



المنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم



# كتاب الفيزياء الجامعي

## المجلد 3

المؤلفون الكبار المساهمون :

**سموئيل ج. لينغ،** جامعة ولاية ترومان  
**جيف ساني،** جامعة لويولا ماريمونت  
**الدكتور وليام موبس**

ترجمة

**أ. د. محمد علي سلامة**

المراجعة العلمية

**أ. د. محمد نافع سوقية**

يوليو 2020

أصدرته إدارة العلوم والبحث العلمي  
تمت الترجمة في المركز العربي للتعريب والترجمة والتأليف والنشر



المنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم

# كتاب الفيزياء الجامعي

## المجلد 3

المؤلفون الكبار المساهمون:

SAMUEL J. LING, TRUMAN STATE UNIVERSITY

سموئيل ج. لينغ، جامعة ولاية ترومان

JEFF SANNY, LOYOLA MARYMOUNT UNIVERSITY

جيف سانّي، جامعة لويولا ماريمون

WILLIAM MOEBS, PHD

وليام موبس، دكتوراه

ترجمة

أ. د. محمد علي سلامة

المراجعة العلمية

أ. د. محمد نافع سوقية



**يوليو 2020**

أصدرته إدارة العلوم والبحث العلمي

تمت الترجمة من قبل المركز العربي للتعريب والترجمة والتأليف والنشر

سموئيل ج. لينغ، جيف سائي، وليام موبس،  
كتاب الفيزياء الجامعي - المجلد 3 / سموئيل ج. لينغ، جيف سائي، وليام موبس، ترجمة المنظمة العربية  
للتربية والثقافة والعلوم، المركز العربي للتعريب والترجمة والتأليف والنشر - تونس: المنظمة العربية للتربية والثقافة  
والعلوم، إدارة العلوم والبحث العلمي، 2020 - 678 ص.  
العنوان الأصلي: **University Physics - Volume 3**  
**ISBN: 978-9973-15-414-9**

## OpenStax

البرنامج التعليمي المفتوح

Rice University 6100 Main Street MS-375

جامعة رايس 6100 الشارع الرئيس MS-375

Houston, Texas 77005

هيوستن، تكساس 77005

لمعرفة المزيد عن البرنامج التعليمي المفتوح OpenStax، تفضل بزيارة الموقع <https://openstax.org>.

يمكن شراء النسخ المطبوعة الفردية والطلبات بالجملة من خلال موقعنا.

© جامعة رايس 2018. محتوى الكتب الجامعية، الذي يُنتجه البرنامج التعليمي المفتوح OpenStax، جرى ترخيص هذا المحتوى

بموجب الترخيص Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0). وبموجب هذا الترخيص، يجب

على أي مستخدم لهذا الكتاب الجامعي أو محتوياته تقديم الإسناد المناسب على النحو التالي:

- إذا قمت بإعادة توزيع هذا الكتاب الجامعي بتنسيق رقمي (بما في ذلك على سبيل المثال لا الحصر PDF و HTML)، عليك

أن تحتفظ في كل صفحة بالإسناد التالي:

"التنزيل مجاني من الموقع <https://openstax.org/details/books/university-physics-volume-3>."

- إذا قمت بإعادة توزيع هذا الكتاب الجامعي بتنسيق طباعي، فعليك تضمين الإسناد التالي في كل صفحة مطبوعة: "التنزيل

مجاني من الموقع <https://openstax.org/details/books/university-physics-volume-3>."

- إذا قمت بإعادة توزيع جزء من هذا الكتاب، فعليك أن تحتفظ في كل صفحة مطبوعة بتنسيق رقمي (بما في ذلك على سبيل

المثال لا الحصر PDF و HTML) وفي كل صفحة مطبوعة فعلية، الإسناد التالي:

"التنزيل مجاني من الموقع <https://openstax.org/details/books/university-physics-volume-3>."

- إذا كنت تستخدم هذا الكتاب الجامعي كمرجع ببيوغرافي (أي ضمن فهرس المراجع)، يرجى تضمين الموقع

<https://openstax.org/details/books/university-physics-volume-3> في الاقتباس الخاص بك.

إذا وُجد لديك أسئلة تتعلق بهذا الترخيص، يرجى الاتصال على البريد الإلكتروني: [support@openstax.org](mailto:support@openstax.org).

## العلامات التجارية

إن كلاً من اسم OpenStax وشعار OpenStax وأغلفة كتب OpenStax واسم OpenStax CNX وشعار OpenStax CNX واسم

OpenStax Tutor وشعار OpenStax Tutor واسم Connexions وشعار Connexions واسم Rice University وشعار Rice

University، جميعها لا تخضع للترخيص ولا يجوز لك استنساخها دون موافقة خطية مسبقة وصریحة من جامعة رايس Rice

.University

PRINT BOOK ISBN-10	1-938168-18-6
PRINT BOOK ISBN-13	978-1-938168-18-5
PDF VERSION ISBN-10	1-947172-22-0
PDF VERSION ISBN-13	978-1-947172-22-7
ENHANCED TEXTBOOK ISBN-10	1-947172-22-0
ENHANCED TEXTBOOK ISBN-13	978-1-947172-22-7
Revision Number	UP3-2016-002(05/18)-MJ
Original Publication Year	2016

## البرنامج التعليمي المفتوح OPENSTAX

يوفر البرنامج التعليمي المفتوح OpenStax كتباً جامعية مجانية ومراجعتها من قبل الأقران ومُرخصة بشكل صريح لكلٍ من الكلية التمهيديّة والدورات التدريبية المتقدمة® وبرامج تعليمية متخصصة منخفضة التكلفة تساعد الطلاب على التعلم. وهي عبارة عن مبادرة تقنية غير ربحية مقرها في جامعة رايس، ونحن ملتزمون بمساعدة الطلاب للوصول إلى الأدوات التي يحتاجونها لإكمال دوراتهم وتحقيق أهدافهم التعليمية.

## جامعة رايس RICE UNIVERSITY

يُعدُّ كلٌّ من OpenStax و OpenStax CNX و OpenStax Tutor من مبادرات جامعة رايس. ولما كانت هذه الجامعة هي جامعة بحثية رائدة ذات التزام متميز بالتعليم الجامعي، فإنها تطمح لتحقيق البحث الرائد في كلِّ من مجال التدريس والتدريس غير المسبوق والمساهمات في تحسين عالمنا. وتسعى الجامعة لتحقيق هذه المهمة من خلال تنمية مجتمع متنوع من التعلم والاكتشاف، والقادر على إنتاج قادة عبر مجموعة من الجهود الإنسانية.



## دعم المؤسسة

إن مؤسسة OpenStax ممتنة للدعم الهائل المقدم من الراعين لها. فدون مشاركتهم القوية، سيبقى هدف الوصول المجاني إلى الكتب الجامعية عالية الجودة مجرد حلم.

تسعى مؤسسة لورا وجون أرنولد (LJAF) بفاعلية إلى فرص للاستثمار في المنظمات وقادة الفكر، الذين لديهم اهتمام صادق في تنفيذ التغييرات الأساسية، التي لا تحقق مكاسب فورية فحسب، ولكنها تحقق إصلاح الأنظمة المعطلة للأجيال القادمة أيضاً. وتتركز LJAF حالياً استثماراتها الإستراتيجية على التعليم والعدالة الجنائية وسلامة البحوث والمساءلة العامة.



تقدم مؤسسة ويليام وفلورا هيوليت William and Flora Hewlett Foundation منحاً منذ عام 1967 للمساعدة في حل المشاكل الاجتماعية والبيئية في الداخل وحول العالم. وتتركز المؤسسة مواردها على الأنشطة في التعليم والبيئة والتنمية والسكان على مستوى العالم وفنون الأداء والعمل الخيري، وتقدم منحاً لدعم المجتمعات المحرومة في منطقة خليج سان فرانسيسكو.



كان كالفين ك. كازانجيان Calvin K. Kazanjian مؤسس مؤسسة بيتر بول Peter Paul (Almond Joy) ورئيسها، كان يعتقد اعتقاداً راسخاً أنه كلما زاد فهم الناس للاقتصاد الأساسي، كانوا أكثر سعادةً وازدهاراً. ووفقاً لذلك، أقام مؤسسة Calvin K. Kazanjian Economics Foundation Inc في عام 1949 كمؤسسة تعليمية غير سياسية لدعم الجهود التي عززت الفهم الاقتصادي.



استرشاداً بالاعتقاد الذي يكمن في أن كل حياة تتمتع بقيمة مكافئة لها، تعمل مؤسسة بيل وميليندا غيتس Bill & Melinda Gates Foundation لمساعدة جميع الأشخاص على أن يعيشوا حياة صحية ومنتجة. تركز هذه المؤسسة في البلدان النامية على تحسين صحة الناس باللقاحات وغيرها من الأدوات المنقذة للحياة ومنحهم الفرصة لانتشال أنفسهم من الجوع والفقير المدقع. أما في الولايات المتحدة، فتسعى هذه المؤسسة إلى تحسين التعليم بشكلٍ كبيرٍ، بحيث تُتاح لجميع الشباب الفرصة للوصول إلى إمكاناتهم



الكاملة. ويقع مقرها في سياتل في واشنطن، ويرأس المؤسسة الرئيس التنفيذي جيف رايكس والرئيس المشارك وليام هـ. غيتس الأب تحت إشراف بيل وميليندا غيتس ووارن بافيت Bill and Melinda Gates .and Warren Buffett

تدعم مؤسسة ماكس فيلد Maxfield Foundation المشاريع ذات التأثير الكبير في العلوم والتعليم والاستدامة وغيرها من المجالات ذات الأهمية الاجتماعية.



تتمثل مهمتنا في مؤسسة Michelson 20MM في زيادة الوصول والنجاح من خلال إزالة العقبات غير الضرورية التي تواجه القدرة على تحمل التكاليف. نحن ندعم إنشاء ومشاركة وانتشار محتوى تعليمي أكثر فاعلية وبأسعار معقولة من خلال الاستفادة من التقانات الإئتلافية والموارد التعليمية المفتوحة ونماذج جديدة للتعاون بين الجهات، التي لا تبغي الربح، ومثيلتها غير الربحية والهيئات العامة.



يدعم صندوق Bill and Stephanie Sick المشاريع المبتكرة في مجالات التعليم والفنون والعلوم والهندسة.



## شكر وتقدير

تتقدم المنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم إلى المركز العربي للتعريب والترجمة والتأليف والنشر (دمشق) بخالص التقدير والشكر على ترجمة الكتاب الصادر عن جامعة رايس عام 2018، محتوى الكتب الجامعية، الذي يُنتجه البرنامج التعليمي المفتوح OpenStax، الولايات المتحدة الأمريكية، تحت عنوان: **University Physics Volume 3**، والشكر موصول إلى كافة فريق العمل الذي أشرف على الترجمة والتدقيق اللغوي والعلمي للمادة وعلى تعاونهم الجدي في إنجاز هذا العمل المتميز.

والمنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم إذ تقوم بنشر وتوزيع النسخة العربية من هذا الكتاب القيم لإثراء المكتبات والتشجيع من خلالها على تدريس ودراسة العلوم باللغة العربية، فإنها تلتزم بتوزيعها مجاناً وبعدم استغلالها لأغراض تجارية.

لمن يرغب من القراء في الاطلاع على النسخة الأصلية باللغة الإنجليزية استخدام الرابط التالي:

<https://openstax.org/details/books/university-physics-volume-3>

ويمكن للراغبين التواصل مع المنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم عبر البيانات التالية:

الهاتف: +216 70 013 900 / الفاكس: +2016 71 948 668

البريد الإلكتروني: [alecso@alecso.org.tn](mailto:alecso@alecso.org.tn)

العنوان البريدي: شارع محمد علي عقيد - المركز العمراني الشمالي - ص.ب.1120، حي الخضراء - 1003

- تونس، الجمهورية التونسية

## تصدير

تعاني المكتبة العربية عموماً من شحّ في المقررات التدريسية في المجالات العلمية والتكنولوجية، وفي الكتب العلمية المتخصصة، وخاصة الموجهة للطلاب والباحثين والمتعلقة بالموارد التعليمية المفتوحة المصدر، ولذلك تسعى المنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم إلى المساهمة في إثراء المكتبات العربية بأهم وأبرز المؤلفات والمقررات التدريسية في مجالات التربية والثقافة والعلوم إيماناً منها بالدور التنموي الذي تلعبه اللغات من خلال تعليم العلوم باللغة الأم لما لها من دور فعّال في تعزيز وتسريع وتيرة نقل وتوطين المعرفة والعلوم والتكنولوجيا.

ولا شك في أن تحصيل العلوم باللغة الوطنية يحقق الفائدة المرجوة أكثر من تحصيلها بلغة أخرى على اعتبار أن اللغة ليست لغة تفاهم واتصال فحسب، بل هي منظومة فكرية حاملة للأفكار ووعاء للمعرفة، وهي الدرب الذي يؤدي إلى الإبداع والابتكار والإنتاج المعرفي في مختلف المجالات.

وتكمن أهمية كتاب "الفيزياء الجامعي - مجلد 3"، الصادر عن جامعة راييس عام 2018، والذي أنتجه البرنامج التعليمي المفتوح OpenStax، في إتاحتها لمورد تعليمي حديث من شأنه أن يجعل مادة الفيزياء مثيرة للاهتمام ومتاحة للطلاب، كما يحتوي على مادة علمية قيّمة، بجانبها النظري والتطبيقي، تم تصميمها اعتماداً على تجارب الطلاب السابقة واستئناساً بتجارب العلماء والباحثين من أهل الاختصاص.

ويسعد المنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم أن تضع بين أيدي قرائها من طلاب وباحثين عرب هذا الكتاب باللغة العربية في نسختين ورقية وإلكترونية لتعم الفائدة مما يكتنزه من مفاهيم هامة وتطبيقات وأساليب حديثة تم إثراؤها بعدد الملاحظات والتجارب التي تضع المادة في سياق الخبرة الفيزيائية.

والله ولي التوفيق،،،

الأستاذ الدكتور محمد ولد أعمر

المدير العام



## تقديم

إن كتاب "الفيزياء الجامعي - المجلد 3" الصادر عن جامعة ريس عام 2018 جاء لتمكين الطلاب من الوصول إلى مواد تعليمية عالية الجودة مع المحافظة على أعلى معايير الصرامة الأكاديمية، ويوفر فرصة مهمة لتعلم المفاهيم الأساسية للفيزياء وفهم كيفية تطبيق هذه المفاهيم في حياتهم والعالم من حولهم، كما جرى تصميم هذا الكتاب العلمي لتوفير تطور منطقي من المفاهيم الأساسية إلى المفاهيم الأكثر تقدماً وتطوراً مع التأكيد على الترابط بين المواضيع من جهة وبين النظري والتطبيقي من جهة أخرى مع الأخذ بملاحظات ذوي الخبرة العلمية والتربوية في هذا المجال.

وتقدم إدارة العلوم والبحث العلمي بالمنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم هذا الكتاب العلمي القيم باللغة العربية مواصلة لمساعيها التي تهدف إلى المساهمة في حركة نقل العلوم والمعرفة من مقررات تدريسية وبرامج ومحتويات تعليمية ذات صبغة علمية وتكنولوجية وتعريبها وإتاحتها للطلاب والباحثين العرب للاستفادة من تجارب الشعوب والدول المتقدمة في مجالات التعليم والبحث العلمي.

يحتوي هذا الكتاب على وحدتين رئيسيتين تناقش الأولى موضوع "البصريات" في أربعة فصول وهي "طبيعة الضوء"، و"البصريات الهندسية وتشكل الخيال"، و"التداخل"، و"الحيود" (الانعراج)، وتناقش الوحدة الثانية موضوع "الفيزياء الحديثة" وقد تم ترتيب محتواها في سبعة فصول ناقشت "النسبية"، و"الفوتونات والأمواج"، و"ميكانيك الكم"، و"التركيب الذري"، و"فيزياء المواد المكثفة" (الصلبة)، و"الفيزياء النووية"، و"فيزياء الجسيمات وعلم الكونيات".

والله ولي التوفيق،،،

المهندس خلف العقلة

القائم بأعمال إدارة العلوم والبحث العلمي

## الفهرس

12	.....مقدمة
	الوحدة الأولى: البصريات
20	.....الفصل الأول: طبيعة الضوء
21	.....1.1 انتشار الضوء
26	.....2.1 قانون الانعكاس
30	.....3.1 الانكسار
33	.....4.1 الانعكاس الداخلي الكلي
39	.....5.1 التشتت (التبدد)
44	.....6.1 مبدأ هيغنز
49	.....7.1 الاستقطاب
72	.....الفصل الثاني: البصريات الهندسية وتَشكُّل الخيال
73	.....1.2 الأحيلة المُشكَّلة بالمرآيا المستوية
76	.....2.2 المرآيا الكروية
88	.....3.2 الأحيلة المُشكَّلة بالانكسار
92	.....4.2 العدسات الرقيقة
105	.....5.2 العين
112	.....6.2 الكاميرا
114	.....7.2 المُكَبِّر البسيط
118	.....8.2 المجاهر والتلسكوبات
144	.....الفصل الثالث: التداخل
144	.....1.3 التداخل مزدوج الشق (تداخل شقي يونغ Young)
148	.....2.3 رياضيات التداخل
152	.....3.3 التداخل متعدد الشقوق
153	.....4.3 التداخل في الأفلام الرقيقة
160	.....5.3 مقياس ميكلسون للتداخل
174	.....الفصل الرابع: حيود (انعراج) الضوء
175	.....1.4 الحيود أحادي الشق
179	.....2.4 الشدة في الحيود أحادي الشق
184	.....3.4 الحيود مزدوج الشق
187	.....4.4 شبكة الحيود
192	.....5.4 الحيود عند الفتحات الدائرية ومقدرة الفصل
199	.....6.4 حيود الأشعة السينية
202	.....7.4 التصوير المُجسَّم (الهولوجرافي)
	الوحدة الثانية: الفيزياء الحديثة
218	.....الفصل الخامس: النسبية

219	..... 1.5 ثبات (صمود) القوانين الفيزيائية.
222	..... 2.5 نسبية التزامن.
225	..... 3.5 تمدد الزمن.
235	..... 4.5 تقلص الطول.
241	..... 5.5 تحويل لورنتز.
252	..... 6.5 التحويل في السرعة النسبية.
257	..... 7.5 تأثير دوبلر للضوء.
260	..... 8.5 العزم النسبي.
262	..... 9.5 الطاقة النسبية.
287	..... <b>الفصل السادس: الفوتونات والأمواج المادية.</b>
288	..... 1.6 إشعاع الجسم الأسود.
297	..... 2.6 المفعول الكهروضوئي.
304	..... 3.6 مفعول كومبتون.
309	..... 4.6 نموذج بور لذرة الهيدروجين.
319	..... 5.6 الأمواج المادية لدي برولي.
327	..... 6.6 الازدواجية "موجة - جسيم".
348	..... <b>الفصل السابع: ميكانيك الكم.</b>
349	..... 1.7 التوابع الموجية.
360	..... 2.7 مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ.
365	..... 3.7 معادلة شرودنجر.
368	..... 4.7 الجسيم الكمومي ضمن صندوق.
375	..... 5.7 الهزاز التوافقي الكمومي.
380	..... 6.7 النفق الكمومي للجزيئات عبر الحواجز الكمونية.
405	..... <b>الفصل الثامن: البنية الذرية.</b>
406	..... 1.8 ذرة الهيدروجين.
415	..... 2.8 العزم ثنائي القطب المغناطيسي الدوراني للإلكترون.
420	..... 3.8 السبين (اللف المغزلي) للإلكترون.
425	..... 4.8 مبدأ الاستبعاد والجدول الدوري.
430	..... 5.8 الأطياف الذرية والأشعة السينية.
443	..... 6.8 الليزر.
457	..... <b>الفصل التاسع: فيزياء المادة المكثفة.</b>
458	..... 1.9 أنواع الروابط الجزيئية.
463	..... 2.9 الطيف الجزيئي.
467	..... 3.9 الروابط في المواد الصلبة البلورية.
474	..... 4.9 نموذج الإلكترون الحر في المعادن.
478	..... 5.9 نظرية العصابات في المواد الصلبة.
482	..... 6.9 أنصاف النواقل والإشابة.

485	7.9 أجهزة أنصاف النواقل.....
491	8.9 الناقلية الفائقة.....
509	<b>الفصل العاشر: الفيزياء النووية.....</b>
510	1.10 خصائص النوى.....
515	2.10 طاقة الترابط النووي.....
518	3.10 التحلل الإشعاعي.....
524	4.10 التفاعلات النووية.....
533	5.10 الانشطار النووي.....
540	6.10 الاندماج النووي.....
545	7.10 التطبيقات الطبية والآثار البيولوجية للإشعاع النووي.....
567	<b>الفصل الحادي عشر: فيزياء الجسيمات وعلم الكونيات.....</b>
568	1.11 مقدمة.....
573	2.11 قوانين مصونية الجسيمات.....
578	3.11 الكواركات.....
582	4.11 مسرعات الجسيمات والكواشف.....
591	5.11 النموذج القياسي.....
597	6.11 الانفجار الكبير.....
602	7.11 تطور الكون المبكر.....
620	<b>الملحق A: الواحدات.....</b>
622	<b>الملحق B: معاملات التحويل.....</b>
627	<b>الملحق C: الثوابت الأساسية.....</b>
630	<b>الملحق D: البيانات الفلكية.....</b>
632	<b>الملحق E: العلاقات الرياضية.....</b>
635	<b>الملحق F: علم الكيمياء.....</b>
636	<b>الملحق G: الأبجدية اليونانية.....</b>
637	<b>أجوبة الأسئلة النظرية والمسائل.....</b>
676	<b>أهم المصطلحات العلمية.....</b>

مرحباً بكم في كتاب الفيزياء الجامعي، أحد كتب OpenStax. كُتِبَ هذا الكتاب الجامعي لزيادة وصول الطلاب إلى مواد تعليمية عالية الجودة، مع الحفاظ على أعلى معايير الصرامة الأكاديمية دون تكلفة تذكر.

### لمحة حول OpenStax

إن OpenStax مؤسسة غير ربحية مقرها في جامعة Rice، ومهمتها تحسين وصول الطلاب إلى التعليم. نشرت أول كتاب جامعي مرخص مفتوح في عام 2012. وجرى توسيع مكتبتها منذ ذلك الحين لأكثر من 25 كتاباً يستخدمها مئات الآلاف من الطلاب في جميع أنحاء العالم. تستخدم الأداة التعليمية المخصصة OpenStax Tutor منخفضة التكلفة، في المقررات التعليمية في جميع أنحاء البلاد. أصبحت مهمة OpenStax ممكنة من خلال الدعم السخي من المؤسسات الخيرية. من خلال هذه المؤسسات، وبمساعدة موارد إضافية منخفضة التكلفة من الشركاء في OpenStax، تمكنت من إزالة الحواجز الأكثر شيوعاً، التي تحول دون التعلم وتمكين الطلاب والمدرسين من النجاح.

### التخصيص (Customization)

جرى ترخيص كتاب الفيزياء الجامعي بموجب الترخيص Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY) مما يعني أنه يمكنك توزيع محتوى هذا الكتاب وتعديله والبناء عليه، ما دمت تقدم الإسناد إلى كلٍ من OpenStax والمساهمين بالمحتوى الخاص به.

ونظراً لأن كتبنا مرخصة بشكل مفتوح، فأنت حر في استخدام الكتاب بأكمله أو اختيار الأقسام الأكثر صلة باحتياجات دورتك التدريسية. فلا تتردد في إعادة مزج المحتوى من خلال تحديد فصول وأقسام معينة للطلاب في منهجك بالترتيب الذي تفضله. يمكنك أيضاً توفير رابط مباشر في منهجك للأقسام الموجودة في عرض الويب لكتابك. يتمتع المدرسون أيضاً بخيار إنشاء نسخة تخصصية من كتاب OpenStax. ويمكن أن تكون هذه النسخة التخصصية للطلاب بصورة مطبوعة أو رقمية منخفضة التكلفة، وذلك من خلال مكتبة الحرم الجامعي الخاصة بهم. تفضل بزيارة صفحة كتابك على OpenStax.org لمزيدٍ من المعلومات.

### الأخطاء المطبعية

تخضع جميع كتب OpenStax الجامعية لمراجعة صارمة. ومع ذلك، مثل أي كتاب جامعي متخصص، قد تحدث أخطاء في بعض الأحيان. ونظراً لأن كتبنا تستند إلى الويب، يمكننا إجراء تحديثات بشكلٍ دوري عندما يكون ذلك ضرورياً من الناحية التربوية. إذا كان لديك أي تصحيح تقترحه، فقم بتقديمه من خلال الرابط في صفحة كتابك على OpenStax.org. يقوم خبراء الموضوع بمراجعة جميع اقتراحات الأخطاء. تلتزم OpenStax بالحفاظ على الشفافية فيما يتعلق بجميع التحديثات، لذلك ستجد أيضاً قائمة بتغييرات الأخطاء السابقة في صفحة كتابك على OpenStax.org.

### التنسيق

يمكنك الوصول إلى هذا الكتاب الجامعي مجاناً في عرض الويب أو نسخة PDF من خلال OpenStax.org، وبتكلفة منخفضة في الطباعة.

## حول كتاب الفيزياء الجامعي

جرى تصميم كتاب الفيزياء الجامعي ليتم تدريسه خلال فصلين دراسيين أو ثلاثة كمقرر للفيزياء. وجرى تطوير النص في هذا الكتاب بهدف تلبية موضوع الفصول الدراسية وتسلسلها وتوفير الأساس للتقدم في الرياضيات والعلوم والهندسة. ويوفر هذا الكتاب فرصة مهمة للطلاب لتعلم المفاهيم الأساسية للفيزياء وفهم كيفية تطبيق هذه المفاهيم في حياتهم والعالم من حولهم. ونظراً للطبيعة الشاملة للكتاب، فإننا نقدم هذا الكتاب في ثلاث مجلدات من أجل المرونة والكفاءة.

## المجالات التي يغطيها هذا الكتاب

يلتزم كتاب الفيزياء الجامعي بتغطية منهاج الفيزياء خلال فصلين دراسيين أو ثلاثة على الصعيد الوطني. لقد عملنا على جعل الفيزياء مثيرة للاهتمام ومتاحة للطلاب مع الحفاظ على الرياضيات الصارمة الكامنة في هذا الموضوع. وانطلاقاً من وضع هذا الهدف في الحسبان، جرى ترتيب محتوى هذا الكتاب الجامعي وتطويره لتوفير تطور منطقي من المفاهيم الأساسية إلى المفاهيم الأكثر تقدماً، وذلك بناءً على معلومات الطلاب المسبقة، والتأكيد على الروابط بين المواضيع وبين النظري والتطبيقات. الهدف من كل قسم هو لتمكين الطلاب ليس فقط من التعرف على المفاهيم، ولكن للعمل معهم بأساليب ستكون مفيدة في المقررات اللاحقة واهتماماتهم في المستقبل. جرى تطوير الميزات التنظيمية والتربوية، وتم الأخذ بملاحظات ذوي الخبرة العلمية والتربوية.

## المجلد الأول

### الوحدة 1: علم الميكانيك

الفصل 1: الواحدات والقياس

الفصل 2: المتجهات

الفصل 3: الحركة وفق خط مستقيم

الفصل 4: الحركة وفق بعدين أو ثلاثة أبعاد

الفصل 5: قوانين نيوتن للحركة

الفصل 6: تطبيقات قوانين نيوتن

الفصل 7: العمل والطاقة الحركية

الفصل 8: الطاقة الكامنة ومصونية الطاقة

الفصل 9: العزم الخطي والتصادم

الفصل 10: دوران المحور الثابت

الفصل 11: العزم الزاوي

الفصل 12: التوازن الساكن والمرونة

الفصل 13: الجاذبية

الفصل 14: ميكانيك السوائل (أو الموائع)

### الوحدة 2: الأمواج والصوتيات

الفصل 15: الاهتزازات

الفصل 16: الأمواج

الفصل 17: الصوت

## المجلد الثاني

### الوحدة 1: الترموديناميك (الديناميك الحراري)

الفصل 1: درجة الحرارة والحرارة

الفصل 2: النظرية الحركية للغازات

الفصل 3: القانون الأول للترموديناميك (للديناميك الحراري)

الفصل 4: القانون الثاني للترموديناميك (للديناميك الحراري)

### الوحدة 2: الكهرباء والمغناطيسية

الفصل 5: الشحنات الكهربائية والحقول

الفصل 6: قانون غاوس

الفصل 7: الكُمون الكهربائي

الفصل 8: المكثفات

الفصل 9: التيار والمقاومة

الفصل 10: دوائر التيار المستمر

الفصل 11: القوى المغناطيسية والحقول

الفصل 12: مصادر الحقول المغناطيسية

الفصل 13: التحريض الكهرطيسي

الفصل 14: التحريض

الفصل 15: دوائر التيار المتناوب

الفصل 16: الأمواج الكهرطيسية

## المجلد الثالث

### الوحدة 1: البصريات

الفصل 1: طبيعة الضوء

الفصل 2: البصريات الهندسية وتَشكُّل الخيال

الفصل 3: التداخل

الفصل 4: الحيود (الانعراج)

### الوحدة 2: الفيزياء الحديثة

الفصل 5: النسبية

الفصل 6: الفوتونات والأمواج

الفصل 7: ميكانيك الكم

الفصل 8: التركيب الذري

الفصل 9: فيزياء المواد المكثفة (الصلبة)

الفصل 10: الفيزياء النووية

الفصل 11: فيزياء الجسيمات وعلم الكونيات

## الأساس التربوي

ستجد في جميع فصول كتاب الفيزياء الجامعي استنتاجات من المفاهيم، التي تعرض أفكاراً وتقنيات كلاسيكية، إضافةً إلى التطبيقات والأساليب الحديثة. تبدأ معظم فصول الكتاب بالملاحظات أو التجارب، التي تضع المادة في سياق الخبرة الفيزيائية. تعتمد العروض التقديمية والتفسيرات على سنواتٍ من الخبرة التدريسية لأساتذة الفيزياء خلال فترة زمنية طويلة، وسعيهم لتحقيق توازن بين الوضوح والدقة، التي أثبتت نجاحها مع طلابهم. يُمكن الترابط في جميع أجزاء الكتاب الطلاب من مراجعة المادة السابقة، ثم العودة إلى المناقشة الجارية (الحالية)، مما يعزز التواصل بين المواضيع. تجري مناقشة الأشكال والتجارب التاريخية الرئيسة في النص الرئيس (وليس في مربعات أو أشرطة جانبية)، مع التركيز على تطوير الحدس الفيزيائي. يتم تسليط الضوء على كلٍ من الأفكار الرئيسة والتعاريف والمعادلات في النص، حيث يتم إدراجها على شكل ملخص في نهاية كل فصل. تتضمن الأمثلة والصور الافتتاحية للفصل التطبيقات المعاصرة من الحياة اليومية أو العلوم والهندسة الحديثة، التي يمكن للطلاب الاتصال بها، وذلك عبر الهواتف الذكية إلى الإنترنت... وإلى أجهزة GPS.

## التقويمات التي تعزز المفاهيم الأساسية

تتبع الأمثلة في أي فصل بشكلٍ عام إجراء تنسيق لثلاثة أجزاء، هي: خطة الحل والحل وملاحظة، وذلك بغية التأكيد على كيفية التعامل مع المسألة، وكيفية التعامل مع المعادلات، وكيفية التحقق من النتيجة وتعميمها. وغالباً ما تكون الأمثلة متنوعة بتحقيق من فهمك للأسئلة والأجوبة، وذلك بهدف مساعدة الطلاب في تعزيز الأفكار المهمة لهذه الأمثلة. وتُمكن خطط حل المسائل في كل فصل من تفصيل طرائق التعامل مع أنواع مختلفة من المسائل في خطوات يمكن للطلاب إتباعها للحصول على الإرشادات. ويشتمل الكتاب أيضاً على تمارين في نهاية كل فصل حتى يتمكن الطلاب من ممارسة ما تعلموه.

**أسئلة نظرية:** لا تتطلب هذه الأسئلة إجراء حسابات، ولكنها تكمن في اختبار تعلم الطالب للمفاهيم الأساسية.

**مسائل:** جرى تصنيفها وفقاً لمهارات اختبار حل المسائل لدى الطلاب، والقدرة على تطبيق الأفكار على النواحي العملية. مسائل إضافية وتعني تطبيق المعرفة عبر الفصل، مما يجبر الطلاب على تحديد المفاهيم والمعادلات المناسبة لحل المسائل المعطاة. هناك نتائج غير معقولة لتمرين توجد بشكل عشوائي، تتطلب من الطلاب أن يقوموا بتقويم الإجابة عن مسألة ما وشرح سبب كونها غير معقولة، وما هي الافتراضات المقدمة، والتي قد لا تكون صحيحة.

**مسائل للتحدي:** وتعني امتداد أفكار النص إلى حالات مثيرة للاهتمام، ولكنها صعبة.

تتوافر إجابات التمارين المختارة في مفتاح الأجوبة في نهاية الكتاب.

## موارد إضافية

### موارد الطالب والمدرّب

قمنا بتجميع موارد إضافية لكل من الطلاب والمدرّبين، بما في ذلك دليل الخطوات الأولى وشرائح Power Point والإجابة وإرشادات الحل لكلٍ من المدرّبين والطلاب. تتطلب موارد المدرّب توافر حساب مدرّب يتم التحقق منه، والذي يُمكنك من التقدم بطلب عند تسجيل الدخول أو إنشاء حسابك على OpenStax.org. وتكمن الاستفادة من هذه الموارد في تكملة كتاب OpenStax الخاص بك.

## محاوّر المجتمع

تتعاون OpenStax مع معهد دراسة إدارة المعرفة في التعليم (ISKME) لتزويد Community Hubs on OER Commons - وهي عبارة عن منصة للمدرّبين لمشاركة الموارد التي أنشأها المجتمع، والتي تدعم كتب OpenStax مجاناً. ومن خلال محاوّر المجتمع الخاصة



بنا، يمكن للمدرسين تحميل المواد الخاصة بهم أو تنزيل المصادر لاستخدامها في الدورات التدريبية الخاصة بهم، بما في ذلك المواد الإضافية والمواد التعليمية والوسائط المتعددة ومحتوى الدورة التدريبية ذي الصلة. ونشجع المدرسين على الانضمام إلى محاور الموضوعات الأكثر صلة بالتدريس والبحث الخاص بهم كفرصة لإثراء الدورات الدراسية وللتفاعل مع أعضاء هيئة التدريس الآخرين. للوصول إلى محاور المجتمع، تفضل بزيارة الموقع:

[www.oercommons.org/hubs/OpenStax](https://www.oercommons.org/hubs/OpenStax) (<https://www.oercommons.org/hubs/OpenStax>).

## موارد الشركاء

شركاء OpenStax هم حلفاؤنا في المهمة بغية جعل المواد التعليمية عالية الجودة وسهلة المنال ومتاحة للطلاب والمدرسين في كل مكان، حيث تندمج أجهزتهم بسهولة مع عناوين OpenStax التابعة لنا وتكلفة منخفضة. وللوصول إلى مصادر الشريك للنص الخاص بك، قم بزيارة صفحة كتابك على الموقع [OpenStax.org](https://www.oercommons.org/hubs/OpenStax).

## عن المؤلفين

### كبار المؤلفين المساهمين في تأليف الكتاب

د. صموئيل لينغ (Dr. Samuel Ling)، جامعة ولاية ترومان (Truman State University)

قام الدكتور صموئيل لينغ بتدريس الفيزياء التمهيديّة والمتقدمة لما يزيد على 25 عاماً في جامعة ترومان الحكومية، حيث يعمل حالياً أستاذ الفيزياء ورئيس قسم. الدكتور لينغ حاصل على درجتي دكتوراه من جامعة بوسطن، واحدة في الكيمياء والأخرى في الفيزياء، وكان زميل أبحاث في المعهد الهندي للعلوم في بنغالور، وذلك قبل انضمامه إلى جامعة ترومان.

الدكتور لينغ مؤلف كتاب "المقرر الأول في الاهتزازات والأمواج"، والذي تم نشره من قبل مطبعة جامعة أكسفورد. يتمتع الدكتور لينغ بخبرة كبيرة في البحث في مجال تدريس الفيزياء، ونشر أبحاثاً حول أساليب التعلم التعاوني في تدريس الفيزياء. حصل على لقب الزمالة في جامعة ترومان ومثيله في جامعة جيسون، وذلك تقديراً لأساليب التدريس المبتكرة من قبله. شملت منشورات الدكتور لينغ البحثية كلاً من علم الكونيات وفيزياء الحالة الصلبة والبصريات غير الخطية.

جيف ساني (Jeff Sanny)، جامعة لويولا ماريماونت (Loyola Marymount University) (LMU)

حصل الدكتور جيف ساني على درجة البكالوريوس في الفيزياء من كلية هارفي مود (Harvey Mudd College) في عام 1974 ودرجة الدكتوراه في فيزياء الحالة الصلبة من جامعة كاليفورنيا - لوس أنجلوس (University of California-Los Angeles) عام 1980. وانضم إلى هيئة التدريس بجامعة لويولا ماريماونت في خريف عام 1980. وخلال ذلك، شغل منصب رئيس القسم إضافة إلى عميد مشارك. يتمتع الدكتور ساني بالتدريس التمهيدي في الفيزياء على وجه الخصوص، إضافة إلى أنه شغوف بتزويد الطلاب بتجاربه البحثية، حيث قام بتوجيه نشاط مجموعة بحثية من الطلاب الجامعيين في فيزياء الفضاء لسنوات عديدة.

وليام موييس (William Moebis)، كان فيما مضى في جامعة لويولا ماريماونت

حصل الدكتور ويليام موييس على درجة البكالوريوس والدكتوراه في عامي 1959 و1965 من جامعة ميشيغان (University of Michigan)، ثم انضم إلى كادر هذه الجامعة بصفته باحثاً مشاركاً لمدة عام، إذ واصل بحث الدكتوراه في فيزياء الجسيمات. وفي عام 1966 قُبل في قسم الفيزياء في إنديانا بوردو فورت واين (IPFW)، حيث شغل منصب رئيس قسم من عام 1971 إلى 1979. وفي عام 1979 انتقل إلى جامعة لويولا ماريماونت (LMU)، حيث شغل منصب رئيس قسم الفيزياء من عام 1979 إلى عام 1986. تقاعد من جامعة LMU في عام 2000. وقد نشر أبحاثه في كلٍ من فيزياء الجسيمات والكيمياء الحركية وتقسيم الخلايا والفيزياء الذرية وتدريس الفيزياء.

## المؤلفون المساهمون

- ستيفن دي دروجر (Stephen D. Druger) وأليس كولاكوفسكا (Alice Kolakowska) - من جامعة ممفيس (University of Memphis)
- ديفيد أندرسون (David Anderson) - من كلية ألبيون (Albion College).
- دانيال بومان (Daniel Bowman) - من كلية فيروم (Ferrum College).
- ديدرا ديميري (Dedra Demaree) - من جامعة جورج تاون (Georgetown University).
- إدو. س. جينزبرغ (Edw. S. Ginsberg) - من جامعة ماساتشوستس (University of Massachusetts)
- جوزيف تراوت (Joseph Trout) - من كلية ريتشارد ستوكتون (Richard Stockton College)
- كيفن ويلوك (Kevin Wheelock) - من كلية بيلفيو (Bellevue College)
- ديفيد سميث (David Smith) - من جامعة جزر فيرجن (University of the Virgin Islands)
- تاكاشي ساتو (Takashi Sato) - من جامعة كوانتلين للفنون التطبيقية (Kwantlen Polytechnic University)
- جيرالد فريدمان (Gerald Friedman) - من كلية مجتمع سانتا في (Santa Fe Community College)
- ليف غاسباروف (Lev Gasparov) - من جامعة شمال فلوريدا (University of North Florida)
- لي لاروي (Lee LaRue) - من كلية باريس جونيور (Paris Junior College)
- مارك لاتيري (Mark Lattery) - من جامعة ويسكونسن (University of Wisconsin)
- ريتشارد لودلو (Richard Ludlow) - من كلية دانيال ويبستر (Daniel Webster College)
- باتريك موتل (Patrick Motl) - من جامعة إنديانا كوكومو (Indiana University Kokomo)
- تاو بانج (Tao Pang) - من جامعة نيفادا (University of Nevada) لاس فيغاس (Las Vegas)
- كينيث بودولاك (Kenneth Podolak) - من جامعة بلاتسبورج الحكومية (Plattsburgh State University)

## المراجعون

- أحمد سلامة - معهد روتشستر التقاني - دبي
- جون أيكين - جامعة كولورادو بولدر
- ريمون بينج - كلية مقاطعة تيرانت
- غافن بوكستون - جامعة روبرت موريس
- إريك كريستنسن - كلية ولاية فلوريدا الجنوبية
- كليفتون كلارك - جامعة ولاية فورت هيز
- نيلسون كوتس - أكاديمية كاليفورنيا البحرية
- هيرفي كولين - كلية كابيولاني المجتمعية
- كارل كوفاتو - جامعة ولاية أريزونا
- أليجاندر كوزاني - كلية إمبيريال فالي
- دانييل دالافاف - كلية نيو جيرسي
- نيكولاس دارنتون - معهد جورجيا للتكنولوجيا
- يثان دينولت - جامعة تامبا
- Salameh Ahmad, Rochester Institute of Technology – Dubai
- John Aiken, University of Colorado–Boulder
- Raymond Benge, Terrant County College
- Gavin Buxton, Robert Morris University
- Erik Christensen, South Florida State College
- Clifton Clark, Fort Hays State University
- Nelson Coates, California Maritime Academy
- Herve Collin, Kapi'olani Community College
- Carl Covatto, Arizona State University
- Alejandro Cozzani, Imperial Valley College
- Danielle Dalafave, The College of New Jersey
- Nicholas Darnton, Georgia Institute of Technology
- Ethan Deneault, University of Tampa

Kenneth DeNisco, Harrisburg Area Community College  
Robert Edmonds, Tarrant County College  
William Falls, Erie Community College  
Stanley Forrester, Broward College  
Umesh Garg, University of Notre Dame  
Maurizio Giannotti, Barry University  
Bryan Gibbs, Dallas County Community College  
Lynn Gillette, Pima Community College–West Campus  
Mark Giroux, East Tennessee State University  
Matthew Griffiths, University of New Haven  
Alfonso Hinojosa, University of Texas – Arlington  
Steward Jensen, Alma College  
David Kagan, University of Massachusetts  
Sergei Katsev, University of Minnesota – Duluth  
Jill Leggett, Florida State College – Jacksonville  
Alfredo Louro, University of Calgary  
James Maclaren, Tulane University  
Ponn Maheswaranathan, Winthrop University  
Seth Major, Hamilton College  
Oleg Maksimov, Excelsior College  
Aristides Marcano, Delaware State University  
James McDonald, University of Hartford  
Ralph McGrew, SUNY – Broome Community College  
Paul Miller, West Virginia University  
Tamar More, University of Portland  
Farzaneh Najmabadi, University of Phoenix  
Richard Olenick, The University of Dallas  
Christopher Porter, Ohio State University  
Liza Pujji, Manakau Institute of Technology  
Baishali Ray, Young Harris University  
Andrew Robinson, Carleton University  
Aruvana Roy, Young Harris University  
Gajendra Tulsian, Daytona State College

كينيث دينيسكو - كلية مجتمع هاريسبورغ  
روبرت إدموندز - كلية مقاطعة تارانت  
وليام فولز - كلية مجتمع إيري  
ستانلي فورستر - كلية بروارد  
أومش جارج - جامعة نوتردام  
ماوريتسيو جيانوتي - جامعة باري  
براين جيبس - كلية مجتمع مقاطعة دالاس  
لين جيليت، كلية مجتمع بيما - الحرم الجامعي الغربي  
مارك جيروكس - جامعة ولاية تينيسي الشرقية  
ماثيو جريفيث - جامعة نيو هافن  
ألفونسو هينوخوسا - جامعة تكساس - أرلينغتون  
ستيوارد جينسين - كلية ألما  
ديفيد كاجان - جامعة ماساتشوستس  
سيرجي كاتسيف - جامعة مينيسوتا - دولوث  
جيل ليجيت - كلية ولاية فلوريدا - اكسونفيل  
ألفريدو لورو - جامعة كالجارى  
جيمس ماكلارين - جامعة تولين  
بون ماهيسواراناثان - جامعة وينشروب  
سيث مييجور - كلية هاميلتون  
أوليف ماكسيموف - كلية إكسلسيور  
أريستيدس مارسانو - جامعة ولاية ديلاوير  
جيمس ماكدونالد - جامعة هارتفورد  
رالف ماكجرو - كلية المجتمع بجامعة نيويورك - بروم  
بول ميلر - جامعة فرجينيا الغربية  
تمار مور - جامعة بورتلاند  
فرزانه نجمبادي - جامعة فينيكس  
ريتشارد أولينيك - جامعة دالاس  
كريستوفر بورتر - جامعة ولاية أوهايو  
ليزا بوجي - معهد ماناكو للتكنولوجيا  
بايشالي راي - جامعة يونغ هاريس  
أندرو روبنسون - جامعة كارلتون  
أروفانا روي - جامعة يونغ هاريس  
غاجيندرا تولسيان - كلية ولاية دايتونا

Adria Updike, Roger Williams University

Clark Vangilder, Central Arizona University

Steven Wolf, Texas State University

Alexander Wurm, Western New England University

Lei Zhang, Winston Salem State University

Ulrich Zurcher, Cleveland State University

أدرىا أوبدايك - جامعة روجر ويليامز

كلارك فانجلدر - جامعة أريزونا الوسطى

ستيفن وولف - جامعة ولاية تكساس

ألكسندر وورم - جامعة ويسترن نيو إنجلاند

لي تشانغ - جامعة ولاية وينستون سالم

أولريش زورشر - جامعة ولاية كليفلاند

## الفصل الأول | طبيعة الضوء THE NATURE OF LIGHT



**الشكل 1.1** بسبب الانعكاس الداخلي الكلي، ينعكس خيال السباح تحت الماء إلى داخل الأخير، حيث توجد كاميرا. التمرج الدائري في مركز الصورة موجود بالفعل على سطح الماء. وبسبب زاوية الرؤية لا يحدث الانعكاس الداخلي الكلي في الحافة العلوية من هذا الخيال، وبالتالي يمكننا رؤية الأنشطة على سطح المسبح.  
(الائتمان: تعديل العمل بواسطة "جياهم"/ فليكر) (credit: modification of work by "jayhem"/Flickr)

### مخطط الفصل

- 1.1 انتشار الضوء
- 2.1 قانون الانعكاس
- 3.1 الانكسار
- 4.1 الانعكاس الداخلي الكلي
- 5.1 التشتت (التبدد)
- 6.1 مبدأ هيغنز
- 7.1 الاستقطاب

### مقدمة

يكن بحثنا في الضوء حول سؤالين يتمتعان بأهمية أساسية: (1) ما طبيعة الضوء؟ و (2) كيف يتصرف الضوء في ظل ظروف مختلفة؟ يمكن العثور على إجابات لهذين السؤالين في معادلات ماكسويل (في بحثه في الأمواج الكهرومغناطيسية على الموقع <http://cnx.org/content/m58495/latest/>)، حيث تتنبأ هذه المعادلات بوجود الأمواج الكهرومغناطيسية وسلوكها. وتشمل أمثلة الضوء كلاً من الأمواج الراديوية والأشعة تحت الحمراء والضوء المرئي والإشعاع فوق البنفسجي والأشعة السينية.

ومن المثير للاهتمام أن ليس جميع ظواهر الضوء يمكن تفسيرها من خلال نظرية ماكسويل، إذ أظهرت التجارب، التي أجريت في وقت مبكر من القرن العشرين، أن الضوء يتمتع بخصائص جسيمية أو شبه جسيمية. والفكرة في أن الضوء يمكن أن يعرض كلاً من خصائصه الموجية والجسيمية، والتي تُدعى الازدواجية "موجة - جسيم"، والتي يتم فحصها في كلٍ من الفوتونات والأمواج المادية.

نقوم في هذا الفصل بدراسة الخصائص الأساسية للضوء. أما في الفصول القليلة التالية، فسنقوم بتحري سلوك الضوء عندما يتفاعل مع العناصر البصرية مثل المرايا والعدسات والفتحات.

## 1.1 | انتشار الضوء The Propagation of Light

### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- تحديد قرينة الانكسار بالنظر إلى سرعة الضوء في الوسط.
- معرفة الطرائق التي ينتقل بها الضوء من مصدره إلى مكان آخر.

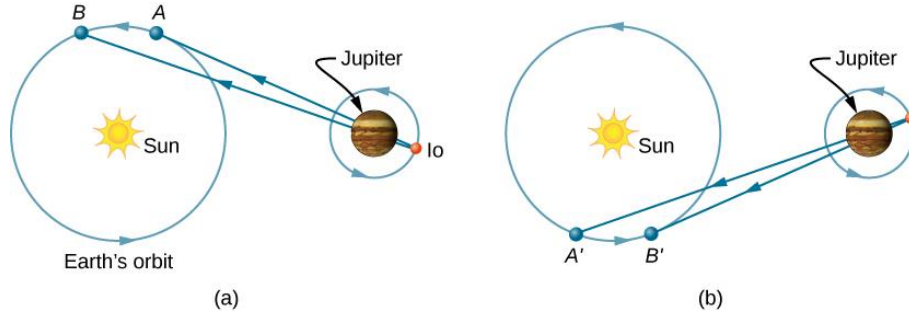
تعد سرعة الضوء في الفراغ  $c$  أحد الثوابت الأساسية للفيزياء. وكما سترى، عندما تصل إلى النظرية النسبية لأينشتاين، أن سرعة الضوء تعدّ مفهوماً مركزياً في هذه النظرية النسبية. ولما كانت دقة قياسات سرعة الضوء قد تحسنت، إذ وُجد أن المراقبين المختلفين، حتى أولئك الذين يتحركون بسرعات عالية فيما بينهم، يعطون القيمة نفسها لسرعة الضوء. ومع ذلك، تختلف سرعة الضوء بطريقة دقيقة مع المواد التي يعبرها الضوء. ولهذا الحقائق آثار بعيدة المدى، كما سنرى في الفصول اللاحقة.

### سرعة الضوء - القياسات المبكرة

تم إجراء أول قياس لسرعة الضوء من قبل عالم الفلك الدنماركي أولي روميرو **Roemer (1644-1710)** في عام 1675، إذ درس مدار القمر **Io**، وهو أحد أقمار كوكب المشتري الأربعة الكبيرة، حيث وجد أن لدى هذا الكوكب فترة دوران تبلغ نحو 42.5 ساعة تقريباً حول كوكب المشتري. واكتشف أيضاً أن هذا المقدار من الزمن يتقلب ببضع ثوان، وذلك اعتماداً على موقع الأرض في مدارها حول الشمس. وأدرك روميرو أن هذا التقلب يرجع إلى السرعة المحدودة للضوء، ويمكن استخدامه لتحديد  $c$ .

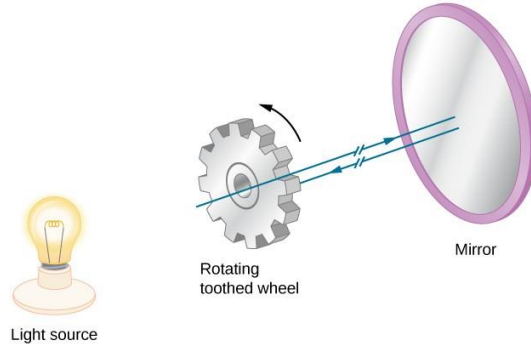
وجد روميرو فترة دوران القمر **Io** عن طريق قياس الفاصل الزمني بين الكسوف المتتالية بواسطة كوكب المشتري. ويوضح **الشكل 2.1 (a)** توضع الكواكب عندما يتم إجراء مثل هذا القياس من الأرض في جزء من مدارها، حيث يتراجع من كوكب المشتري. فعندما تكون الأرض عند النقطة **A**، تكون الأرض والمشتري والقمر التابع له **Io & Jupiter, Earth** بمحاذاة بعضهما البعض (أي على صف واحد)، وفي المرة التالية تحدث هذه المحاذاة عندما تكون الأرض عند النقطة **B**، ويجب أن يسافر الضوء، الذي يحمل تلك المعلومات إلى الأرض، إلى تلك النقطة. ولما كانت النقطة **B** أبعد من مثيلتها **A** عن كوكب المشتري، يستغرق الضوء وقتاً أطول للوصول إلى الأرض عندما تكون الأرض في النقطة **B**. تخيل أنه بعد نحو 6 أشهر، والكواكب متوضعة كما في الجزء **(b) من هذا الشكل**. يبدأ قياس فترة دوران القمر **Io** مع الأرض عند النقطة **A'**، ويُكوّن القمر **Io** كسوفاً لكوكب المشتري. ويحدث الكسوف التالي عندما تكون الأرض عند النقطة **B'**، والتي يسافر إليها الضوء الحامل لمعلومات عن هذه الكسوف. ونظراً لأن النقطة **B'** أقرب إلى كوكب المشتري من مثيلتها **A'**، فإن الضوء يستغرق وقتاً أقل للوصول إلى الأرض عندما تكون الأخيرة في النقطة **B'**. وهذا الفاصل الزمني بين الكسوف المتتالية للقمر **Io**، والذي يظهر عند النقطتين **A'** و **B'**، يكون أقل من مثيله بين الكسوف المرئية عند النقطتين **A** و **B**. ومن خلال قياس الفارق في هذه الفواصل الزمنية والمعرفة المناسبة

للمسافة بين كوكب المشتري والأرض، قام رومر بحساب سرعة الضوء، حيث بلغت  $2.0 \times 10^8$  m/s، وهي أقل بنسبة 33 % من القيمة المعتمدة اليوم.



**الشكل 2.1** طريقة العالم رومر الفلكية لتحديد سرعة الضوء، حيث جرت قياسات دورة القمر Io مع اختلاف ترتيب الأجزاء (a) و (b)، ذلك لأن كلاً من طول مسار الضوء، وزمن الانتقال المرتبط به، يزدادان من A إلى (a)، بينما يتناقصان من A' إلى (b) B.

تم إجراء أول قياس أرضي ناجح لسرعة الضوء من قبل العالم أرماند فيزوا (Armand Fizeau) (1819–1896)، وذلك في عام 1849، حيث وضع عجلة مسننة يمكن تدويرها بسرعة عالية على قمة إحدى التلال ومرآة على قمة تلة ثانية على بعد 8 km (الشكل 3.1). ووضعت مصدر إضاءة مكثف خلف العجلة، بحيث عندما تدور العجلة، تقوم بتجزئة الشعاع الضوئي إلى سلسلة من النبضات. بعد ذلك جرى ضبط سرعة العجلة حتى لا يعود الضوء إلى المراقب الموجود خلف العجلة. وهذا يمكن أن يحصل فقط إذا كانت العجلة تدور بزواوية تتوافق مع إزاحة أسنان العجلة بمقدار  $(n + 1/2)$  من عدد الأسنان، بينما تنتقل النبضات إلى المرآة ذهاباً وإياباً. ومن خلال معرفة كل من السرعة الدورانية للعجلة وعدد أسنانها والمسافة إلى المرآة، استطاع أرماند فيزوا أن يحدد سرعة الضوء لتكون  $3.15 \times 10^8$  m/s، وهذه السرعة تزيد بمقدار 5 % فقط عن السرعة المحددة حالياً.



**الشكل 3.1:** طريقة أرماند فيزوا لقياس سرعة الضوء، حيث تحجز أسنان العجلة الضوء المنعكس عندما يتم تدوير العجلة بمعدل يتطابق مع زمن انتقال الضوء إلى المرآة ذهاباً وإياباً.

قام الفيزيائي الفرنسي جان برنارد ليون فوكو (Jean Bernard Léon Foucault) (1819-1868) بتعديل جهاز فيزوا بواسطة استبدال عجلة مسننة بمرآة دوارة. وفي عام 1862، قاس سرعة الضوء وكانت  $2.98 \times 10^8$  m/s، وتختلف هذه القيمة بمقدار 0.6% فقط عن القيمة المقبولة حالياً. واستخدم ألبرت ميشيلسون (Albert Michelson) (1852-1931) أيضاً طريقة ليون فوكو في عدة مناسبات لقياس سرعة الضوء. أجرى أولى تجاربه في عام 1878؛ وفي عام 1926، كان قد صقل تقنية القياس هذه بشكل جيد، ووجد أن سرعة الضوء تساوي  $2.99796 \times 10^8$  m/s.

أما اليوم، فسرعة الضوء معروفة بدقة كبيرة. وفي الحقيقة، فإن سرعة الضوء  $c$  في الفراغ مهمة للغاية، وتُعدُّ واحدة من القيم (أو المقادير) الفيزيائية الأساسية وتساوي:

$$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s} \approx 3.00 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (1.1)$$

حيث يتم استخدام القيمة التقريبية  $3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$  عندما تكون الدقة المكونة من ثلاثة أرقام كافية.

### سرعة الضوء في المادة

تُعدُّ سرعة الضوء خلال المادة أقل مما هي عليه في الفراغ، ذلك لأن الضوء يتفاعل مع الذرات داخل المادة. وتعتمد سرعة الضوء بشدة على نوع المادة، ذلك لأن تفاعل الضوء يختلف باختلاف ذرات المادة وشبكاتها البلورية وغيرها من البنى الثانوية. ويمكننا تحديد ثابت المادة الذي يصف سرعة الضوء خلالها، وتُسمى قرينة الانكسار  $n$ :

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.2)$$

حيث  $v$  هي سرعة الضوء في المادة.

ونظراً لأن سرعة الضوء خلال المادة تكون دائماً أقل من قيمتها  $c$ ، إذ تعادل سرعة الضوء القيمة  $c$  في الفراغ فقط، فإن قرينة الانكسار تكون دائماً أكبر أو تساوي الواحد؛ أي أن  $n \geq 1$ . ويبين الجدول 1.1 قرائن الانكسار لبعض المواد النموذجية. ولقد تم سرد قيم قرائن الانكسار لطول موجة محدد من الضوء، ذلك لأن هذه القيم تختلف قليلاً فيما بينها باختلاف طول الموجة. ويمكن أن يكون لهذا الاختلاف تأثيرات مهمة، مثله في ذلك مثل الألوان المفصولة بالمشور، كما سنرى في فقرة التشتت من هذا الفصل. لاحظ أنه بالنسبة للغازات، تكون  $n$  قريبة من 1.0. وهذا يبدو معقولاً، نظراً لأن الذرات الموجودة في الغازات منفصل بعضها عن بعض على نطاق واسع، ويتنقل الضوء بسرعهته  $c$  في الفراغ بين الذرات. ومن الشائع أخذ  $n = 1$  للغازات ما لم تكن هناك حاجة إلى دقة كبيرة. وعلى الرغم من أن سرعة الضوء في الأوساط تختلف إلى حد كبير عن قيمتها  $c$  في الفراغ، فإنها لا تزال سرعة كبيرة.

**الجدول 1.1 قرينة الانكسار في أوساط مختلفة للضوء بطول موجة 589 nm في الفراغ.**

القرينة $n$	الوسط
الغازات عند درجة الحرارة $0^\circ\text{C}$ وضغط 1atm.	
1.000293	الهواء
1.00045	أكسيد الكربون
1.000139	الهيدروجين
1.000271	الأكسجين
السوائل عند درجة الحرارة $20^\circ\text{C}$	
1.501	البنزين
1.628	ثاني كبريت الكربون
1.461	رابع كلور الكربون
1.361	الإيثانول
1.473	الجليسرين
1.333	الماء العذب
الأجسام الصلبة عند درجة الحرارة $20^\circ\text{C}$	
2.419	الألماس
1.434	الفلورايت



1.52	الزجاج التاجي
1.66	زجاج الصوان
1.309	الجليد عند درجة الحرارة 0°C
1.49	البوليسترين
1.51	زجاج الوقاية (بلكسي غلاس)
1.544	الكوارتز البلوري
1.458	الكوارتز المنصهر
1.544	كلور الصوديوم
1.923	الزركون

## مثال 1.1

### سرعة الضوء في المجوهرات

احسب سرعة الضوء في الزركون، وهي مادة مستخدمة في المجوهرات لتقليد الألماس (أي للحصول على الألماس التقليدي).

### خطة الحل

يمكننا حساب سرعة الضوء  $v$  في المادة من خلال قرينة الانكسار  $n$  لهذه المادة، وذلك باستخدام المعادلة  $n = c/v$

### الحل


بإعادة ترتيب المعادلة  $n = c/v$  نحصل على:  $v = c/n$ . وتبلغ قرينة الانكسار بالنسبة للزركون المقدار 1.923 كما في الجدول 1.1،

ويتم اعتماد مقدار سرعة الضوء  $c$  من المعادلة 1.1. وبإدخال هذه القيم في المعادلة يعطي:

$$V = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{1.923} = 1.56 \times 10^8 \text{ m/s}$$

### ملاحظة

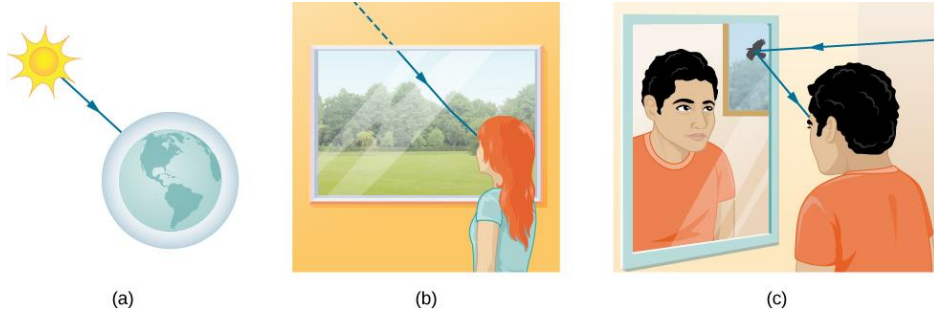
تعد هذه السرعة أكبر قليلاً من نصف سرعة الضوء في الفراغ، ولا تزال هذه القيمة مرتفعة مقارنة بالسرعات التي حصلنا عليها بالتجربة. إن المادة الوحيدة المدرجة في الجدول 1.1، والتي لديها قرينة انكسار أكبر من مثيله للزركون هي الألماس. وسنرى لاحقاً أن قرينة الانكسار الكبيرة للزركون تجعله يتألق أكثر من الزجاج، ولكنه أقل من مثيله للألماس.

 1.1 تحقق من فهمك للجدول 1.1، وذلك من خلال توضيح أنه على الرغم من أن كلاً من الإيثانول والمياه العذبة تتمتع

بقرائن انكسار متشابهة إلى حدٍ كبير، لكنها بأي نسبة تختلف قيم سرعات الضوء فيما بينها في هذه السوائل؟

### النموذج الشعاعي للضوء The Ray Model of Light

لقد قمت بالفعل بدراسة بعض خصائص موجة الضوء في الفصل السابق، وذلك من خلال دراسة الأمواج الكهرومغناطيسية (<http://cnx.org/content/m58495/latest/>). أما في هذا الفصل، فسنبدأ بشكلٍ أساس بدراسة خصائص الأشعة. فهناك ثلاث طرائق يمكن أن ينتقل بها الضوء من مصدره إلى مكانٍ آخر (الشكل 4.1)، إذ يمكن أن يأتي الضوء مباشرةً من المصدر من خلال وسط فارغ، مثلاً من الشمس إلى الأرض. أو يمكن أن ينتقل الضوء عبر أوساط مختلفة، مثل الهواء والزجاج، إلى المراقب. ويمكن أن يصل الضوء أيضاً بعد انعكاسه من المرآة مثلاً. ويمكننا في جميع هذه الحالات نمذجة مسار الضوء كخط مستقيم يُسمى شعاعاً.



**الشكل 4.1:** ثلاث طرائق لانتقال الضوء من مصدره إلى مكانٍ آخر. (a) يصل الضوء إلى الغلاف الجوي العلوي للأرض، منتقلاً عبر وسط فارغ مباشرةً من المصدر. (b) يمكن أن يصل الضوء إلى الشخص بانتقاله عبر أوساط مثل الهواء والزجاج. (c) يمكن أن ينعكس الضوء أيضاً عن جسم مثل المرآة. في الحالات الموضحة هنا، يتفاعل الضوء مع الأشياء الكبيرة بدرجة كافية وكأنه ينتقل وفق خطوط مستقيمة كالأشعة.

تظهر التجارب أنه عندما يتفاعل الضوء مع جسم أكبر عدة مرات من طول الموجة، فإنه ينتقل وفق خطوط مستقيمة، ويتصرف وكأنه شعاع. وتكون خصائص الموجة ليست واضحة في مثل هذه الحالات. ولما كان الطول الموجي للضوء المرئي هو أقل من ميكرون (أي جزء من الألف من المليمتر)، فإنه يتصرف مثل الأشعة في العديد من الحالات الشائعة التي تواجهها أجسام أكبر من الميكرون. فعلى سبيل المثال، عندما يواجه الضوء المرئي أي شيء كبير بما فيه الكفاية، يمكننا أن نلاحظه بالعين المجردة، مثل العملة المعدنية، ويسلك سلوك شعاع، مع تمتعه بخصائص موجية لا تُذكر بشكل عام.

يمكننا في جميع هذه الحالات نمذجة مسار الضوء على شكل خطوط مستقيمة. قد يغير الضوء اتجاهه عندما يواجه أجسام (مثل المرآة) أو عند الانتقال من مادة إلى أخرى (مثلاً الانتقال من الهواء إلى الزجاج)، لكنه يستمر بعد ذلك على شكل خط مستقيم أو شعاع. تأتي كلمة "شعاع" من الرياضيات، وهنا تعني وجود خط مستقيم ينشأ عند نقطة ما. ومن المقبول هنا تصور أشعة الضوء كأشعة الليزر. ويصف نموذج الشعاع مسار الضوء كخطوط مستقيمة.

ونظراً لأن الضوء يتحرك وفق خطوط مستقيمة، ويغير اتجاهاته عندما يتفاعل مع المواد، فإنه يتم وصف مساره من خلال علم الهندسة وعلم المثلثات البسيط. يُسمى هذا الجزء من البصريات، حيث يهيمن الجانب الشعاعي للضوء، بالبصريات الهندسية. ويحكم في هذه الحالة قانونان عن كيفية تغيير الضوء لاتجاهه عندما يتفاعل مع المادة. فهنالكَ قانون الانعكاس للحالات، التي ينعطف الضوء فيها عن المادة، وقانون الانكسار في تلك الحالات التي يمر فيها الضوء خلال المادة. سوف نقوم بإجراء المزيد من الدراسة والفحص لكلٍ من هذين القانونين في الفقرات القادمة من هذا الفصل.

## 2.1 | قانون الانعكاس The Law of Reflection

### الأهداف التعليمية

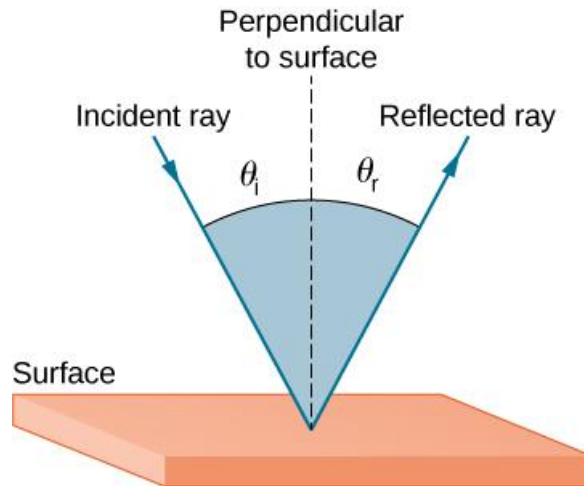
- في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:
- شرح انعكاس الضوء عن الأسطح المصقولة والخشنة.
- وصف مبدأ العواكس الزاوية وتطبيقاتها.

كلما نظرنا إلى المرآة، أو حدّقنا في ضوء الشمس المتلألئ (المتألق) من البحيرة، نشهد انعكاساً للضوء. وعندما تنظر إلى قطعة من الورق الأبيض، تشاهد الضوء يتناثر منها. وتستخدم التلسكوبات الكبيرة ظاهرة الانعكاس للضوء بغية تشكيل أحيلة للنجوم وأجسام فلكية أخرى.

ينص **قانون الانعكاس** على أن زاوية الانعكاس تساوي زاوية الورود (السقوط) للشعاع الضوئي، أو:

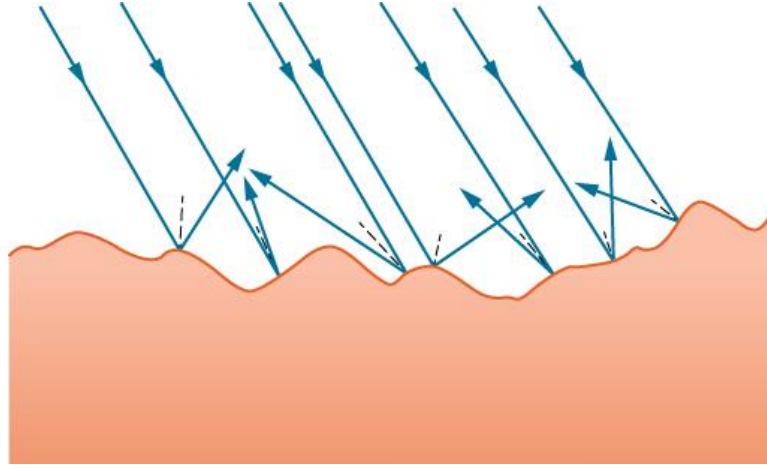
$$1.3 \theta_i = \theta_r$$

ولقد جرى توضيح قانون الانعكاس في **الشكل 5.1**، حيث يوضّح هذا الشكل أيضاً كيف تقاس كلٌّ من زاوية الورود ومثيلتها الانعكاس بالنسبة إلى الناظم على السطح في النقطة التي يصطدم فيها الشعاع الضوئي من هذا السطح.

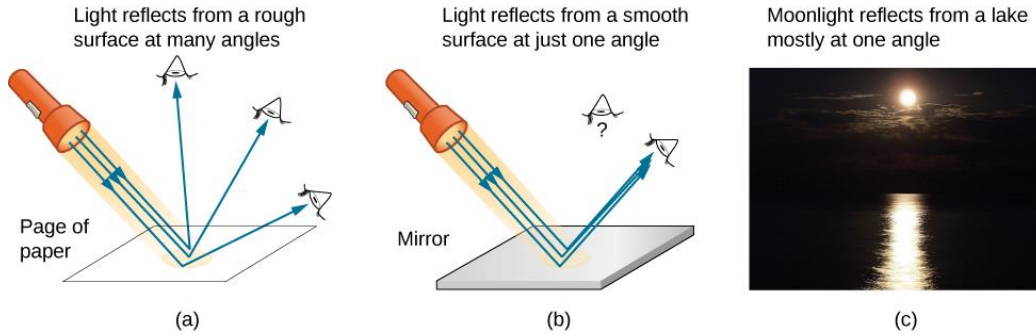


**الشكل 5.1** ينص قانون الانعكاس على أن زاوية الانعكاس تساوي زاوية الورود (السقوط)  $\theta_r = \theta_i$ . وتُقاس هذه الزوايا بالنسبة إلى الناظم على السطح في النقطة التي يرد فيها الشعاع الضوئي إلى هذا السطح.

نتوقع أن نرى انعكاسات عن الأسطح الملساء، ولكن **الشكل 6.1** يوضح كيف يعكس السطح الخشن الضوء. ولما كان الضوء يضرب أجزاءً مختلفة من السطح وبزوايا مختلفة، ويعكس هذا الضوء أو ينتشر في العديد من الاتجاهات المختلفة، فإن انتشار الضوء هو ما يسمح لنا برؤية الورقة من أية زاوية كما هو مبين في **الشكل 7.1 (a)**. إن كلاً من الناس والملابس وأوراق الشجر وجميع الجدران لها أسطح خشنة ويمكن رؤيتها من جميع الجوانب. أما المرآة، فهي من ناحية أخرى تتمتع بسطح أملس (مقارنةً مع الطول الموجي للضوء)، حيث يعكس هذا السطح الضوء في زوايا محددة، كما هو موضح في **الشكل 7.1 (b)**. وأما عندما ينعكس القمر من البحيرة، كما هو مبين في **الشكل 7.1 (c)**، يحدث مزيج من هذه التأثيرات.

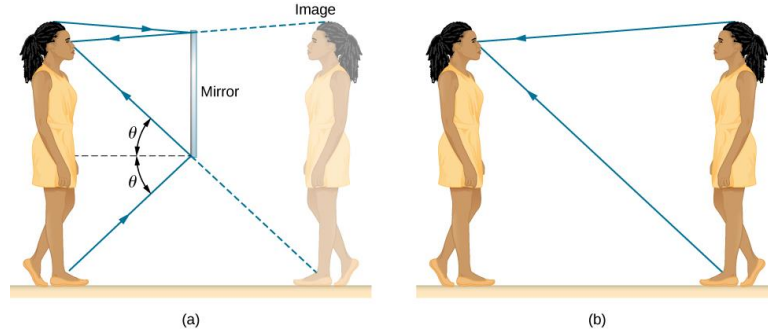


**الشكل 6.1:** ينتشر الضوء عندما ينعكس من سطح خشن. هنا، ترد إلى السطح العديد من الأشعة المتوازية، لكنها تنعكس بزوايا كثيرة مختلفة كون السطح خشناً.



**الشكل 7.1 (a)** عندما تُضاء ورقة بالعديد من الأشعة المتوازية الساقطة عليها، يمكن رؤية هذه الورقة في العديد من الزوايا المختلفة، ذلك لأن سطحها خشن وينتشر الضوء. **(b)** أما عندما تُضاء مرآة بالعديد من الأشعة المتوازية الساقطة عليها، فإن هذه المرآة تعكس الضوء باتجاه واحدٍ فقط، لأن سطحها بالغ النعومة (أملس جداً)، وفي هذه الحالة يستطيع المراقب أن يرى الضوء المنعكس من المرآة فقط ضمن زاوية معينة. **(c)** ينتشر ضوء القمر عندما ينعكس من البحيرة، ذلك لأن سطح البحيرة لامع ولكنه غير مستو. (الائتمان c: تعديل العمل من قبل ديبغو توريس سيلفستر) (credit c: modification of work by Diego Torres Silvestre)

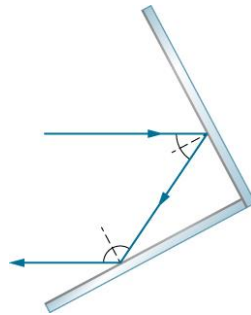
عندما ترى نفسك في المرآة، يبدو لك أن الخيال في الواقع خلف المرآة **(الشكل 8.1)**. نحن نرى الضوء قادماً من اتجاه يحدده قانون الانعكاس، وتكون الزوايا بحيث إن الخيال يتمتع بالضبط بالمسافة نفسها خلف المرآة، بينما أنت تقف أمام هذه المرآة. فإذا كانت المرآة موجودة على جدار الغرفة، فإن الأخيالة الموجودة بما تقع جميعها خلف المرآة، والتي يمكن أن تجعل الغرفة تبدو أكبر. وعلى الرغم من أن هذه الأخيالة بالمرآة تجعل الأشياء تبدو وكأنها لا يمكن أن تكون في مكانها (كأنها خلف جدار صلب)، فإن هذه الأخيالة ليست من نسج خيالك. ويمكن تصوير صور المرآة هذه وتسجيلها بواسطة أدوات فيديو، وتبدو كما هي مع عيوننا (وهي الأدوات البصرية نفسها). والطريقة الدقيقة، التي تتشكل بها الأخيالة من خلال المرايا والعدسات، سوف تُناقش في الفصل القادم في **فقرة البصريات الهندسية وتشكُّل الخيال**.



**الشكل 8.1 (a)** يقع خيالك خلف المرآة. الشعاعان الموضّحان في الشكل هما الشعاعان الساقطان على المرآة بالزوايا الصحيحة، ولينعكسا إلى عيني الشخص. ويظهر الخيال خلف المرآة وبالمسافة نفسها. **(b)** إذا كنت تنظر إلى توأمك مباشرة دون مرآة.

### العواكس الزاوية (العواكس)

إن الشعاع الضوئي، الذي يسقط على جسم مؤلف من سطحين عاكسين متعامدين متبادلين تماماً، ينعكس هذا الشعاع بشكلٍ موازٍ للاتجاه الذي ورد منه **(الشكل 9.1)**. وهذا صحيح عندما تكون الأسطح العاكسة متعامدة ومستقلة عن زاوية الورد. (وللحصول على دليل، أنظر في نهاية الفقرة من هذا الفصل)، إذ يُسمى هذا الجسم **العاكس الزاوي**، حيث يترد الضوء من الزاوية الداخلية. وتعد العواكس الزاوية فئة فرعية من العواكس، والتي تعكس جميعها الأشعة في الاتجاهات نفسها التي وردت منها. وعلى الرغم من أن هندسة الدليل، المشار إليه في نهاية الفقرة، أكثر تعقيداً، إلا إنه يمكن أيضاً إنشاء عواكس زاوية بثلاثة أسطح عاكسة متبادلة، وهذه الأخيرة مفيدة في التطبيقات ثلاثية الأبعاد.



**الشكل 9.1:** شعاع ضوئي يضرب سطحين عاكسين متعامدين، حيث ينعكس هذا الشعاع موازياً للاتجاه الذي ورد منه.

تحتوي العديد من العواكس غير المكلفة، والموجودة على الدراجات والسيارات وإشارات التحذير، عواكس زاوية مصممة لإعادة الضوء في الاتجاه الذي ورد منه. وبدلاً من عكس الضوء البسيط بزوايا عريضة، فإن العاكس الزاوي يضمن ارتداده برؤية عالية إذا كان كلٌّ من المراقب ومصدر الإضاءة موجودين معاً، مثلاً سائق السيارة والمصابيح الأمامية. وضع رواد الفضاء للمركبة أبولو عاكساً زاوياً حقيقياً على سطح القمر **(الشكل 10.1)**، بحيث يمكن لإشارات الليزر الواردة من الأرض أن ترتد من ذلك العاكس الزاوي بهدف قياس المسافة المتزايدة تدريجياً إلى القمر، والتي تقدر ببضعة سنتيمترات في السنة.



**الشكل 10.1 (a)** قام رواد الفضاء بوضع عاكس زاوي على سطح القمر لقياس المسافة المدارية المتزايدة تدريجياً للقمر .  
**(b)** النقاط المضيئة على عواكس أمان الدرجات هي انعكاسات لومضة الكاميرا التي التقطت هذه الصورة في ليلة مظلمة.  
 (الائتمان (a): تعديل العمل من قبل ناسا (NASA)؛ الائتمان (b): تعديل العمل من قبل "جولو" / ويكيبيديا كومنز)  
 (credit a: modification of work by NASA; credit b: modification of work by "Julo"/Wikimedia Commons)

وللعمل على المبدأ نفسه لهذه العواكس الضوئية، تُستخدم العواكس الزاوية بشكل روتيني كعواكس في الرادار **(الشكل 11.1)**، وذلك لتطبيقات الترددات الراديوية. وفي معظم الحالات، فإن القوارب الصغيرة، المصنوعة من الألياف الزجاجية أو الخشب لا تعكس بقوة الأمواج الراديوية المنبعثة من أنظمة الرادار. ولجعل هذه القوارب مرئية للرادار (لتجنب الاصطدام بها، على سبيل المثال)، تُعلق عادةً عواكس الرادار على القوارب في أماكن مرتفعة منها.



**الشكل 11.1** عاكس الرادار، الذي يُرفع على المراكب الشراعية، هو نوع من العواكس الزاوية.  
 (الائتمان: تيم شيرمان - تشيس (credit: Tim Sheerman-Chase)

على سبيل المثال، إذا كنت مهتماً ببناء طائرة غير مرئية، فلا بد من تقليل انعكاسات الرادار عن هذه الطائرة إلى الحد الأدنى لمنع كشفها. وعندها سيكون تجنب وجود زوايا 90 درجة في هيكل الطائرة أحد الاعتبارات التصميمية لهذه الطائرة.

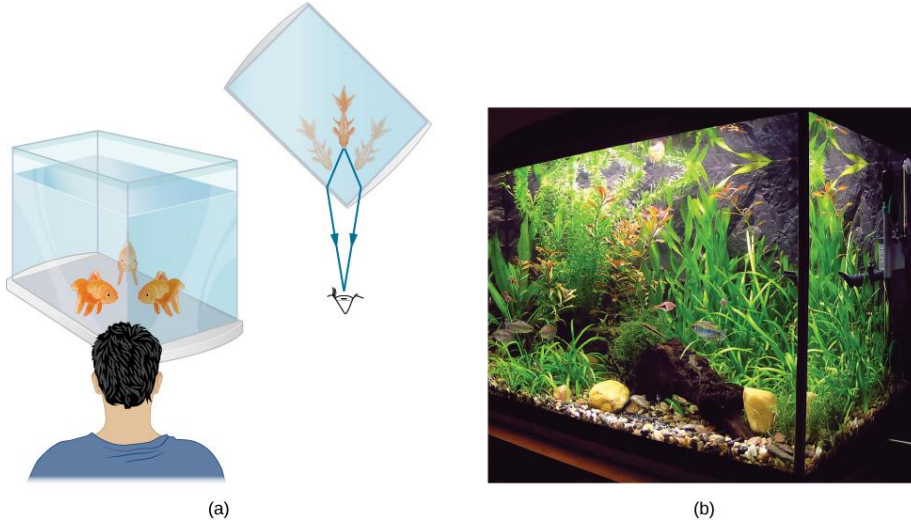
## الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

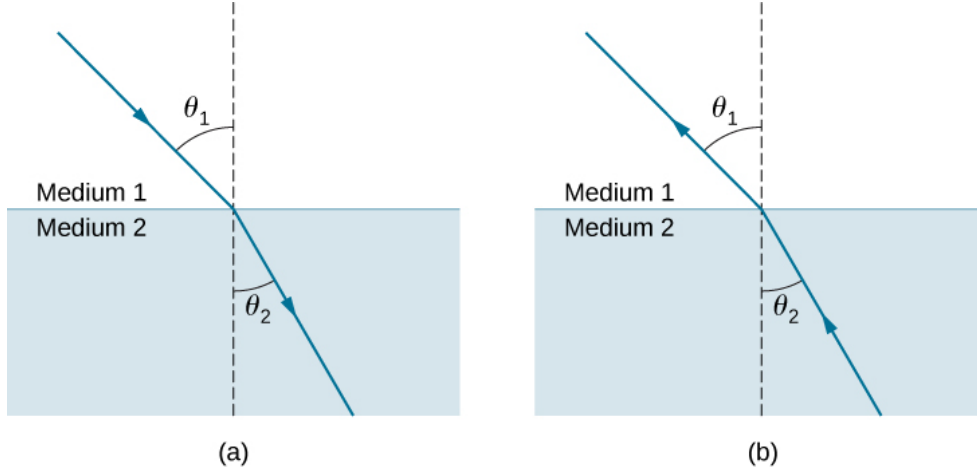
- وصف كيف تُغير الأشعة اتجاهها عند دخول الوسيط.
- تطبيق قانون الانكسار في حل المسائل.

قد تلاحظ غالباً بعض الأشياء الغريبة عند النظر في حوض للأسماك. على سبيل المثال، قد ترى الأسماك نفسها تظهر في مكانين مختلفين (**الشكل 12.1**)، وهذا يحدث لأن الضوء الوارد من الأسماك إليك، يغير اتجاهه عندما يغادر الحزان، وفي هذه الحالة، يمكن أن يسلك طريقين مختلفين للوصول إلى عينيك. إن تغيير اتجاه الشعاع الضوئي (يُطلق عليه الانحناء بشكل فضفاض)، عندما يمر عبر أوساط ذات قرائن انكسار مختلفة يُسمى **الانكسار**، ويرتبط هذا التغير بتغيرات في سرعة الضوء  $v = c/n$ . ويُعد الانكسار المسؤول عن مجموعة هائلة من الظواهر البصرية، بدءاً من عمل العدسات وانتهاءً بنقل البيانات من خلال الألياف البصرية.

يوضح **الشكل 13.1** كيف أن الشعاع الضوئي يغير اتجاهه عندما يمر من وسط إلى آخر. وكما أُشير من قبل، تقاس الزوايا بالنسبة إلى ناظم على السطح عند النقطة التي يعبرها الشعاع الضوئي. (ينعكس بعض الضوء الساقط عن السطح، ولكن في الوقت الحالي نركز على الضوء النافذ). يعتمد التغير في اتجاه الشعاع الضوئي على القيم النسبية لقرائن الانكسار (**فقرة انتشار الضوء**) للوسطين المعنيين. في الحالات الموضحة في الصورة، يتمتع الوسط 2 بقرينة انكسار أكبر من مثيله للوسط 1. لاحظ أنه كما هو موضح في **الشكل 13.1 (a)**، يتحرك اتجاه الشعاع مقترباً من الناظم عندما يتقدم من وسط منخفض قرينة الانكسار إلى آخر مرتفع قرينة الانكسار. وعلى العكس، كما هو مبين في **الشكل 13.1 (b)**، يتحرك اتجاه الشعاع بعيداً عن الناظم عندما يتقدم من وسط مرتفع قرينة الانكسار إلى آخر منخفض قرينة الانكسار. ويكون المسار عكسه تماماً.



**الشكل 12.1 (a)** عند النظر إلى حوض السمك كما هو موضح في الصورة، يمكننا أن نرى الأسماك نفسها في موقعين مختلفين، ذلك لأن الضوء يُغير اتجاهه عندما يعبر من الماء إلى الهواء. وفي هذه الحالة، يمكن أن يصل الضوء إلى المراقب عن طريق مسارين مختلفين، لذلك يبدو السمك في مكانين مختلفين. هذا الانحناء للضوء يُسمى الانكسار، وهو مسؤول عن العديد من الظواهر البصرية. (**b**) تظهر هذه الصورة انكسار الضوء من سمكة بالقرب من أعلى حوض الأسماك.



**الشكل 13.1** يعتمد التغيير في اتجاه الشعاع الضوئي على كيفية تغيير قرينة الانكسار عندما يعبر من وسط إلى آخر. في الحالات الموضحة هنا، قرينة الانكسار أكبر في الوسط 2 من الوسط 1. (a) يقترب الشعاع الضوئي من الناظم عند دخوله لوسط مرتفع قرينة الانكسار. (b) يتحرك الشعاع الضوئي بعيداً عن الناظم عند دخوله وسط منخفض قرينة الانكسار.

يعتمد مقدار تغيير اتجاه الشعاع الضوئي على كلٍ من زاوية وروده ومقدار تغيير سرعته. فبالنسبة لشعاع يرد بزاوية معينة، يؤدي التغيير الكبير في سرعته إلى تغيير كبير في اتجاهه، وبالتالي حدوث تغيير كبير في زاوية انكساره. والعلاقة الرياضية الدقيقة، والتي هي **قانون الانكسار**، أو ما يدعى **قانون سنيل**، تم اكتشافها من قبل عالم الرياضيات الهولندي ويلبرورد سنيل (1591-1626) في عام 1621. ويُعطى قانون الانكسار وفق شكل المعادلة التالية:

$$(4.1) n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2.$$

حيث:  $n_1$  و  $n_2$  هما قرينتا انكسار الوسطين 1 و 2،  $\theta_1$  و  $\theta_2$  هما الزاويتان بين الأشعة والناظم للوسطين 1 و 2. يطلق على الشعاع الوارد اسم الشعاع الساقط، ويُسمى الشعاع الصادر بالشعاع المنكسر، والزوايا المرتبطة بهذه الأشعة هي زاوية الورد وزاوية الانكسار على التوالي.

أظهرت تجارب سنيل توافقها مع قانون الانكسار وأن قرينة الانكسار  $n$  يمكن أن تُنسب لوسط محدد وقيمتها مقاسة. لم يكن سنيل ليدرك أن سرعة الضوء تختلف في الأوساط المختلفة، إذ مفتاح الحل هنا يكمن عندما نستمد قانون الانكسار نظرياً باستخدام مبدأ هيغنز.

## مثال 2.1

### تحديد قرينة الانكسار

أوجد قرينة الانكسار للوسط 2 في **الشكل 13.1 (a)** بفرض أن الوسط 1 هو الهواء وأن زاوية الورد 30.0 درجة وزاوية الانكسار 22.0 درجة.

### خطة الحل

تعد قرينة الانكسار للهواء نحو 1 في معظم الحالات (ويصل إلى أربعة أرقام مهمة، أي 1.000).

وهنا نأخذ  $n_1 = 1.00$  والمعلومات الواردة في المثال:  $\theta_1 = 30.0$  و  $\theta_2 = 22.0$ .

بتوافر هذه المعلومات، يبقى غير معروف فقط في قانون سنيل هو  $n_2$ ، لذلك يمكننا استخدام قانون سنيل لإيجادها.



## الحل

باستخدام قانون سنيل نجد أن:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

ومنه نجد أن:

$$n_2 = n_1 \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}$$

وبإدخال القيم المعروفة لدينا في هذه المعادلة نحصل على:

$$n_2 = 1.00 \frac{\sin 30.0}{\sin 22.0} = \frac{0.500}{0.374} = 1.33$$

## ملاحظة

هذه هي قرينة الانكسار للماء، إذ كان باستطاعة سنيل أن يحدد قيمتها من خلال قياس الزوايا وإجراء الحساب آنف الذكر، ومن ثم أوجد القيمة 1.33 لتكون قرينة الانكسار المناسبة للماء في جميع الحالات الأخرى، مثل انتقال الشعاع الضوئي من الماء إلى الزجاج. واليوم، يمكننا التحقق من أن قرينة الانكسار ترتبط بسرعة الضوء في الوسط من خلال قياس تلك السرعة مباشرةً.



استكشف انحناء الضوء **bending of light** (<https://openstaxcollege.org/l/21bendoflight>) بين وسطين اثنين يتمتعان بقرينتي انكسار مختلفتين. استخدم برنامج المحاكاة "Intro" وشاهد كيف تتغير زاوية انحناء الضوء عند التغيير من الهواء إلى الماء إلى الزجاج. استخدم أداة المنقلة لقياس الزوايا ومعرفة ما إذا كان بإمكانك إعادة تكوين الصورة في **المثال 2.1**. تأكد أيضاً من أن زاوية الانعكاس تساوي زاوية الورود للشعاع.

## مثال 3.1

### أكبر تغيير في الاتجاه

افترض أنه في مثل هذه الحالة المماثلة لتلك في **المثال 2.1**، ينتقل الضوء من الهواء إلى الألماس وأن زاوية الورود 30.0 درجة. أحسب زاوية الانكسار  $\theta_2$  في الألماس.

### خطة الحل

مرة أخرى، لما كانت قرينة الانكسار للهواء هي  $n_1 = 1.00$ ، ولدينا  $\theta_1 = 30.0^\circ$ ، يمكننا البحث عن قيمة قرينة الانكسار للألماس في الجدول 1.1، إذ نجده مساوياً  $n_2 = 2.419$ ، ويبقى المجهول الوحيد في قانون سنيل هو  $\theta_2$ ، الذي نود تحديده.

## الحل

نستخدم قانون سنيل لإيجاد  $\sin \theta_2$  وفقاً للمعادلة التالية:

$$\sin \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1$$

وبإدخال القيم المعروفة في نص المسألة نجد:

$$\sin \theta_2 = \frac{1.00}{2.419} \sin 30.0^\circ = (0.413)(0.500) = 0.207$$

ومنه نجد أن مقدار الزاوية  $\theta_2$  يساوي:

$$\theta_2 = \sin^{-1}(0.207) = 11.9^\circ$$

## ملاحظة

بالنسبة لزاوية الورود 30.0° نفسها، تكون زاوية الانكسار في الألماس أصغر بكثير من الماء (11.9° بدلاً من 22.0°، انظر **المثال 2.1**)، مما يعني أن هناك تغييراً أكبر في اتجاه الشعاع داخل الألماس. والسبب في هذا التغيير الكبير في الاتجاه هو إما التغيير الكبير في قرينة الانكسار (أو السرعة). بشكل عام، كلما كبر التغيير في السرعة، ازداد التأثير على اتجاه الشعاع.

2.1 تحقق من فهمك للجدول 1.1، إن الجسم الصلب المتمتع بأعلى قرينة انكسار يلي الألماس هو الزركون. فإذا تم استبدال الألماس في المثال 3.1 بقطعة من الزركون، فما هي زاوية الانكسار الجديدة في هذه الحالة؟

## 4.1 | الانعكاس الداخلي الكلي Total Internal Reflection

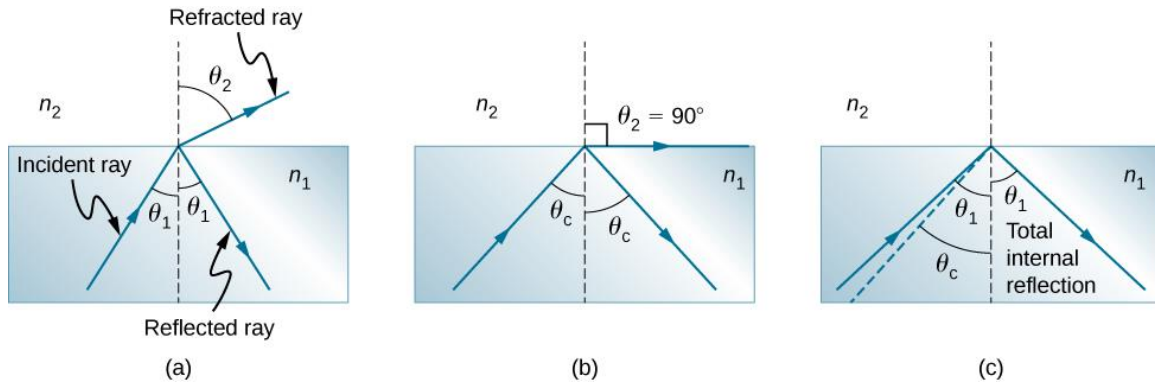
### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- شرح ظاهرة الانعكاس الداخلي الكلي.
- وصف أعمال واستخدامات الألياف البصرية.
- تحليل سبب تألق الألماس.

قد تعكس المرآة ذات النوعية الجيدة أكثر من 90% من الضوء الساقط عليها، وتمتص الباقي. ولكن سيكون من المفيد أن يكون لديك مرآة تعكس كامل الضوء الساقط عليها. ومن المثير للاهتمام، أنه يمكننا أن ننتج انعكاس كلي للضوء من خلال استخدام مظهر من مظاهر الانكسار.

ضع في اعتبارك ما يحدث عندما يصطدم شعاع ضوئي بسطحٍ بين مادتين كما هو موضح في الشكل 14.1 (a)، فإن جزءاً من هذا الضوء يعبر الحد وينكسر، أما الباقي فينعكس. إذاً، وكما هو مبين في هذا الشكل، فإن قرينة الانكسار للوسط الثاني أقل من مثيله للوسط الأول، مما يعني أن الشعاع الضوئي ينحني بعيداً عن الناحية. (ولما كانت  $n_2 < n_1$ ، فإن زاوية الانكسار أكبر من زاوية الورود، أي أن  $\theta_1 < \theta_2$ ). الآن تخيل ما سيحدث عند ازدياد زاوية الورود للشعاع، هذا سوف يسبب ازدياد  $\theta_2$  أيضاً. ويمكن أن تكون أكبر زاوية للانكسار  $\theta_2$  مساويةً  $90^\circ$  كما هو موضح في الجزء (b) من هذا الشكل. وعلى هذا الأساس يتم تعريف الزاوية الحرجة  $\theta_c$  لمجموعة من المواد على أنها زاوية الورود التي تنتج زاوية انكسار مساويةً  $90^\circ$ . وهذا يعني أن  $\theta_c$  هي زاوية الورود عندما  $\theta_2 = 90^\circ$ . فإذا كانت زاوية الورود  $\theta_1$  أكبر من الزاوية الحرجة كما هو مبين في الشكل 14.1 (c)، ينعكس الضوء بالكامل عائداً إلى الوسط 1، فإن هذه الحالة تُسمى الانعكاس الداخلي الكلي للضوء. (كما هو مبين في هذا الشكل، تخضع الأشعة المنعكسة لقانون الانعكاس، بحيث تكون زاوية الانعكاس مساوية لزاوية الورود في جميع الحالات الثلاث آتفة الذكر).



الشكل 14.1 (a) تعتبر أشعة الضوء حاداً تتخفف فيه قرينة الانكسار، مما يعني أن  $n_1 > n_2$ ، والشعاع ينحني بعيداً عن الناحية. (b) الزاوية الحرجة  $\theta_c$  هي زاوية الورود، التي تكون زاوية الانكسار فيها مساويةً  $90^\circ$ . (c) يحدث الانعكاس الداخلي الكلي عندما تكون زاوية الورود أكبر من الزاوية الحرجة.

ينص قانون سنيل على العلاقة بين الزوايا وقرائن الانكسار، ويُعطى بالعلاقة التالية:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

فعندما تساوي زاوية ورود الزاوية الحرجة  $\theta_1 = \theta_c$ ، تكون زاوية الانكسار مساويةً  $90^\circ$ ، أي أن  $\theta_2 = 90^\circ$ .

فإذا لاحظنا أن  $\sin 90^\circ = 1$ ، يصبح قانون سنيل في هذه الحالة ممثلاً بالعلاقة التالية:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2$$

ولهذا، تكون الزاوية الحرجة  $\theta_c$  لمجموعة معينة من المواد معطاة بالعلاقة التالية:

$$\theta_c = \sin^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} \right) \text{ for } n_1 > n_2 \quad (1.5)$$

يحدث الانعكاس الداخلي الكلي لأي زاوية ورود أكبر من الزاوية الحرجة  $\theta_c$ ، ويمكن أن يحدث ذلك فقط عندما الوسط الثاني يتمتع بقرينة انكسار أقل من الأول. لاحظ أن هذه المعادلة مكتوبة للشعاع الضوئي الذي ينتقل خلال الوسط 1 وينعكس من الوسط

الثاني كما هو موضح في الشكل 14.1.

## مثال 4.1

### تحديد الزاوية الحرجة

ما هي الزاوية الحرجة للضوء الذي ينتقل في أنبوب من البوليستيرين (نوع من البلاستيك) محاط بالهواء؟ علماً أن قرينة الانكسار للبوليستيرين هي 1.49.

### خطة الحل

يمكن عد قرينة انكسار الهواء مساويةً 1.00 كما أُشير إلى ذلك من قبل. وبالتالي، ففي هذه الحالة، ولما كان الوسط الثاني يتمتع بقرينة انكسار أقل من الأول (البلاستيك)، يمكننا استخدام المعادلة التالية:

$$\theta_c = \sin^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} \right)$$

لإيجاد الزاوية الحرجة  $\theta_c$ ، حيث  $n_2 = 1.00$  و  $n_1 = 1.49$ .


### الحل

يتم استبدال القيم المحددة في نص المسألة وحل المعادلة لنجد أن:

$$\theta_c = \sin^{-1} \left( \frac{1.00}{1.49} \right) = \sin^{-1}(0.671) = 42.2^\circ$$

### ملاحظة

تعني النتيجة السابقة أن أي شعاع ضوئي داخل البلاستيك، ويسقط على سطحه بزوايا أكبر من  $42.2^\circ$ ، سوف ينعكس كلياً، وهذا ما يجعل السطح الداخلي للبلاستيك الشفاف مرآة مثالية لمثل هذه الأشعة، دون أي حاجة لاستخدام عملية التفضيض (الطلي بالفضة لسطوح المرايا). تتمتع المجموعات المختلفة من المواد بزوايا حرجة متباينة فيما بينها، ولكن يمكن أن ينتج عن أي تركيب من هذه المواد، حيث يكون فيها  $n_2 < n_1$ ، انعكاس داخلي كلي. وبتابع أسلوب الحساب نفسه الوارد آنفاً نجد أن الزاوية الحرجة للأشعة الضوئية المنتقلة من الماء إلى الهواء هي  $48.6^\circ$  درجة، في حين أن الزاوية الحرجة عند انتقال الضوء من الألماس إلى الهواء هي  $24.4^\circ$ ، ومن زجاج الصوان إلى الزجاج التاجي  $66.3^\circ$ .

3.1 تحقق من فهمك أن على السطح الفاصل بين الهواء والماء، يمكن أن تنتقل الأشعة الضوئية من الهواء إلى الماء 

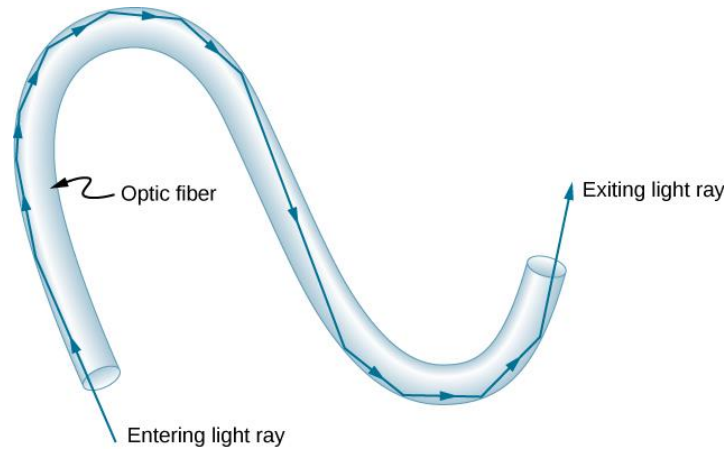
ومن الماء إلى الهواء، وأنه لا تتوافر لمثل هذا النوع من الأشعة الضوئية إمكانية الانعكاس الداخلي الكلي؟

في الصورة الموجودة في افتتاحية هذا الفصل، جرى التقاط صورة للسباح تحت الماء بواسطة كاميرا تحت الماء أيضاً. وعلى ما يبدو السباح في النصف العلوي من الصورة يكون متجهاً للأعلى، لكن في الواقع هي صورة منعكسة للسباح أدناه. وإن التموج الدائري

بالقرب من مركز الصورة هو في الواقع تموج على سطح الماء. وإن توافر المياه الهادئة المحيطة بهذا السطح تجعله سطحاً عاكساً جيداً عند النظر إليه من الأسفل، وذلك بفضل الانعكاس الداخلي الكلي. وعلى أية حال، في أقصى الجزء العلوي لحافة هذه الصورة، تصطدم الأشعة الواردة من الأسفل بالسطح بزوايا ورود أقل من الزاوية الحرجة، مما يسمح للكاميرا بالتقاط الأنشطة على سطح حمام السباحة.

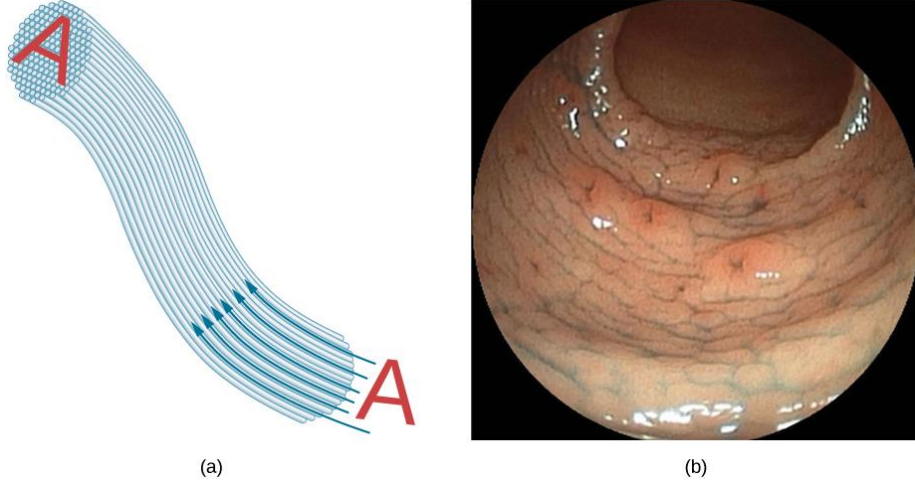
### الألياف البصرية: بدءاً من المناظير وانتهاءً بالهواتف

الألياف البصرية هي أحد تطبيقات الانعكاس الداخلي الكلي المستخدم على نطاق واسع في الاتصالات، حيث تقوم بإرسال الإشارات عبر الهاتف والإنترنت والكبل التلفزيوني. وتستخدم الألياف البصرية خاصية الإرسال الضوئي، التي تتمتع بها الألياف المصنوعة من البلاستيك أو الزجاج. ولما كان الألياف رقيقة، فمن المحتمل أن يصطدم الضوء، الداخل في أحد الألياف، بالسطح الداخلي لليف بزوايا ورود أكبر من الزاوية الحرجة، وبالتالي ينعكس هذا الضوء بشكلٍ كلي كما هو مبين في **الشكل 15.1**. ويجب أن تكون قرينة الانكسار خارج الليف أصغر من مثيلتها في داخله. وفي الواقع، تتمتع معظم الألياف بقرائن انكسار متباينة، وذلك بغية السماح بتوجيه المزيد من الضوء على طول هذه الألياف من خلال توافر ظاهرة الانكسار الداخلي الكلي. وتنعكس الأشعة حول الزوايا كما هو موضح في هذا الشكل، مما يجعل الألياف تبدو وكأنها أنابيب ضوئية صغيرة.



**الشكل 15.1** قد يصطدم الضوء، الداخل إلى الألياف البصرية الرقيقة، يصطدم بالسطح الداخلي بزوايا ورود كبيرة أو مماسية، و ينعكس هذا الضوء بشكلٍ كلي إذا كانت هذه الزوايا تتجاوز بقيمتها مثيلاتها الحرجة. وتستمر هذه الأشعة بالانتقال أسفل الألياف، حتى بعد متابعة انتقالها حول المنعطفات ما دامت زوايا الانعكاس والورود كبيرة.

يمكن استخدام حزم الألياف لنقل صورة دون عدسة كما هو موضح في **الشكل 16.1**. ويدعى الجزء الموجود خارج الجهاز بالمنظار كما هو موضح في **الشكل 16.1 (b)**. وتستخدم المناظير لاستكشاف المناطق الداخلية من الجسم من خلال الفتحات الطبيعية أو الشقوق البسيطة الموجودة داخل هذا الجسم، إذ ينتقل الضوء أسفل إحدى حزم الألياف ليُضيء على الأجزاء الداخلية للجسم، وينتقل الضوء المنعكس عائداً من خلال حزمة أخرى ليتم رصده.

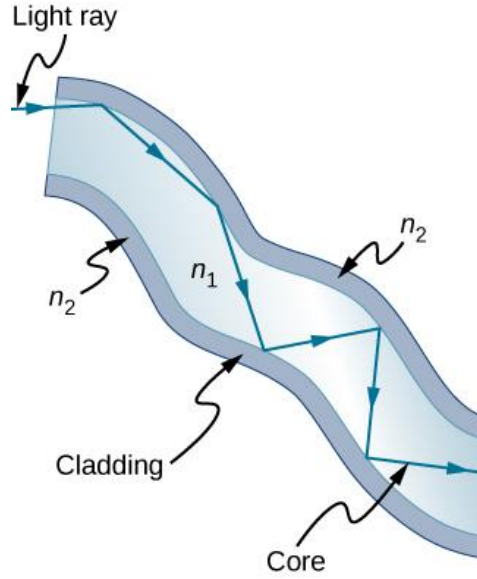


**الشكل 16.1 (a)** تُرسل الصورة "A" بواسطة حزمة من الألياف البصرية. **(b)** يستخدم المنظار لفحص الجسم، كلاهما ينقلان الضوء إلى الداخل ويعيدان صورة مثل الصورة الظاهرة لساق المزمار البشري (هيكل في قاعدة اللسان). (الانتماء b: تعديل العمل بواسطة "مد-كاوس" / ويكيبيديا كومنز)

(credit b: modification of work by "Med\_Chaos"/Wikimedia Commons)

أحدثت الألياف البصرية ثورة في التقنيات الجراحية والاستكشافات داخل جسم الإنسان، إضافةً إلى مجموعة من التشخيصات الطبية والاستخدامات العلاجية. فمثلاً، يمكن إجراء الجراحة التنظيرية لمفصل الركبة أو الكتف باستخدام أدوات القطع المرفقة مع جهاز التنظير والمراقبة من خلاله. ويمكن أيضاً الحصول على عينات، مثلاً، أخذ خزعات من الأورام الحميدة المعوية للفحص الخارجي. وتسمح مرونة حزمة الألياف البصرية للأطباء بالتنقل ضمن مكان صغير في مناطق يصعب الوصول إليها داخل الجسم مثل الأمعاء والقلب والأوعية الدموية والمفاصل. ويؤدي انتقال شعاع الليزر الكثيف لنزع لويحات الانسداد في الشرايين الرئيسية، إضافةً إلى إيصال الضوء لتنشيط أدوية العلاج الكيميائي. وفي الواقع مكنت الألياف البصرية من إجراء كلٍ من الجراحة المجهرية والجراحة عن بعد، إذ تكون الشقوق صغيرة، ولا تحتاج أصابع الجراح للمس الأنسجة المريضة.

تكون الألياف البصرية في حزمها محاطة بمادة تكسية (تغليف) ذات قرينة انكسار أقل من اللب **(الشكل 17.1)**، حيث تمنع مادة التكسية هذه الضوء من الانتقال بين الألياف داخل الحزمة، إذ دون هذه الكسوة، يمكن أن يمر الضوء بين الألياف المتماسمة مع بعضها، ذلك لأن قرائن الانكسار لهذه الألياف متماثلة. وبما أنه لا يوجد ضوء يدخل في الكسوة (معنى ذلك أن مجموع الانعكاس الكلي الداخلي يكون داخل لب الليف البصري)، ولا يمكن للضوء أن ينتقل بين الألياف المغطاة، والتي هي على تماس مباشر مع بعضها. عدا ذلك، ينتشر الضوء على طول الألياف، مما يقلل من فقدان الإشارة وضمان جودة الصورة المتشكلة في النهاية الأخرى لليف البصري. وتشكل الكسوة طبقة واقية إضافية تجعل الألياف البصرية متينة ومرنة في الوقت نفسه.



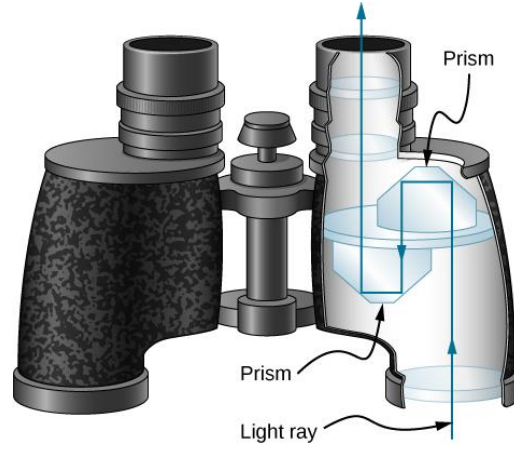
**الشكل 17.1** الألياف في حزم جرى تغليفها بمادة تتمتع بقرينة انكسار أخفض من اللب بهدف تأمين الانعكاس الداخلي الكلي للضوء حتى عندما تكون الألياف على تماس مع بعضها.

جرى تصميم العدسات الصغيرة الخاصة وتصنيعها، التي يمكن تركيبها عند نهايات حزم الألياف. ويمكن للضوء المنبثق من حزمة الألياف أن يتم تركيزه من خلال مثل هذه العدسات وتصوير بقعة صغيرة. ويمكن في بعض الحالات إجراء عملية مسح لهذه البقعة والسماح بالتصوير الجيد لمنطقة داخل الجسم. هناك مرشحات ضوئية خاصة دقيقة مدرجة في نهاية حزمة الألياف لديها القدرة على تصوير الأجزاء الداخلية للأعضاء التي تقع على بعد عشرات الميكرونات أسفل السطح دون تقطيع سطح المنطقة المعروفة باسم التشخيصات غير المحرصة. ويُعدُّ هذا مفيداً بشكل خاص لتحديد مدى انتشار السرطان في المعدة والأمعاء.

هناك نوع آخر من التطبيقات، حيث تستخدم الألياف الضوئية بشكل واسع في مجال الاتصالات لحمل إشارات المحادثات الهاتفية والإنترنت. ولقد جرى مد كابلات الألياف الضوئية في قاع المحيط وتحت الأرض لتمكين الاتصالات البصرية. توفر أنظمة الاتصال بالألياف البصرية العديد من المزايا مقارنةً بالأنظمة الكهربائية (النحاسية)، لا سيما لمسافات طويلة، إذ يمكن جعل الألياف شفافة لدرجة أن الضوء يمكن أن يسافر لعدة كيلومترات قبل أن تصبح قائمة بما يكفي للتضخيم - متفوقة بكثير على النواقل النحاسية. وتُسمى هذه الخاصية للألياف البصرية بالفقد المنخفض. وتصدر الليزر الضوء المتمتع بخصائص تسمح بإجراء محادثات ضمن ليفٍ واحدٍ أكثر بكثير من الإشارات الكهربائية على ناقلٍ واحد. وتُسمى هذه الخاصية للألياف البصرية النطاق الواسع للترددات العالية. ولا تنتج الإشارات الضوئية في الليف الواحد تأثيرات غير مرغوب بها في الألياف المجاورة. تُسمى هذه الخاصية للألياف البصرية بالحديث المتبادل المنخفض. وسوف نقوم باستكشاف الخصائص الفريدة للشعاع الليزري في فصل لاحق من هذا الكتاب.

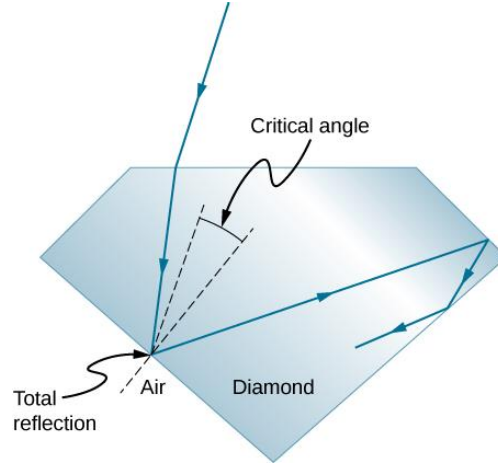
### العواكس الزاوية والألماس

تكون العواكس الزاوية (قانون الانعكاس) فعالة تماماً عندما تتوفر فيها شروط الانعكاس الداخلي الكلي. ومن السهل مع المواد شائعة الاستخدام الحصول على زاوية حرجة أقل من  $45^\circ$ . وأحد استخدامات هذه المرايا المثالية (أي المتقنة) هو في المناظير كما هو مبين في **الشكل 18.1**. وهناك استخدام آخر لهذه المرايا، حيث استخدمت في ما يُسمى البيروسكوبات periscopes (أي المناظير الأفقية) في الغواصات.



**الشكل 18.1** تستخدم هذه المناظير العواكس الزاوية (الموشور) مع انعكاس داخلي كلي للحصول على ضوء لعيني المراقب

يوضح الانعكاس الداخلي الكلي، والمقترن بقرينة انكسار كبيرة، سبب تألق الألماس بشكل أكثر من المواد الأخرى. تبلغ الزاوية الحرجة لسطح الألماس إلى الهواء  $24.4^\circ$  فقط، لذلك عندما يدخل الضوء إلى الألماس، فإنه يواجه مشكلة في العودة خارجه (**الشكل 19.1**). وعلى الرغم من أن الضوء يدخل الألماس بجزئية، إلا أنه لا يمكنه الخروج منه إلا إذا جعلت الزاوية الحرجة أقل من  $24.4^\circ$ . لهذا، تُعدّ سطوحات (جوانب) الألماس خصيصاً لجعل خروج الضوء غير مرجح. يكون الألماس الجيد صافياً للغاية، بحيث يجعل الضوء كثير الانعكاسات الداخلية ومركزاً قبل خروجه، وبالتالي يعطي الألماس البريق الساطع. (يُعدّ الزركون من الأحجار الكريمة الطبيعية التي تتمتع بقرينة انكسار كبيرة بشكل استثنائي، ولكنها ليست كبيرة كما في الألماس، لذا فهي ليست ذات قيمة عالية. ويُصنع مكعب الزركون الذي يتمتع بقرينة انكسار أعلى ( $2.17 \approx$ )، لكنه لا يزال أقل من مثيله للألماس). إن الألوان، التي تراها منبثقة من الألماس الصافي، لا تُعبّر عن لون الألماس، إذ عادةً ما يكون الألماس عديم اللون تقريباً، وهذه الألوان هي نتيجة لظاهرة تشتت الضوء، والتي سوف نناقشها في فقرة **التشتت** من هذا الفصل. ويمكن الحصول على الألماس ملوناً من خلال إحداث عيوب بنيوية في شبكته البلورية وإدخال متضمنات دقيقة من الجرافيت وغيرها من المواد في بنيته. ينتج منجم أرغيل Argyle في غرب أستراليا نحو 90% من الألماس ذي اللون الوردى والأحمر والشمبانيا والكونياك في العالم، في حين نحو 50% من الألماس الصافي في العالم يأتي من وسط إفريقيا وجنوبها.



**الشكل 19.1** لا يمكن للضوء أن يفلت بسهولة من الألماس، ذلك لأن الأخير يتمتع بزواوية حرجة مع الهواء صغيرة جداً. وتكون معظم الانعكاسات كلية بداخله، ويتم وضع سطوحات الألماس، بحيث لا يمكن للضوء الخروج عبرها إلا بطرق استثنائية فقط، وبالتالي يتركيز الضوء مما يجعل الألماس متألقاً وزاهياً.

استكشف انكسار الضوء وانعكاسه (<https://openstaxcollege.org/l/21bendoflight>) بين وسطين يتمتعان بقرائن انكسار مختلفة. حاول أن تجعل الشعاع المنكسر يختفي مع وجود انعكاس داخلي كلي. استعمل أداة المنقلة لقياس الزاوية الحرجة ومقارنتها مع تلك المستنتجة من **المعادلة 1.5**.

## 5.1 | التشتت (التبدد) Dispersion

### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- شرح سبب التشتت في الموشور.
- وصف آثار التشتت في إنتاج أقواس قزح
- تلخيص مزايا التشتت وعيوبه

كلّ منا يستمتع بمشاهدة قوس قزح يبرق في سماء عاصفة مظلمة. كيف تسقط أشعة الشمس على قطرات نقية من المطر، ليحصل لهذه الأشعة انكسار داخل قوس قزح ذي الألوان كما نرى؟ تتسبب العملية ذاتها في تقسيم الضوء الأبيض إلى ألوان من خلال موشور زجاجي نقي أو الألماس (**الشكل 20.1**).





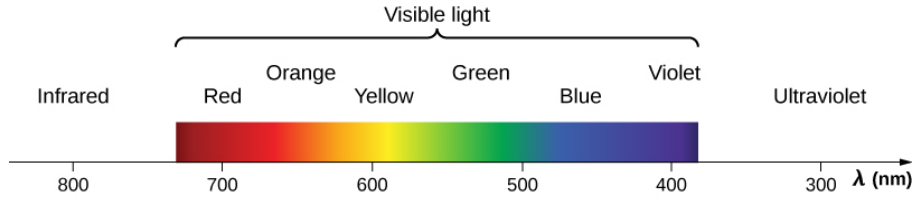
(a)



(b)

**الشكل 20.1** ألوان قوس قزح (a) وتلك التي ينتجها الموشور (b) تكون متطابقة (متماثلة). (الائتمان a: تعديل العمل من قبل "ألفريدو 55" / ويكيبيديا كومنز؛ الائتمان b: تعديل العمل من قبل ناسا NASA) (credit a: modification of work by "Alfredo55"/Wikimedia Commons; credit b: modification of work by NASA)

نحن نرى نحو ستة ألوان في قوس قزح - الأحمر والبرتقالي والأصفر والأخضر والأزرق والبنفسجي، وفي بعض الأحيان يلاحظ النييلي أيضاً. وترتبط هذه الألوان بأطوال موجية مختلفة من الضوء كما هو مبين في **الشكل 21.1**. فعندما تستقبل أعيننا الطول الموجي النقي للضوء، فإننا نميل إلى رؤية لون واحد فقط من الألوان الستة، وهذا يتوقف على الطول الموجي. وهناك الآلاف من الأشكال الأخرى، التي يمكن أن نستشعرها في حالات أخرى، تتعلق بمدى استجابة العين لخليط من الأطوال الموجية. يُعدُّ الضوء الأبيض، على وجه الخصوص، مزيجاً موحداً إلى حد ما لجميع الأطوال الموجية المرئية. أما ضوء الشمس، والذي يُعدُّ أيضاً، فإنه في الواقع يبدو أصفر قليلاً، كونه مزيج لمجموعة من الأطوال الموجية، لكن هذا المزيج يحوي جميع الأطوال الموجية المرئية. يكون تسلسل الألوان في أقواس قزح هو التسلسل نفسه للألوان المبينة في هذا **الشكل**. وهذا يعني أن الضوء الأبيض ينتشر في قوس قزح وفقاً لطول الموجة. يُعرَّف **التشتت** على أنه انتشار الضوء الأبيض في طيفه الكامل للأطوال الموجية. ويُعرَّف أكثر من الناحية التقنية، أن التشتت يحدث كلما اعتمد انتشار الضوء على الطول الموجي.



**الشكل 21.1** على الرغم من أن أقواس قزح مرتبطة بستة ألوان، إلا أن قوس قزح مستمر بتوزيع ألوانه حسب الأطوال الموجية.

يمكن لأي نوع من الأمواج أن يبدي تشتتاً. فعلى سبيل المثال، يمكن لكل من الأمواج الصوتية وجميع أنواع الأمواج الكهرومغناطيسية والأمواج المائية أن تكون مشتتة وفقاً لطول موجتها. وقد يتطلب التشتت ظروفاً خاصة، ويمكن أن ينتج عروضاً مذهلة كما هو الحال في إنتاج قوس قزح. ويُعدُّ هذا صحيحاً أيضاً بالنسبة للصوت، إذ أن جميع الترددات الصوتية تنتقل عادةً بالسرعة نفسها. فإذا كنت تستمع إلى صوتٍ من خلال أنبوب طويل، مثل خرطوم المكنسة الكهربائية، يمكنك سماع ذلك بسهولة من خلال التفاعل مع الأنبوب. يمكن للتشتت، في الواقع، أن يكشف عن الكثير حول ما واجهته الموجة التي تشتت أطوالها الموجية. تشتت الإشعاع الكهرومغناطيسي من الفضاء الخارجي، على سبيل المثال، كشف الكثير عن ما هو موجود بين النجوم - أو ما يُسمى الوسط بين النجمي (أي بين النجوم).

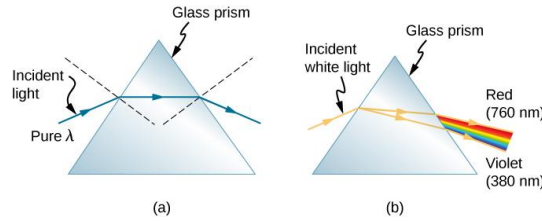
ناقش فيديو نك مور (<https://openstaxcollege.org/l/21nickmoorevid>) تشتت النبضة وهو يقوم بالنقر على نابض

طويل. تابع شرحه، ذلك لأن مور يعيد لقطات عالية السرعة تظهر أمواج عالية التردد تفوق أمواج التردد المنخفض.

الانكسار هو المسؤول عن ظاهرة التشتت في أقواس قزح والعديد من الحالات الأخرى. وتعتمد زاوية الانكسار على قرينة الانكسار كما نعلم من قانون سنيل. نحن نعلم أن قرينة الانكسار  $n$  تعتمد على الوسط. لكن لو سَطِّحْ مُعْطَى، فإن  $n$  تعتمد أيضاً على الطول الموجي (الجدول 2.1). لاحظ أنه بالنسبة إلى وسط معين، تزداد قيم  $n$  كلما انخفض طول الموجة، وتكون قيمها عظمى للضوء البنفسجي. وهكذا، ينحني الضوء البنفسجي أكثر من مثيله الأحمر، كما هو موضح في الموشور في الشكل 22.1 (b). ينتشر الضوء الأبيض وفقاً للتسلسل نفسه للأطوال الموجية كما هو موضح في الشكل 20.1 والشكل 21.1.

### الجدول 2.1 قرينة الانكسار في أوساط مختارة عند أطوال موجية مختلفة.

البنفسجي (410 nm)	الأزرق (470 nm)	الأخضر (550 nm)	الأصفر (580 nm)	البنفسجي (610 nm)	الأحمر (660 nm)	الوسط
1.342	1.338	1.335	1.333	1.332	1.331	الماء
2.458	2.444	2.426	2.417	2.415	2.410	الألماس
1.530	1.524	1.519	1.518	1.514	1.512	الزجاج التاجي
1.698	1.684	1.674	1.667	1.665	1.662	زجاج الصوان
1.506	1.499	1.493	1.492	1.490	1.488	البوليستيرين
1.468	1.462	1.459	1.458	1.456	1.455	كوارتز مصهور

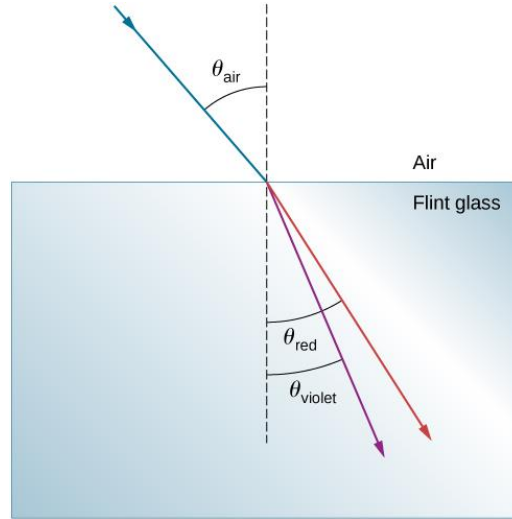


**الشكل 22.1 (a)** يسقط طول موجة نقية من الضوء على الموشور وينكسر في كلا السطحين. **(b)** يُشْتَت الضوء الأبيض بواسطة الموشور (الصورة مبالغ فيها - أي مضخمة). ولما كانت قرينة الانكسار تختلف باختلاف الطول الموجي، فإن زوايا الانكسار تختلف باختلاف الطول الموجي أيضاً. يتم إنتاج تسلسل الألوان من الأحمر إلى البنفسجي، ذلك لأن قرينة الانكسار تزداد باطراد مع انخفاض الطول الموجي.

## مثال 5.1

### تشتت الضوء الأبيض بواسطة زجاج الصوان

ينتقل شعاع الضوء الأبيض من الهواء إلى داخل زجاج الصوان بزواوية ورود تبلغ  $43.2$  درجة. ما هي الزاوية بين الضوء الأحمر ( $660$  nm) ومثيله البنفسجي ( $410$  nm) من الضوء المنكسر؟



### خطة الحل

يبين **الجدول 2.1** قيم قرينة الانكسار لزجاج الصوان عند أطوال موجية مختلفة. استخدم هذه القيم لحساب زاوية الانكسار لكل لون، ثم خذ الفرق للعثور على زاوية التشتت.

### الحل

من خلال تطبيق قانون الانكسار للضوء الأحمر من الحزمة الضوئية:

$$n_{air} \sin \theta_{air} = n_{red} \sin \theta_{red}$$

يمكننا إيجاد زاوية انكسار الضوء الأحمر كما يلي:

$$\theta_{red} = \sin^{-1} \left( \frac{n_{air} \sin \theta_{air}}{n_{red}} \right) = \sin^{-1} \left[ \frac{(1.000) \sin 43.2^\circ}{1.662} \right] = 27.0^\circ$$

وبشكلٍ مماثل، يمكن إيجاد زاوية سقوط الجزء البنفسجي من الحزمة الضوئية:

$$\theta_{violet} = \sin^{-1} \left( \frac{n_{air} \sin \theta_{air}}{n_{violet}} \right) = \sin^{-1} \left[ \frac{(1.000) \sin 43.2^\circ}{1.698} \right] = 26.4^\circ$$

ويكون الفرق بين هاتين الزاويتين هو:

$$\theta_{red} - \theta_{violet} = 27.0^\circ - 26.4^\circ = 0.6^\circ$$

### ملاحظة

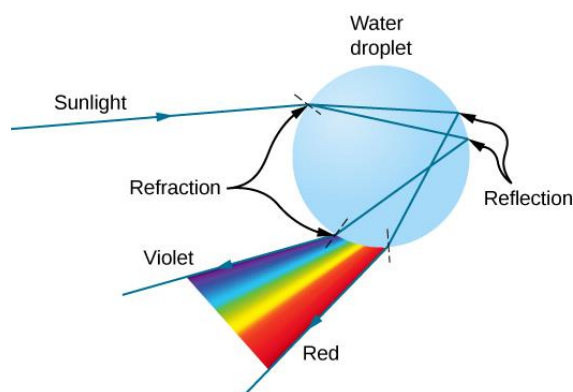
على الرغم من أن  $0.6$  درجة قد تبدو زاوية صغيرة وليست ذات أهمية، إلا أنه إذا سمح لهذه الحزمة الضوئية أن تنتشر لمسافة طويلة بما فيه الكفاية، يصبح تشتت الألوان ملحوظاً جداً.

**4.1 تحقق من فهمك** في المثال السابق لتبين ما هي المسافة، داخل كتلة من زجاج الصوان، يتعين على كلٍ من الأشعة الحمراء ومثلتها البنفسجية التقدم قبل أن يتم فصلهما بمقدار  $1.0 \text{ mm}$ ؟

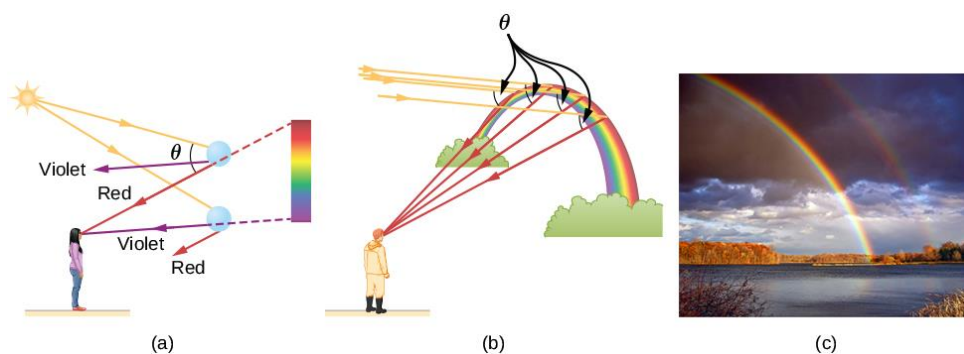
يتم إنتاج أقواس قزح من خلال مزيج من الانكسار والانعكاس. ربما تلاحظ أنك ترى قوس قزح فقط عندما تنظر بعيداً عن الشمس. يدخل الضوء في قطرة ماء وينعكس من الجزء الخلفي لهذه القطرة (**الشكل 23.1**). ينكسر الضوء مرتين عند دخوله في القطرة وعند مغادرتها. ولما كانت قرينة انكسار الماء يختلف باختلاف الطول الموجي، فإن الضوء يتشتت، ويلاحظ قوس قزح (**الشكل 24.1 a**). (لا يحدث تشتت في السطح الخلفي، لأن قانون الانعكاس لا يتعلق بطول الموجة). يعتمد قوس قزح الفعلي للألوان، والذي يراه أحد المراقبين، على عدد لا يحصى من الأشعة، التي تنكسر وتنعكس باتجاه عيني المراقب من العديد من قطرات

الماء. ويكون التأثير أكثر إثارة عندما تكون الخلفية مظلمة، كما هو الحال في الطقس العاصف، ولكن يمكن ملاحظتها أيضاً في شلالات المياه وفي مرشات العشب.

يأتي قوس قزح عندما يكون هناك دايح للنظر بزوايا معينة بالنسبة لاتجاه الشمس كما هو موضح في الجزء (b) من الشكل 23.1. فإذا حدث انعكاسان للضوء داخل قطرة الماء، تم إنتاج قوس قزح "ثانوي" آخر. وينتج هذا الحدث النادر قوساً يتوضع فوق قوس قزح الأساس كما هو موضح في الجزء (c) من الشكل، وينتج ألواناً تتمتع بترتيب عكسي لقوس قزح الأساس، أي يتوضع اللون الأحمر في أدنى زاوية والبنفسجي في أكبرها.



**الشكل 23.1** شعاع ضوئي يسقط على قطرة من الماء، يدخل فيها وينعكس من الجزء الخلفي لهذه القطرة. ينكسر هذا الضوء ويتشتت عند دخوله في القطرة وعند مغادرتها.



**الشكل 24.1 (a)** تبرز ألوان مختلفة في اتجاهات مختلفة، لذا يجب عليك النظر إلى مواقع مختلفة لرؤية الألوان المختلفة لقوس قزح. **(b)** ينشأ قوس قزح من حقيقة أن هناك خطأ، بين المراقب وأي نقطة على القوس، يجعل الزاوية الصحيحة مع الأشعة المتوازية لضوء الشمس بالنسبة للمراقب، ليتلقى هذا الأخير الأشعة المنكسرة. **(c)** قوس قزح مزدوج. **(الائتمان c :** تعديل العمل من قبل "نيكولاس/ ويكيبيديا كومنز)

(credit c: modification of work by "Nicholas"/Wikimedia Commons)

يمكن أن ينتج عن التشتت أقواس قزح جميلة، لكن يمكن أن يسبب ذلك مشاكل في الأنظمة البصرية. يتشتت الضوء الأبيض، المستخدم لنقل الرسائل عبر الألياف، وينتشر هذا الضوء مع الوقت، ويتداخل في النهاية مع الرسائل الأخرى. ولما كان الليزر ينتج طول موجة وحيداً تقريباً، فإن ضوء هذا الليزر يخضع لتشتت ضئيل، وهذا ما يتميز به شعاع الليزر عن مثيله الضوء الأبيض في نقل المعلومات. في المقابل، يمكن استخدام تشتت الأمواج الكهرومغناطيسية القادمة إلينا من الفضاء الخارجي لتحديد كمية المادة التي تعبرها هذه الأمواج.

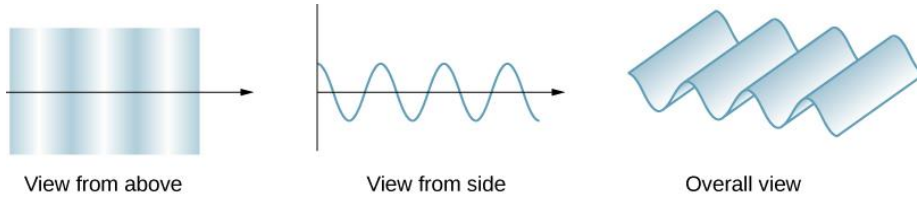
### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- وصف مبدأ هيغنز
- استخدام مبدأ هيغنز لشرح قانون الانعكاس
- استخدام مبدأ هيغنز لشرح قانون الانكسار
- استخدام مبدأ هيغنز لشرح الحيود (الانعراج)

جرى حتى الآن في هذا الفصل مناقشة الظواهر البصرية باستخدام النموذج الشعاعي للضوء. ومع ذلك، تتطلب بعض هذه الظواهر إجراء تحليل وتفسيرات مبنية على المزايا التي تتمتع به موجة الضوء. ويُعدُّ هذا صحيحاً بشكلٍ خاص عندما يكون الطول الموجي لا يكاد يذكر مقارنةً مع أبعاد الجهاز البصري، مثل وجود شق في حالة الانعراج (الحيود). ويُعدُّ مبدأ هيغنز أداةً لا غنى عنها لهذا التحليل.

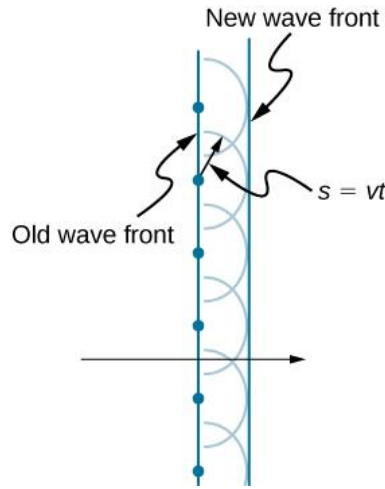
يوضح **الشكل 25.1** كيف تبدو الموجة المستعرضة كما تُرى من الأعلى ومن الجانب، إذ يمكن تخيل موجة خفيفة مثل هذا الانتشار، على الرغم من أننا لا نرى في الواقع هذه الموجة تهتز في الفضاء. نحن نرى جبهات الموجة (أو قممها) من الأعلى كما لو كنا ننظر للأسفل إلى موجات المحيط. وسوف يكون المنظر الجانبي على شكل رسم بياني لحقل كهربائي أو مغناطيسي. وقد تكون وجهة النظر الواردة أعلاه أكثر فائدة في تطوير مفاهيم حول بصريات الموجة.



**الشكل 25.1** موجة عرضية، تشبه موجة الضوء الكهرومغناطيسي، كما تشاهد من الأعلى ومن الجانب. يكون اتجاه الانتشار عمودياً على جبهات الموجة (أو قممها) وهو يمثلها بشعاع.

قام العالم الهولندي كريستيان هيغنز **Christiaan Huygens** (1629-1695) بتطوير تقنية مفيدة لتحديد، وبالتفصيل، كيف وأين تنتشر الأمواج. وانطلاقاً من موقع معروف، ينص مبدأ هيغنز على أن كل نقطة على جبهة الموجة تشكل مصدراً للأمواج الصغيرة المنتشرة في الاتجاه الأمامي بالسرعة نفسها وللموجة نفسها. وتشكل جبهة الموجة الجديدة ظل الزاوية لجميع هذه الأمواج الصغيرة. يوضح **الشكل 26.1** كيف يتم تطبيق مبدأ هيغنز، فعلى سبيل المثال تكون جبهة الموجة هي الحافة الطويلة التي تتحرك في القمة وفي الجوف (القاع). وتبعث كل نقطة على جبهة الموجة موجة نصف دائرية تتحرك بسرعة الانتشار  $v$ . ويمكننا أن نرسم هذه الأمواج الصغيرة مع الزمن  $t$  في وقت لاحق، بحيث تكون هذه الأمواج قد تحركت لمسافة  $s = vt$ . وتكون جبهة الموجة الجديدة هي ظل المستوي للأمواج الصغيرة، وبحيث نتوقع أن تتشكل الموجة فيما بعد وخلال الزمن  $t$ . يصلح مبدأ هيغنز لجميع أنواع هذه الأمواج، بما في ذلك الأمواج المائية ومثيلتها الصوتية والأمواج الضوئية. ومن المفيد، ليس فقط وصف كيفية انتشار الأمواج الضوئية،

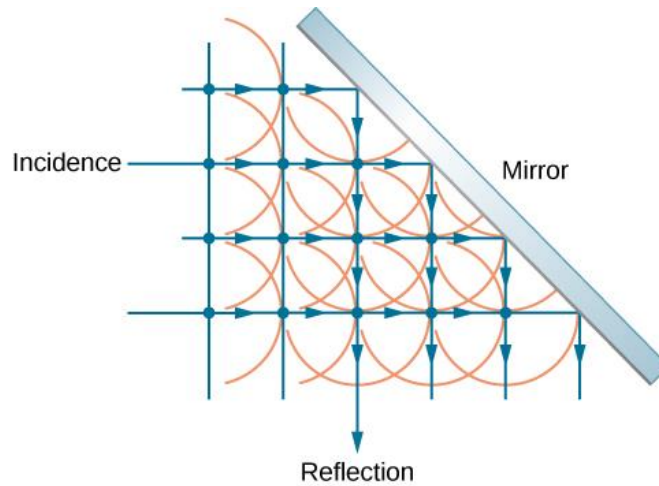
ولكن في شرح قوانين الانعكاس والانكسار أيضاً. بالإضافة إلى ذلك، سنرى أن مبدأ هيغنز يجبرنا كيف وأين تتداخل الأشعة الضوئية.



**الشكل 26.1** يُطبَّق مبدأ هيغنز على جبهة موجة مستقيمة، حيث تبعث كل نقطة على جبهة الموجة أمواجاً صغيرة نصف دائرية تتحرك لمسافة  $s = vt$ . وتشكل جبهة الموجة الجديدة هي ظل الخط لهذه الأمواج.

### الانعكاس

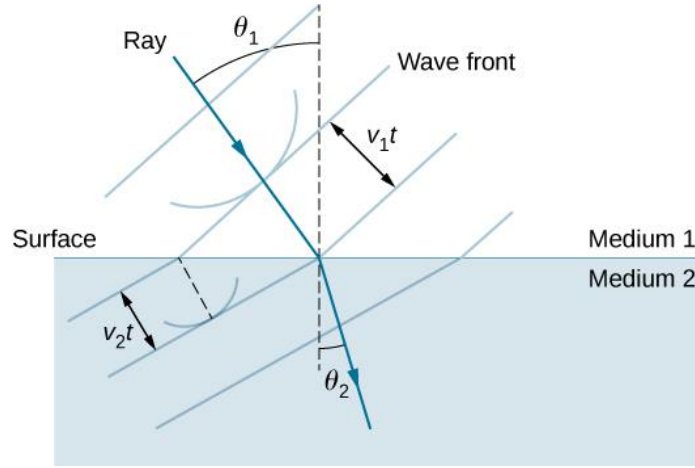
يوضح **الشكل 27.1** كيف تعكس المرآة موجة واردة بزواوية تساوي زاوية الورد، وذلك طبقاً لقانون الانعكاس. فعندما تضرب مقدمة الموجة المرآة، تبعث في البداية أمواج صغيرة من الجزء الأيسر من المرآة، ومن ثم من يمينها. وتتمتع الأمواج القريبة من اليسار بزمن لتنتقل بعيداً، مما ينتج جبهة أمامية تسير في الاتجاه الموضح في هذا الشكل.



**الشكل 27.1** ينطبق مبدأ هيغنز على جبهة الموجة المستوية التي تصدم المرآة. وتُبعث الأمواج الصغيرة الموضحة في الشكل عندما تصدم كل نقطة من جبهة الموجة المرآة. ويبين ظل هذه الأمواج القصيرة وكأنها جبهة الموجة الجديدة قد انعكست بزواوية انعكاس مساوية لمثليلتها الورد. ويكون اتجاه الانتشار عمودياً على جبهة الموجة كما هو موضح في الإشارات السهمية المتجهة نحو الأسفل.

## الانكسار

يمكن تفسير قانون الانكسار من خلال تطبيق مبدأ هيغنز على جبهة الموجة التي تمر من وسط إلى آخر (**الشكل 28.1**). كل موجة قصيرة في هذا الشكل جرى إصدارها عندما عبرت جبهة الموجة السطح البيني بين الأوساط. ولما كانت سرعة الضوء أصغر في الوسط الثاني، ولا تنتقل الأمواج بعيداً في الزمن المعطى، فإن الجبهة الجديدة للموجة تغير اتجاهها كما هو موضح في هذا الشكل. وهذا ما يُفسّر لماذا يغير الشعاع اتجاهه ليصبح أقرب إلى الناظم عند تباطؤ الضوء بمسيره نحو الأسفل. ويمكن اشتقاق قانون سنيل من الشكل الهندسي في **الشكل 28.1 (والمثال 6.1)**.



**الشكل 28.1** تطبيق مبدأ هيغنز على جبهة موجة مستوية عابرة من وسط إلى آخر، وانخفضت سرعتها. وينحني الشعاع نحو الناظم، في حين تتمتع الأمواج القصيرة بسرعة أقل في الوسط الثاني.

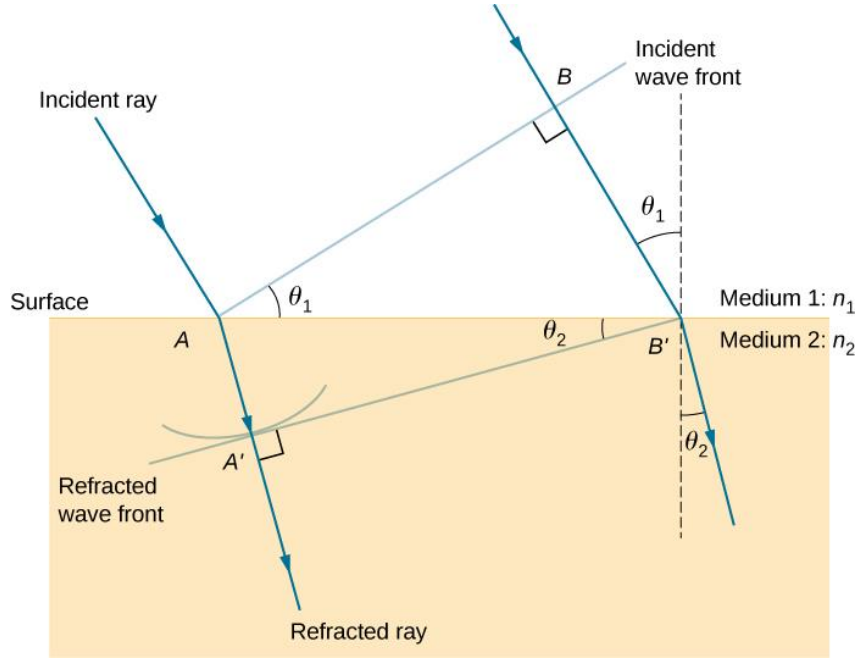
### مثال 6.1

#### اشتقاق قانون الانكسار

استنبط قانون الانكسار من خلال دراسة هندسة جبهة الأمواج

#### خطة الحل

بالنظر إلى **الشكل 29.1**، وهو تكبير **للشكل 28.1**، والذي يُظهر جبهة الموجة العارضة، التي تصل إلى السطح عند النقطة **A** فقط، في حين لا تزال النقطة **B** ضمن الوسط **1**، بينما تستغرق الموجة القصيرة الفترة الزمنية  $\Delta t$  لتصل من النقطة **B** إلى مثلتها **B'** على السطح بسرعة  $v_1 = c / n_1$ ، ويلزم للموجة القصيرة، لتنتقل من النقطة **A** إلى الوسط **2** مسافة قدرها  $AA' = v_2 \Delta t$ ، حيث  $v_2 = c / n_2$ . لاحظ أنه في هذا المثال،  $v_2$  أبطأ من  $v_1$  لأن  $n_2 > n_1$ .



**الشكل 29.1** الشكل الهندسي لقانون الانكسار من الوسط 1 إلى الوسط 2.

### الحل

تكون القطعة المستقيمة  $AB'$  مشتركة بين كل من المثلث  $ABB'$  داخل الوسط 1 والمثلث  $AA'B'$  داخل الوسط 2. لاحظ من الشكل الهندسي، أن الزاوية  $\angle BAB'$  تساوي زاوية الورد  $\theta_1$ . وبالمثل، تساوي الزاوية  $\angle ABA'$  الزاوية  $\theta_2$ . يتم استنتاج طول  $AB'$  بطريقتين:

$$AB' = \frac{BB'}{\sin\theta_1} = \frac{AA'}{\sin\theta_2}$$

عند قلب المعادلة السابقة واستبدال كل من  $AA' = c\Delta t / n_2$  من الأعلى، وبالمثل  $BB' = c\Delta t / n_1$ ، نحصل على:

$$\frac{\sin\theta_1}{c\Delta t/n_1} = \frac{\sin\theta_2}{c\Delta t/n_2}$$

فإذا تم حذف المقدار  $c\Delta t$  من المعادلة السابقة، تُبسط هذه المعادلة في شكلها المألوف:

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$$

### ملاحظة

على الرغم من أن قانون الانكسار قد تم إنشاؤه تجريبياً بواسطة العالم سنيل، ودُكر في فقرة **الانكسار**، إلا إن اشتقاق هذا القانون هنا يتطلب استخدام مبدأ هيغنز وفهم أن سرعة الضوء تتباين بتباين الأوساط التي يمر فيها الضوء.

**5.1** تحقق من فهمك في المثال 6.1، كان لدينا  $n_1 < n_2$ ، فإذا انخفضت قيم  $n_2$  بحيث تكون  $n_1 > n_2$ ، وسرعة الضوء في

الوسط 2 أسرع من الوسط 1، ماذا سيحدث لطول  $AA'$ ؟ وماذا سيحدث لجبهة الموجة  $A'B'$  واتجاه الشعاع المنكسر؟

يعرض هذا التطبيق الصغير (<https://openstaxcollege.org/l/21walfedaniref>) المصمم من قبل وولتر فندت **Walter**

**Fendt** رسماً متحركاً لكل من الانعكاس والانكسار من خلال استخدام أمواج هيغنز القصيرة **Huygens's wavelets** أثناء التحكم في الوسائط (البارامترات). تأكد من النقر على "الخطوة التالية" لعرض هذه الأمواج. يمكنك رؤية جبهات الموجة المنعكسة والمنكسرة.

### الحيود (الانعراج)

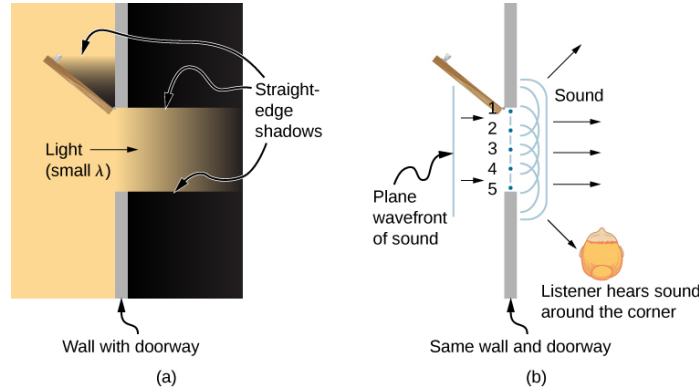
ماذا يحدث عندما تمر موجة من خلال فتحة، مثل الضوء الساطع من خلال الباب المفتوح في غرفة مظلمة؟ بالنسبة للضوء، نلاحظ



ظلاً حاداً من المدخل على أرضية الغرفة، ولا ينحني أي ضوء مرئي حول الزوايا إلى أجزاء أخرى من الغرفة. أما عندما يمر الصوت عبر الباب، فنسمع ذلك في كل مكان في الغرفة، وبالتالي نلاحظ ذلك الصوت ينتشر عندما يمر من خلال هذه الفتحة **(الشكل 30.1)**. ما هو الفرق بين سلوك الأمواج الصوتية ومثيلاتها الضوئية في هذه الحالة؟ الجواب هو أن الضوء له أطوال موجية قصيرة للغاية ويؤدي دور الأشعة. أما الصوت فيتمتع بأطوال موجية من مرتبة مقياس الباب والانحناءات حول الزوايا (فيذا كان تردد الصوت مقداره **1000 Hz**، فإن طول الموجة الصوتية يساوي:

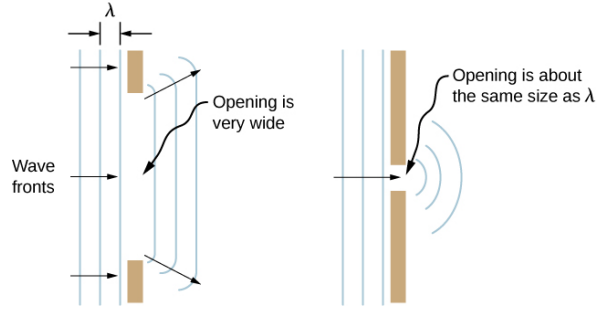
$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{330m/s}{1000s^{-1}} = 0.33m$$

أي بنحو ثلاث مرات أصغر من عرض مدخل الباب).



**الشكل 30.1 (a)** الضوء الذي يمر عبر المدخل يصنع مخططاً حاداً على الأرض. ولما كان طول موجة الضوء صغيراً جداً مقارنةً بمقياس الباب، فهو يؤدي دور الأشعة. **(b)** الأمواج الصوتية تنحني في جميع أنحاء الغرفة، أي تأثير الموجة، ذلك لأن طولها الموجي يكون مماثلاً لمقياس الباب.

إذا مررنا الضوء من خلال فتحات أصغر كالشقوق مثلاً، يمكننا استخدام مبدأ هيغنز لمشاهدة أن الضوء ينحني كما هو الحال في الصوت **(الشكل 30.1)**. يُسمى انحناء موجة حول حواف فتحة أو عقبة بالحيود (الانعراج). والحيود هو عبارة عن ميزة للموجة، ويحدث لجميع أنواع الأمواج. فإذا لوحظ توافر حيود لظاهرة ما، فإنه دليل على أن هذه الظاهرة عبارة عن موجة. وبالتالي، فإن الحيود الأفقي لشعاع الليزر، بعد عبوره الشقوق في **الشكل 30.1**، هو دليل على أن الضوء هو عبارة عن موجة. سوف تتعلم عن الحيود مزيد من التفصيل في الفصل المخصص **للحيود**.



**الشكل 31.1** تطبيق مبدأ هيغنز على جبهة موجة مستوية تصدم فتحة. تتحني حواف جبهة الموجة بعد مرورها خلال الفتحة، وتسمى هذه العملية الحيود. ويبلغ مقدار الانحناء أقصاه عندما تكون الفتحة صغيرة، وبما يتفق مع الحقيقة، والتي تكمن في أن خصائص الموجة تكون أكثر وضوحاً عندما تحدث تفاعلات متبادلة مع الكائنات التي تتمتع بالمقاس نفسه لطول الموجة.

## 7.1 | الاستقطاب Polarization

### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- توضيح التغير في الشدة عند مرور الضوء المستقطب عبر مرشح الاستقطاب
- حساب تأثير الاستقطاب من خلال الانعكاس وزاوية بروستر Brewster's angle
- وصف تأثير الاستقطاب عن طريق الانتثار
- شرح استخدام المواد المقطبة في أجهزة مثل شاشات LCD

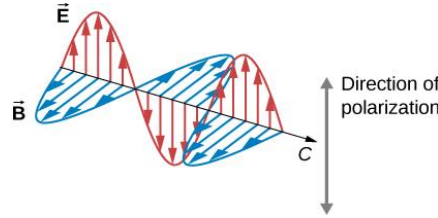
النظارات الشمسية المستقطبة مألوفة لدى معظمنا. وتتمتع هذه النظارات بمقدرة خاصة على خفض وهج الضوء المنعكس من الماء أو الزجاج (**الشكل 32.1**). ولديها هذه المقدرة بسبب الخاصية الموجية للضوء، وتسمى **الاستقطاب**. ما هو الاستقطاب؟ كيف يتم إنتاجه؟ وما بعض استخداماته؟ ترتبط الإجابات عن هذه الأسئلة بالخاصية الموجية للضوء.



**الشكل 32.1** توضح هاتان الصورتان لنهر تأثير مرشح الاستقطاب في خفض الوهج من الضوء المنعكس من سطح الماء. تم التقاط الجزء (b) من هذا الشكل باستخدام مرشح الاستقطاب، بينما الجزء (a) لم يكن كذلك. وكنتيجة، يُشاهد انعكاس السحب والسماء في الجزء (a)، بينما لا يُشاهد ذلك في الجزء (b). تُعدُّ النظارات الشمسية المقطبة مفيدة بشكلٍ خاص على الثلج والماء. (الائتمان a و b: تعديلات في العمل من قبل "أميثشز" / ويكيبيديا كومنز)  
(credit a and credit b: modifications of work by "Amithshs"/Wikimedia Commons)

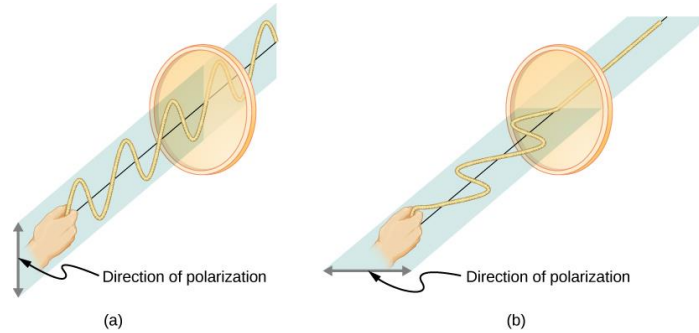
## قانون مالوس Malus's Law

يُعدُّ الضوء أحد أنواع الأمواج الكهرومغناطيسية (EM). وكما لوحظ في الفصل السابق حول **الأمواج الكهرومغناطيسية** (<http://cnx.org/content/m58495/latest>)، أن الأمواج الكهرومغناطيسية (EM) عبارة عن أمواج عرضية تتكون من حقلين كهربائي ومغناطيسي، والتي تهتز عمودياً على اتجاه الانتشار (**الشكل 33.1**). ومع ذلك، وبشكلٍ عام، لا توجد اتجاهات خاصة للاهتزازات في الحقلين الكهربائي والمغناطيسي؛ إذ يهتز في أي مستوٍ موجه بشكل عشوائي وعمودي على اتجاه الانتشار. ويُعدُّ الاستقطاب السمة التي تشير إلى أن اهتزازات الموجة تتمتع باتجاه محدد بالنسبة لاتجاه انتشار الموجة. (وهذا ليس هو نوع الاستقطاب نفسه، والذي تمت مناقشته لفصل الشُّحن). ويقال إن الأمواج، التي تتمتع بمثل هذا الاتجاه، تكون **مستقطبة**. أما بالنسبة للموجة الكهرومغناطيسية EM، فنحن نحدد اتجاه الاستقطاب ليكون هذا الاتجاه موازياً للحقل الكهربائي. وبالتالي، يمكننا التفكير في أسهم الحقل الكهربائي بهدف إظهار اتجاه الاستقطاب كما هو موضح في **الشكل 33.1**.



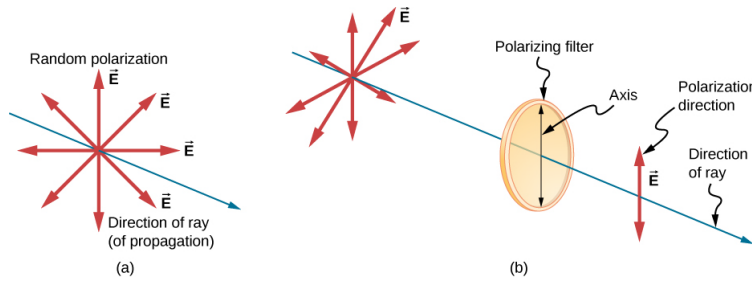
**الشكل 33.1:** تشبه الموجة الكهرومغناطيسية EM مثلتها الضوئية، فهي موجة عرضية. ويكون كلُّ من الحقل الكهربائي ( $\vec{E}$ ) ومثيله المغناطيسي ( $\vec{B}$ ) عموديين على اتجاه الانتشار. ويُعدُّ اتجاه استقطاب الموجة اتجاه الحقل الكهربائي.

لمزيد من البحث، خذ بالحسبان الأمواج العرضية في الحبال الموضحة في **الشكل 34.1**. تكون الاهتزازات في حبل واحد في مستوٍ عمودي، ويُقال إنها **مستقطبة عمودياً**. أما تلك الاهتزازات الموجودة في الحبل الآخر في مستوٍ أفقي، فتكون **مستقطبة أفقياً**. فإذا تم وضع فتحة عمودية على الحبل الأول، فإن الأمواج تمر عبرها، في حين تمنع هذه الفتحة العمودية الأمواج المستقطبة أفقياً. أما بالنسبة إلى الأمواج الكهرومغناطيسية (EM)، فإن اتجاه الحقل الكهربائي يكون مماًثلاً للاضطرابات التي تحدث في الحبال.



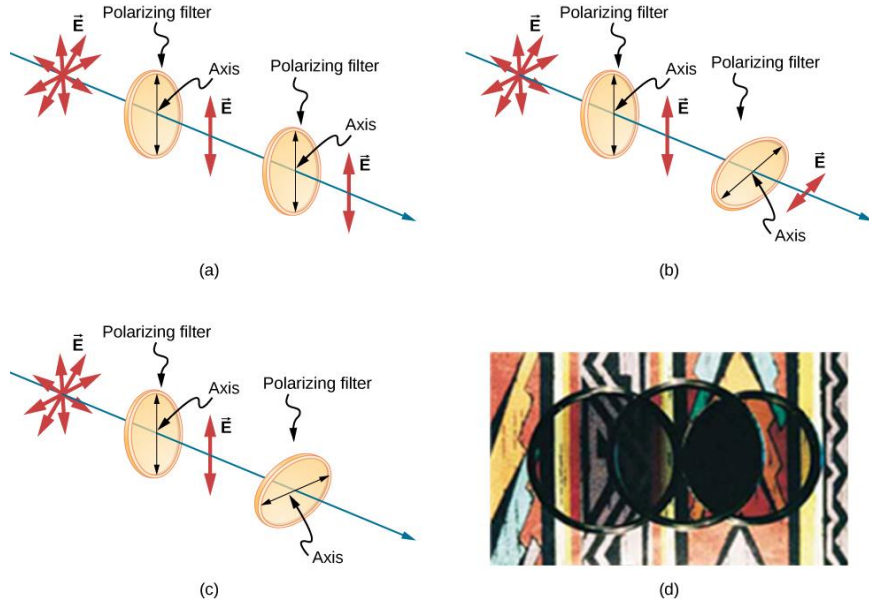
**الشكل 34.1:** الاهتزازات العرضية في حبل واحد (a) في مستوٍ عمودي، وتلك الموجودة في الحبل الآخر (b) في مستوٍ أفقي. يُقال إن الأول مستقطب عمودياً، والآخر يُقال أفقي الاستقطاب. تُمرَّر الفتحات العمودية الأمواج المستقطبة عمودياً وتحجب مثلتها المستقطبة أفقياً.

تنتج الشمس، والعديد من مصادر الإضاءة الأخرى، أمواجاً لها حقول كهربائية في اتجاهات عشوائية (**الشكل 35.1 (a)**). ويقال إن هذا الضوء غير مستقطب، لأنه يتكون من العديد من الأمواج وفي جميع الاتجاهات الممكنة للاستقطاب. تُعدُّ المواد بولارويد - والتي اخترعها إدوين لاند **Edwin Land** - مؤسس شركة بولارويد، - بمنزلة شقوق (أو فتحات) استقطاب للضوء، إذ تسمح للاستقطاب بالمرور باتجاه واحد فقط. وتتكون المرشحات المستقطبة من جزئيات طويلة تنحاز في اتجاه واحد. فإذا فكرنا في الجزئيات على أنها العديد من الشقوق المماثلة لتلك الموجودة في الحبال المهترزة، يمكننا أن نفهم لماذا لا يستطيع العبور إلا الضوء المتمتع باستقطاب محدد. ويكون محور مرشح الاستقطاب هو الاتجاه، والذي على طوله، يمر مرشح الحقل الكهربائي للموجة الكهرومغناطيسية **EM**.



**الشكل 35.1** يمثل السهم النحيل شعاع الضوء غير المستقطب. أما الأسهم الغامقة فتُمثل اتجاه استقطاب الأمواج الفردية، والتي تتكون منها الأشعة. (**a**) إذا كان المصباح غير مستقطب، فإن الأسهم تُشير في جميع الاتجاهات. (**b**) يحتوي مرشح الاستقطاب على محور استقطاب يعمل بمنزلة شق تمر عبره الحقول الكهربائية بالتوازي مع اتجاه هذا المحور. ويُعرّف اتجاه استقطاب الموجة الكهرومغناطيسية **EM** على أنه اتجاه حقلها الكهربائي.

يوضح **الشكل 36.1** تأثير مرشحين مستقطبين على الضوء غير المستقطب في الأصل. يستقطب المرشح الأول الضوء على طول محوره. وعندما تكون محاور المرشحين الأول والثاني بمحاذاة بعضها (متوازية)، عندها فإن كامل الضوء المستقطب، الذي يعبر المرشح الأول، سوف يعبر المرشح الثاني أيضاً. فإذا جرى تدوير مرشح الاستقطاب الثاني، فإن مكون الضوء، الذي يكون موازياً لمحور المرشح الثاني، هو الذي يمكن أن يعبر فقط. وعندما تكون المحاور عمودية، لا يتم تمرير أي ضوء بواسطة المرشح الثاني.



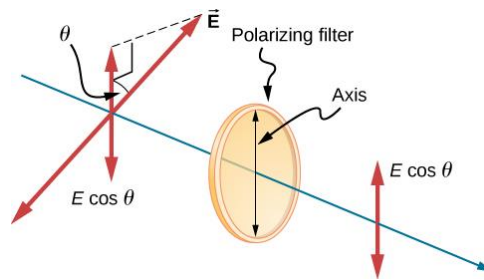
**الشكل 36.1** تأثير تدوير مرشحي استقطاب، حيث يستقطب الأول الضوء. (a) يمر كامل الضوء المستقطب من قبل مرشح الاستقطاب الثاني، لأن محوره موازٍ لمحور الأول. (b) ولما تم تدوير المرشح الثاني، فإن جزءاً من الضوء يتم تمريره فقط. (c) عندما يكون المرشح الثاني عمودياً على الأول، لا يتم تمرير أي ضوء. (d) في هذه الصورة، وُضع مرشح الاستقطاب فوق اثنين آخرين، بحيث يكون محور هذا المرشح عمودياً على المرشح الموجود على اليمين (المنطقة العاتمة)، وبالتوازي مع المرشح على اليسار (المنطقة المضيئة).

(الائتمان د: تعديل العمل من قبل ب. ب. أرون) (credit d: modification of work by P.P. Urone)

يتم تمرير مكون الموجة الكهرومغناطيسية EM الموازي لمحور المرشح فقط. دعونا ندعو  $\theta$  هي الزاوية بين اتجاه الاستقطاب ومحور المرشح. فإذا كان الحقل الكهربائي يتمتع بمطال E، فإن الجزء المرسل من الموجة يتمتع بالمطال  $E \cos \theta$  (الشكل 37.1). ولما كانت شدة الموجة تتناسب مع مربع مطالها، فإن شدة الموجة المنقولة I ترتبط بالموجة الساقطة (الواردة) من خلال المعادلة التالية:

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (1.6)$$

حيث:  $I_0$  هي شدة الموجة المستقطبة قبل المرور عبر المرشح. وهذه المعادلة معروفة بقانون مالوس.



**الشكل 37.1** يمر مرشح الاستقطاب فقط المكون من الموجة الموازي لمحوره، خافضاً من شدة أي ضوء لا يُستقطب موازياً لمحوره.



تساعد الرسوم المتحركة للفيزياء مفتوحة المصدر (<https://openstaxcollege.org/l/21phyanielefie>)، تساعدك على تصور أسهم الحقل الكهربائي وكأنها الضوء الذي يواجه مرشحاً مستقطباً. يمكنك تدوير المرشح - لاحظ أن الزاوية المعروضة هي بالراديان. يمكنك أيضاً تدوير الرسوم المتحركة لتتحليل ثلاثي الأبعاد.

## مثال 7.1

### حساب تخفيض شدة الضوء بواسطة مرشح الاستقطاب

ما الزاوية المطلوبة بين اتجاه الضوء المستقطب ومحور مرشح الاستقطاب للحد من شدته بنسبة 90.0%؟

#### خطة الحل

عندما يتم خفض الشدة بنسبة 90.0%، يبقى 10.0% أو 0.100 من قيمتها الأصلية. وهذا يعني أن  $I = 0.100I_0$ . باستخدام هذه المعلومات، يمكن استخدام المعادلة  $I = I_0 \cos^2 \theta$  لإيجاد الزاوية المطلوبة.

#### الحل

بحل المعادلة  $I = I_0 \cos^2 \theta$  من أجل  $\cos \theta$  واستبدالها بالعلاقة التي تربط ما بين  $I$  و  $I_0$  نجد أن:

$$\cos \theta = \sqrt{\frac{I}{I_0}} = \sqrt{\frac{0.100 I_0}{I_0}} = 0.3162$$

وبالتالي تكون قيمة  $\theta$  مساوية:

$$\theta = \cos^{-1} 0.3162 = 71.6^\circ$$

#### ملاحظة

هناك حاجة إلى زاوية كبيرة إلى حد ما بين اتجاه الاستقطاب ومحور المرشح بغية خفض شدة الضوء لتصل إلى القيمة 10.0% من قيمتها الأصلية. ويبدو هذا معقولاً بناءً على تجربة الأفلام المستقطبة. وإثماً المثيرة للاهتمام أنه عند الزاوية 45 درجة، تنخفض الشدة إلى 50% من قيمتها الأصلية. لاحظ أن 71.6 درجة تعني أنه يبقى 18.4 درجة لخفض الشدة إلى الصفر، وأنه عند الزاوية 18.4 درجة، يتم تقليل الشدة إلى 90.0% من القيمة الأصلية، وذلك من خلال إعطاء دليل على التناظر.



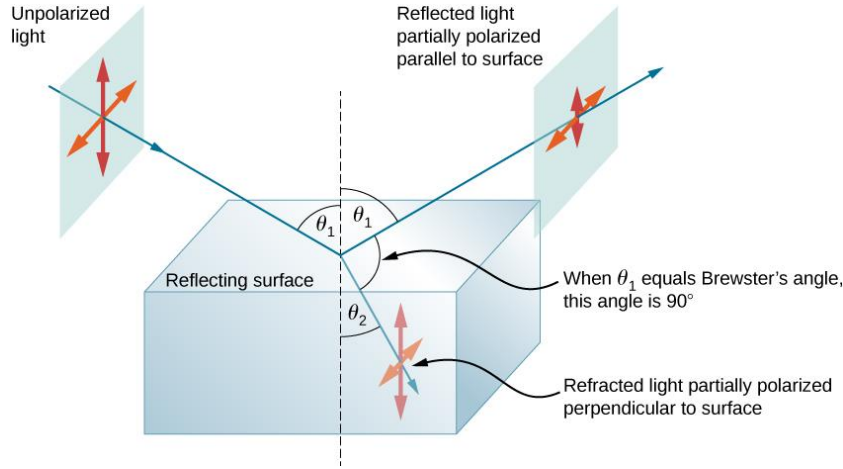
6.1 تحقق من فهمك: فعلى الرغم من أننا لم نحدد الاتجاه في المثال 7.1، دعنا نقول أنه جرى تدوير مرشح الاستقطاب في اتجاه عقارب الساعة بمقدار 71.6 درجة بهدف خفض شدة الضوء بنسبة 90.0%. ماذا سيكون مقدار تخفيض الشدة إذا تم تدوير مرشح الاستقطاب في اتجاه عقارب الساعة بمقدار 71.6 درجة؟

### الاستقطاب بواسطة الانعكاس

الآن، ربما يمكنك تخمين أن النظارات الشمسية المستقطبة تقلل من وهج الضوء المنعكس، لأن هذا الضوء مستقطب. ويمكنك التحقق من ذلك بنفسك عن طريق حمل النظارات الشمسية المستقطبة أمامك وتدويرها أثناء النظر إلى الضوء المنعكس من الماء أو الزجاج. وأثناء تدوير النظارات الشمسية، ستلاحظ أن الضوء ساطع وقاتم، لكن ليس أسود تماماً. وهذا يعني أن الضوء المنعكس مستقطب جزئياً، ولا يمكن حظره تماماً بواسطة مرشح الاستقطاب.

يوضح الشكل 38.1 ما يحدث عندما ينعكس الضوء غير المستقطب من السطح. ينكسر الضوء المستقطب عمودياً بشكل تفضيلي على السطح، بحيث يتم ترك الضوء المنعكس أكثر استقطاباً أفقياً. وتقع أسباب هذه الظاهرة خارج نطاق هذا النص، ولكن من السهل أن نتذكر أن اتجاه الاستقطاب يمكن تمثيله على شكل سهم. ويمثل الاستقطاب العمودي بسهم عمودي على السطح، وأكثر من ذلك من المرجح أن يصطدم ولا ينعكس. ويمثل الاستقطاب الأفقي بسهم يرتد على جانبه، ومن المرجح أن يكون

منعكساً. تحظر النظارات الشمسية ذات المحاور العمودية الضوء المنعكس أكثر من الضوء غير المستقطب من المصادر الأخرى.



**الشكل 38.1** الاستقطاب بواسطة الانعكاس. يحتوي الضوء غير المستقطب على كميات متساوية من الاستقطابين العمودي والأفقي. وبعد التفاعل مع السطح، يتم امتصاص المكونات العمودية أو انكسارها بشكل تفضيلي، تاركةً الضوء المنعكس أكثر استقطاباً أفقياً. ويُعدُّ هذا أقرب إلى السهام التي تصدم جانبيها وترتد عنها، في حين أن السهام الصادمة للقمم تذهب إلى السطح.

ولما كان جزءٌ من الضوء لا ينعكس، فإنه ينكسر، فإن مقدار الاستقطاب يعتمد على قرائن انكسار الأوساط المعنية. يمكن إثبات أن الضوء المنعكس مستقطب تماماً عندما تكون زاوية الانعكاس  $\theta_b$  معطاة بالعلاقة التالية:

$$\tan\theta_b = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.7)$$

حيث  $n_1$  قرينة انكسار الوسط، الذي يسير فيه الضوء الوارد والمنعكس، و  $n_2$  قرينة انكسار الوسط الذي يشكل السطح البيني العاكس للضوء. وتُعرف هذه المعادلة بقانون بروستر، وتعرف الزاوية  $\theta_b$  بزاوية بروستر، إذ سُمِّيت على اسم عالم الفيزياء الإسكتلندي، الذي اكتشفها في القرن التاسع عشر.

تظهر الرسوم المتحركة من الفيزياء مفتوحة المصدر (<https://openstaxcollege.org/l/21phyaniinref>) كلاً من الضوء الوارد والمنعكس والمنكسر على شكل أشعة وأمواج كهرومغناطيسية. حاول تدوير الرسوم المتحركة لتحصل على منظر ثلاثي الأبعاد، وحاول أيضاً تغيير زاوية ورود. ستلاحظ، بالقرب من زاوية بروستر، يصبح الضوء المنعكس مستقطباً للغاية.

## مثال 8.1

### حساب الاستقطاب بواسطة الانعكاس

(a) بأي زاوية سوف يُستقطب الضوء المتحرك في الهواء أفقياً بالكامل عندما ينعكس عن الماء؟ (b) وعندما ينعكس من الزجاج؟

### خطة الحل

كل ما نحتاجه لحل هذه المسائل هي قرائن الانكسار، إذ يتمتع الهواء بقرينة انكسار  $n_1 = 1.00$ ، ويتمتع الماء بقرينة  $n_2 = 1.333$ ، ويتمتع الزجاج بقرينة  $n_2 = 1.520$ . ويمكن أن تستخدم المعادلة  $\tan\theta_b = \frac{n_2}{n_1}$  لتحديد قيم  $\theta_b$  في كل حالة.

### الحل

(a) بإدخال المقادير المعروفة في المعادلة:

$$\tan\theta_b = \frac{n_2}{n_1}$$

نجد أن:

$$\tan\theta_b = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1.333}{1.00} = 1.333$$

وبحل هذه المعادلة من أجل الزاوية  $\theta_b$  نجد أن:

$$\theta_b = \tan^{-1}1.333 = 53.1^\circ$$

وبشكلٍ مماثل، نُحل المسألة بالنسبة لوسطَي الزجاج التاجي والهواء:


$$\tan\theta'_b = \frac{n'_2}{n_1} = \frac{1.520}{1.00} = 1.52$$

وهكذا نجد أن:

$$\theta'_b = \tan^{-1}1.52 = 56.7^\circ$$

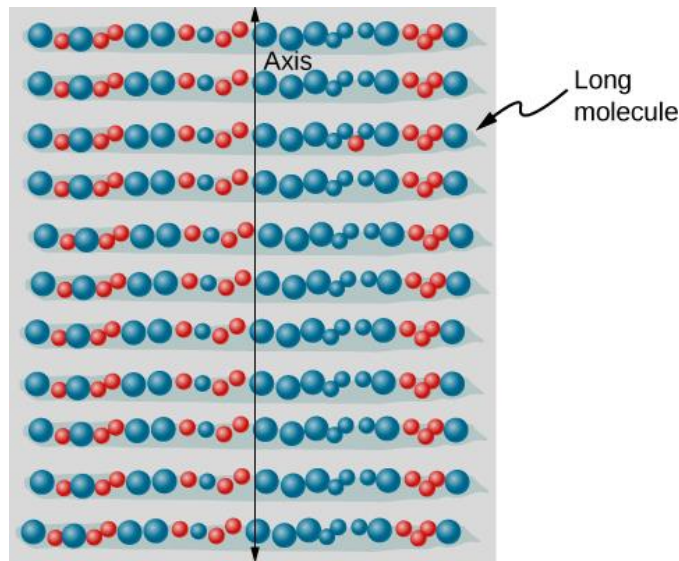
### ملاحظة

يمكن حجب الضوء المنعكس بهذه الزوايا كلياً من خلال مرشح استقطابي جيد، بحيث يكون محوره عمودياً. تكون زاوية بروستر في حالة الماء والهواء ماثلة لتلك في حالة الزجاج والهواء، وعندها تكون النظارات الشمسية فعالة بالقدر نفسه للضوء المنعكس من الماء أو الزجاج، وفي ظل ظروف ماثلة. ولا ينعكس ذلك الضوء الذي ينكسر في هذه الأوساط. لهذا، عندما تكون زاوية ورود مساوية لزاوية بروستر، يكون الضوء المنكسر مستقطباً قليلاً عمودياً. ولن يكون هذا الضوء مستقطباً عمودياً بشكلٍ كلي، ذلك لأنه لا ينعكس سوى جزء صغير من الضوء الساقط، ولهذا ينكسر مقدار كبير من الضوء المستقطب أفقياً.

 **7.1 تحقق من فهمك** لما يحدث لزاوية بروستر إذا كان الضوء الساقط الأصلي بالفعل مستقطباً عمودياً بنسبة 100%؟

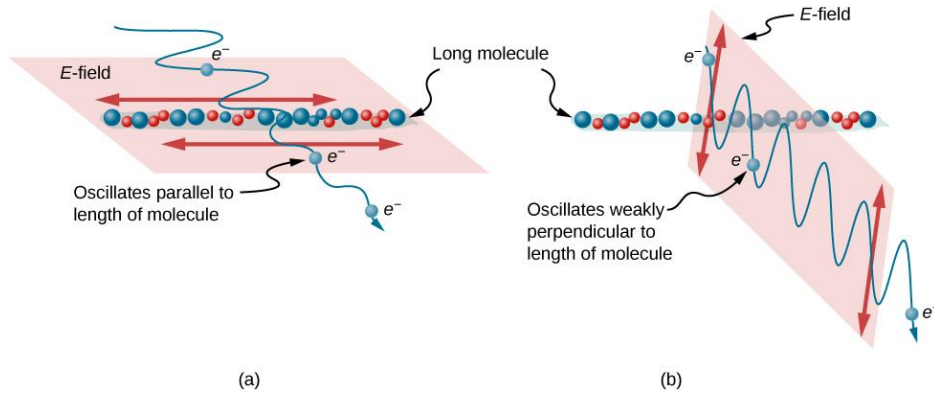
### تفسير مرشحات الاستقطاب من وجهة النظر الذرية

تتمتع مرشحات الاستقطاب بمحور استقطاب يعمل بمنزلة شق، حيث يمرر هذا الشق الأمواج الكهرومغناطيسية EM (أي الضوء المرئي في كثير من الأحيان)، والتي تحتوي على حقل كهربائي موازٍ للمحور. ويتم ذلك بتوافر جزيئات طويلة محاذية عمودياً للمحور كما هو موضح في الشكل 39.1.



**الشكل 39.1** جزيئات طويلة تكون محاذية عمودياً على محور مرشح الاستقطاب. وفي حالة وجود موجة كهرومغناطيسية EM، يكون مكون الحقل الكهربائي عمودياً على هذه الجزيئات المارة عبر المرشح، في حين يجري امتصاص المكون الموازي لهذه الجزيئات.



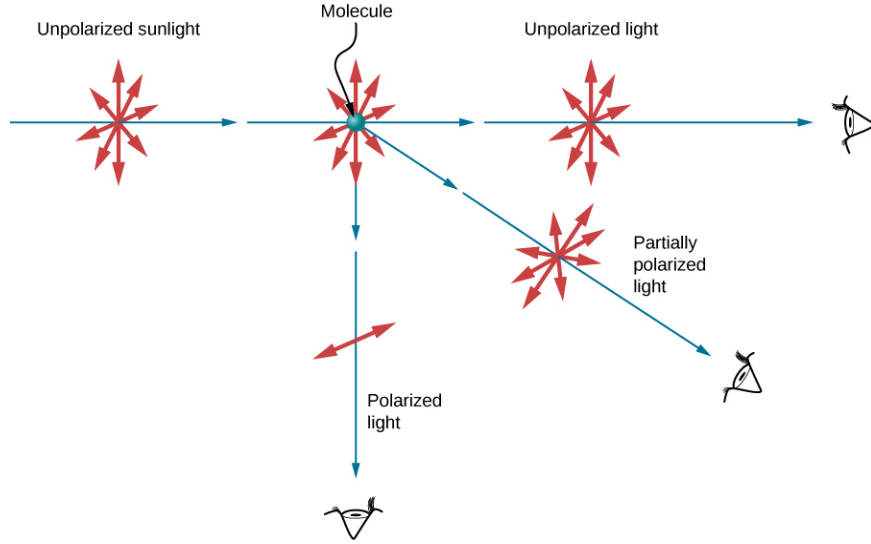


**الشكل 40.1** رسم تخطيطي لإلكترون في جزيء طويل يهتز موازياً للجزيء. ويسبب اهتزاز الإلكترون امتصاص طاقة والإقلال من شدة مكون الموجة الكهرومغناطيسية EM الموازية للجزيء.

يوضح **الشكل 40.1** كيفية امتصاص مكون الحقل الكهربائي الموازي للجزيئات الطويلة. تتألف الموجة الكهرومغناطيسية EM من حقول كهربائية ومغناطيسية مهتزة. ويكون الحقل الكهربائي قوياً مقارنةً مع الحقل المغناطيسي، وهو أكثر فاعلية في ممارسة القوة على الشحنات في الجزيئات. وتكون الإلكترونات هي الجزيئات المشحونة الأكثر تضرراً، ذلك لأن كتل الإلكترون صغيرة. فإذا تم إجبار الإلكترون على الاهتزاز، يمكنه امتصاص الطاقة من الموجة الكهرومغناطيسية EM. وهذا يقلل من مجال الموجة، وبالتالي يقلل من شدتها. في الجزيئات الطويلة، يمكن للإلكترونات الموازية للجزيء، أن تهتز بسهولة أكثر مما لو كانت في الاتجاه العمودي على هذا الجزيء. ترتبط الإلكترونات بالجزيء وهي أكثر تقيداً في حركتها العمودية على هذا الجزيء. وبالتالي، يمكن للإلكترونات أن تمتص الأمواج الكهرومغناطيسية EM التي يكون أحد مكونات حقلها الكهربائي موازياً للجزيء. وتكون الإلكترونات أقل استجابة للحقول الكهربائية العمودية على الجزيء، وتسمح لهذه الحقول بالمرور. وبالتالي، فإن محور مرشح الاستقطاب يكون عمودياً على طول الجزيء.

### الاستقطاب بالتبعثر

إذا كنت تحمل نظارة شمسية مستقطبة أمامك، وقم بتدويرها أثناء النظر إلى السماء الزرقاء، فسترى السماء مشرقة وقائمة. ويُعد ذلك مؤشراً واضحاً على أن الضوء المتبعثر بالهواء مستقطب جزئياً. ويساعد **الشكل 41.1** في توضيح كيفية حدوث ذلك. لما كان الضوء عبارة عن موجة كهرومغناطيسية EM عرضية، فإنه يهز إلكترونات جزيئات الهواء، التي تكون عمودية على اتجاه حركة هذا الضوء. وعندما ستشع هذه الإلكترونات وكأنها هوائيات صغيرة. ولما كانت هذه الإلكترونات تهتز بشكل عمودي على اتجاه أشعة الضوء، فإنها تنتج إشعاع موجة كهرومغناطيسية EM مُستقطب عمودياً على اتجاه الشعاع. وعندما يُعرض الضوء على طول خط عمودي على الشعاع الأصلي كما في الشكل، فإنه لا يمكن أن يكون هناك استقطاب في الضوء المبعثر الموازي للشعاع الأصلي، لأن ذلك يتطلب أن يكون الشعاع الأصلي عبارة عن موجة طولية. أما على طول الاتجاهات الأخرى، فإنه يمكن إسقاط مكون الاستقطاب الآخر على طول خط البصر، وعندما يكون الضوء المبعثر مستقطباً جزئياً فقط. علاوة على ذلك، يمكن أن يجلب الانتثار المتعدد الضوء إلى عينيك من اتجاهات أخرى، ويمكن أن يحتوي هذا الانتثار على استقطابات مختلفة.



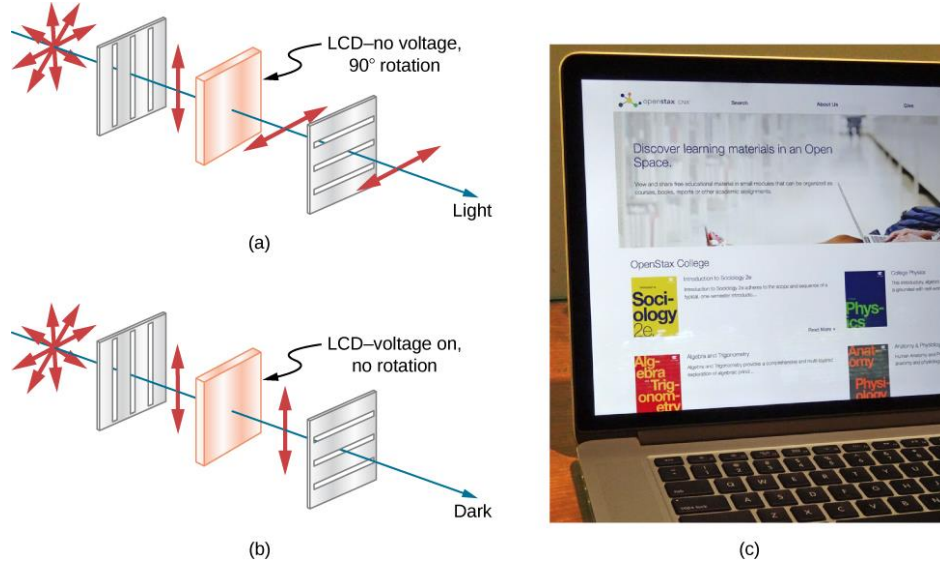
**الشكل 41.1** الاستقطاب بالتبعثر. يتبعثر الضوء غير المستقطب من جزيئات الهواء ليهز الإلكترونات العمودية على اتجاه الشعاع الأصلي. وبالتالي، يتمتع الضوء المبعثر باستقطاب عمودي على الاتجاه الأصلي وليس موازياً له.

يمكن تعميق صور السماء عن طريق مرشحات الاستقطاب، وهي خدعة يستخدمها العديد من المصورين لجعل الغيوم أكثر إشراقاً بواسطة التباين (التغاير). يمكن للتبعثر من جزيئات أخرى، مثل الدخان أو الغبار، أن يقطب الضوء. ويمكن للكشف عن الاستقطاب، المتبعثر في الأمواج الكهرومغناطيسية المنتشرة EM، أن يكون أداة تحليلية مفيدة في تحديد مصدر التبعثر. يتم استخدام مجموعة من المؤثرات البصرية في النظارات الشمسية. فإلى جانب كونها مُستقطبة، قد تحتوي النظارات الشمسية على أصباغ ملونة فيها، في حين يستخدم الآخرون إما طلاء غير عاكس أو عاكساً. التطور الأخير هو العدسات الفوتوكرومية (photochromic)، التي تكون غامقة في ضوء الشمس وتصبح شفافة في داخل المنازل. يتم تضمين العدسات الفوتوكرومية جزيئات ميكروبلورية عضوية، والتي تغير خصائصها عند التعرض للأشعة فوق البنفسجية في ضوء الشمس، ولكنها تصبح واضحة في الإضاءة الاصطناعية دون الأشعة فوق البنفسجية.

### البلورات السائلة وآثار الاستقطاب الأخرى في المواد

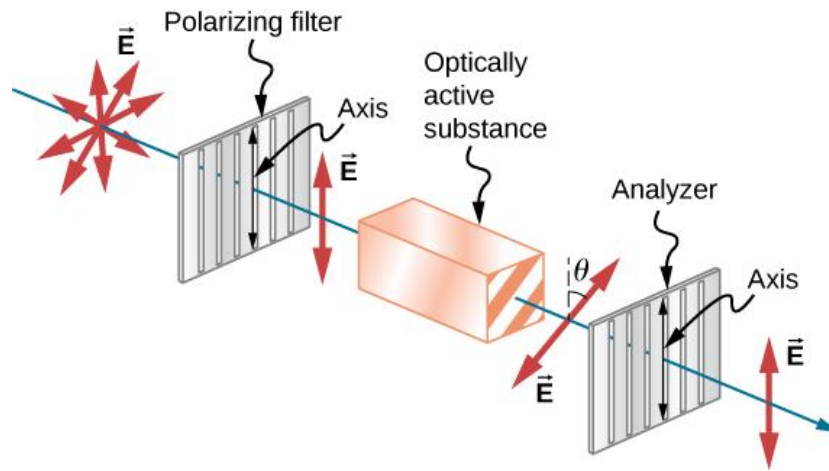
على الرغم من أنك بلا شك على دراية بالشاشات البلورية السائلة الموجودة في الساعات والآلات الحاسبة وشاشات الكمبيوتر والهواتف المحمولة وأجهزة التلفزيون ذات الشاشات المسطحة والعديد من الأجهزة الأخرى، فإنك قد لا تكون مدركاً أنها تستند إلى الاستقطاب. سُمّيت البلورات السائلة بهذا الاسم لأن جزيئاتها يمكن محاذاها حتى لو كانت في سائل. وتتمتع البلورات السائلة بخاصية أنها يمكن أن تُدور استقطاب الضوء الذي يعبر من خلالها بمقدار 90 درجة. علاوة على ذلك، يمكن حظر هذه الخاصية عن طريق تطبيق كمون كما هو موضح في **الشكل 42.1**. من الممكن معالجة هذه الخاصية بسرعة وفي مناطق صغيرة محددة جيداً لإنشاء أنماط التباين التي نراها في العديد من أجهزة LCD.

في أجهزة تلفزيون LCD ذات الشاشات المسطحة يتم توليد ضوءاً كبيراً في الجزء الخلفي من التلفزيون. وينتقل هذا الضوء إلى الشاشة الأمامية من خلال الملايين من وحدات صغيرة تُسمى بكسل (عناصر الصورة). ويظهر في **الشكل 42.1 (a) و (b)** إحدى هذه الشاشات. وتتمتع كل واحدة منها بثلاث خلايا مع مرشحات حمراء أو زرقاء أو خضراء، إذ يتم التحكم في كل منها بشكل مستقل. وعند إيقاف تشغيل الكمون عبر البلورة السائلة، تُمرر البلورة السائلة الضوء من خلال مرشح معين. ويمكننا تغيير تباين الصورة عن طريق تغيير مقدار الكمون المطبق على البلورة السائلة.



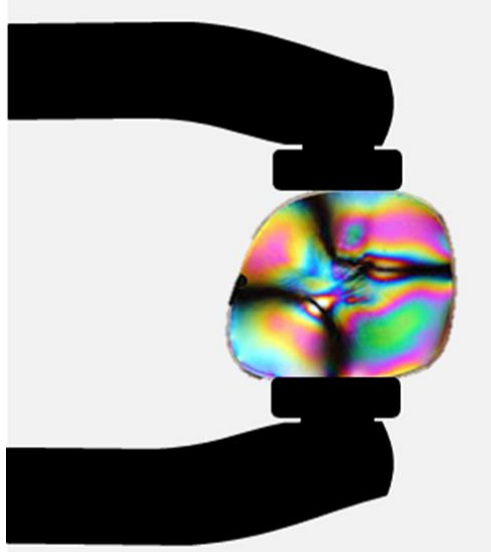
**الشكل 42.1 (a)** يتم تدوير الضوء المستقطب بمقدار 90 درجة بواسطة بلورة سائلة، ثم يتم تمريره عبر مرشح استقطاب يكون محوره عمودي على اتجاه الاستقطاب الأصلي. **(b)** عندما يتم تطبيق كمن على البلورة السائلة، فإن الضوء المُستقطب لا يتم تدويره، وإنما يتم حظره بواسطة المرشح، مما يجعل المنطقة مظلمة مقارنةً مع المناطق المحيطة بها. **(c)** يمكن جعل شاشات البلورة السائلة متمتعة بلون مميز وصغيرة وسريعة بما يكفي لاستخدامها في أجهزة الكمبيوتر المحمولة وأجهزة التلفزيون. (الائتمان (c): تعديل العمل من قبل جين ويتني).  
(credit c: modification of work by Jane Whitney)

يقوم العديد من البلورات والمخالييل بتدوير مستوي استقطاب الضوء المار بها. ويقال إن هذه المواد نشطة ضوئياً. ومن الأمثلة على ذلك ماء السكر والأنسولين والكولاجين (**الشكل 43.1**). وبالإضافة إلى الاعتماد على نوع المادة، يعتمد مقدار الدوران واتجاهه على عدة عوامل أخرى. ومن بين هذه العوامل: تركيز المادة والمسافة التي ينتقل الضوء خلالها وطول موجة الضوء. ويرجع سبب النشاط البصري إلى وجود عدم تناظر في ترتيب جزيئات المادة، مثل كونها حلزونية. وهكذا يمكن أن تُستخدم قياسات دوران الضوء المستقطب المار عبر المواد لقياس التراكيز، وهي تقنية قياسية للسكريات. ويمكن أن تعطي أيضاً معلومات عن أشكال الجزيئات، مثل البروتينات والعوامل التي تؤثر في أشكالها، مثل درجة الحرارة ودرجة الحموضة pH.



**الشكل 43.1** النشاط البصري هو قدرة بعض المواد على تدوير مستوي استقطاب الضوء المار بها. ويتم الكشف عن الدوران باستخدام مرشح الاستقطاب أو جهاز تحليل.

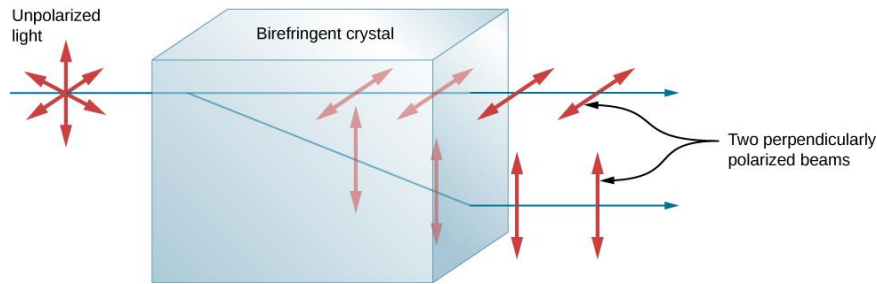
يصبح كلٌّ من الزجاج والبلاستيك ناشطين بصرياً عند الضغط عليهما (أي تعريضهما لإجهاد): فكلما زاد الضغط، زاد التأثير. يمكن القيام بتحليل الإجهاد البصري على الأشكال المعقدة من خلال صنع نماذج بلاستيكية من هذه الأشكال ومراقبتها من خلال مرشحات متقاطعة كما هو مبين في **الشكل 44.1**. من الواضح أن هذا التأثير يعتمد على كلٍ من طول الموجة ومقدار الكمون المطبق. وتستخدم التابعة على الطول الموجي في بعض الأحيان لأغراض فنية أيضاً.



**الشكل 44.1** تحليل الإجهاد البصري لعدسات بلاستيكية وُضعت بين مستطبين متقاطعين.

(الائتمان: "إنفوبرو"/ ويكيبيديا العموم) (credit: "Infopro"/Wikimedia Commons)

هناك ظاهرة أخرى مثيرة للاهتمام مرتبطة مع الضوء المستقطب، وتكمن في قدرة بعض البلورات على تجزئة حزمة غير مستقطبة للضوء إلى اثنتين من الحزم المستقطبة. ويحدث هذا لأن البلورة تتمتع بقيمة واحدة لقرينة انكسار الضوء المستقطب، ولكنها تتمتع بقيم مختلفة لقرينة انكسار الضوء المستقطب في الاتجاه العمودي، بحيث يكون كل مكون لديه زاوية الانكسار الخاصة به. يقال إن مثل هذه البلورات ذات انكسار مزدوج، ولهذا فإن كل مركب يتمتع بزاوية انكسار خاصة به. عند محاذاها بشكل صحيح، تكون عموديتين سوف تظهر الحزم المستقطبة من البلورة (**الشكل 45.1**). يمكن استخدام بلورات ذات انكسار مزدوج لإنتاج حزم مستقطبة من ضوء غير مستقطب. تمتص بعض المواد ثنائية الانكسار بشكل تفضيلي أحد المستقطبات. وتُسمى هذه المواد مزدوجة اللون، ويمكن أن ينتج الاستقطاب من خلال هذا الامتصاص التفضيلي. هذا هو الأساس في كيفية عمل مرشحات الاستقطاب وغيرها من المستقطبات.



**الشكل 45.1** مواد ذات انكسار مزدوج، مثل الكالسييت المعدنية، تقسم أشعة الضوء غير المستقطبة إلى قسمين يتمتcan باثنتين من القيم المختلفة لقرينة الانكسار.

## مراجعة الفصل الأول

### الكلمات المفتاحية

انكسار مزدوج: يشير إلى البلورات التي تقسم شعاع الضوء غير المستقطب إلى حزمتين. زاوية بروستر: هي الزاوية التي يكون فيها الضوء المنعكس مستقطباً تماماً. قانون بروستر  $\tan \theta_b = \frac{n_2}{n_1}$  ، حيث  $n_1$  هي قرينة انكسار الوسط، الذي يحوي الشعاع الوارد ومثيله المنعكس،  $n_2$  هي قرينة انكسار الوسط الذي يشكل السطح البيني الذي يعكس الضوء. العاكس الزاوي: جسم يتكون من سطحين (أو ثلاثة) عاكسة ومتعامدة فيما بينها، بحيث ينعكس الضوء، الداخِل إلى هذا العاكس، عائداً وبشكلٍ موازٍ تماماً للاتجاه الذي ورد منه. الزاوية الحرجة: هي زاوية الورود للشعاع الضوئي، التي تنتج زاوية انكسار تساوي 90 درجة. اتجاه الاستقطاب: هو الاتجاه الموازي للحقل الكهربائي لأمواج كهرومغناطيسية EM. التشتت: هو تبدد الضوء إلى طيف من أطواله الموجية. الألياف البصرية: هو مجال لدراسة انتقال الضوء عبر ألياف من البلاستيك أو الزجاج مطبقاً مبدأ الانعكاس الداخلي الكلي. البصريات الهندسية: هي فرع من البصريات التي تتعامل مع الجانب الشعاعي للضوء. المستقطب أفقياً: هي تلك الاهتزازات المستقطبة في مستوى أفقي. مبدأ هيغنز: يكمن في أن كل نقطة على جبهة الموجة تشكل مصدراً للأمواج القصيرة، التي تنتشر خارج الجبهة في الاتجاه الأمامي وبالسرعَة نفسها للموجة؛ وتكون جبهة الموجة الجديدة عبارة عن ظل المستوي لجميع الأمواج القصيرة. قرينة الانكسار للمادة: هو نسبة سرعة الضوء في الفراغ (مكان مخلخل) إلى سرعته في المادة. قانون الانعكاس: زاوية الانعكاس للضوء تساوي زاوية الورود (السقوط). قانون الانكسار: عندما يعبر شعاع الضوء من وسط إلى آخر، فإنه يغير الاتجاه بمقدار يعتمد على كلٍ من قرينة الانكسار لكل وسط وزاويتي الورود والانكسار. قانون مالوس: حيث  $I_0$  هو شدة الموجة المستقطبة قبل مرورها عبر المرشح. النشاط البصري (الفاعلية البصرية) للمواد: تلك التي تقوم بتدوير مستوي استقطاب الضوء المار بها. الاستقطاب: صفة مميزة للضوء وتعني أن تتمتع اهتزازات الموجة باتجاه محدد بالنسبة إلى اتجاه انتشارها. مستقطب: تعني أن الأمواج الضوئية تتمتع باهتزازات باتجاه محدد لكلٍ من الحقلين الكهربائي والمغناطيسي. شعاع: عبارة عن خط مستقيم يتم إنشاؤه من نقطة ما. الانكسار: تغيير يحدث في اتجاه الشعاع الضوئي عندما يمر هذا الشعاع عبر مواد مختلفة. الانعكاس الداخلي الكلي: ظاهرة تحدث على الحدود بين وسطين، بحيث ينعكس كامل الضوء، ولا يحدث له أي انكسار. عدم الاستقطاب: يشير إلى الأمواج الضوئية المستقطبة عشوائياً. مستقطب عمودياً: يعني أن الاهتزازات موجودة في مستوى رأسي. بصريات الموجة: هي جزء من البصريات يبحث في جانب الموجة من الضوء.

### المعادلات المفتاحية

$$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s} \approx 3.00 \times 10^8 \text{ m/s} \text{ سرعة الضوء}$$

قربنة الانكسار:  $n = \frac{c}{v}$

قانون الانعكاس:  $\theta_r = \theta_i$

قانون الانكسار (قانون سنيل):  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$

الزاوية الحرجة:  $\theta_c = \sin^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} \right)$  for  $n_1 > n_2$

قانون مالوس:  $I = I_0 \cos^2 \theta$

قانون بروستر:  $\tan \theta_b = \frac{n_2}{n_1}$

## الملخص

### 1.1 انتشار الضوء

- سرعة انتشار الضوء في الفراغ:  $c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s} \approx 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$
- قربنة انكسار المادة هي:  $n = c/v$ ، حيث:  $v$  سرعة انتشار الضوء في المادة،  $c$  سرعة انتشاره في الفراغ.
- نموذج شعاع الضوء يصف مسار الضوء كخطوط مستقيمة. ويُطلق على جزء البصريات، الذي يتعامل مع الجانب الشعاعي للضوء، البصريات الهندسية.
- ينتقل الضوء من المصدر إلى مكانٍ آخر وفقاً لثلاث طرق انتقال: (1) بشكلٍ مباشر من المصدر عبر فضاءٍ فارغ، (2) عبر أوساط مختلفة، (3) بعد انعكاسه من مرآة.

### 2.1 قانون الانعكاس

- عندما يصطدم الشعاع الضوئي بسطح ناعم (أملس)، فإن زاوية الانعكاس تساوي زاوية السقوط (الورود).
- تتمتع المرآة بسطح أملس، ويعكس هذا السطح الضوء بزوايا محددة.
- ينتشر الضوء عندما ينعكس من سطح خشن.

### 3.1 الانكسار

- يُسمى تغيير الشعاع الضوئي لاتجاهه، عندما يمر هذا الشعاع عبر مواد مختلفة، بالانكسار.
- يرتبط قانون الانكسار، والمسمى أيضاً بقانون سنل، بقربنة الانكسار لوسطين عند السطح البيني، ليحدث تغيير في زاوية الشعاع الضوئي، الذي يمر عبر ذلك السطح البيني.

### 4.1 الانعكاس الداخلي الكلي

- تُسمى زاوية السقوط، التي تنتج زاوية انكسار تساوي 90 درجة، بالزاوية الحرجة.
- يُعدُّ الانعكاس الداخلي الكلي ظاهرة تحدث عند الحد بين وسطين، بحيث إذا كانت زاوية الورود في الوسط الأول أكبر من الزاوية الحرجة، فإن الضوء كله ينعكس عائداً في الوسط نفسه.
- تستخدم الألياف البصرية في نقل الضوء إلى أسفل الليف المصنوع من البلاستيك أو الزجاج، مع تطبيق مبدأ الانعكاس الداخلي الكلي
- تمنع تغطية الألياف بعازل من انتقال الضوء بين هذه الألياف الموجودة ضمن حزمة.
- يُعزى سبب تألق الألماس إلى توافر ظاهرة الانعكاس الداخلي الكلي عنده مقرونةً بتمتعه بقربنة انكسار كبيرة.

### 5.1 التشتت

- يُسمى انتشار الضوء الأبيض، في طيفه الكامل للأطوال الموجية، بالتشتت.

• يتم إنتاج أقواس قزح من خلال مزيج من انكسار الضوء وانعكاسه، وتنطوي على تشتت ضوء الشمس وتوزيعه المستمر للألوان.

• يُنتج التشتت أقواس قزح جميلة، ولكنه يسبب مشاكل أيضاً في نظم بصرية معينة.

## 6.1 مبدأ هيغنز

• وفقاً لمبدأ هيغنز، فإن كل نقطة على جبهة الموجة تُعدُّ مصدراً للأموح القصيرة، التي تنتشر في الاتجاه الأمامي بسرعة الموجة نفسها. وتُعدُّ جبهة الموجة الجديدة ظلاً لجميع الأمواج القصيرة.

• تعكس المرآة موجة واردة بزواوية تساوي زاوية السقوط (الورود)، مؤكدةً قانون الانعكاس.

• يمكن تفسير قانون الانكسار من خلال تطبيق مبدأ هيغنز على جبهة الموجة التي تعبر من وسط إلى آخر.

• يُسمى انحناء الموجة حول حواف فتحة أو عائق، يُسمى بالحيود (الانعراج).

## 7.1 الاستقطاب

• الاستقطاب هو السمة التي تشير إلى أن اهتزاز الموجة يتمتع باتجاه محدد بالنسبة إلى اتجاه انتشار هذه الموجة. ويُعرَّف اتجاه الاستقطاب على أنه الاتجاه الموازي للحقل الكهربائي لموجة كهرومغناطيسية EM.

• يتكون الضوء غير المستقطب من عدة أشعة تتمتع باتجاهات استقطاب عشوائية.

• يمكن استقطاب الضوء غير المستقطب عن طريق تمريره من خلال مرشح الاستقطاب أو مادة استقطاب أخرى. وتؤدي عملية استقطاب الضوء إلى خفض شدته بواسطة معامل من 2.

• يُعبَّر عن شدة الضوء المستقطب I، بعد مروره عبر مرشح الاستقطاب بالعلاقة:  $I = I_0 \cos^2 \theta$ ، حيث I0 هي شدة الضوء الساقط و  $\theta$  هي الزاوية بين اتجاه الاستقطاب ومحور المرشح.

• ينتج الاستقطاب أيضاً عن طريق الانعكاس.

• ينص قانون بروستر على أن الضوء المنعكس مستقطب كلياً عندما تكون زاوية الانعكاس مساويةً  $\theta_b$ ، والمعروفة باسم زاوية بروستر.

• يمكن أيضاً إنتاج الاستقطاب عن طريق التبعثر.

• هناك عدة أنواع من المواد الفعالة بصرياً تقوم بتدوير اتجاه استقطاب الضوء المار خلالها.

## أسئلة نظرية

### 1.1 انتشار الضوء

1. تحت أي ظروف يمكن نمذجة الضوء على شكل شعاع؟ أو على شكل موجة؟
2. لماذا تكون قرينة الانكسار دائماً أكبر من 1 أو تساويه؟
3. هل حقيقة أن الويمض الضوئي الصادر من البرق يصل إليك قبل أن يرهن صوته أن سرعة الضوء كبيرة للغاية، أو أنها ببساطة أكبر من سرعة الصوت؟ ناقش كيف يمكنك استخدام هذا الانطباع للحصول على تقدير لسرعة الضوء.
4. تأمل بماهية العملية الفيزيائية، التي قد تكون مسؤولة عن انتقال الضوء ببطء أكثر في وسطٍ ما منه في الفراغ.

### 2.1 الانعكاس

5. باستخدام قانون الانعكاس، اشرح كيف يجعل المسحوق أنف الشخص متألقاً. ما هو اسم التأثير البصري؟

### 3.1 الانكسار

6. يتم شرح الانتشار بواسطة الانعكاس عن سطح خشن في هذا الفصل. ويمكن أيضاً أن ينتشر الضوء عن طريق الانكسار. صف كيف يحدث هذا في حالة معينة، مثل الضوء الذي يتفاعل مع الثلج المسحوق.
7. هل سيغير الضوء اتجاهه إلى الأمام أو بعيداً عن الناظم، وذلك عندما ينتقل من الهواء إلى الماء؟ ومن الماء إلى الزجاج؟ ومن الزجاج إلى الهواء؟
8. اشرح لماذا يبدو أن الجسم الموجود في الماء يكون دائماً على عمق أقل مما هو عليه بالفعل؟
9. اشرح لماذا تبدو ساقا الشخص قصيرة جداً عند خوضه في حوض السباحة. قم بتسوية شرحك باستخدام مخطط شعاعي يوضح مسار الأشعة من القدمين إلى عين المراقب الموجود خارج الماء.
10. اشرح لماذا المجداف المغمور جزئياً بالماء يبدو منحنيًا.

### 4.1 الانعكاس الداخلي الكلي

11. أسقطت حلقة مع أحجار كريمة عديمة اللون في الماء. تصبح الأحجار الكريمة غير مرئية عندما تكون مغمورة في الماء. يمكن أن تكون هذه الأحجار هي الألماس؟ فسّر ذلك.
12. أكثر أنواع السراب شيوعاً عبارة عن وهم يكمن في أن الضوء الصادر من الأجسام البعيدة ينعكس في حوض من المياه غير موجود بالفعل. ويلاحظ السراب بشكل عام في الصحاري، وذلك عندما يكون هناك طبقة من الهواء الساخن بالقرب من الأرض. وبالنظر إلى أن قرينة انكسار الهواء تكون أقل مما هي عليه بالنسبة للهواء في درجات الحرارة الأعلى، اشرح كيف يمكن أن يتشكل السراب.
13. كيف تستطيع أن تستخدم الانعكاس الداخلي الكلي كي تُقدّر قرينة الانكسار لوسط ما؟

### 5.1 التشتت

14. هل من الممكن أن يؤدي الانعكاس الداخلي الكلي دوراً في أقواس قزح؟ وضح من حيث قرائن الانكسار والزوايا، وربما يُشار إلى تلك الصورة الموضحة أدناه. البعض منا قد رأى تشكيل قوس قزح مزدوج. هل من الممكن جسدياً (أي بالعين المجردة) مراقبة قوس قزح ثلاثي؟



(ائتمان: "تشاد" / فليكر) (credit: "Chad"/Flickr)

15. قد يكون الألماس عالي الجودة واضحاً وعدم اللون تماماً، حيث ينقل جميع الأطوال الموجية المرئية مع توافر القليل من الامتصاص عنده. اشرح كيف يمكن أن يتألق هذا الألماس مع تمتعه بومضات ذات لون براق عند إضاءته بالضوء الأبيض.

### 6.1 مبدأ هيفنز

16. كيف تعتمد تأثيرات الموجة على حجم الجسم الذي تتفاعل معه هذه الموجة؟ على سبيل المثال، لماذا ينحني الصوت حول زاوية المبنى، بينما الضوء لا ينحني؟



17. هل يُطبق مبدأ هيغنز على جميع أنواع الأمواج؟
18. إذا لوحظ الحيود لبعض الظواهر، فهذا دليل على أن هذه الظاهرة هي موجة. هل العكس صحيح؟ أي إذا لم يتم ملاحظة الحيود، فهل هذا يعني أن هذه الظاهرة ليست موجة؟

### 7.1 الاستقطاب

19. هل يمكن استقطاب الموجة الصوتية في الهواء؟ فسّر ذلك.
20. لا يمر الضوء من خلال مرشحين استقطاب مثاليين محاورهما متعامدة. بينما، إذا وُضع مرشح استقطاب ثالث بين الاثنين الأصليين، يمكن أن يمر بعض الضوء. لماذا يحدث هذا؟ وتحت أي ظروف يمر معظم الضوء؟
21. اشرح ماذا يحدث للطاقة، التي يحملها الضوء، بأنها تخفت عند تمريرها عبر مرشحي استقطاب متقاطعين.
22. عندما تكون جسيمات الضوء المنتشر أصغر بكثير من طولها الموجي  $\lambda$ ، تكون كمية الانتثار متناسبة مع  $\frac{1}{\lambda}$ . فهل هذا يعني أن هناك المزيد من الانتثار عندما تكون  $\lambda$  صغيرة، وأكثر مما هو عليه عندما تكون  $\lambda$  كبيرة؟ كيف يرتبط هذا بحقيقة أن السماء زرقاء؟
23. باستخدام المعلومات الواردة في السؤال السابق، اشرح لماذا يكون غروب الشمس أحمر.
24. عندما ينعكس الضوء بزواوية بروستر عن سطح أملس، فإنه يكون مستقطباً بنسبة 100% موازياً للسطح. وسوف ينكسر جزء من هذا الضوء في السطح. صف كيف ستُجري تجربة لتحديد استقطاب الضوء المنكسر. وما هو الاتجاه الذي تتوقع أن يتمتع به الاستقطاب، وهل تتوقع أن يكون الاستقطاب 100%؟
25. إذا كنت ترقد على شاطئ يطل على المياه ورأسك يميل قليلاً، فإن نظاراتك الشمسية المستقطبة لا تعمل جيداً. لما لا؟

### مسائل

#### 1.1 انتشار الضوء

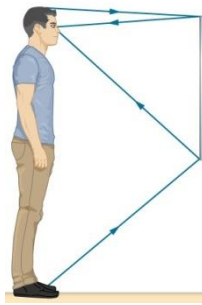
26. ما سرعة الضوء في الماء؟ وفي الغليسيرين؟
27. ما سرعة الضوء في الهواء؟ وفي الزجاج التاجي؟
28. احسب قرينة الانكسار للوسط الذي تكون فيه سرعة الضوء  $2.012 \times 10^8$  m/s، وحدد المادة الأكثر احتمالاً على أساس

#### الجدول 1.1

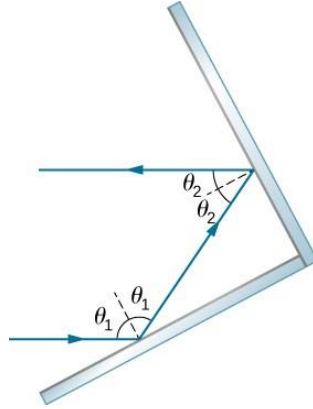
29. في أي مادة في الجدول 1.1 تكون سرعة الضوء مساويةً  $2.290 \times 10^8$  m/s؟
30. كان هناك تصادم كبير لكويكب مع القمر في العصور الوسطى. وصفه الرهبان في كاتدرائية كانتربري Canterbury Cathedral في إنجلترا بأنها توهج أحمر على سطح القمر وما حوله. كم من الوقت، بعد أن ضرب الكويكب القمر، والذي يبعد  $3.84 \times 10^5$  km عن الأرض، سيصل الضوء أولاً إلى الأرض؟
31. يجري توصيل مكونات بعض أجهزة الكمبيوتر بعضها مع بعض من خلال الألياف الضوئية ذات قرينة الانكسار  $n = 1.55$ . ما الوقت المطلوب، مقدراً بالنانوثانية، كي تنتقل الإشارة لمسافة 0.200 m من خلال مثل هذه الألياف؟
32. قارن بين الزمن الذي يستغرقه الضوء لينتقل مسافة 1000 m على سطح الأرض، وفي الفضاء الخارجي.
33. إلى أي مدى ينتقل الضوء تحت الماء خلال فترة زمنية تبلغ  $1.50 \times 10^{-6}$  s؟

## 2.1 الانعكاس

34. لنفترض أن الرجل يقف أمام المرآة كما هو موضح في الشكل أدناه. تقع عيناه على مسافة  $1.65 \text{ m}$  فوق الأرض، وتعلو قمة رأسه بمسافة  $0.13 \text{ m}$ . أوجد الارتفاع فوق سطح الأرض لقمة أصغر مرآة وأسفلها، بحيث يمكن أن يرى هذا الرجل فيها كلاً من قمة رأسه وقدميه. وكيف ترتبط هذه المسافة بارتفاع الرجل؟

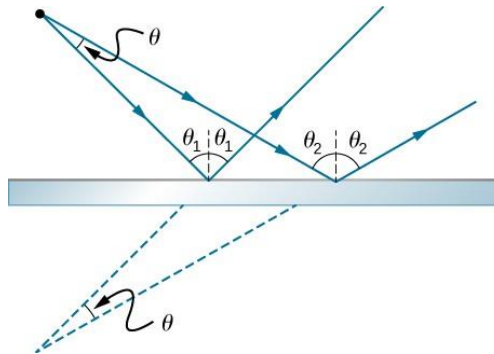


35. يبدو أنه عندما ينعكس الضوء من مرآتين متقابلتين بزواوية صحيحة، فإن الشعاع الصادر يوازي مثيله الوارد كما هو موضح أدناه.



36. على سطح القمر، وضع رواد فضاء قمريون عاكساً زاوياً، بحيث ينعكس عنه شعاع الليزر بشكل دوري. يتم حساب المسافة إلى القمر من زمن الرحلة ذهاباً وإياباً. ما النسبة المئوية اللازمة لتصحيح التأخير الزمني بسبب تباطؤ الضوء في الغلاف الجوي للأرض؟ افترض أن المسافة إلى القمر هي بالضبط  $3.84 \times 10^8 \text{ m}$ ، وأن الغلاف الجوي للأرض (والذي تتباين كثافته مع الارتفاع) يعادل طبقة ثخينها  $30.0 \text{ km}$ ، ويتمتع بقرينة ثابتة للانكسار مقدارها  $n = 1.000293$ .

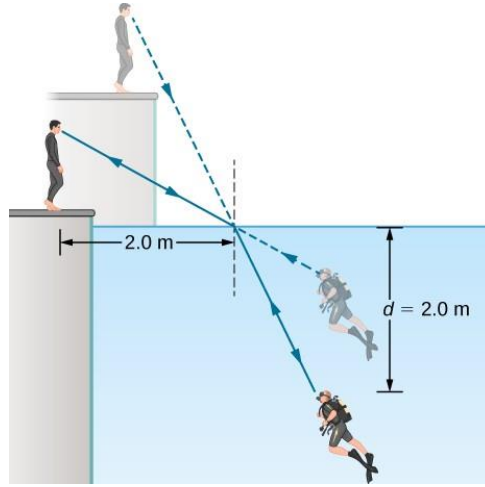
37. مرآة مسطحة لا مقارنة ولا مباعدة. لإثبات ذلك، ضع في حسابك أن هناك شعاعين نابعين من النقطة نفسها ومتباعدين بزواوية  $\theta$  (انظر الشكل أدناه). بيّن أنه بعد سقوطهما على مرآة مستوية، تبقى الزاوية بين اتجاهيهما  $\theta$ .



### 3.1 الانكسار

ما لم يُنص على خلاف ذلك، فيما يتعلق بالمسائل من 1 إلى 10، ينبغي عد قرائن انكسار الزجاج والماء هي 1.50 و 1.333 على التوالي.

38. يتمتع شعاع ضوئي في الهواء بزاوية ورود على سطح لوحة زجاجية تساوي 35 درجة. ما هو مقدار زاويتي الانعكاس والانكسار؟
39. يصطدم شعاع ضوئي في الهواء بسطح بركة، ويصنع مع سطحها زاوية ورود تساوي 20 درجة. ما هو مقدار كلٍ من زاويتي الانعكاس والانكسار لهذا الشعاع؟
40. عندما يعبر شعاع ضوئي من الماء إلى الزجاج، فإنه يبرز بزاوية 30 درجة بالنسبة للناظم على السطح البيني. ما زاوية الورد؟
41. يرسل قلم وميض مغمور بالماء شعاع ضوئي باتجاه السطح بزاوية 30 درجة. ما زاوية الانكسار في الهواء؟
42. تصنع أشعة ضوئية صادرة من الشمس زاوية 30 درجة بالنسبة للناظم عندما تُرى من تحت سطح جسم مائي. بأي زاوية تكون الشمس فوق الأفق؟
43. ينتقل مسار شعاع ضوئي في الهواء من زاوية ورود تساوي 35 درجة إلى زاوية انكسار تساوي 22 درجة، وذلك عندما يدخل هذا الشعاع في كتلة مستطيلة من البلاستيك. ما هي قرينة انكسار البلاستيك؟
44. غواص متدرب في حوض سباحة ينظر إلى معلمه كما هو موضح في الشكل أدناه. ما الزاوية التي تشكلها الأشعة من وجه المدرب مع الناظم على الماء عند النقطة التي يدخل فيها الشعاع إلى الماء؟ إذا علمت أن الزاوية بين الشعاع داخل الماء والناظم عليه (على الماء) هي 25.0 درجة.

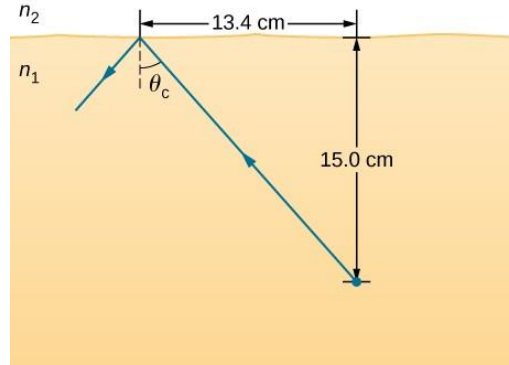


45. (أ) باستخدام المعلومات الواردة في المسألة السابقة، أوجد ارتفاع رأس المدرب فوق الماء، مع الإشارة إلى أنه يتعين عليك أولاً حساب زاوية الورد. (ب) أوجد العمق الواضح لرأس الغواص تحت الماء كما يراه المدرب.

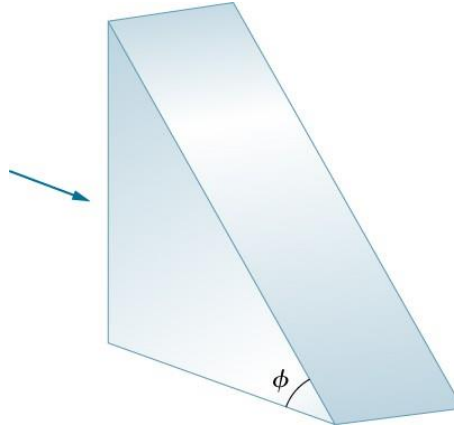
### 4.1 الانعكاس الداخلي الكلي

46. تحقق من أن الزاوية الحرجة للضوء المتجه من الماء إلى الهواء هي 48.6 درجة، كما تمت مناقشته في نهاية **المثال 4.1**، آخذاً بالحسبان الزاوية الحرجة للضوء المنتقل في أنبوب من البوليثين (نوع من البلاستيك) محاط بالهواء.
47. (أ) في نهاية **المثال 4.1**، ذُكر أن الزاوية الحرجة للضوء، الذي ينتقل من الألماس إلى الهواء، هي 24.4 درجة. تحقق من هذا. (ب) ما هي الزاوية الحرجة للضوء الذي ينتقل من الزركون إلى الهواء؟
48. تستخدم الألياف الضوئية زجاج الصوان مغطى بالزجاج التاجي. ما هي الزاوية الحرجة؟
49. بأي زاوية صغرى سوف تحصل على انعكاس داخلي كلي للضوء الذي يسير في الماء وينعكس من الجليد؟

50. لنفترض أنك تستخدم الانعكاس الداخلي الكلي لتصنع عاكس زاوية فعّالاً. فإذا كان هناك هواء خارجي وكانت زاوية الورود **45.0** درجة، فماذا يجب أن يكون الحد الأدنى لقرينة انكسار المادة، التي يتكون منها العاكس؟
51. يمكنك تحديد قرينة انكسار مادة ما من خلال تحديد زاويتها الحرجة. (أ) ما هي قرينة انكسار مادة تتمتع بزاوية حرجة قدرها **68.4** درجة عندما تُغمَر في الماء؟ ما هذه المادة استناداً إلى **الجدول 1.1**؟ (ب) ما الزاوية الحرجة لهذه المادة في الهواء؟
52. إن شعاع الضوء المنبعث تحت سطح سائل مجهول يعلوه هواء، يخضع لانعكاس داخلي كلي كما هو موضح أدناه. ما هي قرينة الانكسار للسائل وتحديد مقدارها المحتمل؟



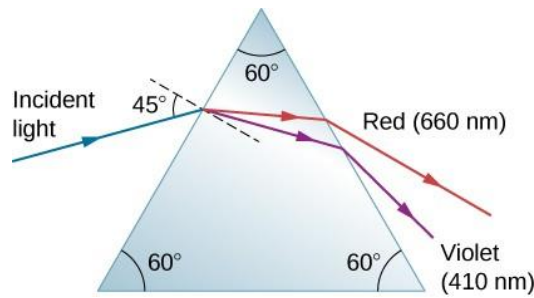
53. تسقط الأشعة الضوئية عادةً على السطح العمودي للموشور الزجاجي ( $n = 1.50$ ) الموضح أدناه. (أ) ما هي أكبر قيمة للزاوية  $\phi$  بحيث تنعكس الأشعة كلياً على الوجه المائل؟ (ب) كرر حساب الطلب (أ) إذا كان الموشور مغموراً في الماء.



### 5.1 التشتت

54. استناداً إلى **الجدول 2.1** ما هي نسبة سرعة الضوء الأحمر إلى الضوء البنفسجي في الألماس؟ (ب) ما هذه النسبة في البوليسترين؟ (ج) أي هذين الضوءين أكثر تشتتاً؟
55. ينتقل شعاع ضوء أبيض من الهواء إلى الماء بزاوية ورود قدرها **75.0** درجة. ما مقادير الزوايا التي ينكسر عندها كل من جزئي هذا الضوء: الأحمر (**660 nm**) والبنفسجي (**410 nm**)؟
56. إلى أي مدى تختلف الزوايا الحرجة لكل من الضوء الأحمر (**660 nm**) والبنفسجي (**410 nm**) في الألماس المحاط بالهواء؟
57. (أ) شعاع ضيق من الضوء يحتوي على أطوال موجية صفراء (**580 nm**) ومثيلتها خضراء (**550 nm**)، ينتقل من البوليسترين إلى الهواء، ليصطدم بالسطح عند الزاوية **30.0** درجة. ما الزاوية بين الألوان عند ظهورها؟ (ب) إلى أي مدى يجب علي هذين اللونين الانتقال لفصلهما بمقدار **1.00 mm**؟

58. حزمة متوازية من الضوء تحتوي على أطوال موجية برتقالية (610 nm) ومثيلتها بنفسجية (410 nm)، تنتقل من الكوارتز المنصهر إلى الماء، وتصدم السطح بينهما بزاوية ورود تساوي 60.0 درجة. ما الزاوية بين هذين اللونين في الماء؟
59. ينتقل شعاع ضوئي (610 nm) من الهواء إلى الكوارتز المنصهر بزاوية ورود تساوي 55.0 درجة. ما زاوية الورد للضوء (470 nm) الداخل في الزجاج ليتمتع بزاوية الانكسار نفسها؟
60. ينتقل شعاع ضيق من الضوء، يحتوي على أطوال موجية حمراء (660 nm) وزرقاء (470 nm)، ينتقل من الهواء عبر قطعة مسطحة من الزجاج التاجي يبلغ نخنها 1.00 cm، ويعود إلى الهواء مرة أخرى. وتساوي زاوية الورد لهذا الشعاع 30.0 درجة. (أ) عند أي الزوايا يظهر هذان اللونان؟ (ب) عند أي مسافة يتم فصل اللونين الأحمر والأزرق عند ظهورهما؟
61. شعاع ضيق من الضوء الأبيض يدخل في موشور مصنوع من الزجاج التاجي بزاوية 45.0 درجة كما هو موضح في الشكل أدناه. عند أي من الزوايا  $\theta_{Red}$  و  $\theta_{Violet}$  يتم خروج اللونين الأحمر (660 nm) والبنفسجي (410 nm) من مكونات هذا الضوء من الموشور؟



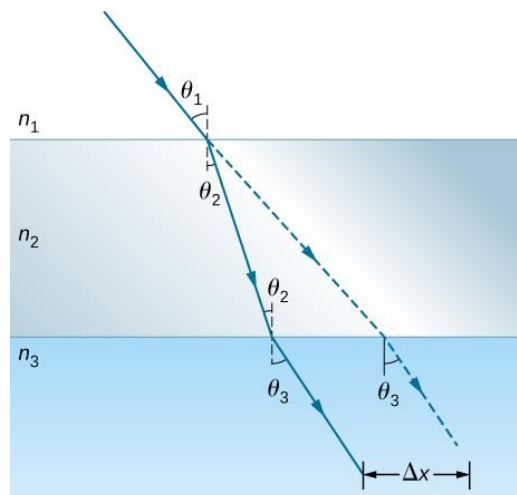
## 7.1 الاستقطاب

62. ما الزاوية المطلوبة بين اتجاه الضوء المستقطب ومحور مرشح الاستقطاب لخفض شدة هذا الضوء إلى النصف؟
63. تساوي الزاوية بين محوري مرشحي استقطاب 45.0 درجة. بأي مقدار يقوم المرشح الثاني بخفض شدة الضوء القادم عبر المرشح الأول؟
64. تتوضع صفيحتان مُستقطبتان  $P_1$  و  $P_2$  معاً، بحيث تكون محاور إرسالها موجهة بزاوية  $\theta$  بالنسبة لبعضها. ما مقدار الزاوية  $\theta$  عندما يمر 25% فقط من أقصى شدة ضوء منقولة من خلالها.
65. لنفترض أنه في المسألة السابقة، كان الضوء الساقط على الصفيحة  $P_1$  غير مُستقطب. عند قيمة محددة للزاوية  $\theta$ ، ما هو الجزء من الضوء الساقط، الذي يمر عبر المجموعة (أي عبر الصفيحتين).
66. لنفترض أنه كان لديك ضوء مُستقطب كلياً شدته  $150 \text{ W/m}^2$ ، ماذا ستكون شدة هذا الضوء بعد مروره عبر مرشح استقطاب، يشكل محوره زاوية 89.0 درجة مع اتجاه استقطاب الضوء؟
67. ما الزاوية التي يجب أن يصنعها محور مرشح الاستقطاب مع اتجاه الضوء المستقطب ذي الشدة  $1.00 \text{ kW/m}^2$ ، بحيث تنخفض هذه الشدة إلى  $10.0 \text{ W/m}^2$ ؟
68. تبين في نهاية المثال 7.1 أن شدة الضوء المستقطب تنخفض إلى 90.0% من قيمته الأصلية عند مروره عبر مرشح الاستقطاب، بحيث يصنع مع محوره زاوية 18.4 درجة بالنسبة لاتجاه الاستقطاب. تحقق من هذا البيان.
69. بين أنه إذا كان لديك ثلاث مرشحات مُستقطبة، بحيث يصنع الثاني مع الأول زاوية 45.0 درجة، والثالث مع الأول زاوية 90.0 درجة، ستنخفض شدة الضوء، الذي يمر عبر الأول، إلى 25.0% من قيمته. (وهذا على عكس وجود الأول والثالث فقط، إذ تنخفض شدته إلى الصفر، لهذا يأتي وضع الثاني بينهما لزيادة شدة الضوء المرسل).

70. تُوضع ثلاث صفائح استقطاب معاً، بحيث يكون محور إرسال الصفيحة الثانية موجهاً بزاوية  $25.0$  درجة بالنسبة لمحور الأول، بينما يكون محور إرسال الصفيحة الثالثة موجهاً بزاوية  $40.0$  درجة (وبالمعنى نفسه) بالنسبة لمحور الأول. ما هو الجزء من شدة الشعاع الساقط غير المستقطب، الذي ينتقل عن طريق المجموعة؟
71. بهدف تدوير محور الاستقطاب لحزمة من الضوء المستقطب خطياً بمقدار  $90.0$  درجة، يضع الطالب الصفيحتين  $P_1$  و  $P_2$ ، بحيث تصنع محاور نفوذتيهما الزاويتين  $45.0$  و  $90.0$  درجة، على التوالي، بالنسبة لمحور شعاع الاستقطاب. (أ) ما هو الجزء من الضوء الساقط، الذي يمر عبر  $P_1$ ، (ب) عبر المجموعة؟ (ج) أعد حساباتك بالنسبة للطلب (ب) من المسألة، وذلك عندما تكون زوايا محاور الإرسال  $30.0$  و  $90.0$  درجة على التوالي.
72. تبين أنه عندما يسقط الضوء، المنتقل داخل الماء، على قطعة بلاستيكية، فإن زاوية بروستر تساوي  $50.0$  درجة. ما هو مقدار قرينة انكسار البلاستيك؟
73. عند أي زاوية سوف يكون الضوء المنعكس من الألماس مستقطباً كلياً؟
74. ما هي زاوية بروستر للضوء المنتقل داخل الماء المنعكس من الزجاج التاجي؟
75. يرى غطاس السكوبا الضوء المنعكس من سطح الماء. بأي زاوية بالنسبة لسطح الماء، سيكون هذا الضوء مستقطباً كلياً؟

### مسائل إضافية

76. من خلال القياسات التي أجراها، قَدَّر روبر (Roemer) أن الضوء يستغرق  $22 \text{ min}$  حتى ينتقل لمسافة تساوي قطر مدار الأرض حول الشمس. (أ) استخدم هذا التقدير مع القطر المعروف لمدار الأرض للحصول على قيمة تقريبية لسرعة الضوء. (ب) يستغرق الضوء في الواقع  $16.5 \text{ min}$  للانتقال عبر هذه المسافة. استخدم هذا الوقت لحساب سرعة الضوء.
77. نَقَدَّ كورنو (Cornu) قياس فيزو (Fizeau's measurement) لسرعة الضوء باستخدام عجلة قطرها  $4.00 \text{ cm}$  تحتوي على  $180$  سنناً. كانت المسافة من العجلة إلى المرآة  $22.9 \text{ km}$ . افترض أنه قاس سرعة الضوء بدقة، فما هي السرعة الزاوية للعجلة؟
78. افترض أنه لديك مادة ناصعة غير معروفة مغمورة في الماء، وترغب في التعرف عليها من خلال العثور على قرينة انكسارها. تقوم بترتيب إدخال شعاع ضوئي بزاوية  $45.0$  درجة في هذه المادة، فإنك تلاحظ أن زاوية انكسار هذا الشعاع تساوي  $40.3$  درجة. ما هي قرينة الانكسار لهذه المادة وما هي هويتها المحتملة؟
79. يُظهر الشكل أدناه شعاعاً ضوئياً انطلق من الهواء عبر الزجاج التاجي إلى الماء، وكأنه ذاهب إلى حوضٍ للأسمك. احسب مقدار الإزاحة ( $\Delta x$ )، التي يتعرض لها الشعاع بواسطة الزجاج، بالنظر إلى أن زاوية سقوط الشعاع هي  $40.0$  درجة وثخن الزجاج  $1.00 \text{ cm}$ .

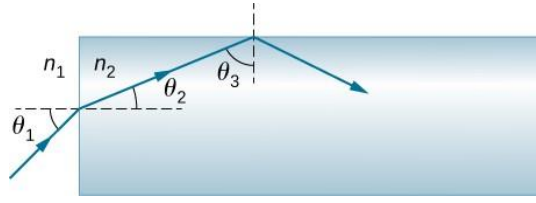


80. بالنظر إلى المسألة السابقة، بيّن أن  $\theta_3$  هي نفسها كما لو كان الوسط الثاني غير موجود.
81. عند أي زاوية يكون الضوء داخل الزجاج التاجي مستقطباً كلياً عندما ينعكس من الماء كما هو الحال في حوض السمك؟
82. إذا كان الضوء المنعكس عند الدرجة 55.6 من النافذة مُستقطب كلياً. ما هي قرينة انكسار هذه النافذة والمادة المحتملة لصنعها؟
83. إذا كان الضوء المنعكس عند الدرجة 62.5 من حجر كريم موجود في حلقة مُستقطب كلياً. أيمن أن يكون هذا الحجر هو جوهرة الألماس؟ (ب) بأي زاوية سيكون الضوء مستقطباً كلياً إذا كانت هذه الجوهرة داخل الماء؟
84. إذا كانت  $\theta_b$  هي زاوية بروستر للضوء المنعكس من أعلى السطح البيني بين مادتين، و  $\theta'$  هي زاوية بروستر للضوء المنعكس من أسفل هذا السطح، أثبت أن  $\theta_b + \theta' = 90^\circ$ .
85. نتائج غير معقولة لنفترض أن الضوء ينتقل من الماء إلى مادة أخرى بزاوية سقوط 10.0 درجات وزاوية انكسار 14.9 درجة. (أ) ما هي قرينة الانكسار للمادة الأخرى؟ (ب) ما هو غير المعقول بشأن هذه النتيجة؟ (ج) ما هي الافتراضات غير المعقولة أو المتناقضة في هذه الحالة؟
86. نتائج غير معقولة يصطدم الضوء، المنقول من الماء إلى حجر كريم، بسطحه بزاوية 80.0 درجة، وله زاوية انكسار تبلغ 15.2 درجة. (أ) ما هي سرعة الضوء في الحجر الكريم؟ (ب) ما هو غير المعقول بشأن هذه النتيجة؟ (ج) ما هي الافتراضات غير المعقولة أو المتناقضة في هذه الحالة؟
87. إذا خفض مرشح الاستقطاب من شدة الضوء المستقطب إلى 50.0% من قيمته الأصلية، فكم يكون مقدار الانخفاض في الحقلين الكهربائي والمغناطيسي في هذه الحالة؟
88. افترض أنك ارتديت زوجين من النظارات الشمسية المستقطبة، بحيث تصنع محاورها زاوية 15.0 درجة. كم من الوقت سيستغرق الضوء ليودع كمية معينة من الطاقة في عينيك مقارنةً مع ارتداء زوج واحد من النظارات الشمسية؟ افترض أن العدسات ناصعة باستثناء خواص استقطابها.
89. (أ) في أحد الأيام، عندما كانت شدة ضوء الشمس تساوي  $1.00 \text{ kW/m}^2$ ، وُضعت عدسة دائرية بقطر  $0.200 \text{ m}$  لتركز الضوء على الماء في دورق أسود. ووضعت صفيحتان مُستقطبتان من البلاستيك أمام العدسة، بحيث صُنعت محاورها زاوية تساوي 20.0 درجة. فإذا افترض أن أشعة الشمس غير مُستقطبة، والمستقطبات ذات كفاءة (مردود) 100%، ما هو المعدل الأولي لتسخين المياه مقدراً بـ  $(^\circ\text{C/s})$ ، بفرض أنه يتم امتصاص 80.0%؟ وتساوي كتلة دورق الألمنيوم  $30.0 \text{ g}$ ، ويجوي هذا الدورق  $250 \text{ g}$  من الماء. (ب) وهل تصبح المرشحات المستقطبة ساخنة؟ فسّر ذلك.

### مسائل للتحدي

90. تستخدم العروض الضوئية، التي تظهر بأشعة الليزر، مرايا متحركة لتحريك الحزم الليزرية وإنشاء تأثيرات (انطباعات) ملونة. بيّن أن شعاع الضوء المنعكس من المرآة يغير اتجاهه بمقدار  $2\theta$  عند يتم تدوير المرآة بزاوية  $\theta$ .
91. باعتبار أن ضوء الشمس، الذي يدخل الغلاف الجوي للأرض عند شروق الشمس وعند غروبها، يدخل بزاوية سقوط (ورود) تساوي 90.0 درجة. فإذا أُخذ بالحسبان، وبشكلٍ تقريبي، الحد الفاصل بين المنطقة الخالية والغلاف الجوي، احسب زاوية انكسار أشعة الشمس. إن هذا يطيل الزمن، الذي تبدو فيه الشمس فوق الأفق، عند شروق الشمس وعند غروبها. قم الآن ببناء مسألة تحدد فيها زاوية الانكسار لنماذج مختلفة من الغلاف الجوي، مثلاً تأخذ في الحسبان طبقات مختلفة من الغلاف الجوي متفاوتة الكثافة. قد يرغب معلمك في إرشادك على مستوى التعقيد، الذي يجب مراعاته، وكيفية اختلاف قرينة الانكسار مع اختلاف كثافة الهواء.

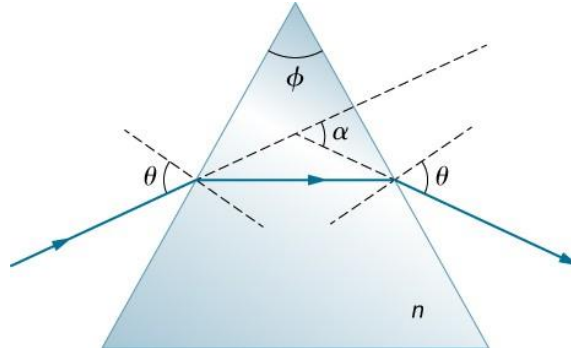
92. يتم انكسار الشعاع الضوئي، الذي يدخل الألياف الضوئية المحاطة بالهواء أولاً، ثم ينعكس هذا الشعاع كما هو موضح أدناه. بيّن أنه إذا كانت هذه الألياف مصنوعة من الزجاج التاجي، فأى شعاع ساقط سينعكس داخلياً بكامله.



93. يسقط شعاع ضوئي على الوجه الأيسر لموشور (انظر الشكل أدناه) بزواوية سقوط تساوي  $\theta$ ، والتي من أجلها يتمتع الشعاع الناشئ بزواوية انكسار تساوي  $\theta$  على الوجه الأيمن لهذا الموشور. بيّن أن قرينة الانكسار  $n$  للموشور الزجاجي هو المعطى بالعلاقة التالية:

$$n = \frac{\sin \frac{1}{2}(\alpha + \theta)}{\sin \frac{1}{2}\theta}$$

حيث:  $\theta$  هي زاوية قمة الموشور و  $\alpha$  هي الزاوية، التي من خلالها ينحرف هذا الشعاع. فإذا كانت  $\alpha = 37.0^\circ$ ، وتبلغ كلٌّ من زوايا قاعدة الموشور  $50.0$  درجة، فما هي قيمة  $n$ ؟



94. إذا كانت زاوية قمة الموشور  $\phi$  في المسألة السابقة هي  $20.0$  درجة وقرينة الانكسار  $n = 1.50$ ، فما هي قيمة  $\alpha$ ؟
95. يُستقطب الضوء، الساقط على صفيحة استقطاب  $P_1$ ، استقطاباً خطياً بزواوية  $30.0$  درجة بالنسبة لمحور الإرسال لهذه الصفيحة  $P_1$ . فإذا وضعت صفيحة  $P_2$  بحيث يكون محورها موازياً لمحور الاستقطاب للضوء الساقط، أي عند  $30.0$  درجة بالنسبة إلى  $P_1$  أيضاً. (أ) ما هو شكل انكسار الضوء الساقط عند عبوره للصفيحة  $P_1$ ؟ (ب) ما هو شكل انكسار الضوء الساقط عند عبوره لمجموعة الصفيحتين؟ (ج) إذا جرى تدوير  $P_2$ ، تم الحصول على الحد الأقصى لشدة الشعاع المنقول. ما هي نسبة هذه الشدة القصوى إلى شدة الضوء المرسل عندما تكون  $P_2$  متوضعة بزواوية  $30.0$  درجة بالنسبة إلى  $P_1$ ؟
96. برهن أنه إذا كانت  $I$  هي شدة الضوء المرسل بواسطة مرشحي استقطاب يصنع محوراهما الزاوية  $\theta$ ، و  $I'$  هي الشدة عندما يصنع هذان المحوران الزاوية  $\theta - 90.0^\circ$ ، برهن أن:  $I + I' = I_0$ ، حيث:  $I_0$  الشدة الأصلية. (تلميح: استخدم المطابقات المثلثية التالية:  $\cos 90.0^\circ - \theta = \sin \theta$  و  $\cos^2 \theta + \sin^2 \theta = 1$ ).



## الفصل الثاني | البصريات الهندسية وتشكُّل الخيال

### GEOMETRIC OPTICS AND IMAGE FORMATION

**الشكل 1.2:** بوابة السحاب (Cloud Gate) وهي عبارة عن منحوتة عامة أعدها أنيش كابور وموجودة في متنزه ميلينيوم في مدينة شيكاغو. تعكس ألواحها المصنوعة من الفولاذ المقاوم للصدأ الصور من حولها وتشوهها، بما في ذلك أفق شيكاغو. أُهديت في عام 2006، لتصبح نقطة جذب سياحي شهيرة، ولتوضح كيف يمكن للفن أن يستخدم مبادئ البصريات الفيزيائية للإبهار والترفيه.

#### مخطط الفصل

1.2 الأحيلة المُشكَّلة بالمرايا المستوية

2.2 المرايا الكروية

3.2 الأحيلة المُشكَّلة بالانكسار

4.2 العدسات الرقيقة

5.2 العين

6.2 الكاميرا

7.2 المكبر البسيط

8.2 المجاهر والتلسكوبات

#### المقدمة

يقدم هذا الفصل الأفكار الرئيسة للبصريات الهندسية، التي تصف تشكُّل الأحيلة نتيجة الانعكاس والانكسار. تُسمى البصريات "الهندسية" بهذا الاسم لأنه يمكن تشكيل الأحيلة باستخدام الإنشاءات الهندسية، مثل مخططات الأشعة. كما رأينا فإن الضوء المرئي هو موجة كهرومغناطيسية. ومع ذلك، فإن طبيعتها الموجية تصبح واضحة فقط عندما يتفاعل الضوء مع أجسام ذات أبعاد مماثلة له

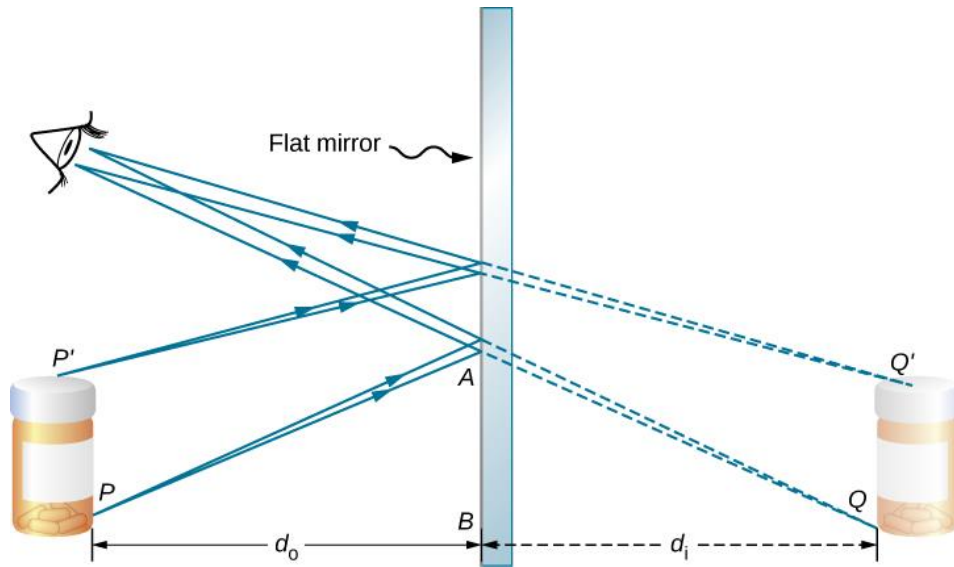
بطول الموجة (والتي تبلغ نحو 500 nm للضوء المرئي). لذلك، تنطبق قوانين البصريات الهندسية فقط على الضوء الذي يتفاعل مع أجسام أكبر بكثير من طول موجة الضوء.

## 1.2 | الأحيلة المُشكَّلة بالمرآيا المستوية Images Formed by Plane Mirrors

### الأهداف التعليمية

- في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:
- وصف كيفية تشكل خيال بواسطة مرآة مستوية.
- التمييز بين الأحيلة الحقيقية ومثيلاتها الوهمية.
- تحديد موقع الخيال واتجاهه، الذي تم تشكيله بواسطة مرآة مستوية.

ما عليك سوى العثور على أقرب حمام لتجد مثلاً لخيال مُشكَّل بواسطة مرآة. تتمتع الأحيلة الموجودة في مرآة مستوية بالجسم نفسه للجسم، وتقع خلف المرآة، واتجاهها هو الاتجاه نفسه للجسم (صحيحة). لفهم ما يحدث، أنظر إلى **الشكل 2.2**، حيث يخرج شعاعان من النقطة  $P$  فيصطدمان بالمرآة وينعكسان إلى عين المراقب. لاحظ أننا نستخدم قانون الانعكاس لرسم الأشعة المنعكسة. إذا تم تمديد الأشعة المنعكسة إلى ما وراء المرآة (انظر الخطوط المتقطعة في **الشكل 2.2**)، ستبدو وكأنها تنشأ من النقطة  $Q$ . ويكون هذا هو موقع خيال النقطة  $P$ . إذا كررنا هذه العملية للنقطة  $P'$ ، فسنحصل على خيالها عند النقطة  $Q'$ . بإمكانك أن تتحقق بنفسك باستخدام أساسيات الهندسة الفراغية بأن ارتفاع الخيال (المسافة من  $Q$  إلى  $Q'$ ) هو الارتفاع نفسه للجسم (المسافة من  $P$  إلى  $P'$ ). بتكوين صور لجميع نقاط الجسم، نحصل على خيال صحيح للجسم خلف المرآة.



**الشكل 2.2:** انعكاس شعاعين ضوئيين منبعثين من النقطة  $P$  من جسم ما بواسطة مرآة مسطحة إلى عين المراقب. يتم الحصول على الأشعة المنعكسة باستخدام قانون الانعكاس. عند تمديد هذه الأشعة المنعكسة إلى الخلف، تبدو وكأنها تأتي من النقطة  $Q$  الواقعة خلف المرآة، حيث يوجد الخيال الوهمي (خيال الجسم). يعطي تكرار هذه العملية للنقطة  $P'$  نقطة الخيال  $Q'$ . وهكذا يكون ارتفاع الخيال هو الارتفاع نفسه للجسم، ويكون الخيال في وضع صحيح، وبعد الجسم عن المرآة  $d_o$  هو البعد نفسه للخيال  $d_i$ .

لاحظ أن الأشعة المنعكسة تظهر للمراقب وكأنها قادمة مباشرةً من الخيال الواقع خلف المرآة. في الواقع، تأتي هذه الأشعة من مواضع نقاط الانعكاس على المرآة. ويُسمى الخيال الموجود خلف المرآة بالخيال الوهمي لأنه لا يمكن عرضه على شاشة - حيث تظهر الأشعة فقط من نقطة مشتركة خلف المرآة. إذا كنت تمشي خلف المرآة، فلن تتمكن من رؤية الخيال، لأن الأشعة لا تصل إلى هناك. ومع ذلك، أمام المرآة، تتصرف الأشعة تماماً كما لو أنها تأتي من خلف المرآة، حيث يوجد الخيال. سنناقش لاحقاً في هذا الفصل مفهوم الأحيولة الحقيقية؛ حيث إن الخيال الحقيقي يمكن إسقاطه على شاشة لأن الأشعة المنبعثة من الخيال هي أشعة مادية. يمكننا حتماً رؤية الأحيولة الحقيقية والوهمية. ولكن الفرق هو أن الخيال الوهمي لا يمكن عرضه على الشاشة، في حين يمكن عرض مثيله الحقيقي.

### تحديد موقع الخيال في المرآة المستوية

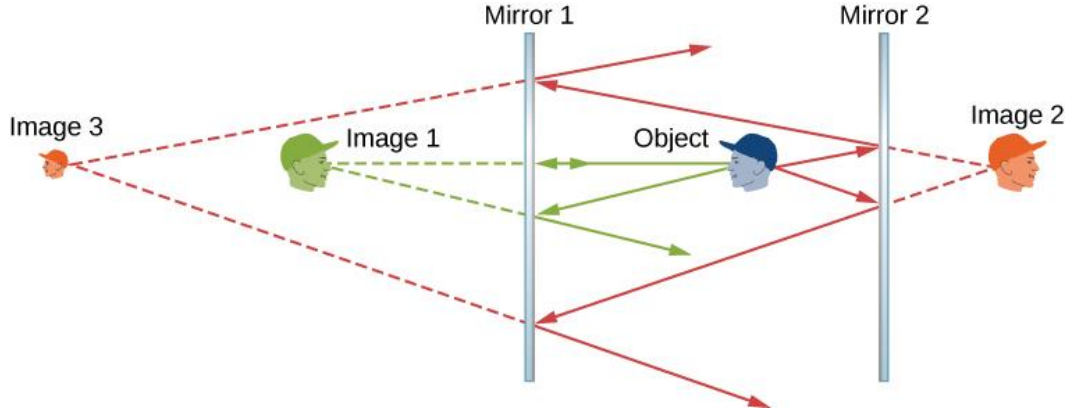
يخبرنا قانون الانعكاس أن زاوية الورود تساوي زاوية الانعكاس. وبتطبيق هذا على المثلثات  $PAB$  و  $QAB$  في الشكل 2.2 وباستخدام أسس الهندسة الفراغية نجد أن المثلثات متطابقة. وهذا يعني أن المسافة  $PB$  بين الجسم والمرآة هي المسافة  $BQ$  نفسها بين المرآة والخيال. بُعد الجسم (رمزه  $d_o$ ) هو المسافة بين المرآة والجسم (أو بشكل أعم، من مركز العنصر البصري الذي يشكل الخيال). وبالمثل، فإن بُعد الخيال (رمزه  $d_i$ ) هو المسافة بين المرآة والخيال (أو بشكل أعم، من مركز العنصر البصري الذي يشكله). إذا قمنا بقياس المسافات من المرآة، فسيكون الجسم والخيال في اتجاهين متعاكسين. لذلك بالنسبة للمرآة المستوية، يجب أن يكون لبُعد الجسم وبُعد الخيال اشارات متعاكسة:

$$d_o = -d_i \quad (2.1)$$

يُعامل الجسم المنعكس، كالعلة المبيّنة في الشكل 2.2، على أنه مجموعة من النقاط، ويمكننا تطبيق الأسلوب المبين أعلاه لتحديد خيال كل نقطة على هذا الجسم، وبالتالي تكوين خياله المنعكس.

### الأحيولة المتعددة

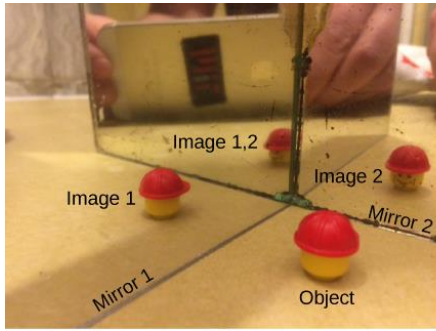
إذا كان الجسم موجوداً أمام مرآتين، فقد تشاهد الأحيولة في كلتا المرآتين. بالإضافة إلى ذلك، قد يعمل الخيال في المرآة الأولى كجسم للمرآة الثانية. لذلك قد تشكل المرآة الثانية خيالاً للخيال. إذا تم وضع المرايا بحيث تكون متوازية فيما بينها ووضع الجسم في أي نقطة غير نقطة منتصف المسافة بينهما، فإن عملية تشكيل خيال للخيال ستتواصل بلا نهاية، تماماً كما يحدث عندما تقف في الردهة والمرايا تحيط بك من كلا الجانبين. يظهر هذا في الشكل 3.2، والذي يعرض ثلاثة أحيولة ناتجة عن الجسم الأزرق. يُلاحظ أن كل انعكاس ينقلب من الأمام ومن الخلف، تماماً مثل سحب قفاز يميني من الداخل إلى الخارج ينتج عنه قفازٌ يساري (وهذا هو السبب في أن انعكاس يدك اليمنى هو يدك اليسرى). وبالتالي، فإن مقدمة الخيالين 1 و 2 ومؤخرتهما يكونان منقلبين مقارنةً بالجسم، وكذلك مقدمة الخيال 3 ومؤخرته تكون مقلوبة بالنسبة للخيال 2، وهو الجسم الذي نتج عنه الخيال 3.



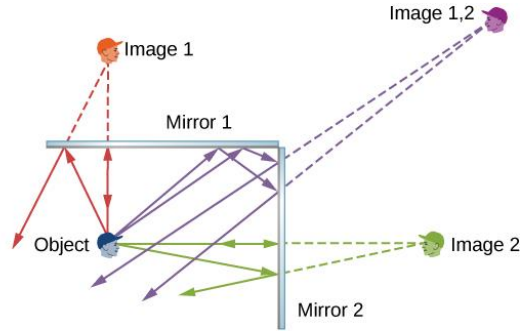
**الشكل 3.2:** يمكن لمرآتين، متوازيتين نظرياً، أن يُنتجا عدداً لا حصر له من الأخيطة لجسم موضوع بعيداً عن منتصف المسافة بينهما. وتظهر هنا ثلاثة أخيلة. مقدمة ومؤخرة كل خيال تكون مقلوبة مقارنة بالجسم الناتج عنه. لاحظ أن الألوان هي فقط لتحديد الأخيلة. بالنسبة للمرايا العادية، يكون لون الخيال هو نفسه لون الجسم.

ربما لاحظت أن الخيال 3 أصغر من الجسم، في حين أن الخياليين 1 و2 لهما المقاس نفسه للجسم. وتُسمى نسبة ارتفاع الخيال إلى ارتفاع الجسم **بالتكبير**. وسنذكر المزيد حول التكبير في القسم التالي من هذا الفصل.

قد تنتهي الانعكاسات اللانهائية. على سبيل المثال، تشكل مرآتان متعامدتان (بينهما زاوية قائمة) ثلاثة أخيلة، كما هو موضح في الجزء (a) من **الشكل 4.2**. تنتج الأخيلة 1 و2 من الأشعة المنعكسة من مرآة واحدة فقط، ولكن الخيال 1,2 يتشكل من الأشعة المنعكسة من كلتا المرآتين. يظهر هذا في مخطط تتبع الأشعة في الجزء (b) من **الشكل 4.2**. لإيجاد الخيال 1,2، عليك أن تنظر خلف زاوية المرآتين.



(a)



(b)

**الشكل 4.2** يمكن لمرآتين أن تُنتجا أخيلة متعددة. (a) تظهر ثلاثة أخيلة لرأس بلاستيكي في مرآتين متعامدتين. (b) جسم واحد، ينعكس من مرآتين متعامدتين، يمكن أن ينتج عنه ثلاثة أخيلة، كما هو مبين في الأخيلة ذات الألوان الأخضر والبنفسجي والأحمر.

## 2.2 | المرايا الكروية Spherical Mirrors

### الأهداف التعليمية

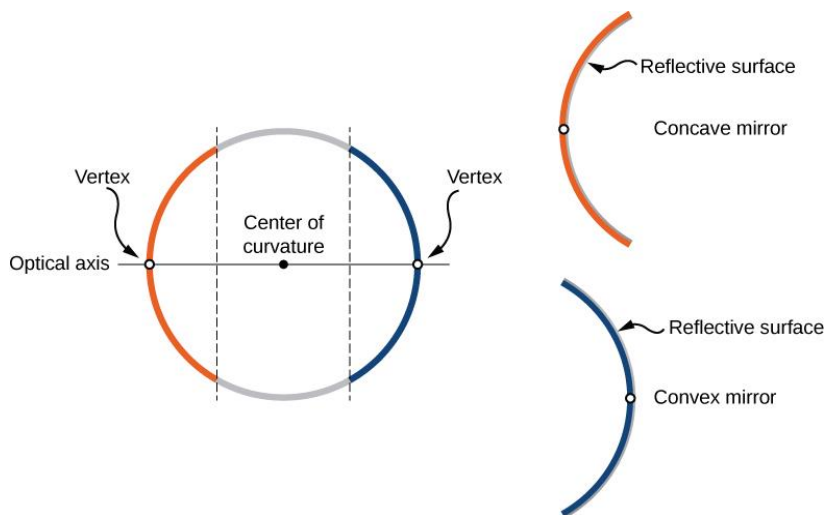
- في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:
- وصف تشكيل الخيال بواسطة المرايا الكروية.
- استخدام المخططات الشعاعية ومعادلة المرآة لتحديد خصائص الخيال في المرآة الكروية.

الخيال في مرآة مستوية له الحجم نفسه للجسم، وصحيح، وله البعد نفسه خلف المرآة كبعد الجسم أمام المرآة. على الجانب الآخر، فإن المرآة المنحنية (**curved mirror**)، يمكنها أن تشكل أحيلة قد تكون أكبر أو أصغر من الجسم، ويمكن أن تتشكل هذه الأحيلة أمام المرآة أو خلفها. وعموماً، فإن أي سطح منحني سيشكل خيلاً على الرغم من أن بعض الأحيلة تكون مشوهة إلى حدٍ لا يمكن التعرف عليها (كمرايا بيت المرح).

نظراً لأن المرايا المنحنية يمكنها تشكيل مجموعة متنوعة جداً من الأحيلة، فإنه يجري استخدامها في العديد من الأجهزة البصرية التي تتمتع بالعديد من الاستخدامات. سنركز على المرايا الكروية، لأنها أسهل من حيث التصنيع مقارنةً بالمرايا الأخرى كالمرايا التي شكلها قطع مكافئ (المرايا المكافئة)، وبالتالي فهي أكثر شيوعاً.

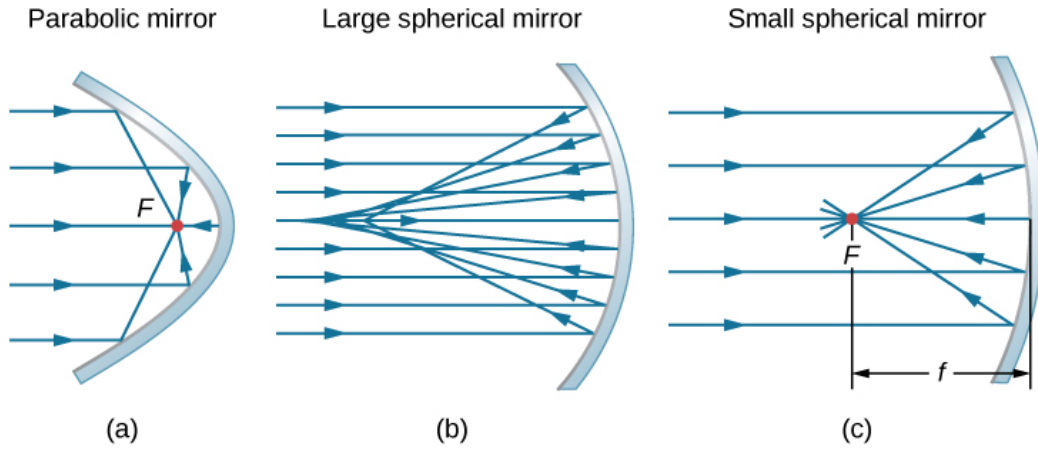
### المرايا المنحنية

يمكننا تمييز نوعين عامين من المرايا الكروية. فإذا كان السطح العاكس للمرآة هو الجانب الخارجي من الكرة، فإن المرآة تُسمى مرآة محدبة (**convex mirror**). أما إذا كان سطحها الداخلي هو السطح العاكس، فإنها تُسمى مرآة مقعرة (**concave mirror**). التناظر هو أحد السمات الرئيسية للعديد من الأجهزة البصرية، بما في ذلك المرايا والعدسات. وغالباً ما يُطلق على محور التناظر لهذه العناصر البصرية المحور الرئيس أو **المحور البصري (optical axis)**. بالنسبة للمرآة الكروية، يمر المحور البصري عبر مركز انحناء المرآة وقمتها (**vertex**)، كما هو موضح في الشكل 5.2.



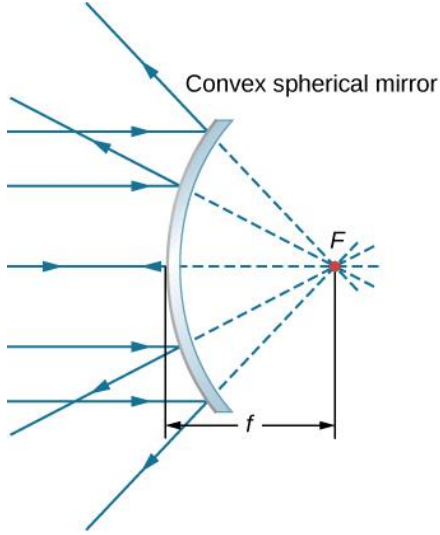
**الشكل 5.2:** تتشكل المرآة الكروية عن طريق قطع جزء من الكرة وطلائها بطبقة مفضضة إما على سطحها الداخلي أو الخارجي. في المرآة المقعرة تكون الطبقة المفضضة على سطحها الداخلي ("الكهف")، أما في المرآة المحدبة فتكون على سطحها الخارجي.

بالنظر إلى الأشعة الموازية للمحور البصري لمرآة مكافئة، كما هو مبين في الجزء (a) من **الشكل 6.2**. ووفقاً لقانون الانعكاس، فإن هذه الأشعة تنعكس بحيث تتلاقى عند نقطة تُسمى **المحرق (focal point)**. يبين الجزء (b) من هذا الشكل مرآة كروية كبيرة مقارنةً بنصف قطر انحنائها. بالنسبة لهذه المرآة، لا تتقاطع الأشعة المنعكسة في النقطة نفسها، وبالتالي لا تتمتع هذه المرآة بمحرق محدد بشكل جيد. وهذا ما يُسمى بالزيوغ الكروي، وينتج عنه خيال غير واضح للجسم المنعكس. يبين الجزء (c) مرآة كروية صغيرة مقارنةً بنصف قطر انحنائها. هذه المرآة هي تقريب جيد للمرآة المكافئة، ذلك أن الأشعة التي تصل موازية للمحور البصري تنعكس إلى محرق محدد جيداً. وتُسمى المسافة على طول المحور البصري من المرآة إلى المحرق **بالبعد المحرقي (focal length focal length)** للمرآة.



**الشكل 6.2** (a) أشعة موازية تنعكس من مرآة مكافئة وتتقاطع في نقطة واحدة تُسمى المحرق  $F$ . (b) الأشعة المتوازية المنعكسة من مرآة كروية كبيرة لا تتقاطع في نقطة مشتركة. (c) إذا كانت المرآة الكروية صغيرة مقارنةً بنصف قطر انحنائها، فإنها تقارب بشكل أفضل الجزء المركزي من المرآة المكافئة، لذلك تتقاطع الأشعة المتوازية بشكلٍ أساسي عند نقطة مشتركة. المسافة على طول المحور البصري من المرآة إلى المحرق هي البعد المحرقي للمرآة  $f$ .

تتمتع المرآة الكروية المحدبة بمحرق أيضاً كما هو مبين في **الشكل 7.2**. تنعكس الأشعة الواردة الموازية للمحور البصري للمرآة وتبدو كأنها تنشأ من النقطة  $F$  عند البعد المحرقي  $f$  خلف المرآة. وبالتالي، فإن المحرق وهمي لأنه لا توجد أشعة حقيقية تمر من خلاله، ولكنها فقط تبدو وكأنها تنشأ منه.



(a)

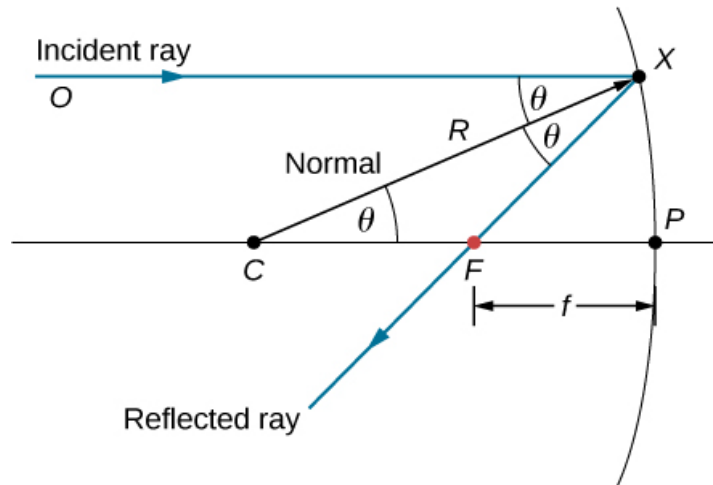


(b)

**الشكل 7.2 (a)** الأشعة المنعكسة بواسطة مرآة كروية محدبة: تنعكس أشعة الضوء الواردة الموازية للمحور البصري للمرآة الكروية المحدبة، وتبدو وكأنها ناشئة عن محرق محدد جيداً على بعد محراقي  $f$  خلف المرآة. المحرق هو نقطة وهمية لأنه لا توجد أشعة حقيقية تمر عبره. (b) صورة لخيال وهمي مُشكّل بمرآة كروية محدبة.

كيف يرتبط البعد المحراقي للمرآة بنصف قطر انحنائها؟ يوضح **الشكل 8.2** شعاعاً واحداً ينعكس بواسطة مرآة كروية مقعرة. الشعاع الوارد موازٍ للمحور البصري. النقطة، التي يتقاطع فيها الشعاع المنعكس مع المحور البصري، هي المحرق. لاحظ أن جميع الأشعة الواردة الموازية للمحور البصري تنعكس من خلال المحرق — نعرض شعاعاً واحداً فقط للتبسيط. نريد أن نجد كيف يرتبط البعد المحراقي  $FP$  (والذي يرمز له بالرمز  $f$ ) بنصف قطر انحناء المرآة  $R$ ، الذي يُعطى طولُه بالعلاقة:  $R = CF + FP$ . يخبرنا قانون الانعكاس أن الزاويتين  $OXC$  و  $CXF$  متساويتان، ولأن الشعاع الوارد موازٍ للمحور البصري، فإن الزاويتين  $OXC$  و  $XCP$  متساويتان أيضاً. وبالتالي، المثلث  $CXF$  هو مثلث متساوي الساقين فيه:  $CF = FX$ . إذا كانت الزاوية  $\theta$  صغيرة (بحيث  $\sin \theta \approx \theta$ )، وهذا ما يُسمى "تقريب الزاوية الصغيرة"، عندئذ يكون:  $FX \approx FP$  أو  $CF \approx FP$ . بإدخال هذا في معادلة نصف القطر  $R$ ، نحصل على:

$$R = CF + FP = FP + FP = 2FP = 2f$$



**الشكل 8.2** الانعكاس في مرآة مقعرة. بتقريب الزاوية الصغيرة، فإن الشعاع الموازي للمحور البصري  $CP$  ينعكس عبر محرق المرآة  $F$ .

بمعنى آخر، بتقريب الزاوية الصغيرة، يكون البعد المحرقي  $f$  للمرآة الكروية المقعرة مساوياً لنصف مقدار نصف قطر انحنائها  $R$ :

$$f = \frac{R}{2}. \quad (2.2)$$

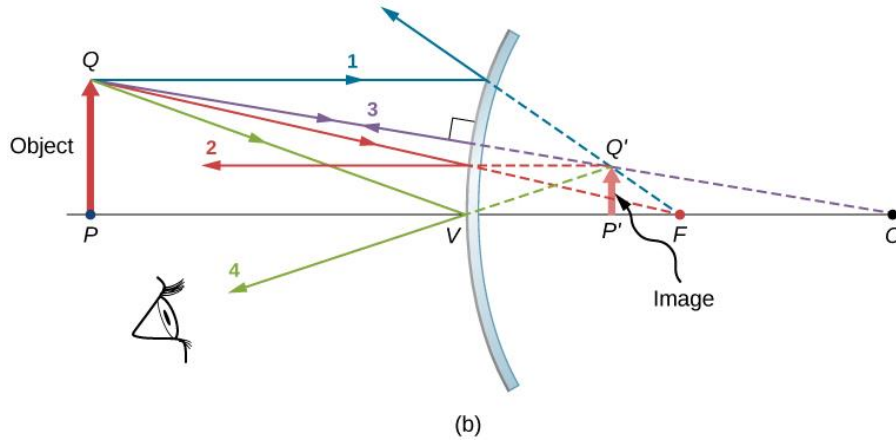
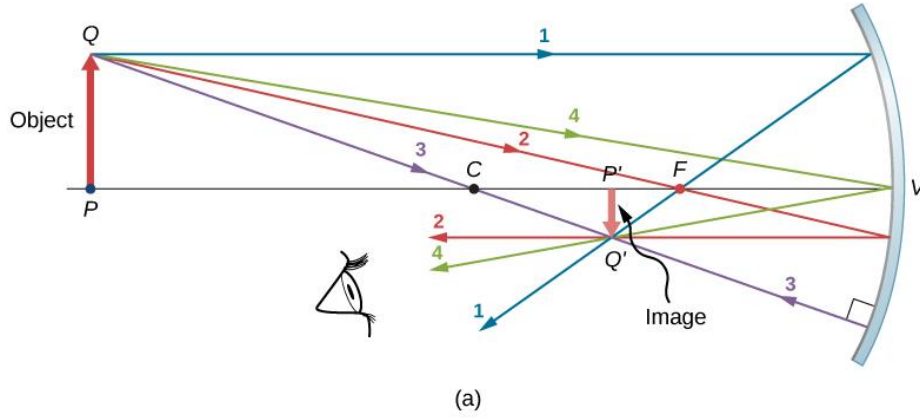
في هذا الفصل، نفترض أن تقريب الزاوية الصغيرة (ويُسمى أيضاً بالتقريب المحوري) صالحاً دائماً. في هذا التقريب، جميع الأشعة هي أشعة محورية، مما يعني أنها تصنع زاوية صغيرة مع المحور البصري، وتبعد عن المحور البصري بمسافة أقل بكثير من نصف قطر الانحناء. في هذه الحالة، تكون زوايا انعكاسها  $\theta$  هي زوايا صغيرة، وعليه يكون:  $\sin \theta \approx \tan \theta \approx \theta$ .

### استخدام تتبع الأشعة لتحديد موقع الأخيطة

لتحديد موقع خيال مُشكّل بواسطة مرآة كروية، نستخدم أولاً تتبع الأشعة، وهي تقنية رسم الأشعة واستخدام قانون الانعكاس لتحديد الأشعة المنعكسة (لاحقاً، بالنسبة للعدسات، نستخدم قانون الانكسار في تحديد الأشعة المنكسرة). بمساعدة بعض أساسيات الهندسة الفراغية، يمكننا استخدام تتبع الأشعة لإيجاد المحرق وموقع الخيال وغيرها من المعلومات حول كيفية تعامل المرآة مع الضوء. في الواقع، لقد استخدمنا فعلاً تتبع الأشعة أعلاه لتحديد المحرق للمرايا الكروية، أو بعد الخيال عن المرايا المسطحة. لتحديد موقع خيال جسم ما، يجب تحديد موقع نقطتين على الأقل من الخيال. ويتطلب تحديد كل نقطة رسم شعاعين على الأقل من نقطة على الجسم وإنشاء الأشعة المنعكسة. النقطة التي تتقاطع عندها الأشعة المنعكسة، سواءً في الفراغ الحقيقي أو الوهمي، هي مكان وجود نقطة الخيال المقابلة. لتسهيل عملية تتبع الأشعة، نركز على أربعة أشعة "رئيسة" يسهل تكوين انعكاساتها.

يبين **الشكل 9.2** مرآة مقعرة ومرآة محدبة، وُضع أمام كل منهما جسم على شكل سهم. يمثل هذا السهم المراد تحديد موقع أخيلته باستخدام تتبع الأشعة. للقيام بذلك، نرسم أشعة من النقطة  $Q$  الموجودة على السهم ولا تقع على المحور البصري. نختار أن نرسم شعاعاً من رأس السهم. ينطلق الشعاع الرئيس 1 من النقطة  $Q$  ويتحرك بالتوازي مع المحور البصري. يجب أن يمر انعكاس هذا الشعاع عبر المحرق، كما هو موضح أعلاه. وهكذا، بالنسبة للمرآة المقعرة، فإن انعكاس الشعاع الرئيس 1 يمر عبر المحرق  $F$ ، كما هو مبين في الجزء (b) من الشكل. بالنسبة للمرآة المحدبة، يكون الامتداد عكسياً لانعكاس الشعاع الرئيس 1 عبر المحرق (أي تركيز وهمي). ينتقل الشعاع الرئيس 2 أولاً على الخط الذي يمر عبر المحرق، ثم ينعكس مرتداً على طول خط موازٍ للمحور البصري. ينتقل الشعاع الرئيس 3 باتجاه مركز انحناء المرآة، لذلك يصل إلى المرآة في حالات الورد الطبيعية، و ينعكس مرتداً على طول الخط الذي ورد منه. وأخيراً، يصل الشعاع الرئيس 4 إلى قمة المرآة، و ينعكس بشكلٍ متناظرٍ حول المحور البصري.





**الشكل 9.2:** الأشعة الأربعة الرئيسية المبينة لكل من (a) المرآة المقعرة و (b) المرآة المحدبة. أشكال الخيال حيث تتقاطع الأشعة (للخيال الحقيقي)، أو حيث تتقاطع امتداداتها الخلفية (للخيال الوهمي).

تتقاطع الأشعة الرئيسية الأربعة عند النقطة  $Q'$ ، حيث يقع خيال النقطة  $Q$ . لتحديد موقع النقطة  $Q'$ ، يكفي رسم أي من هذه الأشعة الأساسية. لذلك لك حرية اختيار أي من الأشعة الرئيسية لتحديد موقع الخيال. يكون رسم أكثر من شعاعين رئيسيين مفيداً في بعض الأحيان للتحقق من صحة تتبع الأشعة.

لتحديد موقع الخيال المنعكس بشكل كامل، نحتاج إلى تحديد موقع نقطة ثانية من هذا الخيال، لمعرفة اتجاهه. للقيام بذلك، نقوم بتتبع الأشعة الرئيسية من قاعدة الجسم. في هذه الحالة، تسير جميع الأشعة الرئيسية الأربعة على طول المحور البصري، فتنعكس من المرآة، ثم تسير على طول المحور البصري. تكمن الصعوبة في أنه نظراً لأن هذه الأشعة خطية، لا يمكننا تحديد نقطة فريدة حيث تتقاطع. كل ما نعرفه هو أن قاعدة الخيال موجودة على المحور البصري. ومع ذلك، نظراً لأن المرآة متناظرة من الأعلى والأسفل، فإنها لا تغير الاتجاه العمودي للجسم. وبالتالي، نظراً لأن الجسم عمودي، يجب أن يكون الخيال عمودياً. لذلك، يكون خيال قاعدة الجسم على المحور البصري مباشرةً فوق خيال الطرف، كما هو مرسوم في الشكل a 9.2.

بالنسبة للمرآة المقعرة، يتشكل الخيال المنعكس في هذه الحالة بين المحرق ومركز انحناء المرآة. ويكون مقلوباً بالنسبة للجسم، وحقيقياً، وأصغر من الجسم. إذا قرنا الجسم من المرآة أو أبعدناه عنها، فستتغير خصائص الخيال. على سبيل المثال، نوضح، كتمرين لاحق، أن الجسم الذي وُضع بين مرآة مقعرة ومحرقها، سيظهر له خيال وهمي صحيح وأكبر منه. بالنسبة للمرآة المحدبة، يتشكل الخيال المنعكس بين المحرق والمرآة. ويكون صحيحاً بالنسبة للجسم، وهمي وأصغر منه.

## ملخص قواعد تتبع الأشعة

تتبع الأشعة مفيد جداً بالنسبة للمرايا. يتم تلخيص قواعد تتبع الأشعة هنا لتبقى كمرجع:

- ينعكس الشعاع الذي يتحرك موازياً للمحور البصري للمرآة الكروية على طول الخط المار بمحرقها (الشعاع 1 في الشكل 9.2)
- ينعكس الشعاع الذي يتحرك على طول الخط المار بمحرق المرآة الكروية على طول خط موازٍ لمحورها البصري (الشعاع 2 في الشكل 9.2).

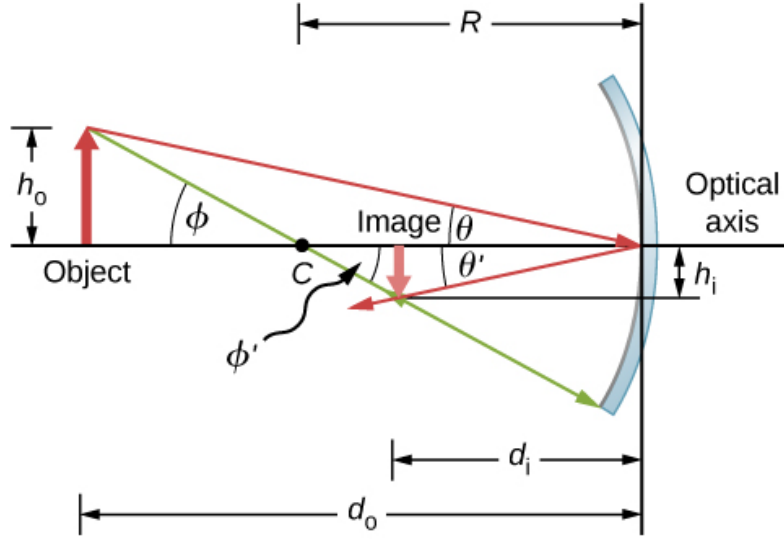
- الشعاع الذي يتحرك على طول الخط المار بمركز انحناء المرآة الكروية ينعكس مرتداً على نفسه (الشعاع 3 - الشكل 9.2)
  - ينعكس الشعاع الوارد على قمة المرآة الكروية بشكل متناظر حول المحور البصري للمرآة (الشعاع 4 - الشكل 9.2).
- نستخدم تتبع الأشعة لتوضيح كيف تتشكل الأحيلة بواسطة المرايا والحصول على معلومات رقمية حول الخصائص البصرية للمرآة. إذا افترضنا أن المرآة صغيرة مقارنةً بنصف قطر انحنائها، فيمكننا أيضاً استخدام الجبر والهندسة الفراغية لاشتقاق معادلة المرآة، وهو ما نقوم به في القسم التالي. يعد الجمع بين تتبع الأشعة ومعادلة المرآة طريقة جيدة لتحليل أنظمة المرآة.

## تَشكُّل الخيال بواسطة الانعكاس - معادلة المرآة

بالنسبة للمرآة المستوية، فقد بيَّنا أن الخيال المشكَّل يتمتع بالارتفاع والاتجاه نفسه للجسم، ويقع على البعد نفسه خلف المرآة كبعد الجسم أمام المرآة. وعلى الرغم من أن الموقف أكثر تعقيداً بعض الشيء بالنسبة للمرايا المنحنية، إلا أن استخدام الهندسة الفراغية يعطي علاقات بسيطة تربط بُعد الجسم والخيال بالبعد المحرقي للمرايا المقعرة والمحدبة.

بالنظر إلى الجسم  $OP$  المبين في الشكل 10.2. نرسم مركز انحناء المرآة بالرمز  $C$  ويكون على بعد  $R$  من قمة المرآة، كما هو موضح في هذا الشكل. كما يرمز لبعد الجسم والخيال بالرموز  $d_o$  و  $d_i$ ، وكذلك ارتفاع الخيال والجسم بالرموز  $h_o$  و  $h_i$ ، على التوالي. ونظراً لأن الزاويتين  $\phi$  و  $\phi'$  هما زاويتان متبادلتان داخلياً، يكون لهما القيمة نفسها. ومع ذلك، يجب أن تختلفا في الإشارة إذا قمنا بقياس الزوايا من المحور البصري، لذلك نقول:  $\phi = -\phi'$ . وبالمثل للزوايا  $\theta$  و  $\theta'$ . يجزينا قانون الانعكاس أن لهما القيمة نفسها، ولكن يجب أن تختلف إشارتهما إذا قمنا بقياس الزوايا من المحور البصري. وبالتالي:  $\theta = -\theta'$ . بأخذ ظل هذه الزوايا  $\theta$  و  $\theta'$ ، واستخدام العلاقة:  $\tan(-\theta) = -\tan \theta$  نجد:

$$\left. \begin{aligned} \tan \theta &= \frac{h_o}{d_o} \\ \tan \theta' &= -\tan \theta = \frac{h_i}{d_i} \end{aligned} \right\} \frac{h_o}{d_o} = \frac{h_i}{d_i} \text{ or } -\frac{h_o}{h_i} = \frac{d_o}{d_i} \quad (2.3)$$



الشكل 10.2 الخيال المُشكَّل بواسطة مرآة مقعرة.

وبالمثل، إذا أخذنا ظل الزوايا  $\phi$  و  $\phi'$  نجد:

$$\left. \begin{aligned} \tan \phi &= \frac{h_o}{d_o - R} \\ \tan \phi' &= -\tan \phi = \frac{h_i}{R - d_i} \end{aligned} \right\} \frac{h_o}{d_o - R} = -\frac{h_i}{R - d_i} \text{ or } -\frac{h_o}{h_i} = \frac{d_o - R}{R - d_i}$$

عطي لجمع بين هاتين النتيجةين:

$$\frac{d_o}{d_i} = \frac{d_o - R}{R - d_i}$$

وبعد التعديل الجبري، تصبح المعادلة من الشكل:

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{2}{R} \quad (2.4)$$

ليس هناك داع لتقريب هذه النتيجة، لذلك فهي صحيحة تماماً. ومع ذلك، كما نوقش أعلاه، في تقريب الزاوية الصغيرة، فإن البعد المحرقى للمرآة الكروية يساوي نصف قيمة نصف قطر انحناء المرآة، أو  $f = R/2$ . ويأخذ هذه العلاقة في **المعادلة 2.3** نحصل على معادلة المرآة:

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} \quad (2.5)$$

تربط معادلة المرآة بعد الخيال والجسم بالبعد المحرقى وتكون صالحة فقط في تقريب الزاوية الصغيرة. وعلى الرغم من اشتقاقها من المرآة المقعرة، إلا أنها تستخدم أيضاً للمرايا المحدبة (يترك إثبات ذلك كتمرين). يمكننا تمديد معادلة المرآة إلى حالة المرآة المستوية من خلال الإشارة إلى أن المرآة المستوية نصف قطر انحنائها لانهائي. وهذا يعني أن المحرق يقع في اللانهاية، وبالتالي يمكن تبسيط معادلة المرآة إلى الشكل:

$$d_o = -d_i \quad (2.6)$$

وهي **المعادلة 2.1** نفسها التي تم الحصول عليها سابقاً.

لاحظ أننا تعاملنا بحذر شديد مع الإشارات عند استخلاص معادلة المرآة. بالنسبة للمرآة المستوية، يكون لبعدها الخيال إشارة تعاكس إشارة بعد الجسم. كذلك، فإن الخيال الحقيقي الذي تشكله المرآة المقعرة في الشكل 10.2 يقع على الجانب الآخر من المحور البصري بالنسبة للجسم. وفي هذه الحالة، يجب أن يكون لارتفاع الخيال إشارة معاكسة لإشارة ارتفاع الجسم. لتتبع إشارات القيم المختلفة في معادلة المرآة، نقدم الآن اصطلاح الإشارة.

### اصطلاح الإشارة للمرايا كروية

يعد استخدام اصطلاح ثابت للإشارة مهماً جداً في البصريات الهندسية، حيث يقوم بتعيين قيم موجبة أو سالبة للكميات المميزة للجملة البصرية. كما يتيح لنا فهم اصطلاح الإشارة وصف الخيال دون إنشاء مخطط شعاعي. ويتلخص اصطلاح الإشارة كما يلي:

1. البعد المحرقى  $f$  موجب للمرايا المقعرة وسالب للمرايا المحدبة.
  2. بعد الخيال  $d_i$  موجب بالنسبة للأخيلة الحقيقية وسالب للأخيلة الوهمية.
- لاحظ أن القاعدة 1 تعني أن نصف قطر انحناء المرآة الكروية يمكن أن يكون موجباً أو سالباً. ماذا يعني أن يكون لديك نصف قطر الانحناء سالباً؟ هذا يعني ببساطة أن نصف قطر الانحناء للمرآة المحدبة مُعرّف بأنه سالب.

### تكبير الخيال

دعنا نستخدم اصطلاح الإشارة لتفسير اشتقاق معادلة المرآة. وجدنا في اشتقاق هذه المعادلة، أن ارتفاع الجسم والخيال مرتبطان بالعلاقة:

$$-\frac{h_o}{h_i} = \frac{d_o}{d_i} \quad (2.7)$$

انظر إلى المعادلة 2.3 يكون كلٌّ من الجسم والخيال، الذي تشكله المرآة في الشكل 10.2، حقيقيين، لذلك يكون بعد الجسم والخيال موجبين. تقع أعلى نقطة للجسم فوق المحور البصري، لذلك يكون ارتفاع الجسم موجباً. ولكن الخيال يقع تحت المحور البصري، وبالتالي فإن ارتفاع الخيال سالب. وعليه، فإن اصطلاح الإشارة يتفق مع اشتقاق معادلة المرآة. في الواقع، تصف المعادلة 2.7 التكبير الخطي (وغالباً ما يطلق عليه "التكبير") للخيال بدلالة بعد الجسم والخيال. وبالتالي فإن التكبير  $m$  دون أبعاد يعطى بالعلاقة التالية:

$$m = \frac{h_i}{h_o} \quad (2.8)$$

إذا كانت  $m$  موجبة، يكون الخيال صحيحاً، وإذا كانت  $m$  سالبة، يكون الخيال مقلوباً. إذا كانت:  $|m| > 1$ ، فإن الخيال أكبر من الجسم، وإذا كانت:  $|m| < 1$ ، يكون الخيال أصغر من الجسم. بهذا التعريف الخاص بالتكبير، نحصل على العلاقة التالية التي تربط بين أبعاد الجسم والخيال الأفقية والعمودية:

$$m = \frac{h_i}{h_o} = \frac{d_i}{d_o} \quad (2.9)$$

هذه العلاقة مهمة جداً لأنها تتيح لنا الحصول على تكبير الخيال من خلال أبعاد الجسم والخيال، والتي يمكنك الحصول عليها من معادلة المرآة.

## جملة توليد الطاقة الشمسية الكهربائية

تتضمن إحدى التقنيات الشمسية المستخدمة اليوم لتوليد الكهرباء جهازاً (يُسمى حوض القطع المكافئ أو مجمع الطاقة الشمسية) يقوم بتركيز أشعة الشمس على أنبوب أسود يحتوي على سائل. يتم ضخ هذا السائل المسخن إلى مبادل حراري، حيث يتم نقل الطاقة الحرارية إلى نظام آخر يستخدم لتوليد البخار وتوليد الكهرباء في نهاية المطاف من خلال دورة البخار التقليدية. يوضح الشكل 11.2 نظام العمل هذا في جنوب كاليفورنيا. المرآة الحقيقية عبارة عن أسطوانة على شكل قطع مكافئ يقع تركيزها على الأنابيب؛ ومع ذلك، يمكننا تقريب المرآة إلى ربع أسطوانة دائرية تماماً.



الشكل 11.2 تستخدم مجمعات الحوض المكافئ لتوليد الكهرباء في جنوب كاليفورنيا.

- (a) إذا كان المطلوب تركيز أشعة الشمس على ارتفاع 40.0 cm من المرآة، فما هو نصف قطر المرآة؟  
 (b) ما كمية أشعة الشمس المركزة على الأنبوب، لكل مترٍ من طول الأنبوب، بفرض أن الشمس (شدة الأشعة الشمسية الواردة) تساوي  $900 \text{ W/m}^2$ ؟  
 ج. إذا كان قطر الأنبوب الحامل للسائل يساوي 2.00 cm، فما هي الزيادة في درجة حرارة السائل لكل متر من الأنبوب على مدى دقيقة واحدة؟ افترض أن كامل الإشعاع الشمسي الوارد على العاكس تمتصه الأنابيب، وأن السائل هو زيت معدني.

## خطة الحل:

أولاً تحديد المبادئ الفيزيائية المستخدمة. يرتبط الجزء (a) ببصريات المرايا الكروية. يحوي الجزء (b) على القليل من الرياضيات، والهندسة الفراغية في المقام الأول. يتطلب الجزء (c) فهم الحرارة والكثافة.

## الحل:

- (a) الشمس هي الجسم، وبالتالي فإن بعد الجسم لا نهائي أساساً أي:  $d_o = \infty$ . بعد الخيال المطلوب  $d_i = 40.0 \text{ cm}$ . نستخدم معادلة المرآة لإيجاد البعد المحرق للمرآة:

$$\begin{aligned}\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} &= \frac{1}{f} \\ f &= \left( \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} \right)^{-1} \\ &= \left( \frac{1}{\infty} + \frac{1}{40.0 \text{ cm}} \right)^{-1} \\ &= 40.0 \text{ cm}\end{aligned}$$

وبالتالي، يبلغ نصف قطر المرآة  $R = 2f = 80.0 \text{ cm}$ .

(b) شدة الأشعة الشمسية الواردة تساوي  $900 \text{ W/m}^2$ . يجب إيجاد مساحة مقطع المرآة المقعرة  $A$ ، انطلاقاً من أن القدرة التي يتم توصيلها تبلغ  $900 \text{ W/m}^2 \times A$ . المرآة في هذه الحالة هي ربع أسطوانة، وبالتالي فإن المساحة لطول  $L$  من المرآة هي:  $A = \frac{1}{4}(2\pi R)L$ . عندئذ تكون المساحة لطول  $1.00 \text{ m}$  هي:

$$A = \frac{\pi R(1.00 \text{ m})}{2} = \frac{(3.14)(0.800 \text{ m})(1.00 \text{ m})}{2} = 1.26 \text{ m}^2.$$

وعليه فإن استطاعة الشمس على طول الأنبوب البالغ طوله  $1.00 \text{ متر}$  هو:

$$\left( 9.00 \times 10^2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right) (1.26 \text{ m}^2) = 1130 \text{ W}.$$

(c) الزيادة في درجة الحرارة تعطى بالعلاقة:  $Q = mc\Delta T$ . كتلة الزيت المعدني  $m$  في متر واحد من الأنبوب هي:

$$\begin{aligned}m &= \rho V = \rho \pi \left( \frac{d}{2} \right)^2 (1.00 \text{ m}) \\ &= (8.00 \times 10^2 \text{ kg/m}^3)(3.14)(0.0100 \text{ m})^2(1.00 \text{ m}) \\ &= 0.251 \text{ kg}\end{aligned}$$

لذلك، فإن الزيادة في درجة الحرارة في دقيقة واحدة:

$$\begin{aligned}\Delta T &= Q/mc \\ &= \frac{(1130 \text{ W})(60.0 \text{ s})}{(0.251 \text{ kg})(1670 \text{ J} \cdot \text{kg}/^\circ\text{C})} \\ &= 162^\circ\text{C}\end{aligned}$$

### ملاحظة

يمكن أن توفر مجموعة من هذه الأنابيب في صحراء كاليفورنيا ناتجاً حرارياً يبلغ  $250 \text{ MW}$  في يوم مشمس، مع وصول السوائل إلى درجات حرارة تصل إلى  $400$  درجة مئوية، ونحن ندرس في هذا المثال في متر واحد فقط من الأنابيب ونحمل الضياعات الحرارية على طول الأنبوب.

## مثال 2.2

### خيال في مرآة محدبة

الكيراتوميتر أو مقياس تقوس القرنية: هو جهاز يستخدم لقياس انحناء القرنية في العين، وتحديدًا لاختيار العدسات اللاصقة المناسبة. حيث ينعكس الضوء من القرنية، التي تعمل كمرآة محدبة، ويقاس مقياس تقوس القرنية قيمة تكبير الخيال. كلما كانت قيمة التكبير

أقل، كان نصف قطره انحناء القرنية أصغر. إذا كان مصدر الضوء على بعد 12 cm من القرنية وكان تكبير الخيال 0.032، فما هو نصف قطر انحناء القرنية؟

### خطة الحل:

إذا أوجدنا البعد المحرقى للمراة المحدبة المكونة بالقرنية، عندها يمكن معرفة نصف قطر الانحناء (وهو ضعف البعد المحرقى). بعد الجسم  $d_o = 12 \text{ cm}$  والتكبير  $m = 0.032$ . أوجد أولاً بعد الخيال  $d_i$  ثم احسب البعد المحرقى  $f$ .

### الحل:

ابدأ بمعادلة التكبير  $m = -d_i/d_o$ . بحل المعادلة من أجل قيمة  $d_i$  وإدخال القيم المعطاة نجد:

$$d_i = -md_o = -(0.032)(12 \text{ cm}) = -0.384 \text{ cm}$$

حيث احتفظنا برقم دقة إضافي مهم لأن هذه الخطوة متوسطة في الحساب. حل معادلة المرآة من أجل قيمة البعد المحرقى  $f$  وأدخل القيم المعلومة لبعد الجسم والخيال. والنتيجة هي:

$$\begin{aligned} \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} &= \frac{1}{f} \\ f &= \left( \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} \right)^{-1} \\ &= \left( \frac{1}{12 \text{ cm}} + \frac{1}{-0.384 \text{ cm}} \right)^{-1} \\ &= -0.40 \text{ cm} \end{aligned}$$

نصف قطر الانحناء هو ضعف البعد المحرقى، وبالتالي:

$$R = 2f = -0.80 \text{ cm}$$

### ملاحظة:

البعد المحرقى سالب، وبالتالي فإن التركيز يكون ظاهرياً، كما هو متوقع بالنسبة للمرآة المقعرة والجسم الحقيقي. نصف قطر الانحناء الموجود هنا معقول للقرنية. يبلغ بعد القرنية عن شبكية العين في عين الشخص البالغ نحو 2.0 cm. عملياً، قد لا تكون القرنيات كروية، مما يعقد مهمة تركيب العدسات اللاصقة. لاحظ أن بعد الخيال هنا سالب ومتفق مع حقيقة أن الخيال خلف المرآة. وبالتالي، فإن الخيال وهمي لأنه لا توجد أشعة تمر بالفعل. في المسائل والتدريبات، ستبين أنه لبعد جسم ثابت، نصف قطر الانحناء الأصغر يوافق التكبير الأصغر.

## خطة حل المسائل: المرايا الكروية

- الخطوة 1. تأكد أولاً من أن الخيال قد تشكل بواسطة مرآة كروية.
- الخطوة 2. تحديد فيما إذا كان المطلوب استخدامه هو تتبع الأشعة، أم معادلة المرآة، أم كلاهما. يعد الرسم مفيداً جداً حتى لو لم يكن في المسألة مطلوباً استخدام تتبع الأشعة تحديداً. اكتب الرموز والقيم المعروفة على الرسم.
- الخطوة 3. حدد بالضبط ما يجب حسابه في المسألة (تحديد المجهول).
- الخطوة 4. قم بعمل قائمة بما تم إعطاؤه أو يمكن استنتاجه من نص المسألة (حدد المعطيات).
- الخطوة 5. إذا كان استخدام مخطط تتبع الأشعة مطلوباً، فاستخدم قواعد تتبع الأشعة المدرجة في بداية هذا القسم.
- الخطوة 6. تتطلب معظم المسائل الكمية استخدام معادلة المرآة. استخدم الأمثلة كدليل لاستخدام معادلة المرآة.
- الخطوة 7. تحقق لمعرفة ما إذا كانت الإجابة منطقية أم لا. هل تتوافق إشارات بعد الجسم والخيال والبعد المحرق مع ما هو متوقع من مخطط تتبع الأشعة؟ هل إشارة التكبير صحيحة؟ هل قيم بعد الجسم والخيال منطقية؟

## الخروج من تقريب الزاوية الصغيرة

تقريب الزاوية الصغيرة هو حجر الزاوية في المناقشة أعلاه لتشكيل الخيال بواسطة مرآة كروية. عند انتهاك هذا التقريب، يصبح الخيال الذي تم تشكيله بواسطة مرآة كروية مشوهاً. ويُسمى هذا التشويه بالزويغ (**aberration**). نناقش هنا باختصار نوعين محددتين من الزويغ: الزويغ الكروي والزويغ اللوني (الغيبوبة).

## الزويغ الكروي

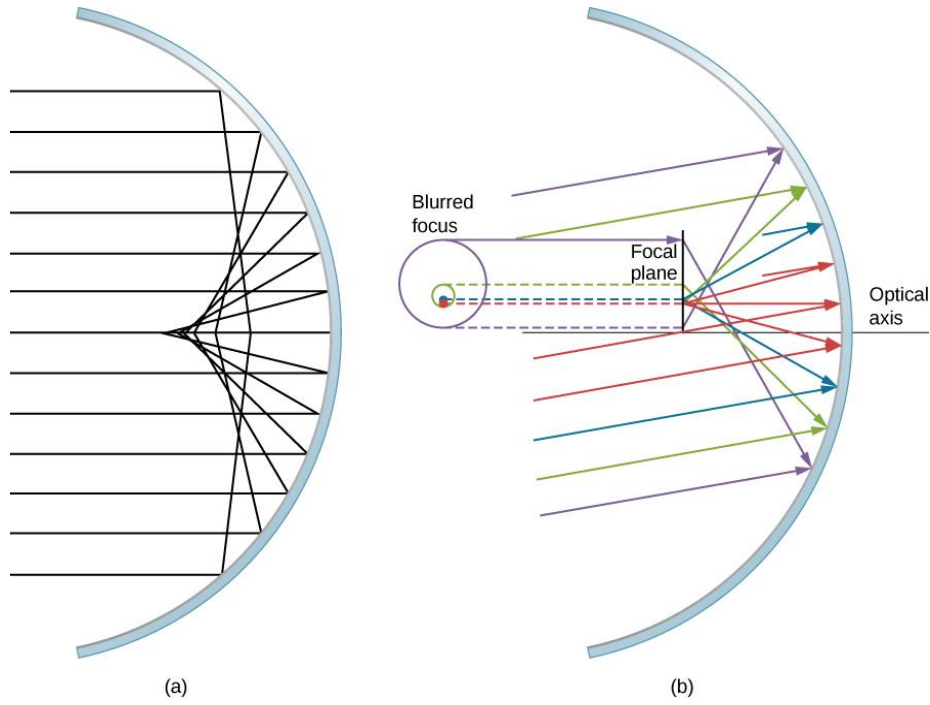
باعتبار حزمة واسعة من الأشعة المتوازية التي تسقط على مرآة كروية، كما هو مبين في **الشكل 12.2**. كلما ابتعدت الأشعة الواردة عن المحور البصري، ساء تقارب المرآة الكروية للمرآة المكافئة. وبالتالي، لا يتم تركيز هذه الأشعة في النقطة نفسها كالأشعة القريبة من المحور البصري، كما هو موضح في هذا الشكل. بسبب الزويغ الكروي (**spherical aberration**) سيتم تشويه خيال الجسم المنعكس في المرآة الكروية. الزويغ الكروي هي سمة من سمات المرايا والعدسات التي نأخذها بالحسبان في القسم التالي من هذا الفصل (نحن بحاجة إلى المزيد من المرايا والعدسات الأكثر تطوراً للقضاء على الزويغ الكروي).

## الغيبوبة أو الزويغ اللوني

يشبه الزويغ اللوني مثيله الكروي، ولكنه ينشأ عندما تكون الأشعة الواردة غير موازية للمحور البصري، كما هو موضح في الجزء (b) من **الشكل 12.2**. تذكّر أن تقريب الزاوية الصغيرة ينطبق على المرايا الكروية التي تُعدُّ صغيرة مقارنةً بنصف قطرها. في هذه الحالة، تُعدُّ المرايا الكروية تقريباً جيداً للمرايا المكافئة. تُركز مرايا القطع المكافئ جميع الأشعة المتوازية مع المحور البصري في المحرق. ومع ذلك، فإن الأشعة المتوازية فيما بينها، والتي لا توازي المحور البصري، تتركز على ارتفاعات مختلفة وعلى أبعاد محرقية مختلفة كما هو مبين في الجزء (b) من **الشكل 12.2**. ونظراً لأن المرآة الكروية متناظرة حول المحور البصري، فإن الأشعة الملونة المختلفة في هذا الشكل تُنشئ دوائر من الألوان الموافقة على المستوى المحرق.

على الرغم من أن المرآة الموضحة في الجزء (b) من **الشكل 12.2**، هي مرآة كروية، إلا أن الزويغ اللوني يحدث أيضاً في المرايا المكافئة -لا ينجم عن انحراف تقريب الزاوية الصغيرة. ومع ذلك، يحدث انحراف كروي فقط للمرايا الكروية، وينجم عن انحراف في تقريب الزاوية الصغيرة. وسنناقش كلاً من الزويغ اللوني والزويغ الكروي في وقت لاحق من هذا الفصل، فيما يتعلق بالتلسكوبات.





**الشكل 12.2 (a)** في الزيوغ الكروي، تتركز الأشعة البعيدة عن المحور البصري والأشعة القريبة من المحور البصري في نقاط مختلفة. لاحظ أن الزيوغ يزداد سوءاً للأشعة البعيدة عن المحور البصري. (b) بالنسبة للانحراف اللوني، تتركز الأشعة المتوازية فيما بينها وغير الموازية للمحور البصري على ارتفاعات مختلفة وأبعاد محرقية مختلفة، لذلك يحتوي الخيال على "ذيل" يشبه المذنب (وهو "غيبوبة" في اللاتينية). لاحظ أن الأشعة الملونة هي فقط لتسهيل المشاهدة؛ لا تشير الألوان إلى لون الضوء .

### 3.2 | الأخيطة المُشكَّلة بالانكسار Images Formed by Refraction

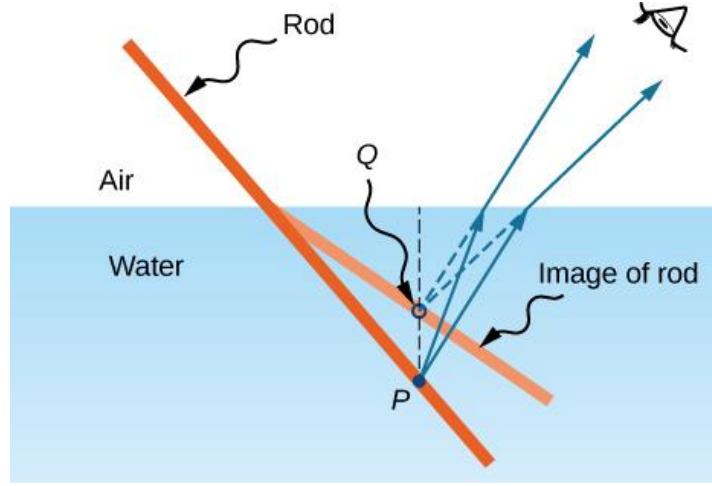
#### الأهداف التعليمية

- في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:
- وصف تشكيل الخيال بسطح انكسار أحادي.
- وصف تشكيل الخيال بسطح انكسار أحادي.
- تحديد موقع الخيال وحساب خصائصه باستخدام معادلة سطح الانكسار الأحادي.

عندما تنتقل أشعة الضوء من وسط إلى آخر، فإن هذه الأشعة تخضع للانكسار، وهو ما يحدث عند ثني موجات الضوء عند السطح الفاصل بين الوسطين. ويمكن أن يشكل سطح الانكسار خيلاً بطريقة مماثلة لسطح الانعكاس، إلا أن قانون الانكسار (قانون سنيل) هو أساس هذه العملية بدلاً من قانون الانعكاس.

#### الانكسار عند سطح بيني مستوي - العمق الظاهري

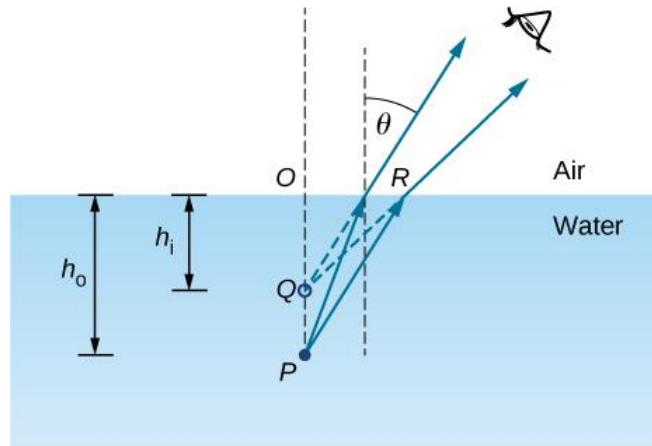
إذا نظرت إلى قضيب مستقيم مغمور جزئياً بالماء، يبدو أنه ينحني عند السطح (الشكل 13.2). السبب وراء هذا التأثير الغريب هو أن خيال القضيب داخل الماء يكون أقرب إلى السطح قليلاً من الموضع الفعلي للقضيب، لذلك لا يصطف مع جزء القضيب الموجود فوق الماء في خط واحد. الظاهرة نفسها تفسر لماذا تبدو الأسماك في الماء أقرب إلى السطح مما هي عليه بالفعل.



**الشكل 13.2:** انحناء قضيب عند السطح الفاصل بين الماء والهواء. تظهر النقطة  $P$  على القضيب عند النقطة  $Q$ ، حيث يتشكل خيال النقطة  $P$  بسبب الانكسار عند السطح الفاصل بين الهواء والماء.

لدراسة تشكيل الخيال الناتج عن الانكسار، خذ بالحسبان الأسئلة التالية:

1. ماذا يحدث لأشعة الضوء عندما تدخل أو تمر عبر وسطٍ مختلف؟
2. هل تلتقي الأشعة المنكسرة التي تنشأ من نقطة واحدة عند نقطة ما أم إن بعضها يتعد عن بعض؟ لكي نكون أكثر تحديداً، فإننا نعتبر نظاماً بسيطاً مكوناً من وسطين مفصولين بسطحٍ بيني مستوي (الشكل 14.2). يكون الجسم في أحد الوسطين ومراقباً في الآخر. على سبيل المثال، عندما ننظر إلى سمكة من فوق سطح الماء، تكون السمكة في الوسط 1 (الماء) ذي قرينة الانكسار 1.33، وتكون عينك في الوسط 2 (الهواء) وقرينة الانكسار 1.00، وسطح الماء هو السطح الفاصل. العمق الذي "تراه" هو ارتفاع الخيال  $h_i$  ويُسمى بالعمق الظاهري (apparent depth). العمق الفعلي للأسماك هو ارتفاع الجسم  $h_o$ .



**الشكل 14.2:** العمق الظاهري الناتج عن الانكسار. يقع الجسم الحقيقي في النقطة  $P$  ويتشكل خياله عند النقطة  $Q$ . الخيال لا يقع عند العمق نفسه للجسم، ولذلك يرى المراقب الخيال عند "عمق ظاهري".

يعتمد العمق الظاهري  $h_i$  على الزاوية، التي يُرى منها الخيال. ولرؤيته من الأعلى (أو ما يُسمى بـ "المنظر العادي")، يمكننا تقريب زاوية الانكسار  $\theta$  إلى زاوية صغيرة، واستبدال  $\sin \theta$  في قانون سنيل بـ  $\tan \theta$ . باستخدام هذا التقريب، يمكننا استخدام المثلثات  $\Delta OQR$  و  $\Delta OPR$  لإظهار أن العمق الظاهري يعطى بالعلاقة:

$$h_i = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)h_o. \quad (2.10)$$

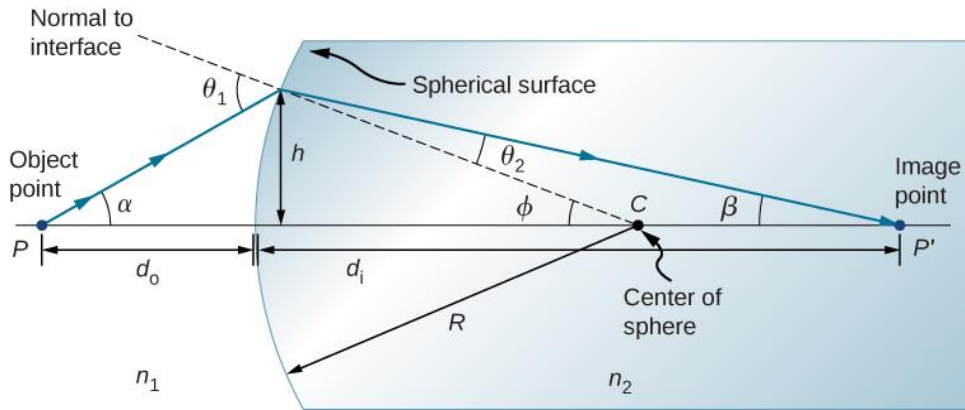
يتم اشتقاق هذه النتيجة كتمرين. وهكذا، تظهر السمكة في 4/3 العمق الحقيقي عندما ينظر إليها من الأعلى.

### الانكسار عند السطح الفاصل الكروي

تؤدي الأشكال الكروية دوراً مهماً في البصريات نظراً لأن الأشكال الكروية عالية الجودة أسهل في التصنيع من السطوح المنحنية الأخرى. لدراسة الانكسار عند السطح الكروي الأحادي، نفترض أن الوسط ذا السطح الكروي في إحدى النهايات يستمر إلى مالا نهاية (وسط "شبه لانهاية").

### الانكسار عند السطح المحدب

باعتبار وجود مصدر ضوء نقطي عند النقطة  $P$  أمام السطح المحدب المصنوع من الزجاج (انظر الشكل 15.2). وعلى اعتبار أن  $R$  هو نصف قطر الانحناء، و  $n_1$  هي قرينة انكسار الوسط الذي يوجد به الجسم النقطة  $P$ ، و  $n_2$  هي قرينة انكسار الوسط ذي السطح الكروي. نريد أن نعرف ما يحدث نتيجة الانكسار عند هذا السطح.



الشكل 2.15 الانكسار عند سطح محدب ( $n_2 > n_1$ ).

نظراً للتماثل الموجود، يكفي دراسة الأشعة في مستوٍ واحدٍ فقط. يوضح الشكل شعاع الضوء الذي ينطلق من النقطة  $P$  فينكسر عند السطح ويمر عبر نقطة الخيال  $P'$ . نستنتج علاقة تربط بين بعد الجسم  $d_o$  وبعد الخيال  $d_i$  ونصف قطر الانحناء  $R$ .

بتطبيق قانون سنيل على الشعاع المنبعث من النقطة  $P$  يعطينا:  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ . ولما كنا نستخدم تقريب الزاوية الصغيرة، فإن

$$\sin \theta \approx \theta \quad \text{وقانون سنيل يأخذ الشكل: } n_1 \theta_1 \approx n_2 \theta_2.$$

هندسياً من الشكل، نلاحظ أن:

$$\theta_1 = \alpha + \phi, \quad \theta_2 = \phi - \beta.$$

بإدخال هذه العلاقات في قانون سنيل نجد:

$$n_1 (\alpha + \phi) \approx n_2 (\phi - \beta).$$

باستخدام المخطط، نحسب ظل الزوايا  $\alpha$  و  $\beta$  و  $\phi$ :

$$\tan \alpha \approx \frac{h}{d_o}, \quad \tan \beta \approx \frac{h}{d_i}, \quad \tan \phi \approx \frac{h}{R}.$$

مرة أخرى باستخدام تقريب الزاوية الصغيرة، نجد أن  $\tan \theta \approx \theta$ ، لذلك تصبح العلاقات أعلاه

$$\alpha \approx \frac{h}{d_o}, \quad \beta \approx \frac{h}{d_i}, \quad \phi \approx \frac{h}{R}.$$

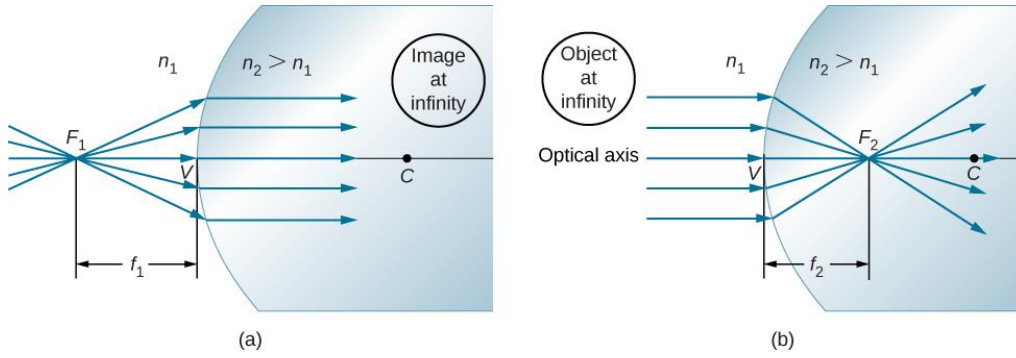
بوضع هذه الزوايا في قانون سنيل نجد:

$$n_1 \left( \frac{h}{d_o} + \frac{h}{R} \right) = n_2 \left( \frac{h}{R} - \frac{h}{d_i} \right).$$

يمكننا كتابة هذا بشكل ملائم ليصبح:

$$\frac{n_1}{d_o} + \frac{n_2}{d_i} = \frac{n_2 - n_1}{R}. \quad (2.11)$$

إذا تم وضع الجسم في نقطة خاصة تُسمى **المحرق الأول**، أو **محرق الجسم**  $F_1$ ، فسيتشكل الخيال في اللانهاية، كما هو موضح في الجزء (a) من **الشكل 16.2**



**الشكل 16.2** (a) المحرق الأول (يُسمى "محرق الجسم") للانكسار عند سطح محدب (b) المحرق الثاني (يُسمى "محرق الخيال") للانكسار عند سطح محدب.

يمكننا إيجاد موقع المحرق الأول  $F_1$  والذي يرمز له بالرمز  $f_1$  من خلال تعويض قيمة  $d_i = \infty$  في المعادلة السابقة.

$$\frac{n_1}{f_1} + \frac{n_2}{\infty} = \frac{n_2 - n_1}{R} \quad (2.12)$$

$$f_1 = \frac{n_1 R}{n_2 - n_1} \quad (2.13)$$

وبالمثل، يمكننا تحديد **المحرق الثاني** أو **محرق الخيال**  $F_2$  حيث يتم تشكيل الخيال لجسم بعيد (الجزء (b)). يتم الحصول على

موقع المحرق الثاني  $F_2$  من **المعادلة 2.11** بتعويض قيمة  $d_o = \infty$ :

$$\frac{n_1}{\infty} + \frac{n_2}{f_2} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

$$f_2 = \frac{n_2 R}{n_2 - n_1}.$$

لاحظ أن محرق الجسم يقع على بعد مختلف من القمة عن تركيز الخيال لأن  $n_1 \neq n_2$ .

## اصطلاح الإشارة لسطوح الانكسار الأحادي

على الرغم من أننا استخلصنا هذه المعادلة للانكسار عند سطح محدب، إلا أن التعبير نفسه ينطبق على السطح المقعر، شريطة أن نستخدم قواعد اصطلاح الإشارة التالية:

1.  $R > 0$  إذا كان السطح محدباً باتجاه الجسم؛ وخلاف ذلك يكون  $R < 0$ .
2.  $d_i > 0$  إذا كان الخيال حقيقياً، ويقع على الجانب المقابل من الجسم؛ وخلاف ذلك يكون  $d_i < 0$ .

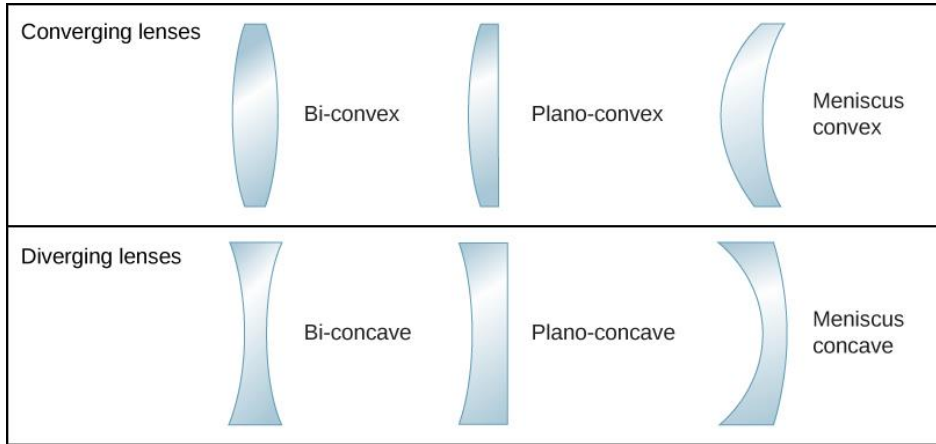
## 4.2 | العدسات الرقيقة Thin Lenses

### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- استخدام مخططات الأشعة لتحديد موقع الخيال المشكّل بواسطة العدسة ووصفه.
- استخدام معادلة العدسة الرقيقة لوصف وتحديد موقع الخيال المشكّل بواسطة العدسة.

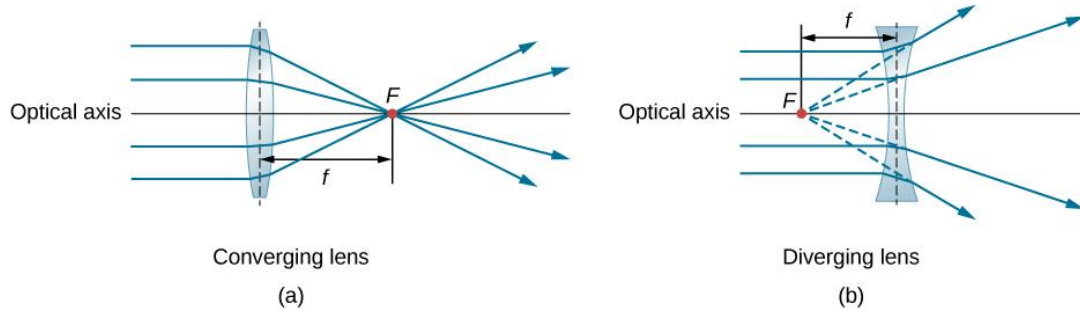
توجد العدسات في مجموعة كبيرة من الأدوات البصرية، بدءاً من العدسة المكبرة البسيطة إلى عدسة تكبير الكاميرا إلى العين نفسها. في هذا القسم، نستخدم قانون سنيل لاستكشاف خصائص العدسات وكيفية تشكّل الأحيولة. كلمة "عدسة" lens مشتقة من الكلمة اللاتينية lentil bean (حبة العدس)، والتي لها شكل يشبه شكله العدسة المحدبة. ومع ذلك، ليس جميع العدسات لها الشكل نفسه. يوضح الشكل 17.2 مجموعة متنوعة من أشكال العدسات المختلفة. المفردات المستخدمة لوصف العدسات هي نفسها المستخدمة في المرايا الكروية: يُسمى محور تناظر العدسة بالمحور البصري، ويمكن تقاطع هذا المحور مع سطح العدسة يُسمى قمة العدسة وهكذا.



**الشكل 17.2** أنواع مختلفة من العدسات: لاحظ أن العدسة المقربة لها "خصر" أكثر تُخناً، في حين أن العدسة المبعدة لها خصر أرق.

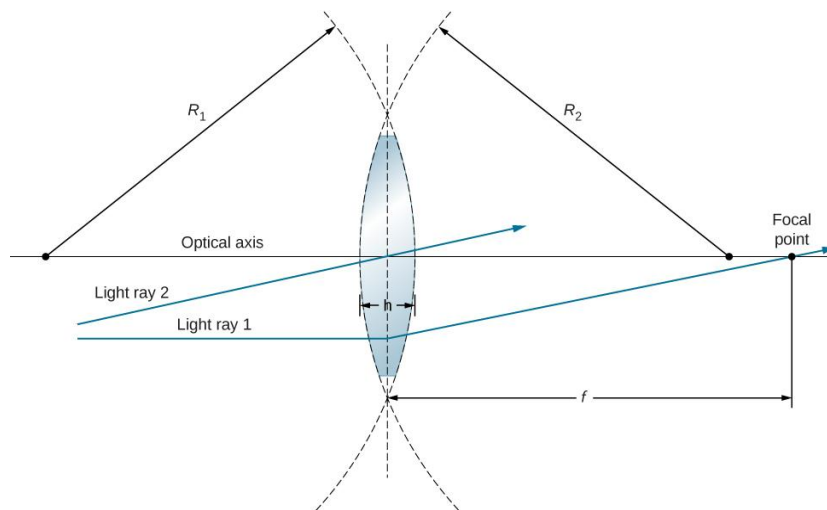
يتم تشكيل العدسة المحدبة أو المقربة، بحيث أن جميع أشعة الضوء الداخلة إليها موازية لمحورها البصري تتقاطع (أو تتركز) في نقطة واحدة على المحور البصري على الجانب المقابل للعدسة، كما هو موضح في الجزء (a) من الشكل 18.2 وكذلك، يتم تشكيل العدسة المقعرة أو المبعدة بحيث تتباعد جميع الأشعة التي تدخلها موازية لمحورها البصري، كما هو موضح في الجزء (b). ولفهم كيفية معالجة العدسة للضوء بشكل أدق، أنظر بدقة إلى الشعاع العلوي الذي يمر عبر العدسة المقربة في الجزء (a). نظراً لأن

قرينة انكسار العدسة أكبر من قرينة انكسار الهواء، وبجسب قانون Snell فإن الأشعة تنحني نحو الخط العمودي على السطح الفاصل عند دخولها العدسة. وكذلك الأمر، عندما تخرج الأشعة من العدسة، فإنها تنحني مبتعدةً عن الخط العمودي. ينطبق المنطق نفسه على العدسات المبعدة، كما هو موضح في الجزء (b). التأثير الكلي هو أن أشعة الضوء تنحني نحو المحور البصري في العدسة المقربة ومبتعدة عن المحور البصري في مثيلتها المبعدة. بالنسبة للعدسة المقربة، النقطة التي تتقاطع عندها الأشعة هي محرق العدسة  $F$ . وبالنسبة للعدسة المبعدة، فإن النقطة التي تظهر منها الأشعة هي المحرق (الوهمي). بعد مركز العدسة عن المحرق هو البعد المحرقي للعدسة  $f$ .



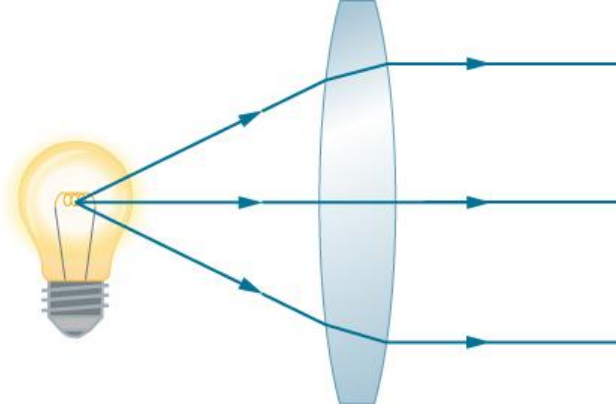
**الشكل 18.2** أشعة الضوء الداخلة إلى (a) عدسة مقربة و (b) عدسة مبعدة، موازية لمحورها، تتلاقى في المحرق  $F$ . بعد مركز العدسة عن المحرق هو البعد المحرقي للعدسة  $f$ . لاحظ أن أشعة الضوء تنحني عند الدخول والخروج من العدسة، حيث يكون التأثير الكلي هو انحناء الأشعة باتجاه المحور البصري.

تعدُّ العدسة رقيقة إذا كان ثخنها  $t$  أقل بكثير من نصف قطر انحناء كلا السطحين، كما هو مبين في **الشكل 19.2**. في هذه الحالة، يمكن اعتبار أن الأشعة تنحني مرة واحدة في مركز العدسة. بالنسبة للحالة المرسومة في هذا الشكل، فإن الشعاع الضوئي 1 موازٍ للمحور البصري، لذلك يتم حني الشعاع الصادر مرة واحدة في مركز العدسة ويمر عبر المحرق. من الخصائص المهمة الأخرى للعدسات الرقيقة أن أشعة الضوء التي تمر عبر مركز العدسة لا تنحرف، كما هو موضح بالشعاع الضوئي 2.



**الشكل 19.2** في تقريب العدسة الرقيقة، تكون ثخانة العدسة  $t$  أصغر بكثير من أنصاف أقطار انحناء سطحي العدسة  $R_1$  و  $R_2$ . نعتبر بأن أشعة الضوء تنحني عند وسط العدسة، كالشعاع الضوئي 1. يمر الشعاع الضوئي 2 عبر مركز العدسة، ولا ينحرف في تقريب العدسة الرقيقة.

كما لاحظنا في المناقشة الأولية لقانون سنيل، فإن مسارات أشعة الضوء قابلة للانعكاس تماماً. هذا يعني أنه يمكن عكس اتجاه الأسهم لجميع الأشعة في **الشكل 18.2**. على سبيل المثال، إذا تم وضع مصدر نقطي للضوء في محرق العدسة المحدبة، كما هو مبين في **الشكل 20.2**، فإن أشعة الضوء تخرج متوازية فيما بينها من الجانب الآخر.

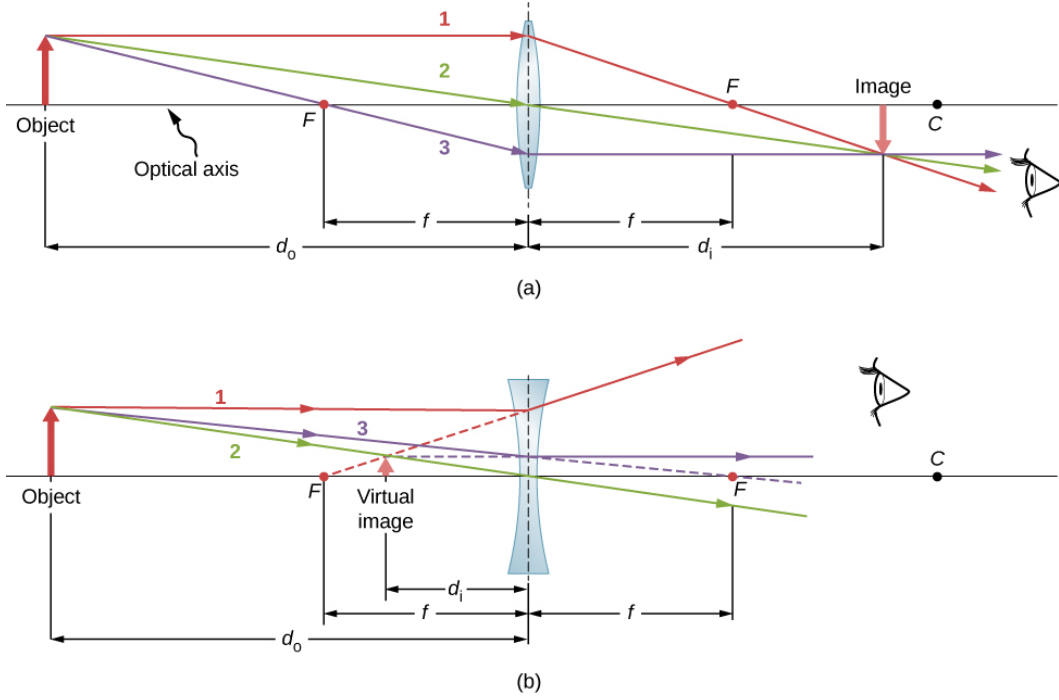


**الشكل 20.2:** مصدر الضوء الصغير، كفتيلة المصباح الكهربائي، الموضوعة عند محرق العدسة المحدبة ينتج عنها أشعة ضوئية تخرج متوازية من الجانب الآخر. المسارات هي تماماً عكس تلك المبينة في **الشكل 18.2** للعدسات المقربة والمبعدة. يتم استخدام هذه التقنية في المنارات وأحياناً في إشارات المرور لإنتاج شعاع ضوئي موجه من مصدر ضوئي يصدر الضوء في جميع الاتجاهات.

### تتبع الأشعة والعدسات الرقيقة

تتبع الشعاع هو تقنية تحديد أو تتبع (تعقب) المسارات التي تتخذها أشعة الضوء. تتبع الأشعة للعدسات الرقيقة يشبه إلى حد كبير الأسلوب الذي استخدمناه مع المرايا الكروية. حيث أنه بالنسبة للمرايا، يمكن لتتبع الأشعة أن تصف بدقة آلية عمل العدسة. تشبه قواعد تتبع الأشعة للعدسات الرقيقة قواعد المرايا الكروية:

1. الشعاع الذي يدخل العدسة المقربة موازياً للمحور البصري، يمر عبر المحرق على الجانب الآخر من العدسة (الشعاع 1 في الجزء (a) من **الشكل 21.2**). والشعاع الذي يدخل العدسة المبعدة موازياً للمحور البصري، فإنه يخرج على طول الخط المار من المحرق على الجانب نفسه من العدسة (الشعاع 1 في الجزء (b) من الشكل نفسه).
2. الشعاع الذي يمر عبر مركز العدسة المقربة أو المبعدة لا ينحرف (الشعاع 2 في الجزأين (a) و (b)).
3. بالنسبة للعدسة المقربة، فإن الشعاع الذي يمر عبر المحرق يخرج من العدسة موازياً للمحور البصري (الشعاع 3 في الجزء (a)). أما بالنسبة للعدسة المبعدة، فإن الشعاع الذي يرد على طول الخط المار عبر المحرق على الجانب الآخر يخرج من العدسة موازياً للمحور (الشعاع 3 في الجزء (b)).



**الشكل 21.2** العدسات الرقيقة لها البعد المحرق نفسه على كلا الجانبين (a). أشعة الضوء المتوازية، التي تدخل عدسة مقربة من الجانب الأيمن، فإنها تتقاطع عند محرقها على الجانب الأيسر. (b) أشعة الضوء المتوازية، التي تدخل عدسة مبعدة من الجانب الأيمن، تبدو وكأنها تأتي من محرقها الموجود على الجانب الأيمن.

تعمل العدسات الرقيقة بشكل جيد مع الضوء الأحادي اللون (أي الضوء الذي يتمتع بطول موجة واحد). ومع ذلك، بالنسبة للضوء الذي يحتوي على عدة أطوال موجية (كالضوء الأبيض)، فإن جودة عمل العدسات تصبح أقل. المشكلة هي أنه، وكما تعلمنا في الفصل السابق، تعتمد قرينة انكسار المادة على الطول الموجي للضوء. وهذه الظاهرة هي السبب في العديد من الآثار الملونة، كقوس قزح. لكن ولسوء الحظ، فإن هذه الظاهرة أيضاً تؤدي إلى انحرافات في الأحيلة التي تتشكل من العدسات. وتحديداً، ونظراً لأن البعد المحرق للعدسة يعتمد على قرينة الانكسار، فإنه يعتمد أيضاً على الطول الموجي للضوء الساقط. وهذا يعني أن الضوء ذا الأطوال الموجية المختلفة سيتركز على نقاط مختلفة، مما ينتج عنه ما يُسمى بـ "الزيبوغ اللوني" "chromatic aberrations." وتحديداً، فإن حواف خيال الجسم الأبيض ستصبح ملونة وغير واضحة. العدسات الخاصة، التي تُسمى بالثنائيات، قادرة على تصحيح الزيبوغ اللوني، حيث يتم تشكيل الثنائي عن طريق لصق عدسة مقربة وعدسة مبعدة. وتنتج هذه العدسات الثنائية doublets المركبة انحرافات لونية منخفضة بشكل ملحوظ.

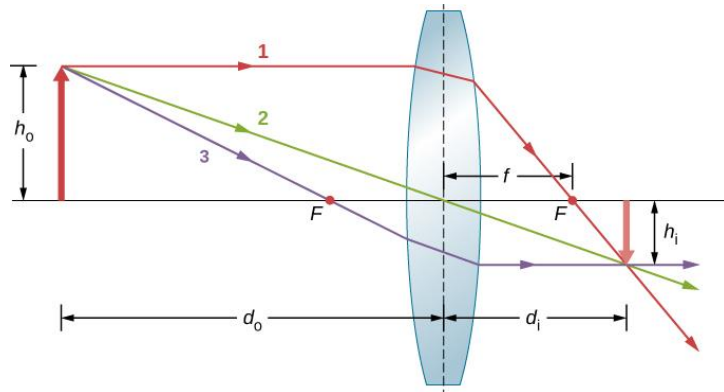
### تشكيل الخيال بواسطة العدسات الرقيقة

نحن نستخدم تتبع الأشعة لاستكشاف أنواع مختلفة من الأحيلة التي يمكن تشكيلها بواسطة عدسة. في بعض الحالات، تشكل العدسة خيلاً حقيقياً، كما يحدث عندما يرسم جهاز عرض الأفلام (البروجيكتور) صوراً على الشاشة. في حالات أخرى، يكون الخيال وهمياً لا يمكن عرضه على الشاشة. وعلى سبيل المثال، أين هو الخيال الذي تشكله النظارات؟ نستخدم تتبع الشعاع للعدسات الرقيقة لتوضيح كيفية تشكيل الأحيلة، ثم نطور معادلات لتحليل خصائص العدسات الرقيقة كميًا. باعتبار جسم ما يقع على مسافة بعيدة من عدسة مقربة، كما هو مبين في **الشكل 22.2**. لإيجاد موقع الخيال وحجمه، فإننا نتبع مسارات أشعة الضوء المحددة الناشئة من نقطة واحدة على الجسم، وفي هذه الحالة، طرف السهم.



يوضح هذا الشكل ثلاثة أشعة من ضمن الكثير من الأشعة المنبثقة من طرف السهم. يمكن تتبع هذه الأشعة الثلاثة باستخدام قواعد تتبع الأشعة المذكورة أعلاه.

- يدخل الشعاع 1 العدسة موازياً لمحورها البصري ويمر عبر المحرق على الجانب الآخر (القاعدة 1).
  - يمر الشعاع 2 عبر مركز العدسة ولا ينحرف (القاعدة 2).
  - يمر الشعاع 3 عبر المحرق في طريقه إلى العدسة ويخرج من العدسة موازياً لمحورها البصري (القاعدة 3).
- تتقاطع هذه الأشعة الثلاثة عند نقطة واحدة على الجانب الآخر من العدسة. وبالتالي، يقع خيال طرف السهم في هذه النقطة. جميع الأشعة التي تأتي من طرف السهم وتدخل العدسة تنكسر وتتقاطع عند النقطة الموضحة. بعد تحديد موقع خيال رأس السهم، نحتاج إلى نقطة أخرى من الخيال لتحديد اتجاه خيال السهم بالكامل. اخترنا تحديد موقع قاعدة خيال السهم، والتي تقع على المحور البصري. كما هو موضح في القسم الخاص بالمرآيا الكروية، ستكون القاعدة على المحور البصري فوق خيال طرف السهم (بسبب تناظر العدسة من الأعلى والأسفل).
- وبالتالي، فإن الخيال يمتد من المحور البصري إلى الارتفاع (السلي) كما هو مبين في هذا الشكل. الأشعة المنطلقة من نقطة أخرى على السهم، كمنتصف السهم، تتقاطع عند نقطة مشتركة أخرى، وبالتالي تملأ بقية الخيال.
- على الرغم من أننا تتبعنا ثلاثة أشعة في هذا الشكل، إلا أننا نحتاج فقط ضروريان لتحديد موقع نقطة من الخيال. من الأفضل تتبع الأشعة التي تتطلب قواعد بسيطة لتتبعها.



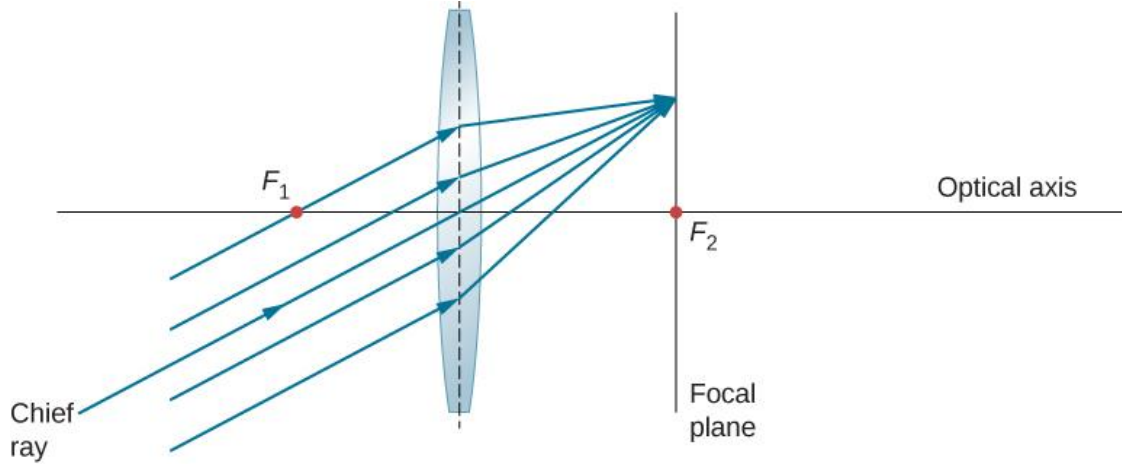
**الشكل 22.2** يستخدم تتبع الأشعة لتحديد موقع الخيال الذي يتشكل بواسطة العدسة. يتم تتبع الأشعة المنطلقة من نفس النقطة على الجسم - كل من الأشعة الثلاثة المختارة تتبع أحد قواعد تتبع الأشعة، ولذلك من السهل تحديد مساراتها. يقع الخيال عند نقطة تقاطع الأشعة. في هذه الحالة، يتم تشكيل خيال حقيقي - وهو الخيال الذي يمكن عرضه على شاشة.

تظهر عدة أبعاد مهمة في الشكل. بالنسبة للمرأة، فإننا نعرّف  $d_o$  بأنها بعد الجسم، أو المسافة بين الجسم ومركز العدسة. يتم تعريف بعد الخيال  $d_i$  بأنه المسافة بين الخيال ومركز العدسة. ويشار إلى ارتفاع الجسم وارتفاع الخيال بالرموز  $h_o$  و  $h_i$  على التوالي. الأحيلة التي تظهر في وضع صحيح بالنسبة للجسم لها ارتفاعات موجبة، أما الأحيلة المقلوبة فلها ارتفاعات سالبة. باستخدام قواعد تتبع الشعاع وعمل رسم بالورق وقلم الرصاص، كالمبين في **الشكل 22.2**، يمكننا تحديد موقع الخيال وحجمه بدقة. ولكن الفائدة الحقيقية من تتبع الأشعة تكمن في تصوير كيفية تشكيل الأحيلة في مختلف الحالات.

### الأشعة المائلة المتوازية والمستوي المحرقي

لقد رأينا أن الأشعة الموازية للمحور البصري تتجه إلى محرق العدسة المقربة. أما في حال ورودها على عدسة مبعدة، فإنها تخرج باتجاه يجعلها تبدو وكأنها قادمة من المحرق الموجود على الجانب الآخر من العدسة (أي الجانب الذي تدخل منه الأشعة المتوازية إلى

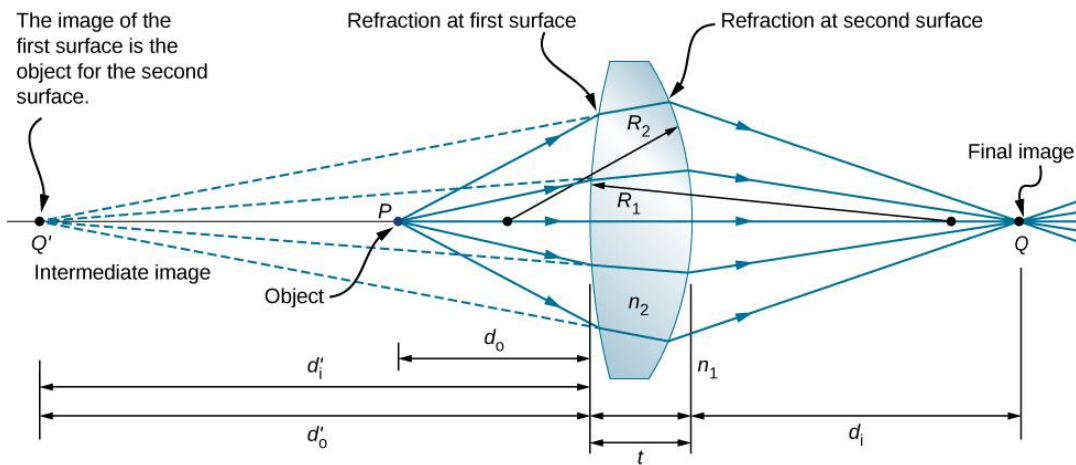
العدسة). ماذا يحدث للأشعة المتوازية فيما بينها والتي لا توازي المحور البصري (الشكل 23.2)؟ في حالة العدسة المقربة، فإن هذه الأشعة لا تتقارب عند المحرق، بل إنها تجتمع معاً عند نقطة أخرى في مستوي المحرق. يحتوي المستوي المحرق على المحرق ويكون عمودياً على المحور البصري. وكما هو موضح في هذا الشكل، تتركز الأشعة المتوازية في مكان تقاطع الشعاع المار عبر مركز العدسة مع المستوي المحرق.



الشكل 23.2 تتركز الأشعة المائلة المتوازية في نقطة في المستوي المحرق.

### معادلة العدسة الرقيقة

يتيح لنا تتبع الأشعة الحصول على صورة نوعية عن تشكيل الخيال. وللحصول على معلومات رقمية، نشق معادلتين من التحليل الهندسي لتتبع الأشعة للعدسات الرقيقة. هذه المعادلات، التي تُسمى معادلة العدسة الرقيقة thin-lens equation ومعادلة صانع العدسة lens maker's equation، تسمح لنا بتحليل العدسات الرقيقة كميًا. باعتبار عدسة محدبة ثنائية سميكة كما هو مبين في الشكل 24.2. قرينة انكسار الوسط المحيط هي  $n_1$  (إذا كانت العدسة في الهواء، عندئذ تكون:  $n_1 = 1.00$ ) وللعدسة هي  $n_2$ . نصف قطر انحناء الجانبين هما  $R_1$  و  $R_2$ . المطلوب إيجاد علاقة بين بعد الجسم  $d_o$  وبعد الخيال  $d_i$  ووسائط العدسة.



الشكل 24.2 شكل لاشتقاق معادلة صانع العدسة. هنا، سماكة العدسة  $t$ ،  $n_1$  هي قرينة انكسار الوسط المحيط، و  $n_2$  هي قرينة انكسار العدسة. نأخذ النهاية عندما  $t \rightarrow 0$  للحصول على معادلة العدسة الرقيقة.

لاشتقاق معادلة العدسة الرقيقة، نأخذ الخيال المتشكل من السطح الكاسر الأول (أي السطح الأيسر) ثم نستخدم هذا الخيال كجسم للسطح الكاسر الثاني. في الشكل، الخيال من السطح الكاسر الأول هو  $Q'$ ، والذي يتم تشكيله عن طريق تمديد الأشعة إلى الخلف من داخل العدسة (هذه الأشعة تنتج عن الانكسار عند السطح الأول). ويظهر ذلك من خلال الخطوط المتقطعة في الشكل. لاحظ أن هذا الخيال وهمي لأنه لا توجد أشعة تمر في الواقع من خلال النقطة  $Q'$ . لإيجاد بعد الخيال  $d_i'$  الموافق للخيال  $Q'$ ، نستخدم **المعادلة 11.2**. في هذه الحالة، يكون بعد الجسم هو  $d_o$ ، وبعد الخيال هو  $d_i$ ، ونصف قطر الانحناء هو  $R_1$ . بتعويض ذلك في **المعادلة 3.2** نحصل على:

$$\frac{n_1}{d_o} + \frac{n_2}{d_i'} = \frac{n_2 - n_1}{R_1}. \quad (2.14)$$

الخيال وهمي ويقع على الجانب نفسه، حيث يوجد الجسم، لذلك  $d_i' < 0$  و  $d_o > 0$ . السطح الأول محدب باتجاه الجسم، لذلك  $R_1 > 0$ .

لإيجاد بعد الجسم  $Q$ ، الذي يتم تشكيله بالانكسار من السطح الثاني، لاحظ أنه تم تبديل موقع قرينتي الانكسار  $n_1$  و  $n_2$  في **المعادلة 11.2**. في **الشكل 24.2**، تنشأ الأشعة في الوسط ذي قرينة الانكسار  $n_2$ ، بينما في **الشكل 15.2**، تنشأ الأشعة في الوسط ذي قرينة الانكسار  $n_1$ . وبالتالي، يجب تبديل أماكن  $n_1$  و  $n_2$  في **المعادلة 11.2**. بالإضافة إلى ذلك، من خلال الرجوع إلى **الشكل 24.2** مرة أخرى، نرى أن بعد الجسم هو  $d_o'$  وبعد الخيال هو  $d_i$ . نصف قطر الانحناء هو  $R_2$  ويُدخل هذه الكميات في **المعادلة 11.2** نحصل على:

$$\frac{n_2}{d_o'} + \frac{n_1}{d_i} = \frac{n_1 - n_2}{R_2}. \quad (2.15)$$

الخيال حقيقي وعلى الجانب الآخر من الجسم، لذلك  $d_i > 0$  و  $d_o' > 0$ . السطح الثاني محدب مبتعداً عن الجسم، لذلك  $R_2 < 0$ . يمكن تبسيط **المعادلة 15.2** بملاحظة أن:  $d_o' = |d_i'| + t$ ، حيث أخذنا القيمة المطلقة لأن  $d_i'$  هو رقم سالب، في حين أن كلاً من  $d_o'$  و  $t$  موجبان. يمكننا الاستغناء عن القيمة المطلقة إذا ألقينا  $d_i'$ ، والذي يعطينا  $d_o' = d_i' + t$ . ويُدخل ذلك في **المعادلة 15.2** نحصل على:

$$\frac{n_2}{-d_i' + t} + \frac{n_1}{d_i} = \frac{n_1 - n_2}{R_2}. \quad (2.16)$$

بجمع المعادلتين **14.2** و **16.2** نحصل على:

$$\frac{n_1}{d_o} + \frac{n_1}{d_i} + \frac{n_2}{d_i'} + \frac{n_2}{-d_i' + t} = (n_2 - n_1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right). \quad (2.17)$$

في تقريب العدسة الرقيقة، نفترض أن العدسة رقيقة جداً مقارنة ببعد الخيال الأول، أو  $d_i' \ll t$  (أو بشكل مكافئ  $R_1 \ll t$  و  $R_2$ ). في هذه الحالة، يتم إلغاء الحدين الثالث والرابع على الجانب الأيسر من **المعادلة 17.2**، فيبقى لنا:

$$\frac{n_1}{d_o} + \frac{n_1}{d_i} = (n_2 - n_1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right).$$

وأخيراً، القسمة على  $n_1$  تعطينا:

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \left( \frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right). \quad (2.18)$$

يشبه الجانب الأيسر بشكل مثير للريبة معادلة المرآة التي قمنا باشتقاقها سابقاً للمرآيا الكروية. وكما هو الحال بالنسبة للمرآيا الكروية، يمكننا استخدام تتبع الأشعة والهندسة الفراغية لإظهار أنه بالنسبة للعدسة الرقيقة، يكون لدينا:

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} \quad (2.19)$$

حيث  $f$  هو البعد المحرقي للعدسة الرقيقة (يتم ترك هذا الاشتقاق كتمرين). هذه هي معادلة العدسة الرقيقة. البعد المحرقي للعدسة الرقيقة هو نفسه على يسار ويمين العدسة. بالجمع بين المعادلتين 18.2 و 19.2 نحصل على:

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1\right) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right) \quad (2.20)$$

وهو ما يُسمى معادلة صانع العدسة. حيث تبين أن البعد المحرقي للعدسة الرقيقة يعتمد فقط على نصف قطر الانحناء وقرينة انكسار كل من العدسة والوسط المحيط بها. بالنسبة للعدسة الموجودة في الهواء،  $n_1 = 1.0$  و  $n_2 \equiv n$ ، لذلك تختصر معادلة صانع العدسة إلى الشكل التالي:

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right). \quad (2.21)$$

### اصطلاح الإشارة للعدسات

لاستخدام معادلة العدسة الرقيقة بشكل صحيح، يجب الالتزام بقواعد اصطلاح الإشارة التالية:

1.  $d_i$  موجب إذا كان الخيال على الجانب المقابل للجسم (أي الخيال حقيقي)؛ فيما عدا ذلك، يكون  $d_i$  سالباً (أي الخيال وهمي).
2.  $f$  موجبة للعدسة المقربة وسالبة للعدسة المبعدة.
3.  $R$  موجب للسطح المحدب باتجاه الجسم، وسالب للسطح المقعر باتجاه الجسم.

### التكبير

باستخدام جسم محدود الحجم على المحور البصري وتتبع الأشعة، يمكننا إظهار أن التكبير  $m$  للخيال هو:

$$m \equiv \frac{h_i}{h_o} = -\frac{d_i}{d_o} \quad (2.22)$$

هذه المعادلة نفسها التي حصلنا عليها للمرآيا تماماً (انظر المعادلة 8.2). إذا كانت  $m > 0$ ، فإن الخيال له نفس اتجاه الجسم العمودي (ويُسمى الخيال "صحيحاً"). إذا كانت  $m < 0$ ، فإن الخيال له اتجاه عمودي معاكس لاتجاه الجسم (ويُسمى الخيال "مقلوباً").

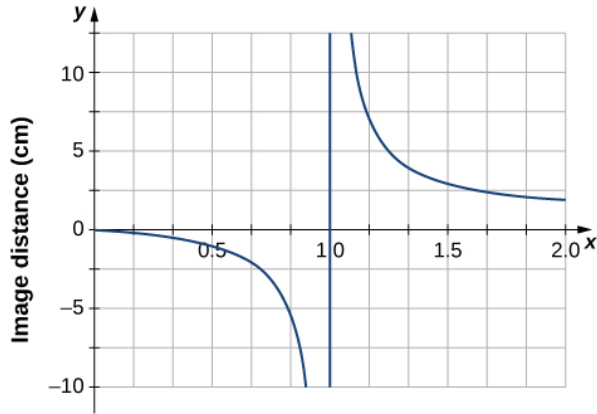
### استخدام معادلة العدسة الرقيقة

معادلة العدسة الرقيقة ومعادلة صانع العدسة قابلتان للتطبيق على نطاق واسع على الحالات التي تحوي عدسات رقيقة. سنستكشف العديد من ميزات تشكيل الخيال في الأمثلة التالية.

باعتبار عدسة رقيقة مقربة. حدد أين يتشكل الخيال وما هو نوع الخيال المتشكل مع اقتراب الجسم إلى العدسة من اللانهاية؟ يمكن ملاحظة ذلك باستخدام معادلة العدسة الرقيقة لبعـد محرفي محدد لرسم بعد الخيال كتابع لبعـد الجسم. وبعبارة أخرى، تمثل العلاقة:

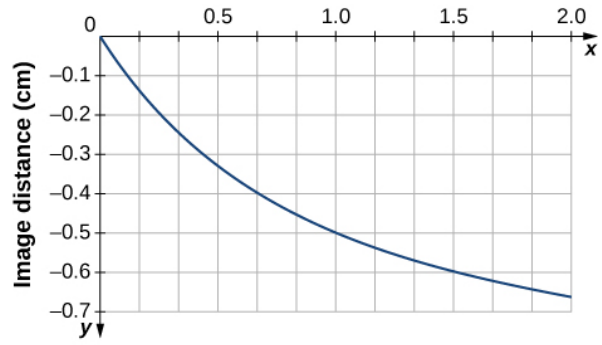
$$d_i = \left( \frac{1}{f} - \frac{1}{d_o} \right)^{-1}$$

لقيمة معينة لـ  $f$ . من أجل القيمة  $f = 1 \text{ cm}$ ، تظهر النتيجة في الجزء (a) من **الشكل 25.2**



Object distance (cm)

(a) Converging lens



Object distance (cm)

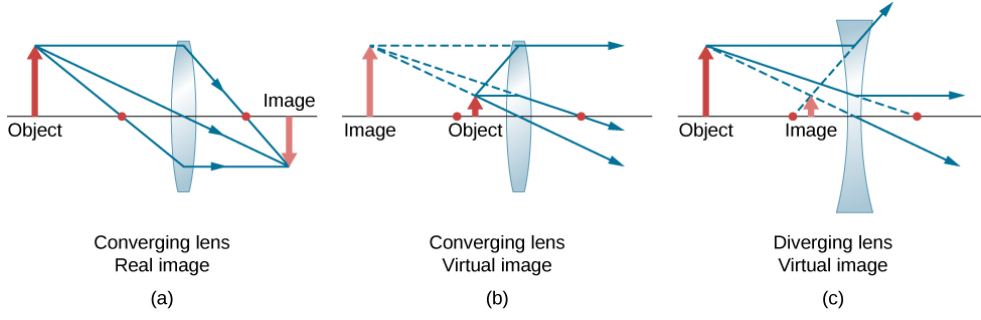
(b) Diverging lens

**الشكل 25.2** (a) بعد الخيال لعدسة رقيقة مقربة فيها  $f = 1.0 \text{ cm}$  كتابع لبعـد الجسم. (b) نفس الشيء ولكن بالنسبة لعدسة مبعدة فيها  $f = -1.0 \text{ cm}$ .

الجسم الذي يبعد عن العدسة بمسافة أكبر بكثير من البعد المحرفي يجب أن ينتج خيالاً يقع بالقرب من المستوي المحرفي، لأن الحد الثاني على الجانب الأيمن من المعادلة المذكورة أعلاه عندئذ يمكن إهماله مقارنةً بالحد الأول، لذلك لدينا:  $d_i \approx f$ .

يمكن ملاحظة ذلك في مخطط الجزء (a) من **الشكل 25.2**، مما يدل على أن بعد الخيال يقترب طولياً من البعد المحرفي البالغ  $1 \text{ cm}$  عند بعد أكبر للجسم. مع اقتراب الجسم من المستوي المحرفي، يتزايد بعد الخيال إلى ما لا نهاية. هذا متوقع لأن الجسم الواقع في المستوي المحرفي ينتج أشعة متوازية تشكل خيالاً عند اللانهاية (أي بعيداً جداً عن العدسة). عندما يكون الجسم أبعد من البعد المحرفي عن العدسة، يكون بعد الخيال موجباً، وبالتالي يكون الخيال حقيقياً، ويقع على الجانب الآخر للعدسة من الجسم، ويكون مقلوباً (لأن  $m = -d_i / d_o$ ). عندما يكون الجسم أقرب من البعد المحرفي للعدسة، يصبح بعد الخيال سالباً، مما يعني أن الخيال وهمي، ويقع على الجانب نفسه للعدسة، حيث يوجد الجسم، وصحيحاً.

بالنسبة للعدسة المبعدة الرقيقة ذات البعد المحرفي  $f = -1.0 \text{ cm}$ ، يتم عرض مخطط مماثل يربط بين بعد الخيال وبعد الجسم في الجزء (b). في هذه الحالة، يكون بعد الخيال سالباً لجميع قيم بعد الجسم الموجبة، مما يعني أن الخيال وهمي، ويقع على نفس جانب العدسة حيث يوجد الجسم، وصحيحاً. يمكن أيضاً مشاهدة هذه الخصائص من خلال مخططات تتبع الأشعة (انظر **الشكل 26.2**).



**الشكل 26.2** تمثل النقاط الحمراء محارق العدسات (a) خيال حقيقي مقلوب يتشكل من جسم أبعد من البعد المحرقي عن عدسة مقربة (b) خيال وهمي صحيح يتشكل من جسم أقرب من البعد المحرقي للعدسة. (c) خيال وهمي صحيح يتشكل من جسم أبعد من البعد المحرقي عن عدسة مبعدة.

لمشاهدة مثال ملموس للأخيلة الصحيحة والمقلوبة، انظر **الشكل 27.2**، الذي يعرض الأخيلة التي تم تشكيلها بواسطة العدسات المقربة عندما يكون الجسم (وجه الشخص في هذه الحالة) على مسافات مختلفة من العدسة. في الجزء (a) من الشكل، يكون وجه الشخص أبعد من البعد المحرقي عن العدسة، وبالتالي فإن الخيال مقلوب. في الجزء (b)، يكون وجه الشخص أقرب من البعد المحرقي من العدسة، وبالتالي يكون الخيال في وضع صحيح.



(a)



(b)

**الشكل 27.2** (a) عندما تكون العدسة المقربة بعيدة عن وجه الرجل بمقدار أكبر من البعد المحرقي، يتشكل خيال مقلوب. لاحظ أن الخيال في المحرق، ولكن الوجه ليس كذلك، لأن الخيال أقرب بكثير إلى الكاميرا التي تلتقط هذه الصورة للوجه (b) يتم إنتاج خيال صحيح لوجه الرجل عندما تكون العدسة المقربة على بعد أقل من البعد المحرقي من وجهه.

استخدم الأمثلة التالية لفهم كيفية عمل العدسات الرقيقة بشكل أفضل.

### خطة حل المسائل: العدسات

- الخطوة 1. تحديد فيما إذا كان من المفيد استخدام تتبع الأشعة، أم معادلة العدسة الرقيقة، أم كلاهما. حتى إذا لم يتم استخدام تتبع الأشعة، فإن الرسم الدقيق يكون دائماً مفيداً للغاية. اكتب الرموز والقيم على الرسم.
- الخطوة 2. تحديد ما يجب حسابه في المسألة (تحديد المجهول).
- الخطوة 3. قم بإعداد قائمة بما تم إعطاؤه أو يمكن استنتاجه من المسألة (تحديد المعلوم).
- الخطوة 4. إذا كان تتبع الأشعة مطلوباً، فاستخدم قواعد تتبع الأشعة المدرجة بالقرب من بداية هذا القسم.

الخطوة 5. تتطلب معظم المسائل الكمية استخدام معادلة العدسة الرقيقة و/أو معادلة صانع العدسة. قم بحل هذه المعادلات لحساب القيم المجهولة وأدخل القيم المعطاة أو استخدم كليهما معاً لإيجاد اثنين من القيم المجهولة.  
الخطوة 6. تحقق لمعرفة فيما إذا كانت الإجابة معقولة. هل الإشارات صحيحة؟ هل الرسم أو تتبع الأشعة يتوافق مع الحساب؟

### مثال 3.2

#### استخدام معادلة صانع العدسة

أوجد نصف قطر انحناء عدسة مقعرة الوجهين بشكل متناظر مصنوعة من زجاج قرينة انكساره 1.55 بحيث يبلغ طول البعد المحرق في الهواء 20 cm (بالنسبة إلى العدسة مقعرة الوجهين، يكون لكلا السطحين نصف قطر الانحناء نفسه).

#### خطة الحل:

استخدم صيغة العدسة الرقيقة لمعادلة صانع العدسة:

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1\right) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$$

حيث  $R_1 < 0$  و  $R_2 > 0$ . نظرًا لأننا نقوم بصنع عدسة مقعرة الوجهين متناظرة، فإنه لدينا  $|R_1| = |R_2|$ .

#### الحل:

يمكننا تحديد نصف قطر الانحناء  $R$  من العلاقة:

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1\right) \left(-\frac{2}{R}\right)$$

بحل المعادلة من أجل قيمة  $R$  وإدخال القيم التالية:  $f = -20$  cm و  $n_2 = 1.55$  و  $n_1 = 1.00$  نجد:

$$R = -2f \left(\frac{n_2}{n_1} - 1\right) = -2(-20 \text{ cm}) \left(\frac{1.55}{1.00} - 1\right) = 22 \text{ cm}.$$

### مثال 4.2

#### عدسة مقربة وقيم مختلفة لبعدها الجسم

حدد موقع واتجاه وتكبير خيال جسم ارتفاعه 3.0 cm في كل من المواضع التالية أمام عدسة محدبة بعدها المحرق يبلغ 10.0 cm. (a)  $d_o = 20.0$  cm (b)  $d_o = 50.0$  cm (c)  $d_o = 5.00$  cm

#### خطة الحل:

نبدأ بمعادلة العدسة الرقيقة:

$$\frac{1}{d_i} + \frac{1}{d_o} = \frac{1}{f}$$

قم بحل هذه المعادلة لحساب بعد الخيال  $d_i$  وأدخل القيم المعطاة لبعدها الجسم والبعده المحرق.

#### الحل:

a. من أجل القيم المعطاة  $d_o = 50$  cm و  $f = +10$  cm نجد

$$d_i = \left( \frac{1}{f} - \frac{1}{d_o} \right)^{-1}$$

$$= \left( \frac{1}{10.0 \text{ cm}} - \frac{1}{50.0 \text{ cm}} \right)^{-1}$$

$$= 12.5 \text{ cm}$$

بعد الخيال موجب، وبالتالي فإن الخيال حقيقي، ويقع على الجانب الآخر للعدسة من الجسم، وعلى بعد 12.5 cm من العدسة. لإيجاد التكبير واتجاه الخيال، نستخدم العلاقة التالية:

$$m = -\frac{d_i}{d_o} = -\frac{12.5 \text{ cm}}{50.0 \text{ cm}} = -0.250.$$

التكبير سالب مما يعني أن الخيال مقلوب. لما كان  $|m| < 1$ ، فالخيال أصغر من الجسم. يعطى حجم الخيال بالعلاقة:

$$|h_i| = |m|h_o = (0.250)(3.0 \text{ cm}) = 0.75 \text{ cm}$$

b. من أجل القيم المعطاة  $d_o = 5 \text{ cm}$ ،  $f = +10 \text{ cm}$ ، نجد

$$d_i = \left( \frac{1}{f} - \frac{1}{d_o} \right)^{-1}$$

$$= \left( \frac{1}{10.0 \text{ cm}} - \frac{1}{5.00 \text{ cm}} \right)^{-1}$$

$$= -10.0 \text{ cm}$$

بعد الخيال سالب، وبالتالي فإن الخيال وهمي، ويقع على نفس الجانب من العدسة حيث يوجد الجسم، وعلى بعد 10 cm من العدسة. يتم إيجاد التكبير واتجاه الخيال من العلاقة:

$$m = -\frac{d_i}{d_o} = \frac{-10.0 \text{ cm}}{5.00 \text{ cm}} = +2.00.$$

التكبير موجب مما يعني أن الخيال في وضع صحيح (أي، لها اتجاه الجسم نفسه).

بما أن  $|m| > 0$ ، فالخيال أكبر من الجسم. يعطى حجم الخيال بالعلاقة:

$$|h_i| = |m|h_o = (2.00)(3.0 \text{ cm}) = 6.0 \text{ cm}.$$

c. من أجل القيم المعطاة  $d_o = 20 \text{ cm}$ ،  $f = +10 \text{ cm}$ ، نجد:

$$d_i = \left( \frac{1}{f} - \frac{1}{d_o} \right)^{-1}$$

$$= \left( \frac{1}{10.0 \text{ cm}} - \frac{1}{20.0 \text{ cm}} \right)^{-1}$$

$$= 20.0 \text{ cm}$$

بعد الخيال موجب، وبالتالي فإن الخيال حقيقي، ويقع على الجانب الآخر للعدسة من الجسم، وعلى بعد 20.0 cm من العدسة. التكبير هو:

$$m = -\frac{d_i}{d_o} = -\frac{20.0 \text{ cm}}{20.0 \text{ cm}} = -1.00.$$

التكبير سالب، مما يعني أن الخيال مقلوب. لما كان  $|m| = 1$ ، فالخيال بالحجم نفسه للجسم.

عند حل المسائل في البصريات الهندسية، نحتاج غالباً إلى الجمع بين تتبع الأشعة ومعادلات العدسات. ويوضح المثال التالي هذا النهج.



### اختيار البعد المحرقي ونوع العدسة

لإسقاط خيال مصباح كهربائي على شاشة تقع على بعد 1.50 m، نحتاج لاختيار نوع العدسة المطلوب استخدامها (مقربة أو مبعدة) وبعدها المحرقي (الشكل 28.2) البعد بين العدسة والمصباح الكهربائي ثابت ويبلغ 0.75 m. حدد كذلك تكبير واتجاه الخيال؟

### خطة الحل:

يجب أن يكون الخيال حقيقياً، لذلك نختار استخدام عدسة مقربة. يمكن إيجاد البعد المحرقي باستخدام معادلة العدسة الرقيقة وحلها لحساب البعد المحرقي. بعد الجسم  $d_o = 0.75$  m وبعد الخيال  $d_i = 1.5$  m.

### الحل:

حل معادلة العدسة الرقيقة للبعد المحرقي وأدخل البعد المطلوب للجسم والخيال:

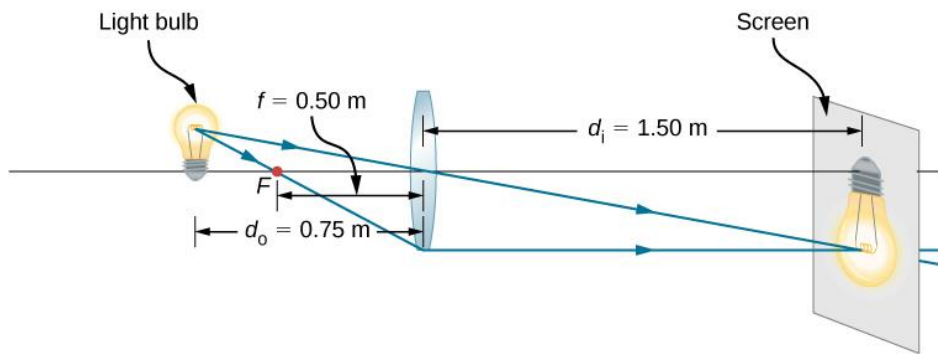
$$\begin{aligned}\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} &= \frac{1}{f} \\ f &= \left( \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} \right)^{-1} \\ &= \left( \frac{1}{0.75 \text{ m}} + \frac{1}{1.5 \text{ m}} \right)^{-1} \\ &= 0.50 \text{ m}\end{aligned}$$

التكبير هو:

$$m = -\frac{d_i}{d_o} = -\frac{1.5 \text{ m}}{0.75 \text{ m}} = -2.0.$$

### ملاحظة

تعني إشارة التكبير السالبة أن الخيال مقلوب. البعد المحرقي موجب، كما هو متوقع للعدسة المقربة. يمكن استخدام تتبع الأشعة للتحقق من الحساب (انظر الشكل 28.2). كما هو متوقع، فإن الخيال مقلوب، حقيقي، وأكبر من الجسم.



**الشكل 28.2** المصباح الكهربائي الذي يوضع على بعد 0.75 m من العدسة ذات البعد المحرقي 0.50 m ينتج خيلاً حقيقياً على الشاشة، كما هو موضح في المثال. تتبع الأشعة يتوقع موقع الخيال وحجمه.

## الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

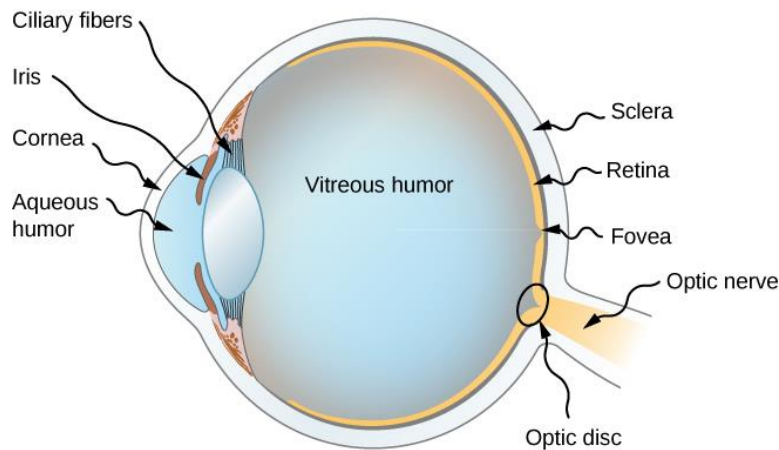
- فهم الفيزياء الأساسية لكيفية تشكل الأحيلة بالعين البشرية.
- فهم الفيزياء الأساسية لكيفية تشكل الأحيلة بالعين البشرية.

العين البشرية هي ربما الأكثر إثارة للاهتمام والأكثر أهمية من جميع الأدوات البصرية. تؤدي أعيننا عدداً كبيراً من الوظائف: فهي تتيح لنا تحديد الاتجاه والحركة والألوان والمسافات. نستكشف في هذا القسم البصري الهندسية للعين.

## فيزياء العين

العين باهرة في كيفية تشكيل الأحيلة وثرء تفاصيلها والألوان التي يمكنها اكتشافها. ومع ذلك، فإن أعيننا غالباً ما تحتاج إلى بعض التصحيح للوصول إلى ما يُسمى الرؤية "الطبيعية". في الواقع، يجب أن تُسمى الرؤية العادية "الرؤية المثالية" لأن ما يقرب من نصف البشر يحتاجون إلى نوع من تصحيح الرؤية، لذلك فإن الحاجة إلى النظارات ليست "غير طبيعية". تكوين الخيال بواسطة أعيننا وتصحيح الرؤية الشائع يمكن تحليلهم من خلال البصريات التي تمت مناقشتها في وقت سابق في هذا الفصل.

يوضح **الشكل 29.2** التشريح الأساسي للعين. تشكل القرنية والعدسة نظاماً يعمل بتقريب جيد كعدسة رقيقة واحدة. ولرؤية واضحة، يجب عرض خيال حقيقي على شبكية العين الحساسة للضوء، والتي تقع على بعد ثابت من العدسة. تتيح العدسة المرنة للعين ضبط نصف قطر انحناء العدسة لإنتاج خيال على شبكية العين للأجسام الواقعة على مسافات مختلفة. يقع مركز الخيال على بقعة العين fovea، التي تحتوي على أكبر كثافة لمستقبلات الضوء وأكبر حدة في المجال المرئي. إن الفتحة المتغيرة (أي البؤبؤ) للعين، بالإضافة للتكيف الكيميائي، تسمح للعين باكتشاف شدة الضوء من أدنى درجة ملحوظة إلى  $10^{10}$  مرة (دون تلف). وهذا نطاق كشف واسع جداً. تبدأ معالجة نبضات العصب البصري بالترابط في شبكية العين وتستمر في المخ. ينقل العصب البصري الإشارات التي تتلقاها العين إلى المخ.



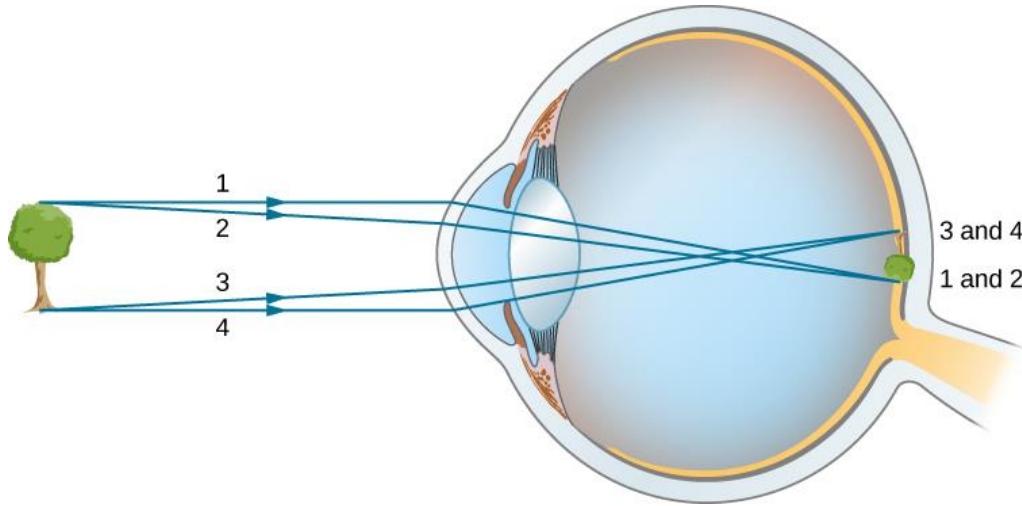
**الشكل 29.2** تعمل القرنية وعدسة العين معاً لتشكل خيال حقيقي على شبكية العين الحساسة للضوء، التي تحتوي على تركيز مكثف للمستقبلات الضوئية في بقعة العين والنقطة العمياء فوق العصب البصري. يمكن ضبط نصف قطر انحناء عدسة العين لتشكل خيال على شبكية العين للأجسام الواقعة على مسافات مختلفة. هنا يتم عرض طبقات الأنسجة ذات قرائن انكسار مختلفة في العدسة. ومع ذلك، تم حذفها من الصور الأخرى للوضوح.

تعد قرائن الانكسار في العين ضرورية لقدرتها على تشكيل الصور. يبين **الجدول 1.2** قرائن الانكسار المتعلقة بالعين. يحدث أكبر تغير في قرينة الانكسار، حيث تنحرف أشعة الضوء بدرجة أكبر، عند السطح الفاصل بين القرنية والهواء أكثر منه عند السطح السائل الفاصل بين الحجره الأمامية وعدسة العين. يُظهر مخطط الشعاع في **الشكل 30.2** تشكيل الخيال من خلال القرنية وعدسة العين. توفر القرنية، والتي تعتبر عدسة مقربة بعدها المحرقي نحو 2.3 cm، معظم قوة تركيز العين. توفر العدسة، وهي عدسة مقربة بعدها المحرقي نحو 6.4 cm، التركيز الأدق المطلوب لإنتاج خيال واضح على شبكية العين. يمكن التعامل مع القرنية والعدسة كعدسة رقيقة واحدة، على الرغم من أن أشعة الضوء تمر عبر عدة طبقات من المواد (كالقرنية والحجره الأمامية وعدة طبقات في العدسة والجسم الزجاجي) وتغير اتجاهها عند كل سطح فاصل بين هذه الطبقات. يشبه الخيال المشكّل إلى حد كبير الخيال الذي تنتجه عدسة محدبة واحدة (أي خيال حقيقي ومقلوب). وعلى الرغم من أن الأحيلة المكوّنة في العين مقلوبة، إلا أن الدماغ يغيرها مرة أخرى ليجعلها تبدو في وضع صحيح.

### الجدول 1.2 قرائن الانكسار المتعلقة بالعين.

المادة	قرينة الانكسار
الماء	1.33
الهواء	1.0
القرنية	1.38
الحجره الأمامية	1.34
العدسة	*1.41
الجسم الزجاجي	1.34

\* هذه قيمة متوسطة. تختلف قرينة الانكسار الفعلية على امتداد العدسة وتأخذ أكبر قيمة لها في وسط العدسة.



**الشكل 30.2** في العين البشرية، يتشكل الخيال على شبكية العين. نستخدم تتبع الأشعة من أعلى الجسم وأسفله لإظهار كيفية إنتاج خيال حقيقي ومقلوب على شبكية العين. لا يؤخذ بعد الجسم في القياس.

كما لاحظنا، يجب أن يقع الخيال بالضبط على شبكية العين لإنتاج رؤية واضحة، أي أن بعد الخيال  $d_i$  يجب أن يساوي المسافة الفاصلة بين العدسة وشبكية العين. نظراً لأن المسافة بين العدسة وشبكية العين لا تتغير، فإن بعد الخيال  $d_i$  يجب أن يكون هو نفسه للأجسام الواقعة على مسافات مختلفة. تضبط العضلات الهدبية شكل عدسة العين للتركيز على الأشياء القريبة أو البعيدة.

تغير العين البعد المحرقي للعدسة عن طريق تغيير شكل عدسة العين. وتُسمى هذه الآلية للعين **بالتكيف (accommodation)**. أقرب نقطة يمكن وضع جسم فيها، بحيث يمكن أن تشكل العين خيلاً واضحاً له على شبكية العين تُسمى **النقطة القريبة (near point)** للعين. وبالمثل، فإن **النقطة البعيدة (far point)** هي المسافة الأبعد التي يكون فيها الجسم مرئياً بوضوح. يمكن لأي شخص نظره طبيعي رؤية الأشياء بوضوح على مسافات تتراوح بين 25 cm إلى ما لا نهاية بشكلٍ أساسي. تزداد النقطة القريبة مع تقدم العمر، لتصبح عدة أمتار لبعض كبار السن. في هذا النص، نعتبر أن النقطة القريبة هي 25 cm. يمكننا استخدام معادلات العدسة الرقيقة لفحص تشكيل الخيال بالعين. أولاً، نحسب **الطاقة الضوئية (optical power)** للعدسة من العلاقة:

$$P = \frac{1}{f} \quad (2.23)$$

البعد المحرقي  $f$  معطى بالمتري. تُسمى واحدة الطاقة البصرية "ديوبتر" **diopeters (D)**. وتساوي،  $1D = 1/m$ ، أو  $1m^{-1}$ . يصف علماء البصريات النظارات الشائعة والعدسات اللاصقة بوحدة الديوبتر. وبهذا التعريف للطاقة البصرية، يمكننا إعادة كتابة معادلات العدسة الرقيقة على الشكل التالي:

$$P = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} \quad (2.24)$$

يُعدُّ العمل باستخدام الطاقة البصرية مناسباً، لأنه من أجل عدستين أو أكثر مقربة فيما بينها، فإن الطاقة البصرية الفعالة لنظام العدسات تساوي تقريباً مجموع الطاقة البصرية للعدسات الفردية:

$$P_{\text{total}} = P_{\text{lens 1}} + P_{\text{lens 2}} + P_{\text{lens 3}} + \dots \quad (2.25)$$

## 6.2 مثال

### البعد المحرقي الفعال للعين

البعد المحرقي للقرنية وعدسة العين يبلغ 2.3 cm و 6.4 cm على التوالي. أوجد البعد المحرقي الصافي والطاقة البصرية للعين.

### خطة الحل:

يتم جمع الطاقة البصرية للعدسات المتوضعة بشكل متقارب فيما بينها، وبالتالي:  $P_{\text{eye}} = P_{\text{cornea}} + P_{\text{lens}}$ .

### الحل:

بكتابة معادلة الطاقة بدلالة الأبعاد المحرقة نجد:

$$\frac{1}{f_{\text{eye}}} = \frac{1}{f_{\text{cornea}}} + \frac{1}{f_{\text{lens}}} = \frac{1}{2.3 \text{ cm}} + \frac{1}{6.4 \text{ cm}}$$

وبالتالي، فإن البعد المحرقي للعين (القرنية والعدسة معاً) هو:

$$f_{\text{eye}} = 1.69 \text{ cm.}$$

الطاقة البصرية للعين:

$$P_{\text{eye}} = \frac{1}{f_{\text{eye}}} = \frac{1}{0.0169 \text{ m}} = 59 \text{ D.}$$

لرؤية واضحة، يجب أن يساوي بعد الخيال  $d_i$  المسافة الفاصلة بين العدسة وشبكية العين. الرؤية الطبيعية ممكنة للأجسام الواقعة على مسافات تتراوح بين  $d_o = 25 \text{ cm}$  إلى ما لا نهاية. يوضح المثال التالي كيفية حساب بعد الخيال لجسم موجود عند النقطة القريبة للعين.

## مثال 7.2

### خيال جسم موجود عند النقطة القريبة

البعد المحرق الصافي لعين بشرية معينة هو  $1.7 \text{ cm}$ . يتم وضع جسم في النقطة القريبة للعين. ما هو بعد الخيال المركز المتشكل خلف العدسة؟

### خطة الحل:

النقطة القريبة للعين تقع على بعد  $25 \text{ cm}$ ، وبالتالي فإن بعد الجسم هو  $d_o = 25 \text{ cm}$ . نحسب بعد الخيال من معادلة العدسة:

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d_o}$$

الحل:

$$\begin{aligned} d_i &= \left( \frac{1}{f} - \frac{1}{d_o} \right)^{-1} \\ &= \left( \frac{1}{1.7 \text{ cm}} - \frac{1}{25 \text{ cm}} \right)^{-1} \\ &= 1.8 \text{ cm} \end{aligned}$$

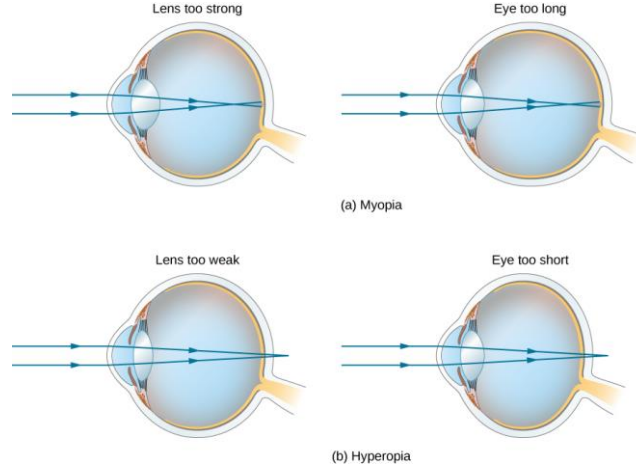
لذلك، يتم تشكيل الخيال على بعد  $1.8 \text{ cm}$  خلف العدسة.

### ملاحظة

من معادلة التكبير، نجد  $m = -\frac{1.8 \text{ cm}}{25 \text{ cm}} = -0.073$ . لما كان  $m < 0$ ، يكون الخيال مقلوباً بالنسبة للجسم. من القيمة المطلقة للتكبير  $m$  نلاحظ أن الخيال أصغر من الجسم؛ في الواقع، فإن حجمه يبلغ 7٪ فقط من حجم الجسم.

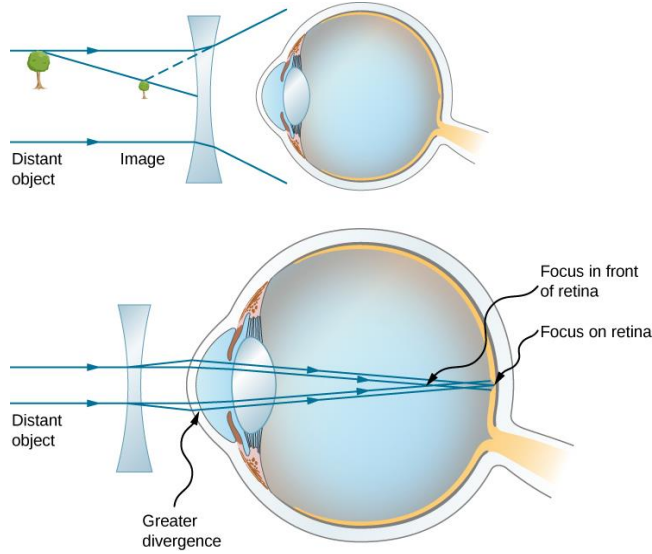
### تصحيح الرؤية (Vision Correction)

الحاجة إلى نوع ما من تصحيح الرؤية هي أمر شائع جداً. يسهل، باستخدام البصريات الهندسية، فهم عيوب الرؤية النموذجية، وبعض هذه العيوب من السهل تصحيحها. يوضح الشكل 31.2 إثنين من العيوب الشائعة للرؤية. قصر النظر (أو حسر البصر) (Nearsightedness or myopia)، وهو القدرة على رؤية الأشياء القريبة، في حين أن الأجسام البعيدة تظهر بصورة ضبابية. تحجب العين الأشعة المتوازية تقريباً والصادرة من الجسم البعيد، وتتقاطع الأشعة أمام شبكية العين. يتم دمج الأشعة الأكثر تباعداً الصادرة من الجسم القريب على شبكية العين للحصول على خيال واضح. تُسمى أبعد مسافة يقع عندها جسم يمكن رؤيته بوضوح بالنقطة البعيدة للعين (عادةً ما تكون النقطة البعيدة في اللانهاية). طول النظر (أو مد البصر) (Farsightedness or hyperopia)، هو القدرة على رؤية الأشياء البعيدة بوضوح، في حين أن الأجسام القريبة تظهر بصورة ضبابية. العين المصابة بمد النظر لا تقارب بما فيه الكفاية الأشعة الصادرة من الجسم القريب لجعل الأشعة تجتمع على شبكية العين.



**الشكل 31.2 (a)** العين المصابة بقصر النظر (حسر البصر) تقارب الأشعة الصادرة من الجسم البعيد أمام الشبكية، لذلك تتباعد هذه الأشعة عندما تصل إلى شبكية العين، مما يؤدي إلى ظهور الخيال بصورة ضبابية. يمكن أن تسبب عدسة العين القوية جداً بقصر النظر، أو قد يكون السبب هو أن العين طويلة جداً (b) لا تستطيع العين المصابة بمد النظر (hyperopic) أن تقارب الأشعة الصادرة من الجسم القريب على الشبكية، مما ينتج عنه رؤية ضبابية قريبة من المجال. قد يكون السبب في مشكلة مد النظر هو أن الطاقة البصرية لعدسة العين غير كافية أو أن العين قصيرة جداً.

نظرًا لأن العين المصابة بقصر النظر تقارب أشعة الضوء بشكل مبالغ فيه، فإن تصحيح قصر النظر يتم بوضع نظارات من العدسات المبعدة أمام العين، كما هو مبين في **الشكل 32.2**. هذا يقلل من الطاقة البصرية للعين التي تكون قوية للغاية (تذكر أن البعد المحرقي للعدسة المبعدة سالب، وبالتالي فإن طاقتها البصرية سالبة). هناك طريقة أخرى لفهم هذا التصحيح وهي أن العدسة المبعدة ستسبب في تباعد الأشعة الواردة أكثر لتعويض التقارب المفرط الناجم عن نظام عدسة العين. يعمل الخيال الذي تنتجه العدسة المبعدة للنظارات كجسم (بصري) للعين، ولأن العين لا يمكنها التركيز على أجسام وراء نقطتها البعيدة، يجب أن تشكل العدسة المبعدة خيال للأجسام (المادية) البعيدة عند نقطة أقرب من النقطة البعيدة.



**الشكل 32.2** يتطلب تصحيح قصر النظر عدسة مُبعدة تُعَوِّض عن تقارب العين المفرط للأشعة. تنتج العدسة المبعدة خيالاً أقرب إلى العين من الجسم المادي. يعمل هذا الخيال كجسم بصري للعين، ويمكن للشخص المصاب بقصر النظر رؤيته بوضوح لأنه أقرب من النقطة البعيدة.

## تصحيح قصر النظر

ما هي الطاقة البصرية اللازمة لعدسة النظارات لتصحيح رؤية شخص مصاب بقصر النظر، تبلغ نقطة البعيدة 30.0 cm؟ بفرض أن العدسة التصحيحية مثبتة على بعد 1.50 cm من العين.

## خطة الحل:

نريد لهذا الشخص المصاب بقصر النظر أن يكون قادراً على رؤية الأجسام البعيدة بوضوح، مما يعني أن عدسة النظارات يجب أن تنتج خيالاً يقع على بعد 30.0 cm من العين لجسم يقع في اللانهاية. بعد الخيال عن العين هو 30.0 cm، وبالتالي بعده عن عدسة النظارات يكون:  $30.0 \text{ cm} - 1.50 \text{ cm} = 28.5 \text{ cm}$ . لذلك، يجب أن يكون لدينا  $d_i = -28.5 \text{ cm}$  عند  $d_o = \infty$ . بعد الخيال سالب لأنه على الجانب نفسه من عدسة النظارات، حيث يوجد الجسم.

## الحل:

نظرًا لأن  $d_i$  و  $d_o$  معلومان، يمكننا إيجاد الطاقة البصرية لعدسة النظارات باستخدام **المعادلة 2.24**:

$$P = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{\infty} + \frac{1}{-0.285 \text{ m}} = -3.51 \text{ D}.$$

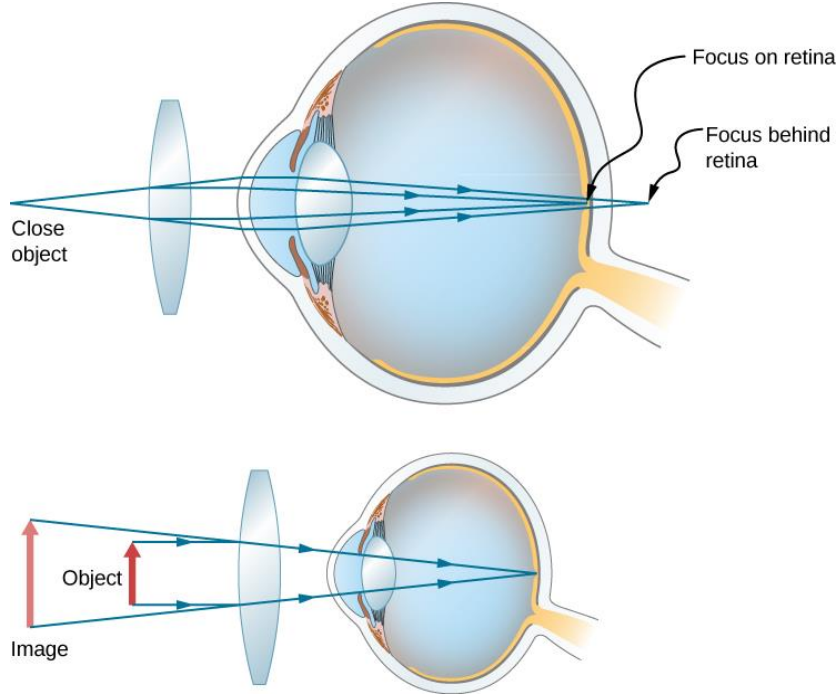
## ملاحظة:

تشير الطاقة البصرية السالبة إلى وجود عدسة مبعدة (أو مقعرة)، كما هو متوقع. إذا قمت بفحص النظارات الطبية للأشخاص المصابين بقصر النظر، فستجد أن العدسات تكون أرق ما عليه في المركز. بالإضافة إلى ذلك، إذا قمت بقراءة وصفة طبية للنظارات للأشخاص الذين يعانون من قصر النظر، فستجد أن الطاقة البصرية الموصى بها للعدسة سالبة وتُعطى بوحدة الديوبتر.

يكون تصحيح مد النظر ببساطة باستخدام النوع المعاكس من العدسات المستخدمة لمعالجة قصر النظر (على سبيل المثال، عدسة مقربة)، كما هو مبين في **الشكل 33.2**.

ستنتج هذه العدسة خيالاً للأجسام المادية التي تكون أقرب من النقطة القريبة على مسافة تقع بين النقطة القريبة والنقطة البعيدة، بحيث يمكن للشخص رؤية الخيال بوضوح. لتحديد الطاقة البصرية اللازمة للتصحيح، يجب معرفة النقطة القريبة للشخص، كما هو

موضح في **المثال 9.2**



**الشكل 33.2** يستخدم لتصحيح مد النظر عدسة مقربة تعوض تقارب العين الضعيف. تنتج العدسة المقربة خيالاً أبعد عن العين من الجسم نفسه، حتى يتمكن الشخص المصاب بمد النظر من رؤيته بوضوح

## مثال 9.2

### تصحيح مد النظر

ما هي القوة البصرية لعدسة النظارات اللازمة لشخص يعاني من مد النظر، ونقطته القريبة هي 1.00 m، حتى يتمكن من رؤية جسم بوضوح على بعد 25.0 cm من العين؟ افترض أن العدسة التصحيحية مثبتة على بعد 1.5 cm من العين.

### خطة الحل:

عندما يكون الجسم على بعد 25.0 cm من العين، يجب أن تنتج عدسة النظارات خيالاً على بعد 1.00 m (في النقطة القريبة)، حتى يتمكن الشخص من رؤيتها بوضوح. لما كان الخيال يبعد 1.00 m عن العين، فإنه يبعد عن عدسة النظارات مسافة:

$100 \text{ cm} - 1.5 \text{ cm} = 98.5 \text{ cm}$ ، لأن عدسة النظارات تبعد 1.5 cm عن العين. وبالتالي،  $d_i = -98.5 \text{ cm}$ ، حيث تشير الإشارة

السالبة إلى أن الخيال على الجانب نفسه من العدسة، حيث يوجد الجسم. بعد الجسم عن عدسة النظارات هو:

$$d_o = 23.5 \text{ cm} = 25.0 \text{ cm} - 1.5 \text{ cm}$$

### الحل:

نظراً لأن  $d_o$  و  $d_i$  معلومان، يمكننا إيجاد الطاقة البصرية لعدسة النظارات باستخدام **المعادلة 2.24**

$$P = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{0.235 \text{ m}} + \frac{1}{-0.985 \text{ m}} = +3.24 \text{ D.}$$



## ملاحظة:

تشير الطاقة البصرية السالبة إلى وجود عدسة مقربة (محدبة)، كما هو متوقع. إذا قمت بتفحص نظارات الأشخاص المصابين بمد النظر، فستجد أن العدسات تكون أكثر ثخانة في الوسط. بالإضافة إلى ذلك، فإن النظارات الطبية الموصوفة للأشخاص الذين يعانون من مد النظر، طاقتها البصرية موجبة.

## 6.2 | الكاميرا The Camera

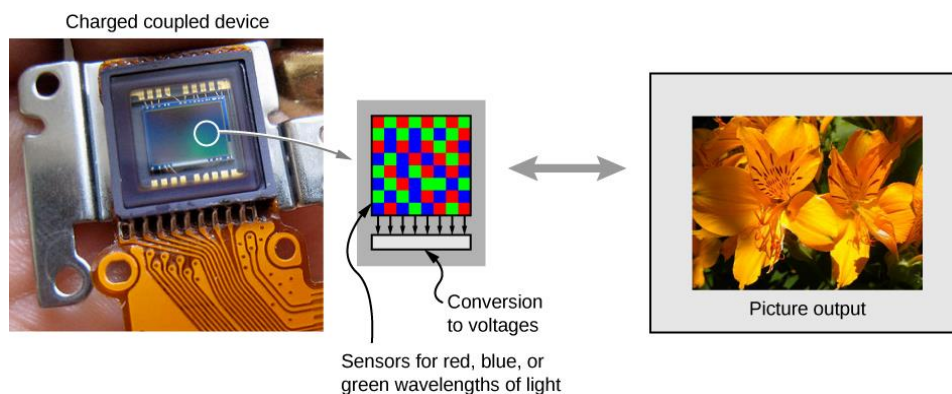
### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- وصف بصريات الكاميرا.
- وصف الخيال الذي تشكله الكاميرا.

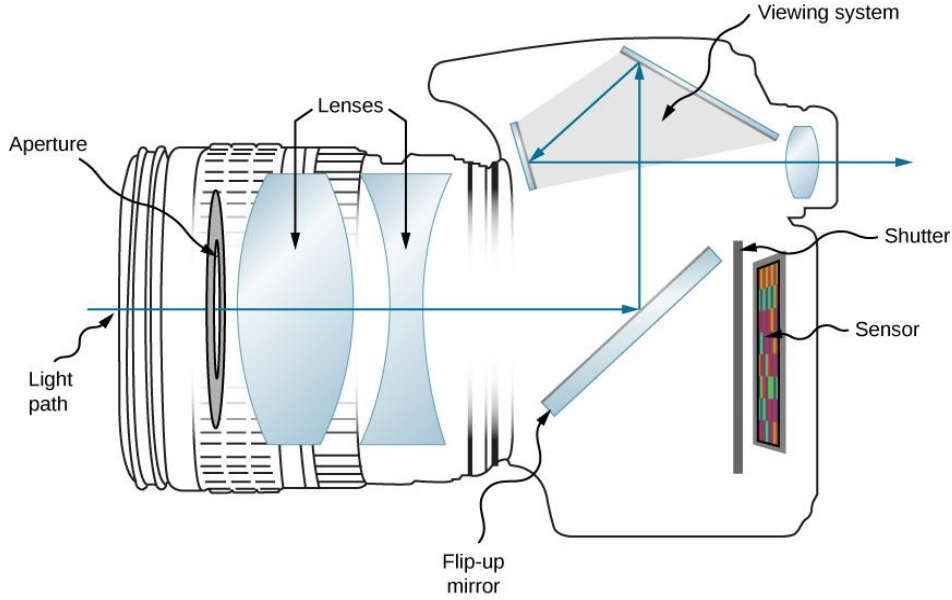
الكاميرات شائعة جداً في حياتنا اليومية. بين عامي 1825 و 1827، نجح المخترع الفرنسي نيسفور نيس Nicephore Niepce في التقاط صورة بواسطة كاميرا بدائية. ومنذ ذلك الحين، تحقق تقدم هائل في تصميم الكاميرات وأجهزة الكشف القائمة على الكاميرا.

في البداية، تم تسجيل الصور باستخدام التفاعل الحساس للضوء للوكبات القائمة على الفضة مثل كلور الفضة أو بروم الفضة. كانت ورقة الصور الفوتوغرافية الفضية شائعة الاستخدام حتى ظهور التصوير الرقمي في الثمانينيات، والذي يرتبط بشكل وثيق بمكشافات أجهزة اقتران الشحنة (CCD). باختصار CCD عبارة عن رقاقة شبه موصلة تُسجل الصور كمصفوفة من البيكسلات الصغيرة، كل بكسل يقع في "حاوية bin" على السطح. كل بكسل قادر على اكتشاف شدة الضوء الذي يؤثر عليه. يتم إدخال اللون عن طريق وضع مرشحات للون الأحمر والأزرق والأخضر على وحدات البكسل، مما ينتج عنه صور رقمية ملونة (الشكل 2.34). يتوافق بكسل CCD واحد مع بكسل واحد للصورة في أفضل دقة له. لتقليل الدقة وتقليل حجم الملف، يمكننا "تخزين" عدة وحدات بكسل CCD في حاوية واحدة، مما ينتج عنه صورة أصغر ولكن "منقطة".



**الشكل 34.2** يحول جهاز اقتران الشحنات (CCD) الإشارات الضوئية إلى إشارات إلكترونية، مما يسمح بالمعالجة الإلكترونية للصور المرئية وتخزينها. هذا هو أساس التصوير الإلكتروني في جميع الكاميرات الرقمية، من الهواتف المحمولة إلى كاميرات تصوير الأفلام.

من الواضح أن الإلكترونيات تشكل جزءاً كبيراً من الكاميرا الرقمية. ومع ذلك، فإن الأساس الفيزيائي لها هو البصريات الأساسية. في الواقع، تشبه بصريات الكاميرا إلى حدٍ كبير بصريات العدسة الفردية عندما يكون بعد الجسم عن العدسة أكبر بكثير من البعد المحرقي للعدسة (الشكل 35.2).



**الشكل 35.2** تحتوي الكاميرات الرقمية الحديثة على عدة عدسات لإنتاج صور واضحة بأقل قدر من الزيغ، وتستخدم مرشحات حمراء وزرقاء وخضراء لإنتاج الصور الملونة.

بالنظر إلى كاميرا الهاتف الذكي مثلاً، فقد تم تجهيز كاميرا الهاتف الذكي المتوسطة بعدسة ثابتة لها زاوية رؤية واسعة وذات بعد محرقي يبلغ نحو 4-5 mm (هذا البعد المحرقي يساوي تقريباً ثخانة الهاتف). يتم تركيز الصور، التي تلتقطها العدسة، على كاشف CCD المثبت على الجانب الآخر من الهاتف. في الهاتف الخليوي، لا يمكن للعدسة و CCD أن يتحركا بالنسبة لبعضهما البعض. إذاً، كيف نتأكد من أن أحيلة كل من الجسم البعيد والقريب يتم تركيزها؟ تذكر أن العين البشرية يمكن أن تتكيف مع الأحيلة القريبة والبعيدة عن طريق تغيير بعدها المحرقي. لا تستطيع كاميرا الهاتف الخليوي القيام بذلك لأن بعد العدسة عن الكاشف ثابت. وهنا يصبح البعد المحرقي الصغير مهماً. بفرض أن لدينا كاميرا ذات بعد محرقي 5 mm. ما هو بعد الخيال لصورة شخصية (سيلفي)؟ بعد الجسم لصورة شخصية (يساوي طول اليد التي تحمل الهاتف) نحو 50 cm. باستخدام معادلة العدسة الرقيقة، يمكننا أن نكتب:

$$\frac{1}{5 \text{ mm}} = \frac{1}{500 \text{ mm}} + \frac{1}{d_i}$$

ثم نحصل على بعد الخيال:

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{5 \text{ mm}} - \frac{1}{500 \text{ mm}}$$

لاحظ أن بعد الجسم أكبر بنحو 100 مرة من البعد المحرقي. يمكننا أن نرى بوضوح أن الحد  $1/(500 \text{ mm})$  أصغر بكثير من  $1/(5 \text{ mm})$ ، مما يعني أن بعد الخيال تساوي إلى حد كبير البعد المحرقي للعدسة. يعطينا الحساب الفعلي بعد الخيال  $d_i = 5.05 \text{ mm}$ . هذه القيمة قريبة جداً من البعد المحرقي للعدسة.

دعونا الآن ننظر في حالة الجسم البعيد. لنقل أننا نود التقاط صورة لشخص يقف على بعد نحو 5 أمتار منّا. باستخدام معادلة العدسة الرقيقة مرة أخرى، نحصل على بعد الخيال 5.05 mm. كلما كان بعد الجسم عن العدسة أكبر، اقتربت قيمة بعد الخيال من البعد المحرق. وفي الحالة الحدية عندما يكون الجسم بعيداً بشكل لا نهائي، نحصل على بعد للخيال مساوياً تماماً للبعد المحرق للعدسة. كما نرى، فإن الفرق بين بعد الخيال لصورة سيلفي وبعد الخيال لجسم بعيد هو نحو 0.05 mm أو 50  $\mu\text{m}$ . حتى البعد القصير لجسم مثل طول اليد هو أكبر من ضعفي البعد المحرق للعدسة، مما ينتج عنه اختلافات دقيقة في بعد الخيال. (مقدار الفرق  $\mu\text{m}$  50 هو أصغر من ثخانة ورقة متوسطة) يمكن بسهولة استيعاب مثل هذا الفارق الصغير بواسطة الكاشف نفسه، الذي يتم وضعه عند البعد المحرق للعدسة. يمكن لبرامج تحليل الصور أن تساعد في تحسين جودة الصورة. الكاميرات التقليدية التي تستخدم تقنية التصوير والالتقاط غالباً ما تستخدم عدسة متحركة لتغيير بعد الخيال عن العدسة. تسمح العدسات المعقدة للكاميرات المرايا العاكسة ذات التكلفة الأكبر بالتقاط صور فوتوغرافية بجودة رائعة. بصريات عدسات هذه الكاميرا هو خارج نطاق هذا الكتاب.

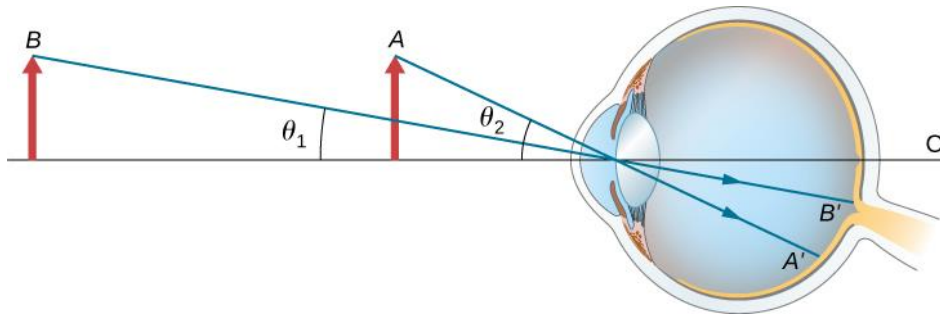
## 7.2 | المكبر البسيط The Simple Magnifier

### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

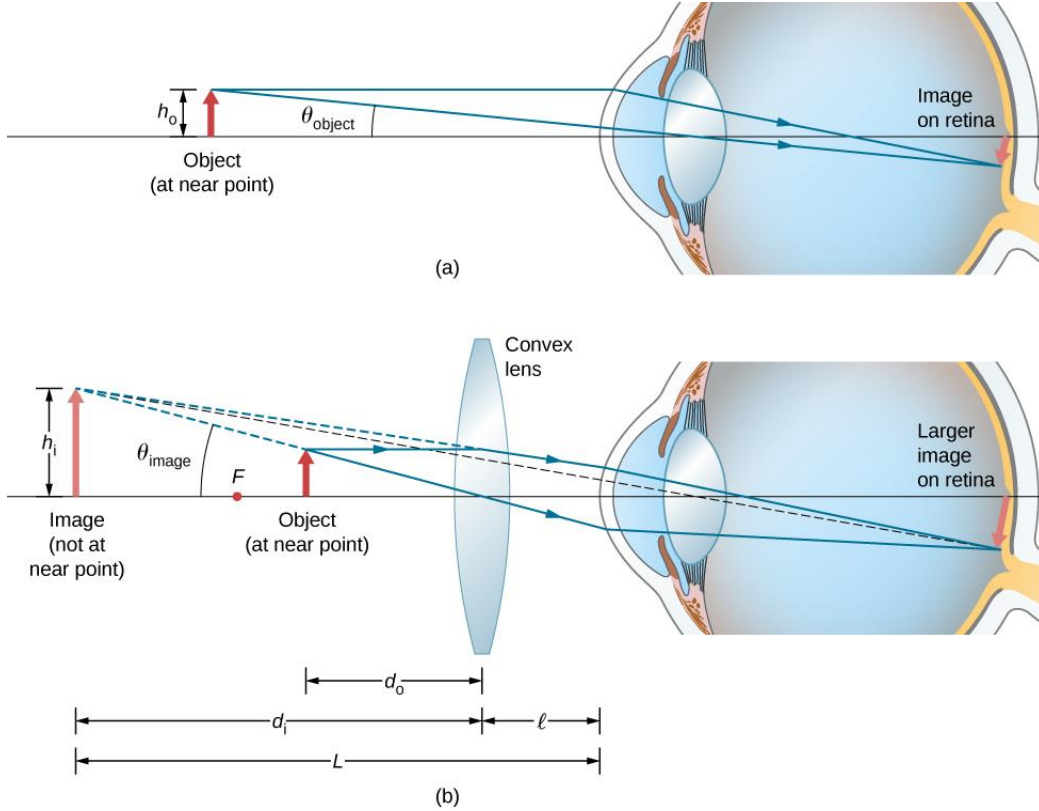
- فهم بصريات المكبر البسيط.
- وصف الخيال الذي يتم تشكيله بواسطة المكبر البسيط.

يعتمد الحجم الظاهري للجسم الذي تدركه العين على زاوية الميل التي يصنعها الجسم مع العين. كما هو مبين في **الشكل 36.2**، فإن الجسم الموجود عند النقطة  $A$  يميل بزاوية أكبر عن العين مما هو عليه عندما يوضع الجسم نفسه عند النقطة  $B$ . وبالتالي، فإن الجسم عند النقطة  $A$  يشكل خيلاً أكبر على شبكية العين (انظر إلى  $OA'$ ) من ذلك الذي يتشكل عندما يتم وضعه عند النقطة  $B$  (انظر  $OB'$ ). وهكذا، فإن الأجسام التي تصنع زوايا ميل كبيرة مع العين تظهر أكبر لأنها تشكل أحيلة أكبر على شبكية العين.



**الشكل 36.2** يتحدد الحجم الذي تدركه العين بالزاوية التي يصنعها الجسم مع العين. الخيال المُشكّل للجسم على شبكية العين في حال وجوده عند النقطة  $A$  أكبر من الخيال المُشكّل لنفس الجسم على شبكية العين عند توضع في النقطة  $B$  (وذلك بمقارنة ارتفاعات الأحيلة  $OA'$  مع  $OB'$ ).

لقد رأينا أنه عندما يتم وضع جسم ما ضمن البعد المحرقى للعدسة المحدبة، فإن خياله يكون وهمياً، صحيحاً، وأكبر من الجسم (انظر الجزء (b) من الشكل 26.2). وبالتالي، عندما يكون هذا الخيال، الذي تنتجه عدسة محدبة، بمنزلة جسم للعين، كما هو مبين في الشكل 37.2، ويتم تكبير الخيال على شبكية العين، لأن الخيال الذي تنتجه العدسة يميل بزوايا أكبر عن العين من الجسم. تُسمى العدسة المحدبة المستخدمة لهذا الغرض بالزجاج المكبر (magnifying glass) أو المكبر البسيط (simple magnifier)



**الشكل 37.2** المكبر البسيط هو عدسة محدبة تستخدم لإنتاج خيال مكبر للجسم على شبكية العين. (a) عند عدم وجود عدسة محدبة، يصنع الجسم زاوية ميلان مع العين  $\theta_{object}$ . (b) عند وجود العدسة المحدبة في مكانها، فإن الخيال الذي تنتجه العدسة المحدبة يميل بزوايا  $\theta_{image}$  عن العين، بحيث تكون:  $\theta_{image} > \theta_{object}$ . وبالتالي، فإن الخيال الناتج على شبكية العين أكبر بوجود العدسة المحدبة في مكانها.

لحساب تكبير العدسة المكبرة، نقارن الزاوية التي يصنعها الخيال (الذي تشكله العدسة) بالزاوية التي يصنعها الجسم (التي يتم صنعها بدون عدسة)، كما هو مبين في الشكل 37.2. نفترض أن الجسم يقع في النقطة القريبة للعين، لأن هذا هو بعد الجسم الذي يمكن أن تشكل عنده العين المجردة أكبر خيال على شبكية العين. وسنقارن الأخيلا المكبرة التي شكلتها العدسة بهذا الحجم الأقصى للخيال المشكّل بالعين المجردة. تكبير الخيال الملاحظ بالعين هو التكمير الزاوي (angular magnification  $M$ )، والذي يعرف بأنه نسبة الزاوية التي يصنعها الخيال  $\theta_{image}$  إلى الزاوية التي يصنعها الجسم  $\theta_{object}$ :

$$M = \frac{\theta_{image}}{\theta_{object}} \quad (2.26)$$

النظر إلى الحالة المبينة في الشكل 37.2. يتم وضع العدسة المكبرة على بعد  $\ell$  من العين، ويتشكل الخيال الذي ينتجه المكبر على بعد  $L$  من العين. نريد حساب التكبير الزاوي لأي قيمة تعسفية لـ  $L$  و  $\ell$ . في تقريب زاوية صغيرة، الحجم الزاوي  $\theta_{\text{image}}$  للخيال هو:  $h_i/L$ . الحجم الزاوي للجسم  $\theta_{\text{object}}$  عند النقطة القريبة هو:  $\theta_{\text{object}} = h_o/25 \text{ cm}$ . عندئذ يكون التكبير الزاوي هو:

$$M = \frac{\theta_{\text{image}}}{\theta_{\text{object}}} = \frac{h_i(25 \text{ cm})}{Lh_o} \quad (2.27)$$

باستخدام المعادلة 8.2 للتكبير الخطي:

$$m = \frac{d_i}{d_o} = \frac{h_i}{h_o}$$

ومعادلة العدسة الرقيقة:

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f}$$

في المعادلة 27.2، حصلنا على العلاقة التالية للتكبير الزاوي للعدسة المكبرة:

$$\begin{aligned} M &= \left(-\frac{d_i}{d_o}\right)\left(\frac{25 \text{ cm}}{L}\right) \\ &= -d_i\left(\frac{1}{f} - \frac{1}{d_i}\right)\left(\frac{25 \text{ cm}}{L}\right) \\ &= \left(1 - \frac{d_i}{f}\right)\left(\frac{25 \text{ cm}}{L}\right) \end{aligned} \quad (2.28)$$

من الجزء (b) من الشكل، نلاحظ أن القيمة المطلقة لبعـد الخيال هي:  $|d_i| = L - \ell$ . لاحظ أن  $d_i < 0$  لأن الخيال وهمي، لذا يمكننا الاستغناء عن القيمة المطلقة عن طريق إدراج الإشارة السالبة بشكل صريح  $-d_i = L - \ell$ . بإدخال هذا في المعادلة 28.2 يعطينا المعادلة النهائية للتكبير الزاوي للعدسة المكبرة:

$$M = \left(\frac{25 \text{ cm}}{L}\right)\left(1 + \frac{L - \ell}{f}\right) \quad (2.29)$$

لاحظ أن جميع الكميات في هذه المعادلة يجب التعبير عنها بالسنتيمترات. في كثير من الأحيان، نريد أن يكون الخيال في النقطة القريبة أي على بعد  $(L = 25 \text{ cm})$  للحصول على الحد الأقصى للتكبير، ونحمل العدسة المكبرة على مقربة من العين ( $\ell = 0$ ). في هذه الحالة، تعطي المعادلة 29.2:

$$M = 1 + \frac{25 \text{ cm}}{f} \quad (2.30)$$

مما يدل على أن أقصى تكبير يحدث للعدسة ذات البعد المحرق الأقصر. وبالإضافة إلى ذلك، عندما يقع الخيال على بعد النقطة القريبة، وتكون العدسة قريبة للعين ( $\ell = 0$ )، عندئذ يكون  $L = d_i = 25 \text{ cm}$  و المعادلة 27.2 تصبح:

$$M = \frac{h_i}{h_o} = m \quad (2.31)$$

حيث:  $m$  هو التكبير الخطي (المعادلة 32.2) المشتق للمرايا الكروية والعدسات الرقيقة. تكون الحالة المفيدة الأخرى عندما يكون الخيال في اللانهاية ( $L = \infty$ ). عندها تصبح المعادلة 29.2 بالشكل:

$$M(L = \infty) = \frac{25 \text{ cm}}{f} \quad (2.32)$$

التكبير الناتج هو ببساطة نسبة بعد النقطة القريبة إلى البعد المحرقي للعدسة المكبرة، لذلك فإن العدسة ذات البعد المحرقي الأقصر تعطي تكبيراً أقوى. وعلى الرغم من أن هذا التكبير أصغر بمقدار 1 من التكبير الذي تم الحصول عليه عندما يقع الخيال في النقطة القريبة، فإنه يوفر ظروف المشاهدة الأكثر راحة، لأن العين تكون مسترخية عند النظر إلى جسم بعيد.

بمقارنة **المعادلة 29.2** مع **المعادلة 32.2**، نرى أن نطاق التكبير الزاوي للعدسة المقربة المعطاة هو:

$$\frac{25 \text{ cm}}{f} \leq M \leq 1 + \frac{25 \text{ cm}}{f} \quad (2.33)$$

## مثال 10.2

### تكبير الألماس

يريد جواهري فحص ألماسة قطرها 3.0 mm باستخدام المكبر، حيث توضع الماسة عند النقطة القريبة للجواهري (25 cm)، ويحمل الجواهري العدسة المكبرة بالقرب من عينه.

(a) ما هو البعد المحرقي اللازم للعدسة المكبرة لرؤية خيال الماسة بقطر 15 mm؟

(b) ما هو البعد المحرقي اللازم للعدسة المكبرة للحصول على تكبير  $\times 10$ ؟

### خطة الحل:

نحن بحاجة إلى تحديد التكبير المطلوب للمكبر، لأن الجواهري يحمل العدسة المكبرة بالقرب من عينه، يمكننا استخدام **المعادلة 30.2** للعثور على البعد المحرقي للعدسة المكبرة.

### الحل:

a. التكبير الخطي المطلوب هو نسبة قطر الخيال المطلوب إلى القطر الفعلي للماسة (**المعادلة 32.2**). ولأن الجواهري يحمل العدسة المكبرة بالقرب من عينه والخيال يتشكل في نقطته القريبة، فإن التكبير الخطي هو نفسه التكبير الزاوي، لذلك:

$$M = m = \frac{h_i}{h_o} = \frac{15 \text{ mm}}{3.0 \text{ mm}} = 5.0.$$

ويمكن حساب البعد المحرقي  $f$  للعدسة المكبرة بـ **المعادلة 30.2** من أجل قيمة  $f$  فنحصل على:

$$M = 1 + \frac{25 \text{ cm}}{f}$$

$$f = \frac{25 \text{ cm}}{M - 1} = \frac{25 \text{ cm}}{5.0 - 1} = 6.3 \text{ cm}$$

b. للحصول على خيال مكبر بمعامل يساوي عشرة، نقوم مرة أخرى بـ **المعادلة 30.2** من أجل قيمة  $f$ ، ولكن هذه المرة نستخدم  $M = 10$ . فتكون النتيجة:

$$f = \frac{25 \text{ cm}}{M - 1} = \frac{25 \text{ cm}}{10 - 1} = 2.8 \text{ cm}.$$

### ملاحظة:

لاحظ أنه يتم الحصول على تكبير أكبر باستخدام عدسة ذات بعد محرقي أصغر. لذلك، نحتاج إلى استخدام عدسة نصف قطر أختائها لا يتجاوز بضع سنتيمترات، ويجب حملها بالقرب من العين. ولكن هذا ليس مريحاً تماماً. المجهر المركب، الذي سنستكشفه في القسم التالي، يمكنه التغلب على هذا العيب.

### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- شرح المبادئ الفيزيائية الكامنة وراء عمل المجاهر والتلسكوبات.
- وصف الخيال الذي تشكله هذه الأدوات وحساب تكبيرها.

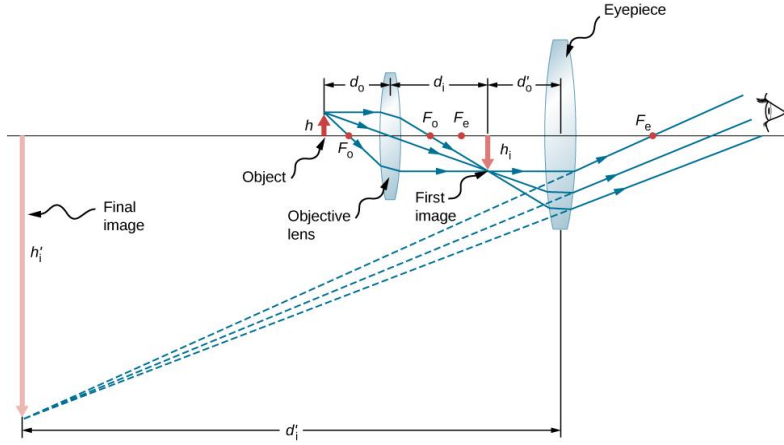
المجاهر والتلسكوبات هي الأدوات الأساسية التي ساهمت بشكل كبير في فهمنا الحالي للعالم المرئية والميكروية. أدى اختراع هذه الأجهزة إلى اكتشافات عديدة في تخصصات مثل الفيزياء وعلم الفلك وعلم الأحياء، على سبيل المثال لا الحصر. في هذا القسم، نوضح الأسس الفيزيائية التي تجعل هذه الأدوات تعمل.

### المجاهر

على الرغم من أن العين رائعة في قدرتها على رؤية الأشياء الكبيرة والصغيرة، إلا أنه من الواضح أنها محدودة في أصغر التفاصيل التي يمكنها اكتشافها. وقد أدت الرغبة في رؤية أكثر مما يمكن رؤيته بالعين المجردة إلى استخدام الأدوات البصرية. لقد رأينا أن العدسة المحدبة البسيطة يمكن أن تشكل خيلاً مكبراً، لكن من الصعب الحصول على تكبير كبير بهذه العدسة. ومن الصعب الحصول على تكبير تزيد قيمته عن  $5\times$  دون تشويه الخيال. وللحصول على تكبير أعلى، يمكننا الجمع بين العدسة المكبرة البسيطة وعدسة إضافية واحدة أو أكثر. في هذا القسم، نقوم بدراسة المجاهر التي تقوم بتكبير التفاصيل التي لا يمكننا رؤيتها بالعين المجردة.

تم تطوير المجاهر لأول مرة في أوائل القرن السادس عشر من قبل صناع النظارات في هولندا والدنمارك. تم بناء أبسط **مجهر مركب (compound microscope)** من عدستين محدبتين (**الشكل 38.2**). فالعدسة الجسيمية (**objective lens**) هي عدسة محدبة ذات بعد محرق قصير (أي طاقة عالية) ولها تكبير نموذجي يتراوح بين  $5\times$  إلى  $100\times$ . و **العدسة العينية (eyepiece)**، وتسمى أيضاً بالبصرية، هي عدسة محدبة بعدها المحرق أطول.

الغرض من المجهر هو إنشاء صور مكبرة للأجسام الصغيرة، وتساهم كلتا العدستين في التكبير النهائي. كما يتم إنتاج صور مكبرة نهائية بعيدة بما فيه الكفاية عن المراقب ليتم عرضها بسهولة، نظراً لأن العين لا يمكنها تركيز الأجسام أو الصور القريبة جداً (أي أقرب من النقطة القريبة للعين).



**الشكل 38.2** يتكون المجهر المركب من عدستين: جسيمية وعينية. تشكل العدسة الجسيمية الخيال الأول، والذي يكون أكبر من الجسم. يقع هذا الخيال الأول داخل البعد المحرقي للعين ويكون بمثابة جسم للعين. تشكل العدسة العينية الخيال النهائي الذي يتم تكبيره بشكل أكبر.

لنرى كيف يقوم المجهر المبين في **الشكل 38.2** بتشكيل الخيال، ننظر إلى عدساته بالترتيب. بعد الجسم  $f^{\text{obj}}$  أكبر من البعد المحرقي للعدسة الجسيمية بقليل، مما ينتج عنه خيال حقيقي مقلوب وأكبر من الجسم. يُعدُّ هذا الخيال الأول بمثابة جسم للعدسة الثانية، أو العدسة العينية. توضع العدسة، بحيث يكون الخيال الأول ضمن بعدها المحرقي  $f^{\text{eye}}$ ، بحيث يمكنها أن تزيد من تكبير الخيال. بمعنى أنها تعمل كعدسة مكبرة تقوم بتكبير الخيال المتوسط الذي تنتجه العدسة الجسيمية. الخيال الذي تنتجه العدسة العينية هو خيال وهمي مكبر. ويبقى الخيال النهائي مقلوباً ولكنه أبعد عن المراقب من الجسم نفسه، مما يجعل عرضه سهلاً. تقوم العين بعرض الخيال الوهمي الذي شكلته العدسة العينية، والذي يعمل كجسم للعدسة في العين. الخيال الوهمي الذي تشكله العدسة العينية خارج البعد المحرقي للعين، وبالتالي فإن العين تشكل خيالاً حقيقياً على شبكية العين. تكبير المجهر هو جداء التكبير الخطي للعدسة الجسيمية  $m^{\text{obj}}$  بالتكبير الزاوي للعدسة العينية  $M^{\text{eye}}$ . حيث تعطى هذه القيم بالعلاقات التالية:

$$m^{\text{obj}} = -\frac{d_i^{\text{obj}}}{d_o^{\text{obj}}} \approx -\frac{d_i^{\text{obj}}}{f^{\text{obj}}} \text{ (linear magnification y objective)}$$

$$M^{\text{eye}} = 1 + \frac{25 \text{ cm}}{f^{\text{eye}}} \text{ (angular magnification y eyepiece)}$$

حيث،  $f^{\text{obj}}$  و  $f^{\text{eye}}$  هما الأبعاد المحرقة للعدسات الجسيمية والعينية على التوالي. نفترض أن الخيال النهائي يتشكل عند النقطة القريبة للعين، مما يعطي أكبر قيمة للتكبير. لاحظ أن التكبير الزاوي للعدسة العينية هو نفسه الذي تم الحصول عليه سابقاً للمكبر البسيط. لا ينبغي أن يكون هذا مفاجئاً، لأن العدسة العينية هي في الأساس عدسة مكبرة، وينطبق عليها المبدأ الفيزيائي نفسه. **الصافي**  $M_{\text{net}}$  للمجهر المركب هو جداء التكبير الخطي للعدسة الجسيمية بالتكبير الزاوي للعدسة العينية:

$$M_{\text{net}} = m^{\text{obj}} M^{\text{eye}} = \frac{d_i^{\text{obj}} (f^{\text{eye}} + 25 \text{ cm})}{f^{\text{obj}} f^{\text{eye}}} \quad (2.34)$$



## مثال 11.2

### كبير المجهر

احسب التكبير لجسم وضع على بعد 6.20 mm من مجهر مركب يحتوي على عدسة جسيمية بعدها المحرقي يبلغ 6.00 mm وعدسة عينية بعدها المحرقي 50.0 mm. وتفصل بين العدستين مسافة قدرها 23.0 cm.

### خطة الحل:

هذه الحالة مشابهة لما هو مبين في الشكل 38.2. لإيجاد التكبير الكلي، يجب أن نعرف التكبير الخطي للعدسة الجسيمية والتكبير الزاوي للعدسة العينية. يمكننا استخدام المعادلة 34.2، لكننا نحتاج إلى استخدام معادلة العدسة الرقيقة لإيجاد بعد الخيال للعدسة الجسيمية  $d_i^{obj}$ .

### الحل:

بحل معادلة العدسة الرقيقة لإيجاد البعد  $d_i^{obj}$  نجد:

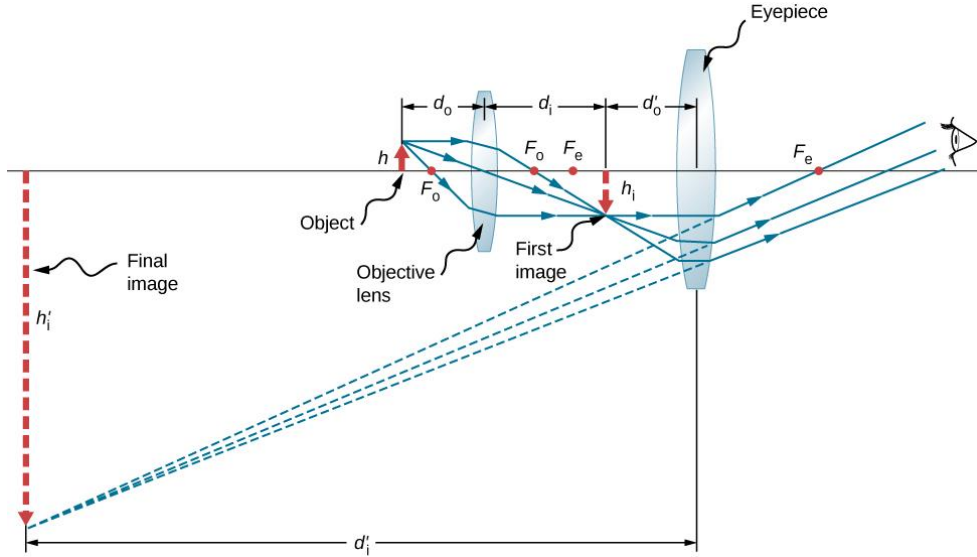
$$\begin{aligned} d_i^{obj} &= \left( \frac{1}{f^{obj}} - \frac{1}{d_o^{obj}} \right)^{-1} \\ &= \left( \frac{1}{6.00 \text{ mm}} - \frac{1}{6.20 \text{ mm}} \right)^{-1} = 186 \text{ mm} = 18.6 \text{ cm} \end{aligned}$$

بإدخال هذه النتيجة في المعادلة 34.2 مع القيم المعروفة  $f^{obj} = 6.20 \text{ mm} = 0.620 \text{ cm}$  و  $f^{eye} = 50.0 \text{ mm} = 5.00 \text{ cm}$  نحصل على:

$$\begin{aligned} M_{net} &= \frac{d_i^{obj} (f^{eye} + 25 \text{ cm})}{f^{obj} f^{eye}} \\ &= \frac{(18.6 \text{ cm})(5.00 \text{ cm} + 25 \text{ cm})}{(0.600 \text{ cm})(5.00 \text{ cm})} \\ &= -186 \end{aligned}$$

### ملاحظة:

يُسهّم كل من العدسة الجسيمية والعدسة العينية في التكبير الكلي، ويكون كبيراً وذا قيمة سالبة، ويوافق الشكل 38.2، حيث يُلاحظ أن الخيال كبير ومقلوب. في هذه الحالة، يكون الخيال وهمياً ومقلوباً، وهذا لا يمكن أن يحدث لعنصر واحد (انظر الشكل 26.2).



**الشكل 39.2** مجهر مركب يتشكل فيه الخيال في اللانهاية.

نقوم الآن بحساب قوة تكبير المجهر عندما يتشكل الخيال في اللانهاية، كما هو مبين في **الشكل 39.2**، لأن هذا يجعل مشاهدته مريحة أكثر. قوة تكبير المجهر هي جداء التكبير الخطي للعدسة الجسيمية  $m^{obj}$  بالتكبير الزاوي للعدسة العينية  $M^{eye}$ . نعلم أن  $m^{obj} = -d_i^{obj}/d_o^{obj}$ ، ومن معادلة العدسة الرقيقة نحصل على:

$$m^{obj} = -\frac{d_i^{obj}}{d_o^{obj}} = 1 - \frac{d_i^{obj}}{f^{obj}} = \frac{f^{obj} - d_i^{obj}}{f^{obj}}. \quad (2.35)$$

إذا كان الخيال النهائي يقع في اللانهاية، وجب أن يكون الخيال، الذي تنتجه العدسة الجسيمية، في محرق العدسة العينية. ويمكن ذلك بتعويض قيمة  $d_i = \infty$  في معادلة العدسة الرقيقة أو بالتذكر بأن الأشعة التي تمر عبر المحرق تخرج من العدسة موازية فيما بينها، وهو ما يعادل التبئير في اللانهاية. بالنسبة للعديد من المجاهر، يتم توحيد البعد بين محرق العدسة الجسيمية من جهة الخيال ومحرق العدسة العينية من جهة الجسم عند القيمة  $L = 16 \text{ cm}$ . وتسمى هذه المسافة طول أنبوب المجهر. من **الشكل 39.2**، نلاحظ أن:  $L = f^{obj} - d_i^{obj}$ . وبإدخال هذا في **المعادلة 35.2** نحصل على:

$$m^{obj} = \frac{L}{f^{obj}} = \frac{16 \text{ cm}}{f^{obj}}. \quad (2.36)$$

نحتاج الآن لحساب التكبير الزاوي للعدسة العينية عند وجود الخيال في اللانهاية. للقيام بذلك، نأخذ نسبة زاوية ميل الخيال  $\theta_{image}$  إلى زاوية ميل الجسم  $\theta_{object}$  عند النقطة القريبة للعين (وهي أقرب مسافة تستطيع عندها العين المجردة عرض الجسم، وبالتالي هذا هو الموضع الذي سيشكل فيه الجسم أكبر خيال له على شبكية العين المجردة. باستخدام **الشكل 39.2** وتقريب الزاوية الصغيرة، لدينا  $\theta_{image} \approx h_i^{obj}/f^{eye}$  و  $\theta_{object} \approx h_i^{obj}/25 \text{ cm}$ ، حيث:  $h_i^{obj}$  هي ارتفاع الخيال الذي تشكله العدسة الجسيمية والذي يعد جسماً للعدسة العينية. وبالتالي، فإن التكبير الزاوي للعدسة العينية هو:

$$M^{eye} = \frac{\theta_{image}}{\theta_{object}} = \frac{h_i^{obj}}{f^{eye}} \frac{25 \text{ cm}}{h_i^{obj}} = \frac{25 \text{ cm}}{f^{eye}}. \quad (2.37)$$

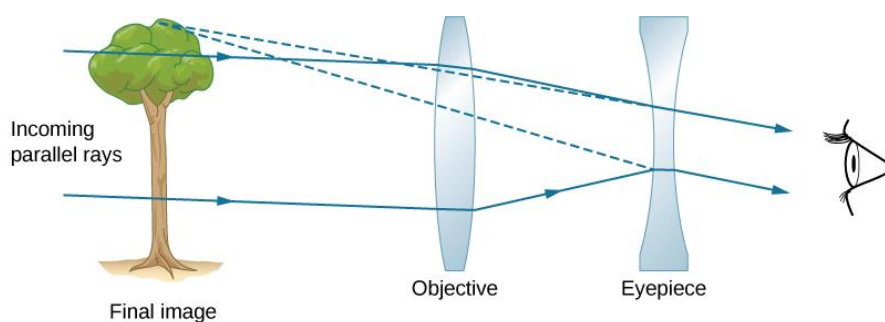
وبالتالي فإن قوة التكبير الصافية للمجهر المركب عند وقوع الخيال في اللانهاية هي:

$$M_{net} = m^{obj} M^{eye} = -\frac{(16 \text{ cm})(25 \text{ cm})}{f^{obj} f^{eye}}. \quad (2.38)$$

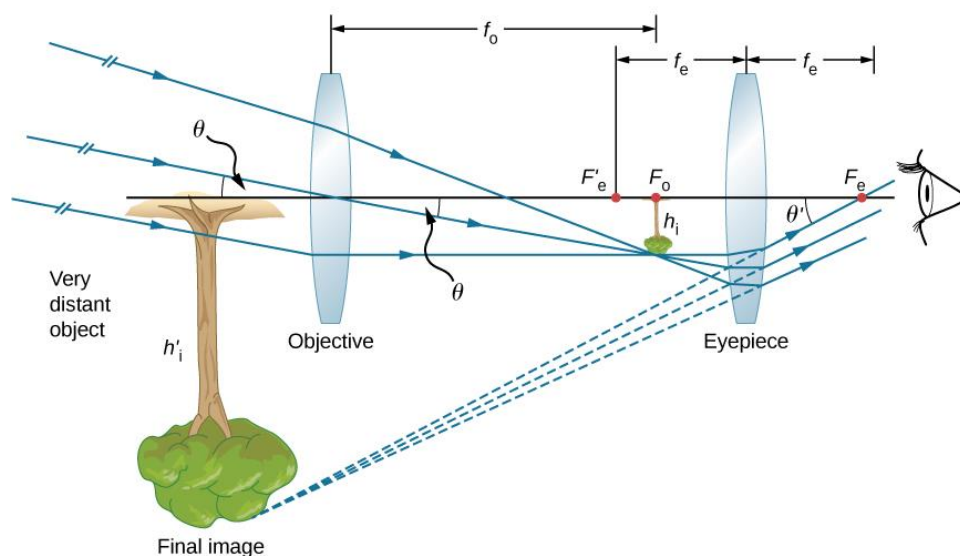
يجب أن تكون الأبعاد المحرقة بالسنتيمترات. تشير الإشارة السالبة إلى أن الخيال النهائي مقلوب. لاحظ أن المتغيرات الوحيدة في المعادلة هي الأبعاد المحرقة للعدسة الجسيمية والعدسة العينية، مما يجعل هذه المعادلة مفيدة بشكل خاص.

## التلسكوبات

التلسكوبات مخصصة لعرض الأجسام البعيدة وإنتاج صور أكبر من الصور المنتجة بالعين المجردة. تلتقط التلسكوبات كمية من الضوء أكبر بكثير من العين، مما يسمح بمشاهدة الأجسام الخافتة بتكبير أكبر ودقة أفضل. اخترعت التلسكوبات في نحو عام 1600، وكان غاليليو أول من استخدمها لدراسة السماء والمذنبات الهائلة. وقد شاهد أقمار كوكب المشتري والحفر والجبال على سطح القمر وتفاصيل البقع الشمسية وحقيقة أن درب التبانة يتكون من عدد كبير من النجوم الفردية.



(a)



(b)

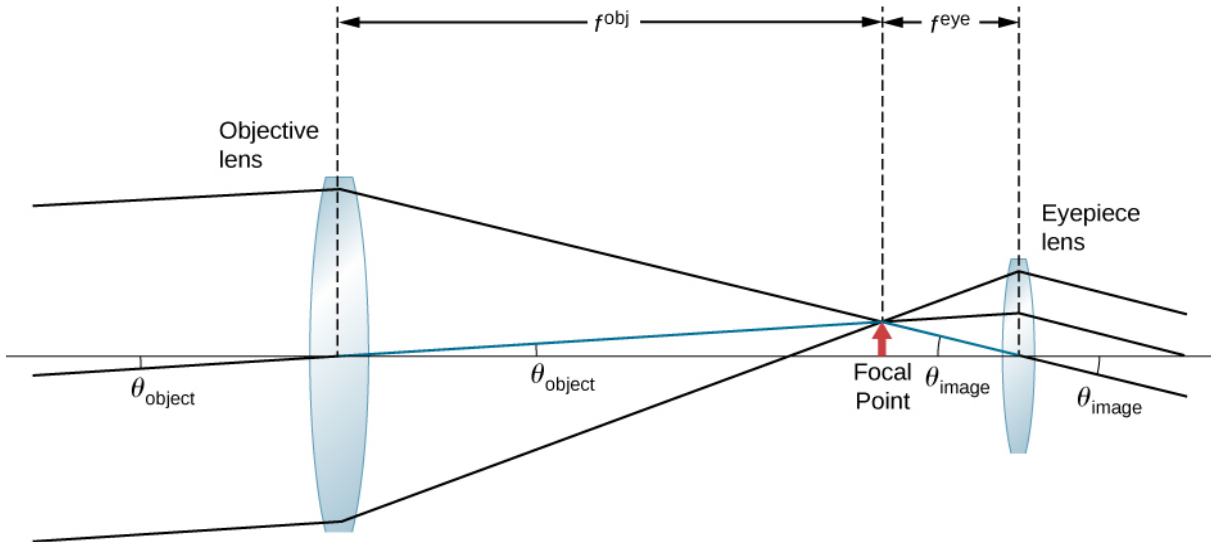
**الشكل 40.2 (a)** قام غاليليو بصنع التلسكوبات من عدسة جسيمية محدبة وعدسة عينية مقعرة. تنتج هذه العدسات خيالاً صحيحاً وتستخدم في مناظير التجسس. **(b)** معظم التلسكوبات الانكسارية البسيطة تحوي عدستين محدبتين. العدسة الجسيمية تشكل خيالاً حقيقياً مقلوباً عند (أو ضمن) المستوى المحرقي للعدسة العينية. يُعدُّ هذا الخيال بمنزلة جسم للعدسة العينية. تشكل العدسة العينية خيالاً وهمياً ومقلوباً ومكبراً.

يوضح الجزء (a) من **الشكل 40.2** تلسكوباً انكسارياً مصنوعاً من عدستين. تشكل العدسة الأولى، والتي تُسمى العدسة الجسيمية، خيلاً حقيقياً ضمن البعد المحرقي للعدسة الثانية، والتي تُسمى بالعدسة العينية. يعمل خيال العدسة الجسيمية كجسم للعدسة العينية، والتي تشكل خيلاً وهمياً مكبراً يتم رصده بواسطة العين. هذا التصميم هو ما استخدمه غاليليو لمراقبة السماء. على الرغم من أن ترتيب العدسات في التلسكوب الانكساري يشبه ما هو عليه في المجهر، إلا إن هناك اختلافات مهمة. في التلسكوب، يكون الجسم الحقيقي بعيداً ويكون الخيال المتوسط أصغر من الجسم. في المجهر، يكون الجسم الحقيقي قريباً جداً ويكون الخيال المتوسط أكبر من الجسم. في كل من التلسكوب والمجهر، تقوم العدسة العينية بتكبير الخيال المتوسط؛ وهذا هو التكبير الوحيد في التلسكوب.

يظهر التلسكوب ذو العدستين الأكثر شيوعاً في الجزء (b) من الشكل. يكون الجسم بعيداً جداً عن التلسكوب، بحيث يقع في اللانهاية بشكلٍ أساساً مقارنةً بالأبعاد المحرقية للعدسات ( $d_o^{obj} \approx \infty$ )، لذلك فإن الأشعة الواردة تكون متوازية بشكلٍ أساس وتتركز على المستوى المحرقي. وبالتالي، يتم إنتاج الخيال الأول حيث يكون:  $d_i^{obj} = f^{obj}$ ، كما هو موضح في الشكل، ولا يكون كبيراً مقارنةً بما قد نراه من خلال النظر إلى الجسم مباشرةً. ومع ذلك، فإن العدسة العينية للتلسكوب (مثل العدسة العينية للمجهر) تتيح لنا الاقتراب أكثر من النقطة القريبة من هذا الخيال الأول، وبالتالي تقوم بتكبيره (لأننا بالقرب منها، فهي تنقل زاوية أكبر من العين وبالتالي خيال أكبر على شبكية العين). كما هو الحال بالنسبة للمكبر البسيط، فإن التكبير الزاوي للتلسكوب هو نسبة زاوية ميل الخيال ( $\theta_{image}$  في الجزء (b)) إلى زاوية الجسم الحقيقي ( $\theta_{object}$  في الجزء (b)):

$$M = \frac{\theta_{image}}{\theta_{object}} \quad (2.39)$$

للحصول على علاقة التكبير التي لا تتضمن سوى بارامترات العدسة، لاحظ أن المستوى المحرقي للعدسة الجسيمية يقع بالقرب من المستوى المحرقي للعدسة العينية. إذا افترضنا أن هذه المستويات متراكبة، سيكون لدينا الحالة المبينة في **الشكل 41.2**.



**الشكل 41.2** المستوى المحرقي للعدسة الجسيمية للتلسكوب قريب جداً من المستوى المحرقي للعدسة العينية. زاوية ميل الخيال  $\theta_{image}$  الذي يرى من خلال العدسة العينية أكبر من زاوية ميل الجسم  $\theta_{object}$  عند النظر بالعين المجردة.

نفترض كذلك أن الزاويتين  $\theta_{object}$  و  $\theta_{image}$  صغيرتان، بحيث يتم الاحتفاظ بتقريب الزاوية الصغيرة ( $\tan \theta \approx \theta$ ).

إذا كان الخيال الذي تشكل في المستوى المحرقي له ارتفاع  $h$ ، إذاً:

$$\theta_{\text{object}} \approx \tan \theta_{\text{object}} = \frac{h}{f_{\text{obj}}}$$

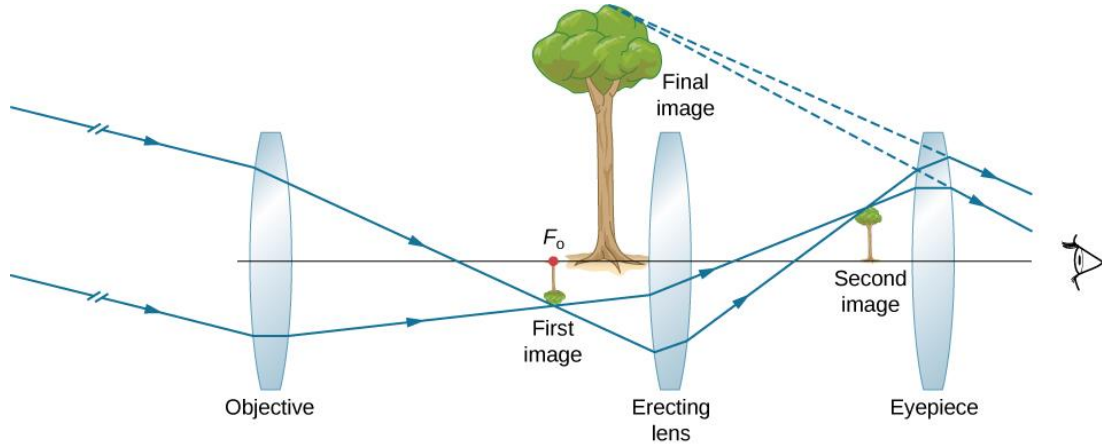
$$\theta_{\text{image}} \approx \tan \theta_{\text{image}} = \frac{-h}{f_{\text{eye}}}$$

حيث يتم تقديم الإشارة السالبة لأن الارتفاع سالب إذا قمنا بقياس الزاويتين باتجاه عقارب الساعة. بإدخال هذه التعبيرات في **المعادلة 39.2** نحصل على:

$$M = \frac{-h_i}{f_{\text{eye}}} \frac{f_{\text{obj}}}{h_i} = -\frac{f_{\text{obj}}}{f_{\text{eye}}}. \quad (2.40)$$

وبالتالي، للحصول على أكبر قدر من التكبير الزاوي، من الأفضل أن يكون لديك عدسة جسيمية ذات بعد محرفي طويل وعدسة عينية ببعد محرفي قصير. كلما زاد التكبير الزاوي  $M$ ، بدا الجسم عند مشاهدته من خلال التلسكوب، مما يجعل التفاصيل أكثر وضوحاً. يتم فرض قيود على التفاصيل التي يمكن ملاحظتها من خلال عدة عوامل، بما في ذلك جودة العدسة واضطراب الغلاف الجوي. العدسات العينية النموذجية لها أبعاد محرفية 2.5 cm أو 1.25 cm. إذا كانت عدسة التلسكوب الجسيمية ذات بعد محرفي يبلغ 1m، فإن هذه العدسات العينية تعطي تكبيراً بمقدار  $40\times$  و  $80\times$  بالترتيب. وبالتالي، فإن التكبير الزاوي يجعل الخيال يظهر 40 مرة أو 80 مرة أقرب من الجسم الحقيقي.

تشير الإشارة السالبة في التكبير إلى أن الخيال مقلوب، وهو أمر غير مهم لمراقبة النجوم، ولكنه يمثل مشكلة حقيقية بالنسبة للتطبيقات الأخرى، مثل تلسكوبات السفن أو المدافع التلسكوبية المستخدمة لرؤية المناظر الطبيعية. إذا كانت هناك حاجة إلى خيال صحيح، يمكن استخدام ترتيب جاليليو في الجزء (a) من **الشكل 40.2**، لكن الترتيب الأكثر شيوعاً هو استخدام عدسة محدبة ثالثة كعدسة عينية، مما يزيد البعد بين العدستين الأوليين ويعكس الخيال مرة أخرى كما هو موضح في **الشكل 42.2**.



**الشكل 42.2** هذا الترتيب للعدسات الثلاثة في التلسكوب ينتج خيلاً نهائياً صحيحاً. العدستان الأولى والثانية متباعدتان بما فيه الكفاية، بحيث أن العدسة الثانية تقلب خيال الأولى. تعمل العدسة الثالثة كمكبر وتحافظ على الخيال في وضعٍ صحيحٍ وفي موقعٍ يسهل رؤيته.

أكبر تلسكوب انكساري في العالم هو تلسكوب يركس الذي يبلغ قطره 40 inch يقع في بحيرة جنيف، ويسكونسن (**الشكل 43.2**)، وتديره جامعة شيكاغو.

بناء التلسكوبات الانكسارية الكبيرة عملية صعبة ومكلفة للغاية، فهي تحتاج إلى عدسات كبيرة خالية من العيوب، والتي تعد في حد ذاتها مهمة صعبة من الناحية الفنية. يبدو التلسكوب الانكساري، بشكل أساسي، على شكل أنبوب له هيكل داعم لتدويره

في مختلف الاتجاهات. ويعاني التلسكوب الانكساري من عدة مشاكل. حيث يتسبب انحراف العدسات في عدم وضوح الصورة. بالإضافة إلى أنه، عندما تصبح العدسات أكثر ثخانة كما هو الحال في العدسات الأكبر حجماً، يتم امتصاص المزيد من الضوء، مما يجعل مراقبة النجوم الباهتة أكثر صعوبة. العدسات الكبيرة هي أيضاً ثقيلة جداً وتتشوه تحت ثقلها. تتم معالجة بعض هذه المشاكل في التلسكوبات الانكسارية عن طريق تجنب الانكسار لجمع الضوء وبدلاً من ذلك باستخدام مرآة منحنية في مكانها، كما ابتكرها إسحاق نيوتن. وتُسمى هذه التلسكوبات بالتلسكوبات الانعكاسية.

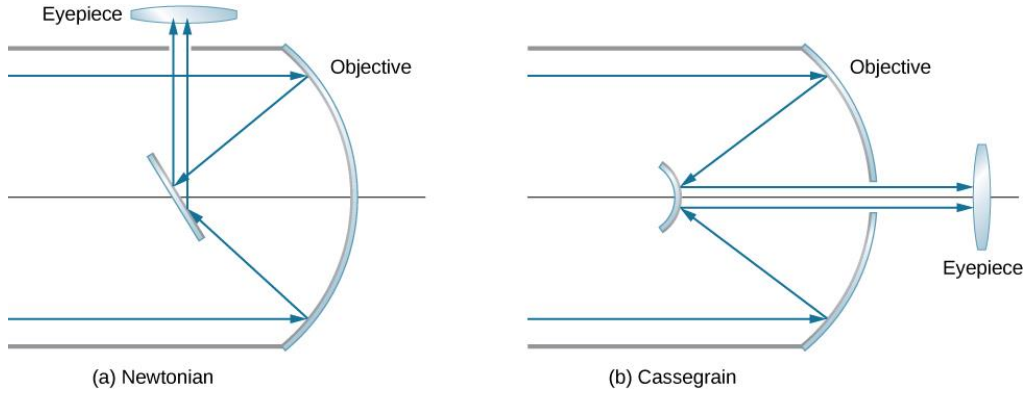


**الشكل 43.2** في عام 1987، بنى مرصد بيركس في ولاية ويسكونسن (في الولايات المتحدة الأمريكية) تلسكوباً انكسارياً كبيراً له عدسة جسيمية يبلغ قطرها 40 inch ويبلغ طول أنبويه 62 قدماً.

### التلسكوبات الانعكاسية

صمم إسحاق نيوتن أول تلسكوب انعكاسي في نحو عام 1670 لحل مشكلة الزيوغ اللوني الذي يحدث في جميع التلسكوبات الانكسارية. في حالة الزيوغ اللوني، ينكسر ضوء الألوان المختلفة بكميات مختلفة قليلاً في العدسة. ونتيجة لذلك، يظهر قوس قزح حول الخيال ويظهر الخيال غير واضح. في التلسكوب الانعكاسي، تسقط أشعة الضوء من مصدر بعيد على سطح مرآة مقعرة مثبتة في نهاية الأنبوب. استخدام المرآة بدلاً من العدسة يلغي الزيوغ اللوني. تركز المرآة المقعرة الأشعة على مستواها المحرفي. مشكلة التصميم هي كيف يتم مشاهدة الخيال المركز. استخدم نيوتن تصميماً ينعكس فيه الضوء المركز من المرآة المقعرة على جانب واحد من الأنبوب إلى داخل العدسة العينية [الجزء (a) من الشكل 44.2]. هذا الترتيب شائع في العديد من تلسكوبات الهواة ويُسمى بالتصميم النيوتوني (Newtonian design).

تعكس بعض التلسكوبات الضوء إلى الخلف باتجاه منتصف المرآة المقعرة باستخدام مرآة محدبة. في هذا الترتيب، تحتوي المرآة المقعرة المستخدم لجمع الضوء على ثقب في الوسط [الجزء (b) من هذا الشكل]. عندئذ يرد الضوء على العدسة العينية. يُسمى هذا الترتيب للعدسة الجسيمية والعدسة العينية بتصميم كاسيغرين (Cassegrain design). معظم التلسكوبات الكبيرة، بما في ذلك التلسكوب الفضائي هابل، من هذا التصميم. هناك عدة ترتيبات أخرى ممكنة أيضاً. في بعض التلسكوبات، يتم وضع كاشف الضوء في النقطة التي يتركز فيها الضوء بواسطة المرآة المنحنية.



**الشكل 44.2** التلسكوبات الانعكاسية: (a) في التصميم النيوتوني، تقع العدسة العينية على جانب التلسكوب؛ (b) في تصميم Cassegrain، تقع العدسة العينية خلف الفتحة الموجودة في المرآة الأساسية.

معظم التلسكوبات البحثية الفلكية في الوقت الراهن هي من النوع الانعكاسي. واحد من أقدم التلسكوبات الكبيرة من هذا النوع هو تليسكوب هيل بطول 200 inch (5 m) وقد بني على جبل بالومار في جنوب كاليفورنيا، والذي يحتوي على مرآة قطرها 200 بوصة. أحد أكبر التلسكوبات في العالم هو تلسكوب كيك بطول 10 m في مرصد كيك في قمة بركان ماونا كيا النائم في هاواي. يشغل مرصد كيك تلسكوبات طولها 10 m، كل منها ليس مرآة واحدة، بل يتكون من 36 مرآة سداسية. بالإضافة إلى ذلك، فإنه يمكن أن يعمل التلسكوبان الموجودان في كيك معاً، مما يزيد من قدرتهما لتصبح مرآة فعالة بطول 85 m. يعد تلسكوب هابل (**الشكل 45.2**) منظاراً عاكساً كبيراً آخر ذا مرآة أولية قطرها 2.4 m. تم وضع تلسكوب هابل في مدار حول الأرض في عام 1990.



**الشكل 45.2** التلسكوب الفضائي هابل كما يُرى من المكوك الفضائي ديسكفري.

ويُعطى التكبير الزاوي  $M$  للتلسكوب الانعكاسي **بالمعادلة 36.2**. في المرآة الكروية، يبلغ البعد المحرق نصف قيمة نصف قطر الانحناء، لذا فإن عمل مرآة جسيمية بحجم كبير لا يساعد التلسكوب في جمع المزيد من الضوء فحسب، بل يزيد أيضاً من تكبير الخيال.

## مراجعة الفصل الثاني

### الكلمات المفتاحية

**الزيوغ:** تشوه في الخيال ناتج عن الزيوغ من تقريب الزاوية الصغيرة.

**التكيف:** استخدام العضلات الهدبية لضبط شكل عدسة العين للتركيز على الأشياء القريبة أو البعيدة.

**التكبير الزاوي:** نسبة زاوية الميل التي يصنعها الجسم المرصود باستخدام عدسة مكبرة مقارنةً بالزاوية المرصودة بالعين المجردة.

**العمق الظاهري:** العمق الذي يبدو أن الجسم يقع عنده بالنسبة للسطح الفاصل بين وسطين.

**تصميم Cassegrain:** ترتيب للعدستين الجسيمية والعينية بحيث تكون المرآة المقعرة التي تجمع الضوء لها ثقب في المنتصف، فيرد الضوء عندها على العدسة العينية.

**جهاز اقتران الشححات (CCD):** رقاقة من أنصاف النواقل تقوم بتحويل الصورة الخفيفة إلى بكسلات صغيرة يمكن تحويلها إلى إشارات إلكترونية للون والشدة.

**الغيبوبة (الزيوغ اللوني):** يشبه الزيوغ الكروي، ولكنه ينشأ عندما لا تكون الأشعة الواردة موازية للمحور البصري.

**المجهر المركب:** مجهر مصنوع من عدستين محدبتين، أولهما تعمل بمنزلة العدسة العينية والثانية بمنزلة العدسة الجسيمية.

**المرآة المقعرة:** مرآة كروية، يقع سطحها العاكس على الجانب الداخلي من الكرة؛ تشكل المرآة ما يشبه "الكهف".

**العدسة المقربة (أو المحدبة):** عدسة تتقارب فيها أشعة الضوء الداخلة المتوازية فيما بينها إلى نقطة واحدة على الجانب الآخر.

**المرآة المحدبة:** مرآة كروية، يقع سطحها العاكس على الجانب الخارجي من الكرة.

**المرآة المنحنية:** مرآة تتكون من سطح منحني، كروي أو بيضوي أو على شكل قطع مكافئ مثلاً.

**عدسة مبعدة (أو مقعرة):** العدسة التي تتسبب في انحراف أشعة الضوء عن محورها البصري.

**العدسة العينية:** عدسة أو مجموعة من العدسات في الأداة البصرية وهي الأقرب إلى عين المراقب.

**النقطة البعيدة:** أبعد نقطة يمكن أن تراها العين بتركيز.

**مد النظر (أو مد البصر):** عيب بصري تظهر فيه الأشياء القريبة غير واضحة لأن صورها تتركز خلف شبكية العين بدلاً من أن تكون على شبكية العين؛ يمكن لشخص مصاب بمد النظر رؤية الأشياء البعيدة بوضوح ولكن الأجسام القريبة تظهر غير واضحة.

**التركيز الأول أو تركيز الجسم:** الجسم الموجود في هذه النقطة ينتج عنه خيالٌ يقع في اللانهاية على الجانب الآخر من السطح الكروي الفاصل بين وسطين.

**البعد المحرق:** المسافة على طول المحور البصري بين المحرق العنصر البصري الذي يركز أشعة الضوء.

**المستوى المحرق:** المستوى الذي يحتوي على المحرق ويكون عمودياً على المحور البصري.

**المحرق:** بالنسبة للعدسة أو المرآة المقربة، هي النقطة التي تقاطع عندها أشعة الضوء المقربة؛ أما بالنسبة للعدسة أو المرآة المبعدة، فهي النقطة التي تبدو أن أشعة الضوء المتباعدة تنشأ منها.

**بعد الخيال:** بعد الخيال عن المحور المركزي للعنصر البصري الذي ينتج الخيال.

**التكبير الخطي:** نسبة ارتفاع الخيال إلى ارتفاع الجسم.

**التكبير:** نسبة حجم الخيال إلى حجم الجسم.

**النقطة القريبة:** أقرب نقطة يمكن أن تراها العين بتركيز.



**قصر النظر (أو حسر البصر):** عيب بصري تظهر فيه الأجسام البعيدة غير واضحة لأن أحياتها مركزة أمام شبكية العين بدلاً من أن تكون على شبكية العين؛ ويمكن للشخص المصاب بقصر النظر أن يرى الأشياء القريبة بوضوح ولكن الأجسام البعيدة تكون غير واضحة.

**التكبير الصافي (Mnet):** في المجهر المركب هو جداء التكبير الخطي للعدسة الجسيمية بالتكبير الزاوي للعدسة العينية. التصميم النيوتوني: هو ترتيب للعدستين الجسيمية والعينية بحيث ينعكس الضوء المركز من المرآة المقعرة على جانب واحد من الأنبوب إلى داخل العدسة العينية.

**بعد الجسم:** هو بعد الجسم عن المحور المركزي للعنصر البصري الذي ينتج خياله.

**العدسة الجسيمية:** هي العدسة الأقرب إلى الجسم الذي يجري فحصه.

**المحور البصري:** هو المحور الذي تتناظر حوله المرآة؛ ويمكننا تدوير المرآة حول هذا المحور دون أن يتغير أي شيء.

**الطاقة البصرية (P):** هو مقلوب البعد المحرق للعدسة، حيث يتم التعبير عن البعد المحرق بالأمتار. ويتم التعبير عن الطاقة البصرية P للعدسة بوحدة الديوبتر (D)؛ وهي:  $1D = 1/m = 1 \text{ m}^{-1}$ .

**المرآة المستوية:** سطح (مسطح) عاكس مستوي.

**تتبع الأشعة:** هي تقنية تستخدم الإنشاءات الهندسية لإيجاد وتوصيف الخيال الذي يشكله نظام بصري.

**الخيال الحقيقي:** هو الخيال الذي يمكن عرضه على الشاشة لأن الأشعة تنبعث فعلياً من خلال الخيال.

**المحرق الثاني أو محرق الخيال:** بالنسبة للسطح الفاصل المقرب، هي النقطة التي تنكسر فيها حزمة من الأشعة المتوازية عند السطح الفاصل الكروي؛ أما بالنسبة للسطح الفاصل المبعد، فهي النقطة التي تتركز عندها الأشعة الممتدة للخلف للأشعة المتجمعة بين وسطين.

**المكبر البسيط (أو العدسة المكبرة):** عدسة مقربة تنتج خيالاً وهمياً للجسم الذي يقع ضمن البعد المحرق للعدسة.

**تقريب الزاوية الصغيرة:** هو تقريب صالح عندما يكون حجم المرآة الكروية أصغر بكثير من نصف قطر المرآة؛ في هذا التقريب، يكون الزيوغ الكروي ضئيلاً، ويكون محرق المرآة محددًا بشكل جيد.

**الزيوغ الكروي:** هو تشوه في الخيال الذي تشكله المرآة الكروية عندما لا يتم تركيز جميع الأشعة في النقطة نفسها.

**تقريب العدسة الرقيقة:** افتراض أن العدسة رقيقة جداً مقارنة ببعد الخيال الأول.

**قمة المرآة:** هي نقطة تقاطع سطح المرآة مع المحور البصري.

**الخيال الوهمي:** هو الخيال الذي لا يمكن عرضه على الشاشة لأن الأشعة لا تنبعث فعلياً من الخيال، بل تظهر فقط منه.

### العلاقات الأساسية

$d_o = -d_i$	بعد الخيال في المرآة المستوية
$f = \frac{R}{2}$	البعد المحرقى لمرآة كروية
$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f}$	معادلة المرآة
$m = \frac{h_i}{h_o} = -\frac{d_i}{d_o}$	تكبير المرآة الكروية
اصطلاح الإشارة للمرايا	
+ للمرآة المقعرة - للمرآة المحدبة	البعد المحرقى $f$
+ للجسم حقيقي - للجسم الوهمي	بعد الجسم $d_o$
+ للخيال الحقيقي - للخيال الوهمي	بعد الخيال $d_i$
+ للخيال الصحيح - للخيال المقلوب	التكبير $m$
$h_i = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)h_o$	معادلة العمق الظاهري
$\frac{n_1}{d_o} + \frac{n_2}{d_i} = \frac{n_2 - n_1}{R}$	معادلة السطح الكروي
$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f}$	معادلة العدسة الرقيقة
$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1\right)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$	معادلة صانع العدسة
$m \equiv \frac{h_i}{h_o} = -\frac{d_i}{d_o}$	تكبير الجسم $m$
$P = \frac{1}{f}$	الطاقة البصرية
$P_{\text{total}} = P_{\text{lens1}} + P_{\text{lens2}} + P_{\text{lens3}} + \dots$	القوة البصرية للعدسات الرفيعة والمقربة فيما بينها
$M = \frac{\theta_{\text{image}}}{\theta_{\text{object}}}$	التكبير الزاوي للمكبر البسيط $M$
$M = \left(\frac{25 \text{ cm}}{L}\right)\left(1 + \frac{L - \ell}{f}\right)$	التكبير الزاوي لجسم ما على بعد $L$ من العين لعدسة محدبة بعدها المحرقى $f$ وتوجد على بعد $\ell$ من العين
$\frac{25 \text{ cm}}{f} \leq M \leq 1 + \frac{25 \text{ cm}}{f}$	مجال التكبير الزاوي لعدسة معينة لشخص تقع نقطته القريبة على بعد 25cm
$M_{\text{net}} = m^{\text{obj}} M^{\text{eye}} = \frac{d_i^{\text{obj}} (f^{\text{eye}} + 25 \text{ cm})}{f^{\text{obj}} f^{\text{eye}}}$	التكبير الصافي للمجهر المركب

## ملخص الفصل:

### 1.2 الأحيلة المُشكَّلة بالمرآيا المستوية

- تشكل المرآة المستوية دائماً خيالاً وهمياً (يقع خلف المرآة).
- الخيال والجسم لهما نفس البعد عن المرآة المستوية، وحجم الخيال هو نفس حجم الجسم، والخيال صحيح.

### 2.2 المرآيا الكروية

- المرآيا الكروية قد تكون مقعرة (مقربة) أو محدبة (مبعدة).
- البعد المحرق للمرآة الكروية يساوي نصف قيمة نصف قطر الانحناء:  $f = R/2$ .
- معادلة المرآة وتبع الأشع تتيحان لنا إعطاء وصف كامل للخيال المتشكل بواسطة مرآة كروية.
- الزيوغ الكروي يحدث للمرآيا الكروية ولكنه لا يحدث للمرآيا المكافئة. الزيوغ اللوني يحدث لكلا النوعين من المرآيا.

### 3.2 الأحيلة المُشكَّلة بالانكسار

- يشرح هذا القسم كيف يشكل السطح الفاصل للأحيلة.
- عندما يتم رصد جسم عبر سطح فاصل مستوي بين وسطين، فإنه يظهر على بعد ظاهري  $h_i$  يختلف عن البعد الفعلي  $h_o$ :  
$$h_i = (n_2 / n_1) h_o$$
- يتم تشكيل خيال من خلال انكسار الضوء سطح كروي يفصل بين وسطين لهما قرائن الانكسار  $n_1$  و  $n_2$ .
- يعتمد بعد الخيال على نصف قطر انحناء السطح الفاصل وموقع الجسم وقرائن انكسار الأوساط.

### 4.2 العدسات الرقيقة

- هناك نوعان ممكنان من العدسات: المقاربة والمباعدة. العدسة، التي تتسبب في انحراف أشعة الضوء نحو محورها البصري، هي عدسة مقربة، وإذا تسببت بانحراف الأشعة الضوئية بعيداً عن محورها البصري تكون مبعدة.
- بالنسبة للعدسة المقربة، يقع محرقها في نقطة تقاطع الأشعة الضوئية. أما بالنسبة للعدسة المبعدة، فإن المحرق هو النقطة التي يبدو وكأن أشعة الضوء المتباعدة قد نشأت منها.
- بعد مركز العدسة الرقيقة عن محرقها يُسمى البعد المحرق  $f$ .
- تتبع الأشعة هو أسلوب هندسي يستخدم لتحديد المسارات التي تتخذها الأشعة الضوئية المارة عبر العدسات الرقيقة.
- الخيال الحقيقي يمكن عرضه على الشاشة.
- الخيال الوهمي لا يمكن عرضه على الشاشة.
- تشكل العدسة المقربة أحيلة حقيقية أو وهمية، تبعاً لموقع الجسم؛ بينما العدسة المبعدة تشكل أحيلة وهمية فقط.

### 5.2 العين

- يتم وصف الخيال المشكَّل بالعين بشكل كاف باستخدام معادلة العدسة الرقيقة.
- تنتج العين خيالاً حقيقياً على شبكية العين عن طريق ضبط البعد المحرق في عملية تُسمى التكيف.
- قصر النظر أو حسر البصر، هو عدم القدرة على رؤية الأشياء البعيدة ويتم تصحيحه باستخدام عدسة مبعدة للحد من الطاقة البصرية للعين.
- مد النظر، أو مد البصر، هو عدم القدرة على رؤية الأشياء القريبة ويتم تصحيحه بعدسة مقربة لزيادة القوة البصرية للعين.

- في قصر النظر ومد النظر، تنتج العدسات التصحيحية أحيلاً على مسافات تقع بين النقاط القريبة والبعيدة للشخص حتى يتمكن من رؤية الصور بوضوح.

## 6.2 الكاميرا

- تستخدم الكاميرات مجموعة من العدسات لتشكيل خيال يمكن تسجيله.
- يعتمد التصوير الرقمي على أجهزة اقتران الشحنات (CCDs) التي تقسم الخيال إلى "وحدات بكسل" صغيرة يمكن تحويلها إلى إشارات إلكترونية.

## 7.2 المكبر البسيط

- المكبر البسيط هو عدسة مقربة وتنتج خيلاً وهمياً مكبراً للجسم الموجود ضمن البعد المحرق للعدسة.
- يحسب التكبير الزاوي لتكبير خيال تم تشكيله بواسطة المكبر. ويساوي نسبة الزاوية التي يصنعها الخيال إلى تلك التي يصنعها الجسم عند مشاهدة الجسم بالعين المجردة.
- التكبير الزاوي أكبر للعدسات المكبرة ذات الأبعاد المحقية الأصغر.
- يمكن أن تنتج العدسات المكبرة البسيطة تكبيراً يصل إلى عشرة أضعاف (10×).

## 8.2 المجاهر والتلسكوبات

- يحتوي العديد من الأجهزة البصرية على أكثر من عدسة أو مرآة واحدة. يتم تحليلها بالنظر إلى كل عنصر بالترتيب. الخيال الذي تشكله الأولى يكون جسماً للثانية، وهكذا. تنطبق نفس تقنيات تتبع الأشعة والعدسة الرقيقة التي تم قديمها في الأقسام السابقة على كل عنصر من عناصر العدسة.
- إن التكبير الكلي لنظام متعدد العناصر هو جداء التكبير الخطي لعناصره الفردية بالتكبير الزاوي للعدسة العينية. بالنسبة لنظام مكون من عنصرين له عدسة جسيمية وعدسة عينية، يكون:  $M = m_{obj} m_{eye}$  حيث:  $m_{obj}$  هو التكبير الخطي للعدسة الجسيمية و  $m_{eye}$  هو التكبير الزاوي للعدسة العينية.
- المجهر هو عبارة عن نظام متعدد العناصر يحتوي على أكثر من عدسة أو مرآة واحدة. ويتيح لنا رؤية التفاصيل التي لا تتمكن من رؤيتها بالعين المجردة. كل من العدسة العينية والعدسة الجسيمية تسهمان في التكبير.
- تكبير المجهر المركب للخيال الواقع في اللانهاية هو:

$$M_{net} = \frac{(16 \text{ cm})(25 \text{ cm})}{f_{obj} f_{eye}}$$

- في هذه المعادلة، البعد الموحد بين محرق العدسة الجسيمية من جانب الخيال ومحرق العدسة العينية من جانب الجسم هو 16cm، والبعد الطبيعي للنقطة القريبة هو 25cm، و  $f_{obj}$  و  $f_{eye}$  هي الأبعاد المحقية للعدسات الجسيمية والعينية، على التوالي.
- يمكن صنع التلسكوبات البسيطة من عدستين. يتم استخدامها لعرض الجسومات على مسافات كبيرة.
- يعطى التكبير الزاوي للتلسكوب M بالعلاقة:

$$M = -\frac{f_{obj}}{f_{eye}}$$

حيث:  $f_{obj}$  و  $f_{eye}$  هما الأطوال البؤرية للعدسة الجسيمية والعدسة على التوالي.

## أسئلة نظرية

### 1.2 الأحيلة المُشكَّلة بالمرآيا المستوية

1. ما الفروق بين الأحيلة الحقيقية والظاهرية؟ كيف يمكنك (من خلال النظر) تحديد فيما إذا كان الخيال المشكَّل بواسطة عدسة أو مرآة واحدة حقيقياً أم وهمياً؟
2. هل يمكن رؤية الخيال الوهمي؟ اشرح إجابتك
3. هل يمكن تصوير الخيال الوهمي؟
4. هل يمكن عرض الخيال الوهمي على الشاشة؟
5. هل من الضروري عرض الخيال الحقيقي على الشاشة لرؤيته؟
6. ابتكر ترتيباً للمرايا يتيح لك رؤية الجزء الخلفي من رأسك. ما هو الحد الأدنى لعدد المرايا اللازمة لهذه المهمة؟
7. إذا كنت ترغب برؤية جسمك بالكامل في مرآة مسطحة (من الرأس إلى أخمص القدمين)، ما هو طول اللازم للمرأة؟ هل يعتمد حجمه المرآة على بعدك عنها؟ قدم رسم توضيحياً لذلك.

### 2.2 المرايا الكروية

8. ما هو البعد الذي يقع عنده الخيال دائماً: عند  $d_0$  أم  $d_1$  أم  $f$ ؟
9. تحت أي ظرف من الظروف سيكون الخيال في محرق العدسة أو المرآة الكروية؟
10. ماذا يعني التكبير السالب؟ ما معنى التكبير الذي تكون قيمته المطلقة أقل من واحد؟
11. هل يمكن أن يكون الخيال أكبر من الجسم على الرغم من أن تكبيره سالب؟ اشرح الإجابة.

### 3.2 الأحيلة المُشكَّلة بالانكسار

12. استنبط معادلة حساب العمق الظاهري للأسمالك في حوض للأسماك باستخدام قانون سنيل.
13. استخدم المسطرة والمنقلة لإيجاد الخيال المشكَّل بالانكسار في الحالات التالية. بفرض أن السطح الفاصل بين الهواء والزجاج. و باعتبار أن قرينة الانكسار 1 للهواء و 1.5 للزجاج. (تلميح: استخدم قانون سنيل عند السطح الفاصل).
- (a) جسم نقطي يقع على محور سطح فاصل مقعر على نقطة ضمن البعد المحرقي من الرأس.
- (b) جسم نقطي يقع على محور سطح فاصل مقعر على نقطة أبعد من البعد المحرقي عن الرأس.
- (c) جسم نقطي يقع على محور سطح فاصل محدب على نقطة ضمن البعد المحرقي من الرأس.
- (d) جسم نقطي يقع على محور سطح فاصل محدب على نقطة أبعد من البعد المحرقي عن الرأس.
- (e) كرر (a) - (d) لجسم نقطي خارج المحور.

### 4.2 العدسات الرقيقة

14. هل يمكنك إثبات أن قطعة من الزجاج المسطح، كتلك المستخدمة في النافذة، يمكن اعتبارها عدسة ذات بعد محرقي لانهائي. وإذا كان الأمر كذلك، فأين يتشكل الخيال؟ أي ما هي العلاقة بين  $d_0$  و  $d_i$  ذات الصلة؟
15. عند تقوم بضبط تركيز الكاميرا، فإنك تقوم بضبط بعد العدسة عن الفيلم. فإذا كانت عدسة الكاميرا تشبه العدسة الرقيقة، فلماذا لا يكون بعد الفيلم للأجسام القريبة والبعيدة ثابتاً؟
16. هناك محرقان للعدسة الرقيقة، يقع كل منهما على جانبي العدسة وعلى مسافات متساوية من مركزها، ويجب أن يؤثر كل منهما بنفس الطريقة على الضوء الداخل من أي من الجانبين. انظر من خلال نظارات من الأمام ومن الخلف و اشرح ما تلاحظه إذا كانت العدسات المستخدمة في هذه النظارات هي عدسات رقيقة.

17. هل سيتغير البعد المحرقى للعدسة عند غمرها في الماء؟ فسّر الإجابة.

## 5.2 العين

18. إذا تم استئصال عدسة العين لشخص ما بسبب إعتامها (كما كان يحدث في العصور القديمة)، لماذا نتوقع أن يوصف له الطبيب نظارات بعدسات تبلغ طاقتها البصرية نحو 16D؟

19. عندما يتم تسليط ضوء ليزر على عين، ذات رؤية طبيعية وفي حالة استرخاء، لإصلاح الغدة الدمعية عن طريق اللحم البقعي لشبكية العين في الجزء الخلفي من العين، فإنه يجب أن تكون الأشعة الداخلة للعين متوازية. لماذا؟

20. لماذا تكون رؤيتك ضبابية عندما تفتح عينيك أثناء السباحة تحت الماء؟ كيف يتمكن قناع الوجه من تأمين الرؤية الواضحة؟

21. أصبح من الشائع استبدال العدسة المعتمدة في العين بعدسة داخلية. يمكن اختيار هذه العدسة الداخلية بحيث يكون لدى الشخص رؤية بعيدة مثالية.

هل سيكون الشخص قادراً على القراءة دون نظارات؟ إذا كان الشخص يعاني من قصر النظر، هل قوة العدسة الداخلية أكبر أم أصغر من قوة العدسة التي تم استئصالها؟

22. إذا كان يجب إعادة تشكيل القرنية (يمكن إجراء ذلك جراحياً أو باستخدام العدسات اللاصقة) لتصحيح قصر النظر، فهل يجب أن يكون نصف قطر انحنائها أكبر أم أصغر؟ اشرح الإجابة.

## 8.2 المجاهر والتلسكوبات

23. البصريات الهندسية تصف تفاعل الضوء مع الأشياء العيانية. لماذا، إذاً، يصلح استخدام البصريات الهندسية لتحليل خيال المجهر؟

24. الخيال الذي ينتجه المجهر في الشكل 38.2 لا يمكن عرضه على الشاشة. هل يمكن تحقيق ذلك باستخدام عدسات أو مرآة إضافية؟ اشرح الإجابة.

25. إذا كنا نريد من المجهر أو التلسكوب إظهار خيال حقيقي على الشاشة، فكيف يمكننا تغيير موضع العدسة العينية بالنسبة للعدسة الجسيمية؟

## مسائل:

### 1.2 الأخيلة المُشكَّلة بالمرآة المستوية

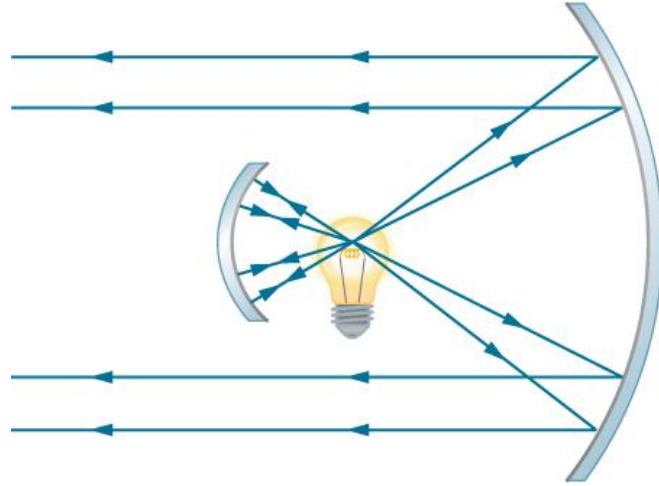
26. بفرض وجود اثنتين من المرآة المسطحة التي تم وضعها بحيث تشكل فيما بينها زاوية 120 درجة. يتم وضع جسم على منتصف الزاوية بين المرآة. ارسم مخطط الأشعة كما هو مبين في الشكل 4.2 لإظهار عدد الأخيلة التي يتم تشكيلها.

27. بفرض وجود اثنتين من المرآة المسطحة التي تم وضعها بحيث تشكل فيما بينها زاوية 60 درجة. يتم وضع جسم على منتصف الزاوية بين المرآة. ارسم مخطط الأشعة كما هو مبين في الشكل 4.2 لإظهار عدد الأخيلة التي يتم تشكيلها.

28. باستخدام أكثر من مرآة مسطحة، قم بإنشاء مخطط الأشعة لتوضيح كيفية تشكيل الخيال المقلوب.

### 2.2 المرآة الكروية

29. يوضح الشكل التالي مصباحاً كهربائياً موضوعاً بين مرآتين كرويتين. تنتج إحدى المرآتين حزمة من الأشعة الضوئية المتوازية. بينما تمنع الأخرى خروج الضوء دون وضعه في الحزمة. أين تقع فتيلة المصباح بالنسبة لمحرق أو نصف قطر انحناء كل من المرآتين؟



30. لماذا غالباً ما تستخدم المرايا المبعدة لمرايا الرؤية الخلفية في المركبات؟ ما هو العيب الرئيسي لاستخدام مثل هذه المرآة مقارنة بالمرايا المسطحة؟

31. تستخدم بعض الكاميرات المقربة المرآة بدلاً من العدسة. ما هو نصف قطر انحناء المرآة اللازمة لاستبدال عدسة كاميرا مقربة بعدها المحرقي يبلغ 800 mm؟

32. احسب البعد المحرقي للمرآة المشكّلة من الظهر اللمعة يبلغ نصف قطر انحنائها 3.00 cm.

33. تستخدم سخانات الغرفة الكهربائية مرآة مقعرة لتعكس الأشعة تحت الحمراء (IR) المنبعثة من وشائع التسخين. لاحظ أن الأشعة تحت الحمراء تتبع نفس قانون الانعكاس الذي يتبعه الضوء المرئي. فإذا علمت أن نصف قطر انحناء المرآة يبلغ 50.0 cm وأنها تنتج خيالاً للوشائع يبعد بمقدار 3.00 m عن المرآة، حدد موقع الوشائع؟

34. أوجد تكبير وشائع التسخين في المسألة السابقة. لاحظ أن حجمها الكبير يساعد على نشر الطاقة المنعكسة.

35. ما هو البعد المحرقي لمرآة تجميل تعطي تكبيراً بمقدار 1.50 عندما يكون بعد وجه الشخص 12.0 cm؟ بين بشكل صريح كيف تتبع الخطوات الواردة في **خطة حل المسائل: المرايا الكروية**.

36. إذا كان أحد المتسوقين يقف على بعد 3.00 m من مرآة أمينية محدبة ويرى خياله مكبراً بمقدار 0.250. (a) أين يقع خياله؟ (b) ما هو البعد المحرقي للمرآة؟ (c) ما هو نصف قطر الانحناء؟

37. جسم يبلغ ارتفاعه 1.5 cm ويتم وضعه على بعد 3.00 cm عن قرنية شخص ما، ويبلغ ارتفاع خياله المنعكس 0.167 cm. (a) احسب التكبير الناتج؟ (b) حدد موقع الخيال؟ (c) أوجد نصف قطر انحناء المرآة المحدبة التي شكلتها القرنية. (لاحظ أنه يتم استخدام هذه التقنية من قبل فاحصي النظر لقياس انحناء القرنية لتركيب العدسات اللاصقة. ويطلق على الأداة المستخدمة مقياس تقوس القرنية، أو مقياس الانحناء).

38. باستخدام مخطط تتبع الأشعة لمرآة مسطحة تبين أن الخيال يقع خلف المرآة وعلى بعد مساو لبعد الجسم عن المرآة. ويتمثل ذلك بالعلاقة:  $d_i = -d_o$ ، نظراً لأن هذا البعد سالب (وهو خيال وهمي). حدد البعد المحرقي للمرآة المسطحة؟

39. بين أنه بالنسبة للمرآة المسطحة، يكون:  $h_i = h_o$ ، إذا علمت أن الخيال يقع خلف المرآة وله نفس بعد الجسم عن المرآة.

40. باستخدام قانون الانعكاس أثبت أن البعد المحرقي للمرآة يساوي نصف قيمة نصف قطر الانحناء. بمعنى برهن العلاقة:

$f = R/2$ . لاحظ أن هذه العلاقة تكون صحيحة للمرآة الكروية فقط إذا كان قطرها صغيراً مقارنة بنصف قطر الانحناء.

41. بالنظر مرة أخرى إلى سخان الغرفة الكهربائية الذي تم بحثه في المسألة 5، احسب كثافة الأشعة تحت الحمراء مقدرة بوحدة  $W/m^2$  والساقطة من المرآة المقعرة على شخص يقف على بعد 3.00 m من السخان. باعتبار أن وشائع التسخين تشع بمقدار 1500 W وأن مساحتها  $100 \text{ cm}^2$ ، وأن نصف الطاقة المشعة تنعكس وتتركز بواسطة المرآة.
42. يتم وضع مرآتين بحيث تتشكل بينهما زاوية  $60^\circ$ ، ويوضع جسم في نقطة تبعد بشكل متساو عن المرآتين. استخدم المنقلة لرسم الأشعة بدقة وحدد موقع كل الأحيولة. قد تضطر لرسم عدة أشكال حتى لا تتسبب الأشعة الصادرة عن الأحيولة المختلفة بتشويه الرسم.
43. يتم وضع مرآتين بشكل متواز وبحيث تفصل بينهما مسافة قدرها 3 cm. ويتم وضع جسم نقطي بين المرآتين يكون على بعد 1 cm من أحد المرآتين. حدد إحداثيات جميع الأحيولة.

### 3.2 الأحيولة المُشكَّلة بالانكسار

44. يقع جسم في الهواء على بعد 30 cm من قمة سطح مقعر مصنوع من الزجاج بنصف قطر انحناء 10 cm. أين يتشكل الخيال بواسطة الانكسار وما هو تكبيره؟ باعتبار أن:  $n_{\text{air}} = 1$  و  $n_{\text{glass}} = 1.5$ .
45. يقع جسم في الهواء على بعد 30 cm من قمة سطح محدب مصنوع من الزجاج بنصف قطر انحناء 80 cm. أين يتشكل الخيال بواسطة الانكسار وما هو تكبيره؟
46. يوجد جسم في الماء على بعد 15 cm من قمة سطح مقعر مصنوع من الزجاج بنصف قطر انحناء 10 cm. أين يتشكل الخيال بواسطة الانكسار وما هو تكبيره؟ باعتبار أن:  $n_{\text{water}} = 4/3$  و  $n_{\text{glass}} = 1.5$ .
47. يوجد جسم في الماء على بعد 30 cm من قمة سطح محدب مصنوع من زجاج شبكي بنصف قطر انحناء يبلغ 80 cm. أين يتشكل الخيال بواسطة الانكسار وما هو تكبيره؟ باعتبار أن:  $n_{\text{water}} = 4/3$  و  $n_{\text{plexiglas}} = 1.65$ .
48. يقع جسم في الهواء على بعد 5 cm من قمة سطح مقعر مصنوع من الزجاج بنصف قطر انحناء 20 cm. أين يتشكل الخيال بواسطة الانكسار وما هو تكبيره؟ باعتبار أن:  $n_{\text{air}} = 1$  و  $n_{\text{glass}} = 1.5$ .
49. اشتق معادلة السطح الفاصل الكروي للانكسار على سطح مقعر. (تلميح: اتبع الاشتقاق في النص لسطح محدب).

### 4.2 العدسات الرقيقة

50. ما البعد اللازم للفيلم الموجود في الكاميرا عن العدسة، إذا كان البعد المحراقي للعدسة 35.0 mm ويتم استخدامها لتصوير زهرة تقع على بعد 75.0 cm؟ بين بشكل صريح كيف تتبع الخطوات الواردة في **خطة حل المسائل: العدسات**.
51. يحتوي جهاز عرض شرائح معين على عدسة بعدها المحراقي 100 mm. (a) ما بعد الشاشة إذا تم وضع شريحة على بعد 103 mm من العدسة وتنتج خيالاً حاداً؟ (b) إذا كانت أبعاد الشريحة هي 24.0 x 36.0 mm، فما هي أبعاد الخيال؟ بين بشكل صريح كيف تتبع الخطوات الواردة في **خطة حل المسائل: العدسات**.
52. يقوم طبيب بفحص خلد بعدسة مكبرة بعدها المحراقي 15.0 cm وتقع على بعد 13.5 cm من الخلد. (a) أين يقع الخيال؟ (b) ما هو التكبير؟ (c) ما هو حجم خيال الخلد إذا كان قطره 5.00 mm؟
53. يتم استخدام كاميرا، البعد المحراقي لعدستها يبلغ 50.00 mm لتصوير شخص يقف على بعد 3.00 m. (a) ما هو العد اللازم للفيلم عن العدسة؟ (b) إذا كان ارتفاع الفيلم 36.0 mm، فما هو جزء الشخص البالغ طوله 1.75 m الذي يتشكل عليه؟ (c) ناقش إلى أي حد يبدو ذلك معقولاً، استناداً إلى خبرتك في التقاط الصور أو التصوير.
54. إذا كان البعد المحراقي لعدسة كاميرا تستخدم للتقاط الصور عن قرب هو 22.0 mm. وكان أكبر بعد بين الفيلم والعدسة هو 33.0 mm. (a) احسب بعد أقرب جسم يمكن تصويره؟ (b) احسب تكبير هذا الجسم الأقرب؟



55. بفرض وجود كاميرا لبعدها المحرقي لعدستها 50.00 mm وتبعد هذه العدسة بمقدار 51.00 mm عن الفيلم الموجود في الكاميرا. (a) احسب بعد الجسم الذي يقع في نقطة المحرق؟ (b) احسب ارتفاع الجسم إذا كان ارتفاع خياله 2.00 cm؟
56. ما هو البعد المحرقي لعدسة مكبرة ينتج عنها تكبير قدره 3.00 لجسم (عملة نادرة على سبيل المثال) يبعد عنها بمقدار 5.00 cm؟
57. يتم تكبير كتاب لثلاثة أضعاف حجمه الأصلي عندما يقع على بعد 7.50 cm من عدسة مكبرة بعدها المحرقي 10.0 cm. (a) أوجد تكبير الكتاب عندما يوضع على بعد 8.50 cm من المكبر. (b) كرر عملية الحساب إذا وضع الكتاب على بعد 9.50 cm من المكبر. (c) ناقش كيف تغير التكبير عند زيادة بعد الجسم كما ورد في هاتين الحالتين.
58. بفرض أن عدسة مقرية بعدها المحرقي 200 mm تستخدم لتصوير الجبال على بعد 10.0 km. (a) أين يقع الخيال؟ (b) احسب ارتفاع خيال حرف ارتفاعه 1000 m على أحد الجبال؟
59. كاميرا، البعد المحرقي لعدستها يبلغ 100 mm، وتستخدم لتصوير الشمس. ما هو ارتفاع خيال الشمس على الفيلم، إذا علمت أن قطر الشمس هو  $1.4 \times 10^6$  km وأنها تبعد مسافة قدرها  $1.50 \times 10^8$  km؟
60. استخدم معادلة العدسة الرقيقة لإظهار أن تكبير العدسة الرقيقة يتحدد ببعدها المحرقي وبعد الجسم ويعطى بالعلاقة:  

$$.m = f/(f - d_o)$$
61. يتم وضع جسم ارتفاعه 3.0 cm على بعد 5.0 cm أمام عدسة مقرية بعدها المحرقي 20 cm ويلاحظ من الجانب الآخر. أين يقع الخيال وما هو حجمه؟
62. يتم وضع جسم ارتفاعه 3.0 cm على بعد 5.0 cm أمام عدسة مبعدة بعدها المحرقي 20 cm ويلاحظ من الجانب الآخر. أين يقع الخيال وما هو حجمه؟
63. يتم وضع جسم ارتفاعه 3.0 cm على بعد 25 cm أمام عدسة مبعدة بعدها المحرقي 20 cm. يوجد خلف العدسة المبعدة، عدسة مقرية بعدها المحرقي 20 cm. البعد بين العدستين 5.0 cm. حدد موقع وحجم الخيال النهائي.
64. يتم وضع عدستين محددتين بعدها المحرقيان 20 cm و 10 cm بحيث تفصل بينهما مسافة 30 cm، وتكون العدسة ذات البعد المحرقي الطويل من جهة اليمين. يتم وضع جسم ارتفاعه 2.0 cm في منتصف المسافة بينهما ويتم النظر من خلال كل عدسة من اليسار ومن اليمين. صف ما يمكن رؤيته، حدد المكان الذي سيظهر فيه الخيال (الأخيلة)، وحدد فيما إذا كان في وضع صحيح أم مقلوب وما هو تكبيره.

## 5.2 العين

- بعد العدسة عن شبكية العين هو 2.00 cm، ما لم تنص المسألة على خلاف ذلك.
65. احسب قوة العين عند عرض جسم على بعد 50.0 cm.
66. احسب قوة العين عند عرض جسم على بعد 3.00 m.
67. يبلغ متوسط ارتفاع الحرف المطبوع في العديد من الكتب 3.50 mm. احسب ارتفاع خيال الحرف على شبكية العين عندما يكون الكتاب على بعد 30.0 cm من العين؟
68. بفرض وجود شخص بصره حاد لدرجة أنه يرى بوضوح الأشياء التي تشكل خيلاً ارتفاعه  $4.00 \mu\text{m}$  على شبكية عينه. ما هو أقصى بعد يستطيع عنده قراءة الأحرف التي يبلغ ارتفاعها 75.0 cm على جانب طائرة؟
69. غالباً ما يتمكن الأشخاص الذين يقومون بعمل دقيق عن قرب، مثل الجواهريين، من رؤية الأشياء بوضوح على بعد أقرب بكثير من القيمة المعتادة والتي تبلغ 25 cm. (a) احسب القوة البصرية لامرأة تستطيع رؤية جسم بوضوح على بعد 8.00 cm فقط. (b)

- ما هو حجم الخيال لجسم ارتفاعه 1.00 mm، كالكتابة الموجودة داخل خاتم، والتي تقع عند هذا البعد؟ (c) ماذا سيكون حجم الخيال إذا تم تعليق الجسم عند القيمة المعتادة للبعد والتي تبلغ 25.0 cm؟
70. ما هي النقطة البعيدة لشخص تبلغ القوة البصرية لعينه في حالة الاسترخاء 50.5 D؟
71. ما هي النقطة القريبة لشخص تبلغ القوة البصرية لعينه في حالة التكيف 53.5 D؟
72. (a) يتم باستخدام الليزر لإعادة تشكيل القرنية لمريض يعاني من قصر النظر من خلال التقليل من القوة البصرية لعينه بمقدار 9.00 D، بخطأ نسبي في التصحيح النهائي يبلغ  $\pm 5.0\%$ . ما هي قدرة عدسات النظارات مقدره بالديوبتر التي قد يحتاجها هذا الشخص بعد هذه العملية؟ (b) هل كان الشخص كان الشخص يعاني من قصر النظر أم مد النظر قبل العملية؟ كيف علمت بذلك؟
73. قوة الرؤية الطبيعية عن قرب هي 54.0 D. عند إجراء عملية تصحيح الرؤية، تزداد قوة عين المريض بمقدار 3.00 D. بفرض أن هذا يعطي المريض رؤية طبيعية عن قرب، ما هي النقطة القريبة للمريض قبل العملية؟
74. بالنسبة للرؤية البعيدة العادية، تتمتع العين بقوة 50.0 D. ما هي النقطة البعيدة السابقة للمريض الذي خضع لعملية تصحيح رؤية بالليزر، والتي قللت من قوة عينه بمقدار 7.00 D، للحصول على رؤية بعيدة طبيعية؟
75. قوة العين الطبيعية في حالة الرؤية البعيدة هي 50.0 D. مريض يعاني من قصر نظر شديد نقطته البعيدة هي 5.00 cm. كم ديوبتر يجب تقليل قوة عينه عند تصحيح الرؤية بالليزر للحصول على رؤية بعيدة طبيعية؟
76. قوة عين الطالب عند قراءة السبورة تبلغ 51.0 D. كم تبعد السبورة عن عينه؟
77. تبلغ قوة عيون الطبيب 53.0 D أثناء فحصه للمريض. ما هو بعد الجسم الذي يتم فحصه عن عينه؟
78. قوة العين الطبيعية في حالة الرؤية البعيدة هي 50.0 D. امرأة شابة رؤيتها البعيدة طبيعية ولديها قدرة على التكيف (أي زيادة) قوة العين بمقدار 10.0%. ما هو بعد أقرب جسم يمكن أن تراه بوضوح؟
79. النقطة البعيدة لشخص يعني من قصر النظر هي 50.0 cm. (a) ما هي قوة عينه في حالة الاسترخاء؟ (b) إذا كان لديه القدرة العادية على التكيف 8.00%، فما هو بعد أقرب جسم يمكنه رؤيته بوضوح؟
80. رجل يعاني من قصر النظر الشديد، نقطته البعيدة. ما هي قوة العدسات اللاصقة التي ستقوم بتصحيح رؤيته البعيدة (عند وضعها على العين)؟
81. كرر المسألة السابقة إذا تم استخدام نظارات تكون على بعد 1.50 cm من العيون.
82. شخص يعاني من قصر النظر يرى أن قوة العدسات اللاصقة في وصفة الطبيب هي 4.00 D-. ما هي نقطته البعيدة؟
83. كرر المسألة السابقة إذا تم استخدام نظارات تبعد مسافة 1.75 cm عن العيون.
84. قوة العدسات اللاصقة المبينة في الوصفة الطبية لشخص يعاني من مد نظر ضعيف هي 0.750 D، والنقطة القريبة للشخص هي 29.0 cm. ما هي قوة الطبقة الدمعية بين القرنية والعدسة إذا كان التصحيح مثالياً، مع أخذ الطبقة الدمعية بالحسبان؟
- 7.2 المكبر البسيط**
85. إذا كان الخيال المشكّل على شبكية العين يميل بزاوية 30 درجة وكان الجسم يميل بزاوية 5 درجات، فما هو تكبير الخيال؟
86. ما تكبير العدسة المكبرة ذات البعد المحرقى 10 cm إذا كانت تبعد عن العين بمقدار 3.0 cm وكان الجسم على بعد 12 cm من العين؟
87. كم يجب أن يبعد جسم عن عدسة مكبرة بعدها المحرقى 2.1 cm للحصول على تكبير قدره  $\times 10$ ؟ بفرض أن العدسة المكبرة تبعد عن العين بمقدار 5.0 cm.

88. بفرض أنك تحمل عدسة مكبرة بعدها المحرقي 5.0 cm أقرب ما يمكن إلى عينيك. إذا كان لديك نقطة قريبة طبيعية، فكم سيكون التكبير؟

89. إذا كنت تنظر إلى جبل من خلال عدسة مكبرة بعدها المحرقي  $f = 10$  cm. ما هي قيمة التكبير؟

90. إذا كنت تنظر إلى جسم من خلال عدسة مكبرة بعدها المحرقي 2.5 cm ويبعد عنها بمقدار 10 cm. ما هو بعد العدسة المكبرة عن عينيك للحصول على تكبير قيمته 10X؟

91. تشكل العدسة المكبرة خيلاً ارتفاعه 10 cm على الجانب الآخر للعدسة من جسم يبعد عنها بمقدار 10 cm. ما هو تكبير هذه العدسة لشخص لديه نقطة قريبة طبيعية إذا كانت عينه تبعد بمقدار 12 cm عن الجسم؟

92. جسم يُرى بالعين المجردة يميل بزاوية 2 درجة. إذا قمت بمشاهدة الجسم من خلال عدسة مكبرة قيمة تكبيرها  $10\times$ ، فما الزاوية التي يصنعها الخيال المتشكل على شبكية العين؟

93. عدسة مكبرة تعطي تكبيراً زاوياً قدره 4.00 بالنسبة لعين طبيعية في حالة الاسترخاء. ما هي أكبر قيمة للتكبير يمكن أن تعطيتها هذه العدسة المكبرة؟

94. ما هو نطاق التكبير الممكن باستخدام عدسة مقربة بعدها المحرقي 7.0 cm؟

95. عدسة مكبرة تعطي تكبيراً زاوياً قدره 4.5 عندما يستخدمها شاب نقطته القريبة 18 cm. ما هو الحد الأقصى للتكبير الزاوي الذي يحصل عليه شخص أكبر سنّاً نقطته القريبة 45 cm؟

## 8.2 المجاهر والتلسكوبات

96. مجهر تكبيره الكلي يبلغ 800 وله عدسة جسيمية تكبر بمقدار 200. (a) ما هو التكبير الزاوي للعدسة العينية؟ (b) إذا كان هناك عدستان جسيميتان أحريان يمكن استخدامهما، قيم التكبير لهما هي 100 و 400، فما هي قيم التكبير الكلي الأخرى الممكنة؟

97. (a) ما هو التكبير الذي ينتج عن عدسة جسيمية لمجهر بعدها المحرقي 0.150 cm وتقع على بعد 0.155 cm من الجسم الذي يتم مشاهدته؟ (b) ما هي قيمة التكبير الكلي إذا تم استخدام العدسة العينية  $8\times$  (أي تلك التي تنتج تكبيراً زاوياً بمقدار 8.00)؟

98. أين يجب وضع الجسم بالنسبة لمجهر، البعد المحرقي لعدسته الجسيمية 0.50 cm لإنتاج تكبير قيمته 400-؟

99. تبعد جرثومة الأميبا بمقدار 0.305 cm عن عدسة جسيمية لمجهر بعدها المحرقي يبلغ 0.300 cm. (a) أين يقع الخيال المشكّل بواسطة العدسة الجسيمية؟ (b) ما هي قيمة تكبير هذا الخيال؟ (c) توضع عدسة عينية بعدها المحرقي 2.00 cm على بعد 20.0 cm من العدسة الجسيمية. أين يقع الخيال النهائي؟ (d) ما هي قيمة التكبير الزاوي الذي تعطيه العدسة العينية؟ (e) ما هي قيمة

التكبير الكلي؟ (انظر الشكل 39.2).

100. نتائج غير معقولة يعرض لك أصدقاؤك صورة من خلال المجهر. ويخبرونك أن المجهر له عدسة جسيمية بعدها المحرقي -0.500 cm و عدسة عينية بعدها المحرقي 5.00 cm. والتكبير الكلي الناتج هو 250,000، هل هذه القيم واقعية للمجهر؟

\* بعد العدسة عن شبكية العين هو 2.00 cm، ما لم تنص المسألة على خلاف ذلك.

101. ما هو التكبير الزاوي للتلسكوب الذي يحتوي على عدسة جسيمية بعدها المحرقي 100 cm و عدسة عينية بعدها المحرقي 2.50 cm؟

102. أوجد البعد بين العدستين الجسيمية والعينية في التلسكوب الوارد في المسألة السابقة واللازم لإنتاج خيال نهائي بعيد جداً عن المراقب، بحيث تكون الرؤية أكثر استرخاءً. لاحظ أن التلسكوب يستخدم عادة لمشاهدة الأشياء البعيدة.

103. يحتوي تلسكوب انعكاسي كبير على مرآة جسيمية يبلغ قطر الخنائها 10.0 m. ما هي قيمة التكبير الزاوي الذي ينتج عند استخدام عدسة عينية بعدها المحرقي 3.00 m؟

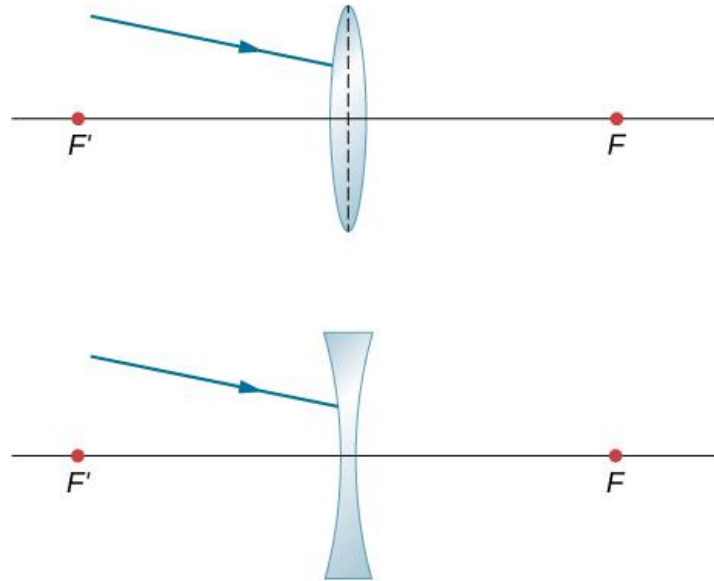
104. يحتوي تلسكوب صغير على مرآة مقعرة كعدسة جسيمية يبلغ قطر انحنائها 2.00 m. البعد المحرقي لعدسته العينية هو 4.00 cm. (a) ما هو التكبير الزاوي للتلسكوب؟ (b) ما هي الزاوية التي تصنعها بقعة شمسية قطرها 25,000 km؟ ما هي زاوية خيالها المتداخلة؟

105. منظار  $7.5\times$  ينتج تكبير زاويا قيمته -7.50 يعمل كتلسكوب (يتم استخدام المرايا لجعل الخيال في وضع صحيح) إذا كان المنظار يحتوي على عدسات جسيمية ببعد محرفي 75.0 cm، فما هو البعد المحرفي للعدسات العينية؟

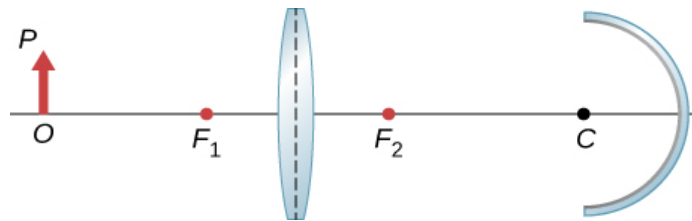
106. قم بكتابة مسألتك الخاصة: باعتبار تلسكوب من النوع المستخدم من قبل غاليليو، له عدسة جسيمية محدبة وعدسة عينية مقعرة كما هو موضح في الجزء (a) من الشكل 40.2

قم بكتابة مسألة تقوم فيها بحساب موقع وحجم الخيال الناتج. من ضمن الأشياء التي يجب مراعاتها هي الأبعاد المحرفية للعدسات ومواضعها النسبية وكذلك حجم وموقع الجسم. تحقق من أن التكبير الزاوي أكبر من واحد. بمعنى أن الزاوية التي يتم صنعها مع العين بواسطة الخيال أكبر من الزاوية التي يصنعها الجسم.

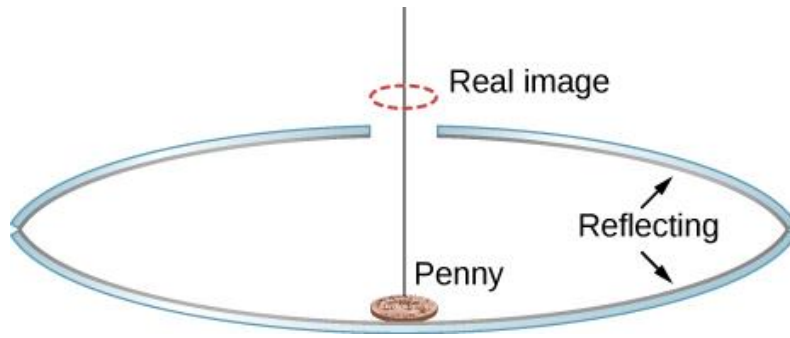
107. قم بتتبع الأشعة لمعرفة كيف ستظهر الأشعة بعد الانكسار من خلال العدسة الرقيقة في الشكل التالي. افترض تقريب العدسة الرقيقة. (تلميح: اختر نقطة  $P$  على الشعاع المحدد في كل حالة. تعامل مع هذه النقطة كجسم. ثم حدد موقع خيالها  $Q$ . استخدم القاعدة: كل الأشعة على الجانب الآخر من العدسة إما تمر عبر  $Q$  أو تبدو وكأنها صادرة من  $Q$ ).



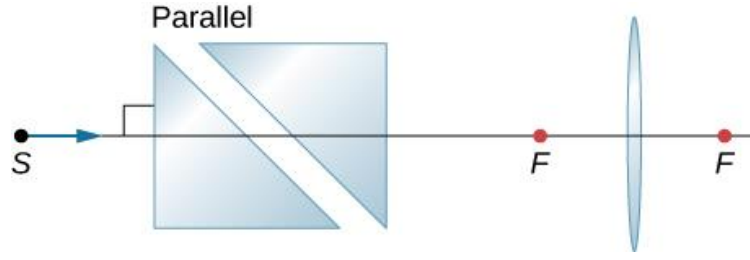
108. انسخ وارسم الأشعة لإيجاد الخيال النهائي في الرسم البياني التالي. (تلميح: أوجد الخيال المتوسط من خلال العدسة وحدها. استخدم الخيال المتوسط كجسم للمرآة واعمل مع المرآة وحدها لإيجاد الخيال النهائي).



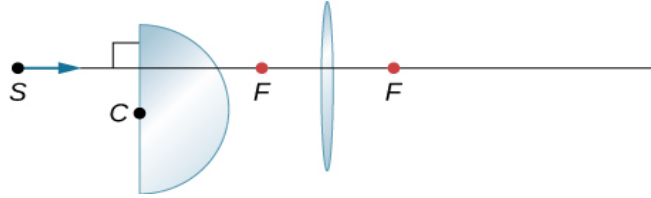
109. يتم وضع مرآة مقعرة نصف قطر انحنائها 10 cm على بعد 30 cm من عدسة محدبة رقيقة بعدها المحرقي 15 cm. حدد موقع وقيمة تكبير لمبة صغيرة توضع على بعد 50 cm من العدسة باستخدام الأسلوب الجبري.
110. يتم وضع جسم ارتفاعه 3 cm على بعد 25 cm أمام عدسة مقربة بعدها المحرقي 20 cm. يوجد خلف العدسة مرآة مقعرة بعدها المحرقي 20 cm. والبعد بين العدسة والمرآة هو 5 cm. حدد موقع الخيال النهائي واتجاهه وحجمه.
111. يتم وضع جسم ارتفاعه 3 cm على بعد 25 cm أمام عدسة مقربة بعدها المحرقي 20 cm وتسمى بالعدسة الأولى. يوجد خلف العدسة عدسة مقربة أخرى بعدها المحرقي 20 cm وتبعد عن العدسة الأولى بمقدار 10 cm. كما يوجد مرآة مقعرة بعدها المحرقي 15 cm وتبعد عن العدسة الثانية بمقدار 50 cm. حدد موقع الخيال النهائي واتجاهه وحجمه.
112. يوضع جسم ارتفاعه 2 cm على بعد 50 cm أمام عدسة مبعدة بعدها المحرقي 40 cm. كما يوجد خلف العدسة مرآة محدبة بعدها المحرقي 15 cm وضعت على بعد 30 cm من العدسة المقربة. حدد موقع الخيال النهائي واتجاهه وحجمه.
113. يتم وضع اثنتين من المرايا المقعرة بشكل متقابل. إحدى المرأتين لها ثقب صغير في الوسط. يتم وضع قطعة نقد واحدة على المرآة السفلية (انظر الشكل التالي). عندما تنظر من الجانب، فإنك تشاهد خيلاً حقيقياً للقطعة النقدية فوق الفتحة. اشرح كيف يمكن أن يحدث ذلك.



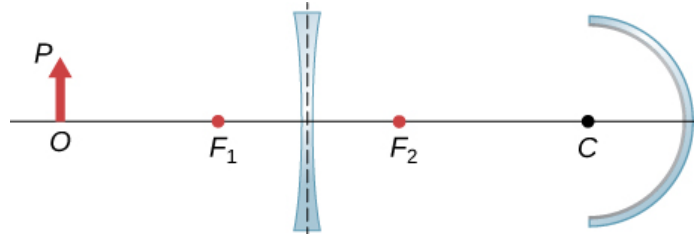
114. يوضع مصباح ارتفاعه 5 cm أمام عدسة مقربة بعدها المحرقي 20 cm. إذا كان هناك مرآة مستوية على بعد 15 cm خلف العدسة. فأين ستجد الخيال عندما تنظر في المرآة؟
115. أشعة متوازية ترد من مصدر بعيد على عدسة مقربة بعدها المحرقي 20 cm بزواوية 15 درجة مع الاتجاه الأفقي. حدد الموضع العمودي للخيال الحقيقي الذي تتم ملاحظته على شاشة موجودة في المستوى المحرقي.
116. أشعة متوازية ترد من مصدر بعيد على عدسة مبعدة بعدها المحرقي 20 cm بزواوية 10 درجات مع الاتجاه الأفقي. إذا كنت تنظر من خلال العدسة، فأين سيظهر الخيال في المستوى العمودي؟
117. يتم وضع مصباح كهربائي على بعد 10 cm من مرآة مستوية، والتي تواجه مرآة محدبة نصف قطر انحنائها 8 cm. تقع المرآة المستوية على بعد 30 cm من قمة المرآة المحدبة. حدد موقع الخياليين في المرآة المحدبة. هل هناك أخيلة أخرى؟ إذا كان الأمر كذلك، فأين تقع؟
118. مصدر ضوئي نقطي يقع على بعد 50 cm أمام عدسة مقربة بعدها المحرقي 30 cm. يتم وضع مرآة مقعرة بعدها المحرقي 20 cm وعلى بعد 25 cm خلف العدسة. أين يتشكل الخيال النهائي، وما هو اتجاهه وتكبيره؟
119. انسخ وتتبع الأشعة لمعرفة كيفية خروج شعاع أفقي وارد من S بعد العدسة. باعتبار أن:  $n = 1.55$  للزجاج الذي صنع منه المنشور.



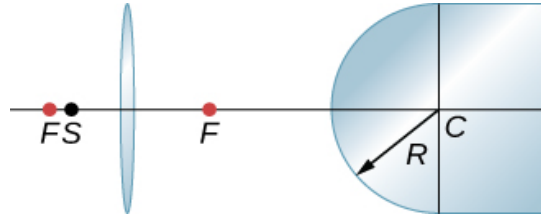
120. انسخ وتتبع كيف يخرج شعاع أفقي من  $S$  بعد العدسة. باعتبار أن:  $n = 1.55$  للزجاج.



121. انسخ وارسم الأشعة لمعرفة الخيال النهائي.



122. باستخدام طريقة تتبع الأشعة أو عن طريق الحساب، حدد المكان داخل الزجاج، حيث تتلاقى الأشعة الواردة من  $S$  وتتكسر عبر العدسة المحدبة والسطح المحدب الفاصل بين الزجاج والهواء. استخدم المسطرة لتقدير نصف قطر الانحناء.



123. عدسة مبعدة بعد محراقي يبلغ  $20 \text{ cm}$ . ما هي قوة العدسة مقدرة بالديوبتر؟

124. يتم لصق عدستين، بعداهما المحرقيان هما  $f_1$  و  $f_2$  باستخدام مادة شفافة، يمكن إهمال سماكتها. بين أن الطاقة الكلية للعدستين تجمع جمعاً بسيطاً.

125. احسب التكبير الزاوي لعدسة محدبة بعدها المحراقي يبلغ  $2.5 \text{ cm}$ ؟

126. ما هي علاقة حساب التكبير الزاوي للعدسة المحدبة ذات البعد المحراقي  $f$  إذا كانت العين قريبة جداً من العدسة وتقع النقطة القريبة على بعد  $D$  من العين؟

### مسائل إضافية

127. استخدم المسطرة والمنقلة لرسم مخطط الأشعة لإيجاد الأحيولة في الحالات التالية:

(a) جسم نقطي يقع على محور مرآة مقعرة عند نقطة ضمن البعد المحراقي من الرأس.

- (b) جسم نقطي يقع على محور مرآة مقعرة عند نقطة أبعد من البعد المحرقى من الرأس.  
 (c) جسم نقطي يقع على محور مرآة محدبة عند نقطة ضمن البعد المحرقى من الرأس.  
 (d) جسم نقطي يقع على محور مرآة محدبة عند نقطة أبعد من البعد المحرقى من الرأس.  
 (e) كرر (a) - (d) لجسم نقطي يقع خارج المحور.

128. أين يجب وضع جسم طوله 3 cm أمام مرآة مقعرة نصف قطر الخنائها 20 cm بحيث يكون خياله حقيقي وطوله 2 cm؟

129. يوضع جسم طوله 3 cm أمام مرآة محدبة نصف قطر الخنائها 20 cm. أين يتشكل الخيال؟ كم يبلغ طول الخيال؟ ما هو اتجاه الخيال؟

130. إذا كنت تبحث عن مرآة حتى تتمكن من رؤية خيال وهمي مكبر لأربعة أضعاف الجسم عندما يتم وضع الجسم على بعد 5 cm من قمة المرآة. أي نوع من المرآة التي ستحتاجها؟ كم ينبغي أن يكون نصف قطر انحناء المرآة؟

131. اشتق المعادلة التالية لمرآة محدبة:

$$\frac{1}{VO} - \frac{1}{VI} = -\frac{1}{VF},$$

حيث  $VO$  هو بعد الجسم  $O$  عن قمة الرأس  $V$ ،  $VI$  هو بعد الخيال  $I$  عن  $V$ ، و  $VF$  هو بعد المحرق  $F$  عن  $V$ .  
 (تلميح: استخدم مجموعتين من المثلثات المتشابهة).

132. (a) ارسم مخطط تتبع الأشعة لتكوين خيال لجسم عمودي يقع على المحور البصري لعدسة مقربة وأبعد من محرقها.  
 (b) استخدم الهندسة الفراغية المستوية في الشكل المرسوم وأثبت أن التكبير  $m$  يعطى بالعلاقة:

$$m = \frac{h_i}{h_o} = -\frac{d_i}{d_o}$$

133. استخدم مخططاً آخر لتتبع الأشعة للحالة نفسها المبينة في المسألة السابقة لاشتقاق معادلة العدسة الرقيقة:

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f}.$$

134. بفرض أنك تقوم بتصوير شخص يبلغ طوله 2.0 m بكاميرا، البعد المحرقى لعدستها هو 5.0 cm. يجب ألا يزيد ارتفاع الخيال في الفيلم على 2.0 cm. (a) ما هو أقرب بعد عن يمكن للشخص أن يقف فيه؟ (b) ما هو بعد العدسة عن الفيلم عند هذا البعد المحسوب؟

135. أوجد البعد المحرقى لعدسة بلانو محدبة رقيقة. السطح الأمامي لهذه العدسة مسطح، والسطح الخلفي كروي نصف قطرها انحناءه  $R_2 = -35$  cm. بفرض أن قرينة انكسار العدسة هو 1.5.

136. أوجد البعد المحرقى لعدسة هلالية إذا كان:  $R_1 = 20$  cm و  $R_2 = 15$  cm. بفرض أن قرينة انكسار العدسة هو 1.5.

137. رجل يعاني من قصر النظر ولا يستطيع رؤية الأشياء التي تبعد عن عينيه مسافة أكبر من 20 cm بوضوح. على أي بعد يجب أن يقف هذا الرجل أمام المرآة ليرى ما يفعله عندما يخلق؟

138. ترى أحد الأمهات أن وصفة العدسات اللاصقة الخاصة بطفلها هي 0.750 D. ما هي النقطة القريبة للطفل؟

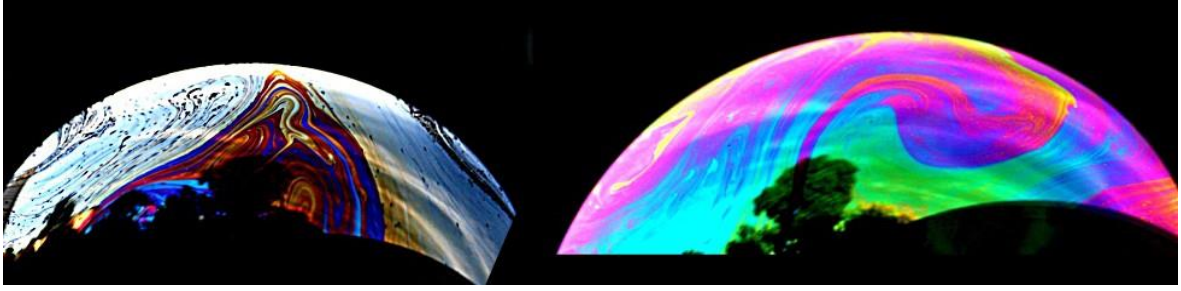
139. أعد المسألة السابقة معتبراً أن بعد النظارات عن العيون هو 2.20 cm.

140. شخص يعاني من قصر النظر ونقطته البعيدة هي 22.5 cm، وصفت له عدسات لاصقة قوتها 4.00 D. ما هي قوة الطبقة الدمعية بين القرنية والعدسة إذا كان التصحيح مثالياً، آخذين بالحسبان الطبقة الدمعية؟

141. نتائج غير معقولة. ولد نقطته القريبة هي 50 cm ونقطته البعيدة هي 500 cm. هل ستقوم عدسة قوتها 4.00 D بتصحيح النقطة البعيدة لتصبح قيمتها هي اللاهائية؟
142. أوجد التكبير الزاوي للخيال بواسطة عدسة مكبرة بعدها المحرقي  $f = 5.0$  cm إذا تم وضع الجسم على بعد  $d_o = 4.0$  cm من العدسة وكانت العدسة قريبة من العين.
143. إذا كان البعد المحرقي للعدسة الجسيمية والعدسة العينية في مجهر مركب هو 2.5 cm و 10 cm، على الترتيب وكان البعد بينهما هو 12 cm. ووضع جسم طوله  $70 \mu\text{m}$  على بعد 6.0 cm من العدسة الجسيمية. ما حجم الخيال الوهمي الذي يشكله النظام المركب من العدسة الجسيمية والعدسة العينية؟
144. ارسم الأشعة لتحديد الحجم لتحديد موقع الخيال عند شبكية العين إذا كان البعد المحرقي للعدسة 2.5 cm وكانت النقطة القريبة 24 cm. (تلميح: ضع الجسم عند النقطة القريبة).
145. إذا كان البعد المحرقي للعدستين الجسيمية والعينية هو 3 cm و 10 cm على الترتيب. احسب البعد اللازم بين العدستين إذا كان المطلوب هو الحصول على تكبير  $\times 10$  من النظام المركب من العدستين.
146. شخص يعاني من مد النظر نقطته القريبة 100 cm. عند أي بعد أمام شبكية العين أو خلفها يقع خيال جسم وضع على بعد 25 cm من إطار العين؟ باعتبار أن بعد القرنية ع شبكية العين 2.5 cm.
147. شخص يعاني من قصر النظر نقطته البعيدة 80 cm. (a) ما هو نوع العدسة التصحيحية التي سيحتاجها هذا الشخص إذا كانت العدسة ستوضع على بعد 1.5 cm من العين؟ (b) ما هي قوة العدسات اللاصقة اللازمة؟ بفرض أن بُعد العدسات اللاصقة عن العين مساوياً للصفير.
148. في تلسكوب انعكاسي، العدسة الجسيمية هي مرآة مقعرة نصف قطر أحنائها 2 m، والعدسة العينية عبارة عن عدسة محدبة بعد محرقي 5 cm. أوجد الحجم الظاهري لشجرة طولها 25 m تقع على بعد 10 km كما سيُرى عند النظر إليها بواسطة التلسكوب.
149. يشاهد تلسكوب نجمتين تفصل بينهما مسافة  $10^9$  km وتبين أنه تفصل بينهما زاوية  $10^{-5}$  rad. فإذا كان البعد المحرقي للعدسة العينية للتلسكوب يبلغ 1.5 cm والبعد المحرقي للعدسة الجسيمية 3 m، فما هو مدى بُعد النجوم عن المراقب؟
150. ما هو الحجم الزاوي للقمر إذا كان يُرى بواسطة منظار فيه البعد المحرقي للعدسة العينية 1.2 cm والبعد المحرقي للعدسة الجسيمية 8 cm؟ باعتبار أن نصف قطر القمر  $1.74 \times 10^6$  m وبعد القمر عن المراقب  $3.8 \times 10^8$  m.
151. يتم رصد كوكب مجهول على بعد  $10^{12}$  متراً عن الأرض بواسطة تلسكوب فيه البعد المحرقي للعدسة العينية 1 cm والبعد المحرقي للعدسة الجسيمية 1 m. فإذا كان هذا الكوكب البعيد يصنع زاوية قياسها  $10^{-5}$  راديان مع العدسة العينية، فما هو حجم الكوكب؟



## INTERFERENCE | الفصل الثالث | التداخل



**الشكل 1.3:** فقاعات صابون منقوشة من سائل نقي على شكل فيلم رقيق. الألوان التي نراها لا تعود إلى أي تصبُّع، بل هي نتيجة لتداخل ضوئي، مما يعزز أطوالاً موجية محددة لثخانة معينة للفيلم.

### مخطط الفصل

**1.3** التداخل مزدوج الشق (تداخل شقي يونغ (Young))

**2.3** رياضيات التداخل

**3.3** التداخل متعدد الشقوق

**4.3** التداخل في الأفلام الرقيقة

**5.3** مقياس ميكلسون للتداخل (Michelson)

### مقدمة:

أكثر المؤشرات دلالة على وجود الموجة هو التداخل. وتُعدُّ هذه الخاصية للموجة الأبرز عندما تتفاعل الموجة مع جسم غير كبير الأبعاد مقارنةً مع طول الموجة. ويلاحظ التداخل في كلِّ من الأمواج المائية ومثيلاتها الصوتية والضوئية، وفي جميع أنواع الأمواج. إذا كنت قد نظرت من قبل إلى اللون الأحمر والأزرق والأخضر في فقاعة صابون مضاءة بالشمس، وتساءلت كيف يمكن أن ينتج عنها ماء صابوني ملون، فقد واجهت إحدى الظواهر الكثيرة، التي لا يمكن تفسيرها إلا من خلال موجة الضوء (أنظر الشكل 1.3). وينطبق الشيء نفسه على الألوان، التي تظهر عن بقعة نفطية أو في الضوء المنعكس عن قرص (DVD)، إذ لا يمكن تفسير هذه الظواهر الأخرى المثيرة للاهتمام بشكل كامل بواسطة البصريات الهندسية. في هذه الحالات، يتفاعل الضوء مع الأجسام ويعرض خصائصه الموجية. يُطلق على فرع البصريات، الذي يأخذ في الحسبان سلوك الضوء عندما يعرض خصائص الموجة، بصريات الموجة (وتُسمى أحياناً البصريات الفيزيائية). وهذا هو موضوع هذا الفصل.

## 1.3 | التداخل مزدوج الشق (تداخل شقي يونغ (Young)) : Young's Double-Slit Interference

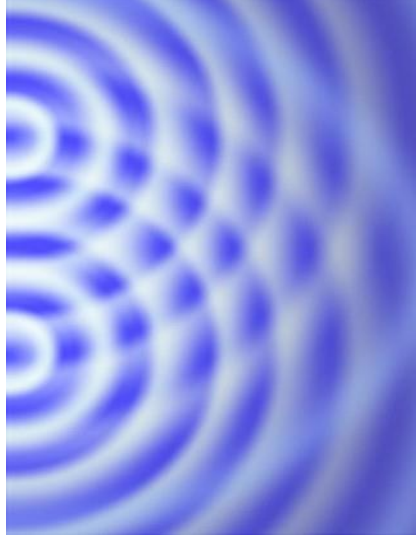
### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- تفسير ظاهرة التداخل.
- تحديد التداخل البنَّاء والهدَّام لشق مزدوج.

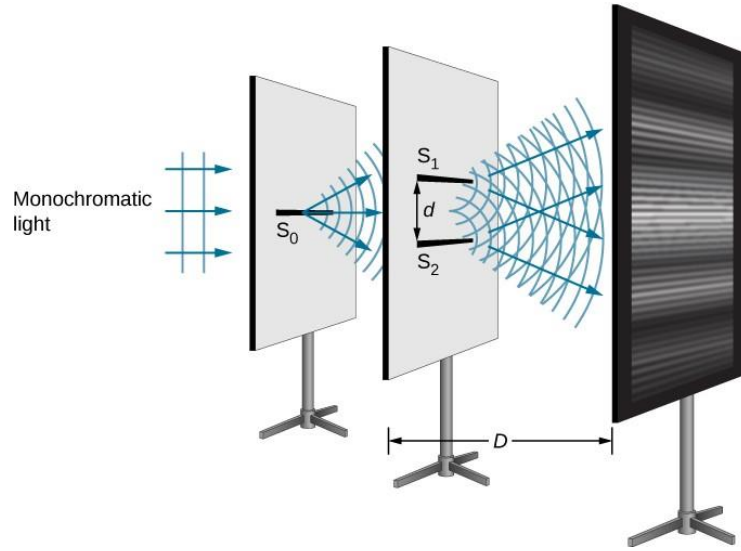
اعتقد الفيزيائي الهولندي كريستيان هيغنز (1629-1695) أن الضوء عبارة عن موجة، لكن إسحاق نيوتن لم يوافق الرأي. فلقد اعتقد نيوتن أن هناك تفسيرات أخرى للألوان والآثار التداخل والانعكاس، والتي كانت ملحوظة في ذلك الوقت. وبسبب سمعة نيوتن الهائلة، سادت وجهة نظره عموماً؛ وفي الحقيقة لا يعد نجاح مبدأ هيغنز دليلاً مباشراً يُثبت أن الضوء عبارة عن موجة. جاء قبول الطابع الموجي للضوء بعد سنوات عديدة في عام 1801، عندما أظهر الفيزيائي والطبيب الإنجليزي توماس يونغ (1773-1829) تداخلاً ضوئياً في تجربته الكلاسيكية ذات الشق المزدوج.

إذا لم يكن هناك مصدر واحد، بل مصدران للأمواج، يمكن جعل هذه الأمواج تتداخل كما في حالة الأمواج على الماء (**الشكل 2.3**). وإذا كان الضوء عبارة عن موجة كهرومغناطيسية، يجب أن يُظهر تأثيرات التداخل في الظروف المناسبة. في تجربة يونغ، يمر ضوء الشمس من خلال ثقب في لوحة. ويسقط الشعاع العابر من الثقب على ثقبين على متن صفيحة ثانية. وعندما سقط الضوء المنبعث من الثقبين على شاشة لوحظ فيها نمط من البقع المضيئة وأخرى مظلمة. لا يمكن تفسير هذا النموذج، والذي يطلق عليه أهداب، إلا من خلال التداخل أو ظاهرة الموجة.



**الشكل 2.3** صورة لنمط التداخل الناتج عن الأمواج المائية الدائرية في خزان يتموج الماء بداخله. لدينا اثنان من الغطاسات الرقيقة (أجسام رقيقة تستخدم لتوليد الأمواج)، إذ تهتز صعوداً وهبوطاً في طور معين على سطح الماء. ويتم إنتاج الأمواج المائية الدائرية بواسطة كل غطاس (جسم)، حيث تنبعث منه (الأمواج). وتكون النقاط التي يكون فيها الماء هادئاً (الموافقة للتداخل الهدّام) واضحة للعيان.

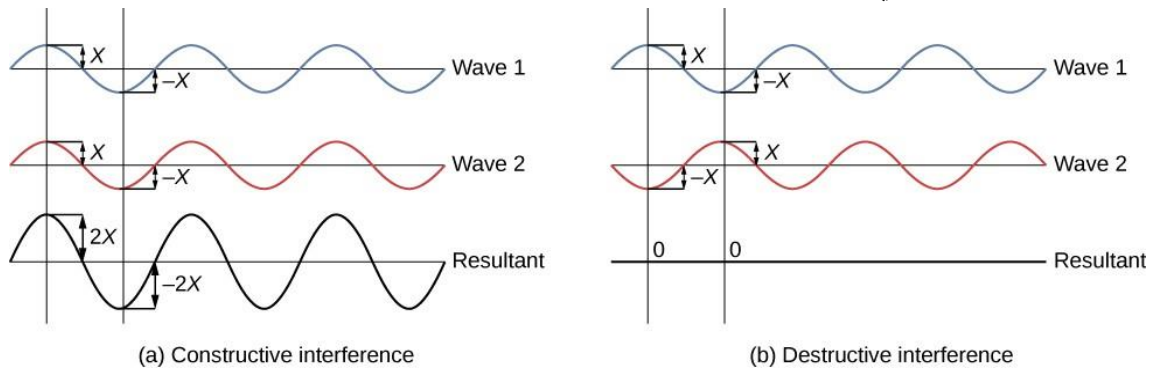
يمكننا تحليل التداخل ذي الشقين بمساعدة **الشكل 3.3**، والذي يصور جهازاً مشابهاً للجهاز المستخدم في تجربة العالم يونغ. يسقط الضوء من مصدر أحادي اللون على فتحة  $S_0$ ، إذ يصطدم الضوء المنبعث من  $S_0$  بشقين آخرين  $S_1$  و  $S_2$ ، وهما متساويا البعد عن الشق  $S_0$ . يتشكل نمط من أهداب التداخل على الشاشة بواسطة الضوء المنبعث من  $S_1$  و  $S_2$ . يُفترض أن الشقين ضيقان للغاية، بحيث يمكن عدُّهما مصادر نقطية ثانوية للأمواج هيغنز (**طبيعة الضوء**). المسافة  $d$  بين الشقين  $S_1$  و  $S_2$ ، حيث:  $(d \leq 1 \text{ mm})$ ، والمسافة  $D$  بين الشاشة والشقين  $(D=1 \text{ m})$ ، وهي أكبر بكثير من  $d$ .



**الشكل 3.3:** تجربة التداخل مزدوج الشق، وذلك باستخدام الضوء أحادي اللون وشقين ضيقين. يُلاحظ وجود أهداب ناتجة عن تداخل أمواج هيغنز من الشقين  $S_1$  و  $S_2$  على الشاشة.

نظراً لأن الشق  $S_0$  مصدر نقطي للضوء أحادي اللون، فإن أمواج هيغنز (Huygens) الثانوية، التي تغادر  $S_1$  و  $S_2$ ، تحافظ دائماً على فرق طوري ثابت (حيث يكون معدوماً في هذه الحالة لأن  $S_1$  و  $S_2$  متساوي البعد عن  $S_0$ )، ولهما التردد نفسه. ويقال في هذه الحالة أن المصدرين  $S_1$  و  $S_2$  متماسكان (coherent). ونعني بالأمواج المتماسكة (coherent waves) أن هذه الأمواج تقع في الطور نفسه أو إنها تتمتع بعلاقة طورية محددة. ويُعبّر المصطلح "غير المتماسكة (incoherent)" عن وجود علاقة عشوائية للطور بين الأمواج، وهو ما سيكون عليه الحال إذا جرى إضاءة  $S_1$  و  $S_2$  بواسطة مصدرين ضوئيين مستقلين بدلاً من مصدر واحد ( $S_0$ ). ويعني مصدران اثنان من مصادر الضوء المستقلة (والتي قد تكون عبارة عن منطقتين منفصلتين داخل المصباح نفسه أو ضوء الشمس) أن ضوء هذين المصدرين بشكلٍ عام لا ينبعث في انسجام تام، والذي يكون غير متماسك أيضاً، لأن  $S_1$  و  $S_2$  يتمتعان بالبعد نفسه عن  $S_0$ ، ويكون مطالاً موجتي هيغنز متساويين.

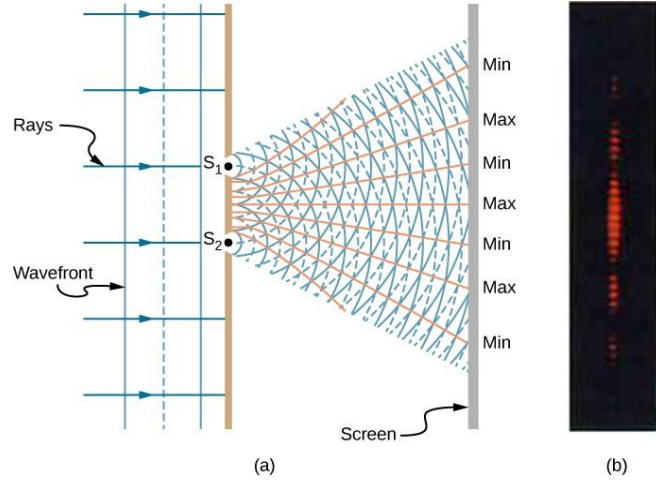
استخدم يونغ ضوء الشمس، حيث يشكل كل طول موجة نمطه الخاص، مما يجعل التأثير أكثر صعوبة في الرؤية. في المناقشة التالية، نوضّح تجربة الشق المزدوج مع ضوء أحادي اللون ( $\lambda$  أحادية) لتوضيح هذا التأثير. يُظهر **الشكل 4.3** التداخل البناء والهدام النقي لموجتين اثنتين لهما الطول الموجي والمطال نفسهما.



**الشكل 4.3:** تجمع مطالات الأمواج. (a) يتم الحصول على تداخل بناءً نقي عندما تكون مطالات الأمواج متماثلة في الطور،

(b) يحدث التداخل الهدام النقي عندما تكون مطالات الأمواج المتماثلة مختلفة في الطور، أو إنها تنتقل بمقدار نصف طول الموجة.

عندما يعبر الضوء الشقوق الضيقة، تعمل هذه الشقوق كمصدر للأمواج المتماسكة، وينتشر الضوء على شكل أمواج نصف دائرية كما هو مبين في **الشكل 5.3 (a)**. يحدث التداخل البناء النقي عندما تنتقل الأمواج من قمة إلى قمة أو من قاع إلى قاع، بينما يحدث التداخل الهدام النقي بين القمة والقاع. يجب أن يسقط الضوء على الشاشة، وينتشر إلى أعيننا حتى نرى هذا النمط من التداخل. يوضح **الشكل 2.3** نمطاً مماثلاً للأمواج المائية. لاحظ أن مناطق التداخل البناء والهدام تنتقل من الشقوق بزوايا محددة جيداً إلى الشعاع الأساس. تعتمد هذه الزوايا على طول الموجة والمسافة بين الشقين كما سنرى أدناه.

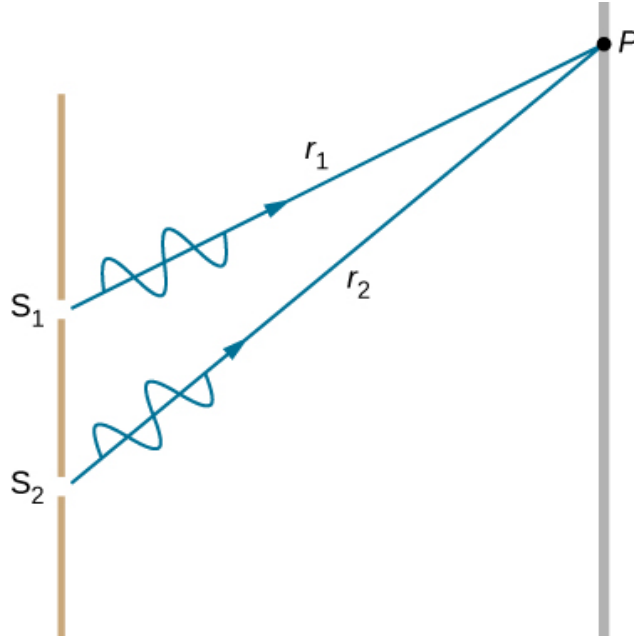


**الشكل 5.3:** تشكل الشقوق المزدوجة مصدرين متماسكين للأمواج التي تتداخل، (a) يحيد الضوء من كل شق لأن الشقوق ضيقة. تتداخل هذه الأمواج بشكلٍ بناءً (المناطق المضيئة)، وتتداخل بشكلٍ هدامٍ (المناطق المظلمة). يمكننا أن نرى هذا فقط إذا كان الضوء يسقط على الشاشة، وينتشر أو يتبعثر إلى أعيننا. (b) عندما يسقط الضوء، الذي مر عبر الشقوق المزدوجة على الشاشة، نرى هذا النمط.

لفهم نمط التداخل مزدوج الشق، فكر في كيفية انتقال موجتين من الشقوق إلى الشاشة (**الشكل 6.3**). يحدد كل شق مسافة مختلفة عن نقطة معينة على الشاشة. وهكذا، تتشكل أعداد مختلفة من أطوال الأمواج التي تناسب كل مسار. تنطلق الأمواج من الشقوق ضمن طور معين (من القمة إلى القمة)، ولكنها قد تنتهي في نهاية الطور (من القمة إلى القاع) على الشاشة إذا كانت المسارات تختلف في طولها بمقدار نصف طول الموجة، وتتداخل بشكلٍ هدامٍ. إذا كانت المسارات تختلف بأطوال موجية كاملة، فستصل الأمواج ضمن الطور (من القمة إلى القمة) على الشاشة، وتتداخل بشكلٍ بناءً. بشكلٍ عام، إذا كان فرق طول المسار  $\Delta l$  بين الأمواج هو أي عدد من أنصاف كامل الأطوال الموجية  $[(1/2)\lambda, (3/2)\lambda, (5/2)\lambda, \dots]$ ، يحدث تداخل هدامٍ. وبالمثل، إذا كان فرق طول المسار يساوي عدداً صحيحاً من الأطوال الموجية  $(\lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots)$ ، سيحدث تداخل بناءً. يمكن التعبير عن هذه الشروط بالمعادلات التالية:

$$\Delta l = m\lambda, \text{ for } m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \text{ (constructive interference)} \quad (3.1)$$

$$\Delta l = (m + 1/2)\lambda, \text{ for } m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \text{ (destructive interference)} \quad (3.2)$$



**الشكل 6.3:** تتبع الأمواج مسارات مختلفة من الشقين إلى نقطة محددة  $P$  على الشاشة. يحدث التداخل الهدام عندما يكون أحد المسارات أطول بنصف طول الموجة عن الآخر - تبدأ الأمواج ضمن طور معين، ولكنها تصل خارجة من هذا الطور. يحدث التداخل البناء عندما يكون أحد المسارات أطول بمقدار طول موجة كاملة - تبدأ الأمواج ضمن طور معين، وتصل وهي ضمن الطور نفسه.

## 2.3 | رياضيات التداخل: Mathematics of Interference

### الأهداف التعليمية

- في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:
- تحديد زوايا الأهداب المضيئة والمظلمة للتداخل المزدوج الشق.
- تحديد مواقع الأهداب المضيئة على الشاشة.

يوضح **الشكل 7.3 (a)** كيفية تحديد فارق طول المسار  $\Delta l$  للأمواج، التي تعبر من شقين إلى نقطة مشتركة على الشاشة. إذا كانت الشاشة تبعد مسافة كبيرة مقارنة بالمسافة بين الشقين، فإن الزاوية  $\theta$  بين المسار وخط من الشق إلى الشاشة [الجزء (b)] هي نفسها تقريباً لكل مسار. بمعنى آخر،  $r_2$  و  $r_1$  متوازيان. وتختلف أطوال  $r_2$  و  $r_1$  بمقدار  $\Delta l$  كما هو مبين في الخططين المتقطعين في هذا الشكل. تعطي الحسابات المثلثية البسيطة ما يلي:

$$\Delta l = d \sin \theta \quad (3.3)$$

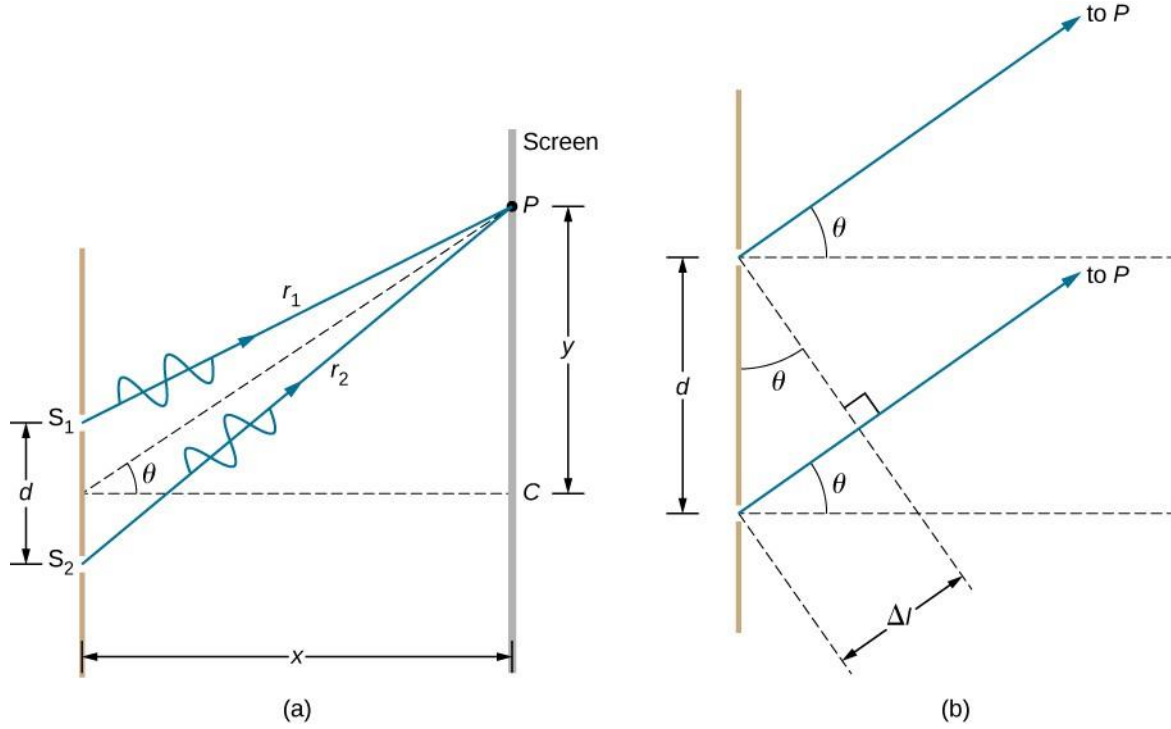
حيث:  $d$  هو المسافة بين الشقين. عند جمع هذه النتيجة مع **المعادلة 1.3**، نحصل على تداخل بناءً لشق مزدوج عندما يكون فرق طول المسار من مضاعفات طول الموجة، أو:

$$d \sin \theta = m\lambda, \text{ for } m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \text{ (constructive interference)} \quad (3.4)$$

وبالمثل، للحصول على تداخل هدام للشق المزدوج، يجب أن يكون فرق طول المسار من مضاعفات نصف طول الموجة، أو:

$$d \sin \theta = (m + \frac{1}{2})\lambda, \text{ for } m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \text{ (desstructive interference)} \quad (3.5)$$

حيث:  $\lambda$  هو طول الموجة للضوء،  $d$  هي المسافة بين الشقين، و  $\theta$  هي الزاوية من الاتجاه الأساس للشعاع كما هو موضح أعلاه. تُسمى  $m$  مرتبة (درجة) التداخل (order of the interference). على سبيل المثال  $m = 4$  هو تداخل من المرتبة الرابعة.



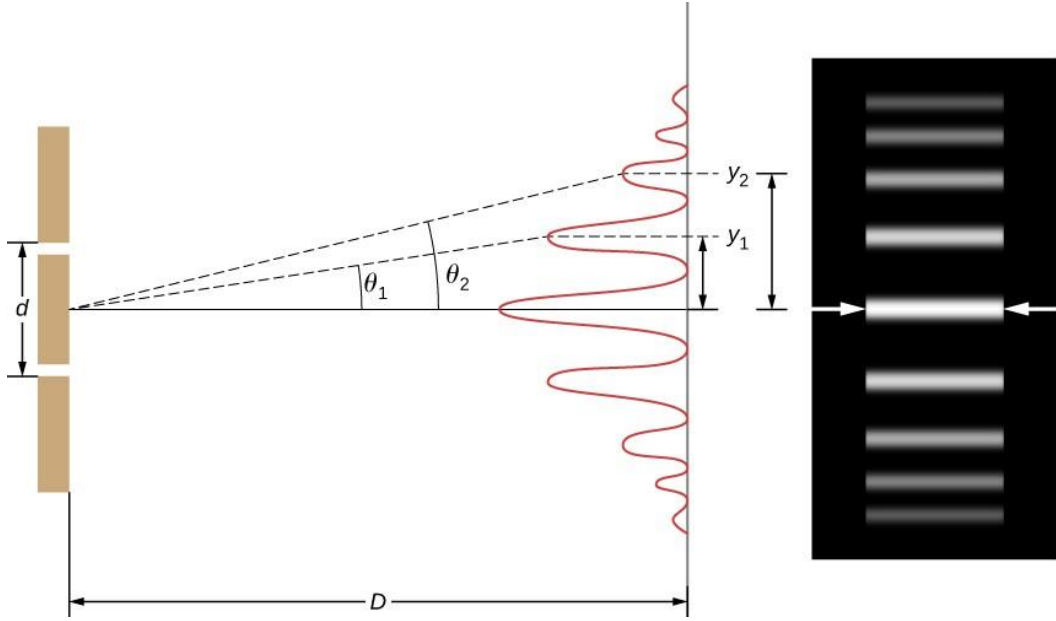
**الشكل 7.3: (a)** للوصول إلى النقطة P، يجب أن تسلك أمواج الضوء من  $S_1$  و  $S_2$  مسافات مختلفة. **(b)** فرق المسار بين المسارين هو  $\Delta l$ .

تتضمن معادلات التداخل مزدوج الشق سلسلة من الخطوط المضئية والمظلمة. من أجل الشقوق العمودية، ينتشر الضوء أفقياً على جانبي الشعاع (بشكل مخروطي) في نمط يُسمى هدب التداخل **(الشكل 8.3)**. كلما ازداد اقتراب الشقين الواحد من الآخر، ازداد تباعد الأهداب المضئية. يمكننا أن نرى هذا من خلال دراسة المعادلة  $d \sin \theta = m\lambda$ ، من أجل  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ . كلما صغرت قيم  $d$  كبرت  $\theta$  من أجل قيم ثابتة لكل من  $\lambda$  و  $m$ ، ذلك لأن  $\sin \theta = \frac{m\lambda}{d}$ ، ويتوافق هذا مع زعمنا أن تأثيرات الموجة تكون ملحوظة للغاية عندما يكون الجسم، الذي تصادفه الموجة، صغيراً (ويقصد هنا الجسم الصغير بالشقوق، بمعزل عن المسافة  $d$  بينهم). ويؤدي صغر المسافة  $d$  إلى كبر الزاوية  $\theta$ ، وبالتالي، يكون التأثير كبيراً. بالرجوع إلى الجزء (a) من هذا الشكل، عادةً ما تكون  $\theta$  صغيرة بما يكفي، وبالتالي  $\sin \theta \cong \tan \theta \cong \frac{y_m}{d}$ ، حيث  $y_m$  هي المسافة من القمة العظمى المركزية إلى الهدب المضئي ذي المرتبة  $m$ ، و  $D$  هي المسافة بين الشق والشاشة. قد تكون **المعادلة 4.3** مكتوبة على الشكل التالي:

$$d \frac{y_m}{D} = m\lambda$$

or

$$Y_m = \frac{m\lambda D}{d} \quad (3.6)$$



**الشكل 8.3:** نمط التداخل للشق مزدوج، حيث تتناقص شدة قمم هذا النمط مع زيادة الزاوية  $\theta$ . كما تُظهر الصورة عدداً من الخطوط المضيئة والمظلمة، الناتجة عن تداخل الضوء المار عبر شق مزدوج.

### مثال 1.3

#### إيجاد طول الموجة من نمط التداخل:

لنفترض أنك تمرر الضوء من ليزر He-Ne خلال شقين مفصولين بمقدار  $0.0100 \text{ mm}$ ، وتجد أن الخط المضيء الثالث على الشاشة يتكون عند الزاوية  $10.95^\circ$  بالنسبة إلى الشعاع الوارد. ما هو طول موجة هذا الضوء؟

#### خطة الحل:

هذه الظاهرة هي حالة تداخل مزدوج الشق كما هو موضح في **الشكل 8.3** ويرجع الخط المضيء الثالث إلى تداخل بناء من الدرجة الثالثة، مما يعني أن:

$$m = 3$$

لدينا:

$$\theta = 10.950, \quad d = 0.0100 \text{ mm}$$

وبالتالي يمكن إيجاد طول الموجة باستخدام المعادلة:

$$d \sin \theta = m\lambda$$

للتداخل البناء:

#### الحل:

يعطي حل المعادلة  $d \sin \theta = m\lambda$  طول الموجة  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{d \sin \theta}{m}$$

باستبدال القيم المعروفة في المعادلة نحصل على:

$$\lambda = \frac{(0.0100 \text{ mm})(\sin 10.95^\circ)}{3} = 6.33 \times 10^{-4} = 633 \text{ nm}$$

#### ملاحظة:

يُعبّر عن قيمة طول الموجة للضوء المنبعث من ليزر He-Ne بثلاث مراتب دقة. ليس مصادفةً، أن يشبه هذا اللون الأحمر اللون

المنبعث من مصابيح النيون. لكن الأهم من ذلك هو حقيقة أن أنماط التداخل يمكن استخدامها لقياس طول الموجة. حيث إن يونغ فعل ذلك لإظهار الأطوال الموجية. ولا تزال هذه التقنية التحليلية تُستخدم على نطاقٍ واسعٍ لقياس الأطياف الكهرطيسية. بالنسبة لمرتبة تداخل معينة، تزداد زاوية التداخل البناءً بزيادة طول الموجة  $\lambda$ ، بحيث يمكن الحصول على الأطياف الموجية (قياسات الشدة مقابل طول الموجة).

### مثال 2.3

#### حساب أعلى مرتبة ممكنة:

لا تحتوي أنماط التداخل على عددٍ لا حصر له من الأهداب، وذلك نظراً لأن هناك حداً كبيراً لمرتبة  $m$ . (بقعة الضوء الظاهرة على الشاشة). ما هو التداخل البناء المتمتع بأعلى مرتبة ممكنة مع النظام الموصوف في المثال السابق؟

#### خطة الحل:

تصف المعادلة  $d \sin \theta = m\lambda$  (لأجل  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$ ) التداخل البناء من شقين. بالنسبة للقيم الثابتة للوسيطين:  $d$  و  $\lambda$ ، كلما كانت  $m$  أكبر، فإن  $\sin \theta$  أكبر. ومع ذلك، فإن القيمة القصوى التي يمكن أن تبلغها  $\sin \theta$  هي 1، أي عندما يكون مقدار الزاوية  $\theta$  مساوياً 90 درجة. (تشير الزوايا الأكبر إلى أن الضوء يذهب للخلف ولا يصل إلى الشاشة على الإطلاق)، دعنا نجد القيمة  $m$  التي تتوافق مع أقصى زاوية حيود.

#### الحل:

$$\text{حل المعادلة } d \sin \theta = m\lambda$$

لأجل إيجاد قيمة  $m$  نحصل على:

$$m = \frac{d \sin \theta}{\lambda}$$

بأخذ  $\sin \theta = 1$  واستبدال قيم  $d$  و  $\lambda$  من المثال السابق يعطي:

$$m = \frac{(0.0100 \text{ mm})(1)}{633 \text{ m}} \cong 15.8$$

لذلك، يمكن أن يكون أكبر عدد صحيح للمرتبة  $m$  هو 15، أو بشكل آخر  $m = 15$ .

#### ملاحظة:

يعتمد عدد الأهداب على كلٍ من طول الموجة والمسافة بين الشقين. ويكون عدد الأهداب كبيراً جداً من أجل قيم كبيرة للمسافة بين الشقين. ومع ذلك، تذكر (انظر الفقرة 1.1 انتشار الضوء ومقدمة هذا الفصل) أن تداخل الموجة يكون ظاهراً فقط عندما تتفاعل الموجة مع أجسام ليست كبيرة مقارنةً بطول هذه الموجة. لذلك، إذا أصبحت المسافة بين الشقين وأبعاد الشقين أكبر بكثير من طول الموجة، فإن شدة الضوء من هذا النمط على الشاشة تتغير، لذلك هناك ببساطة خطان مضيئان تظهرهما الشقوق، كما هو متوقع، وذلك عندما يتصرف الضوء كأشعة. نلاحظ أيضاً أن الأهداب تتلاشى بعيداً عن المركز. وبالتالي، قد لا يمكن ملاحظة جميع الأهداب 15.

1.3 للتحقق من فهمك في النظام المستخدم في الأمثلة السابقة، ما هما الزاويتان الأولى والثانية اللتان تشكلان الأهداب

المضيئة؟



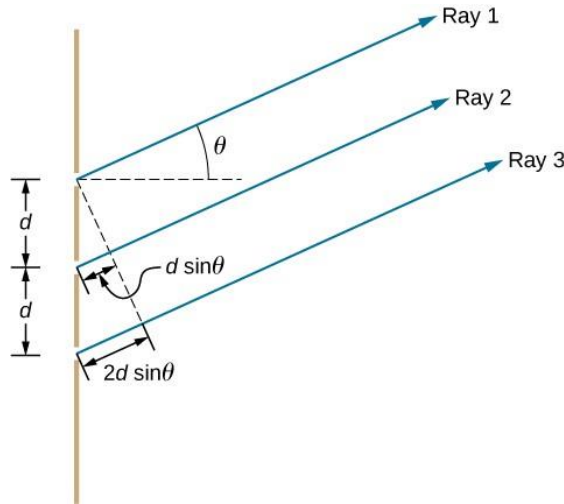
### 3.3 | التداخل المتعدد الشقوق: Multiple-Slit Interference

#### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- تحديد مواقع القمة العظمى للثلاثية للتداخل متعدد الشقوق وشدته.

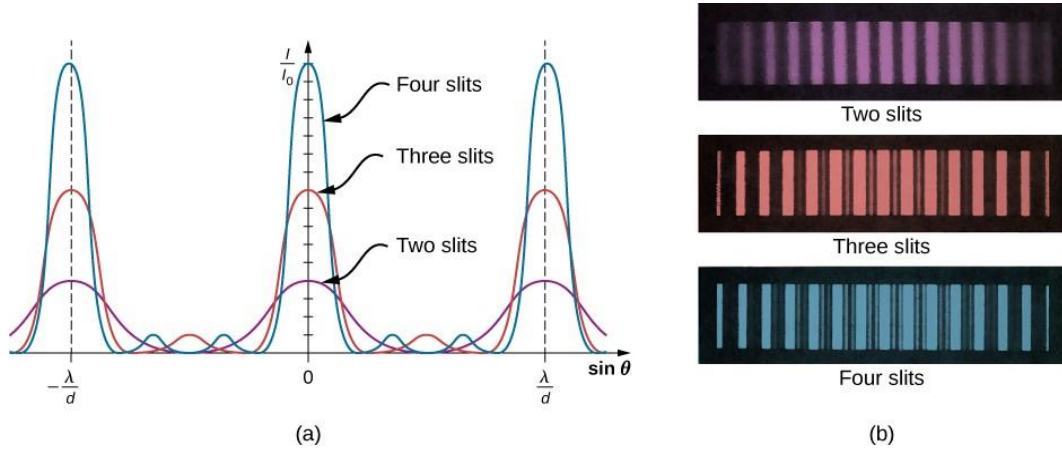
يعطي تحليل تداخل الضوء، الذي يمر عبر شقين، وأهداب التداخل نظرة تاريخية حول تجارب توماس يونغ. ومع ذلك، فإن الكثير من التطبيق الحديث للتداخل لا يستخدم فقط شقين بل الكثير من الشقوق، ويمكن أن يقترب عدد هذه الشقوق من اللانهاية في التطبيقات العملية. يُسمى العنصر البصري الرئيس بالحاجز الشبكي للانكسار (أو شبكة الحيود)، وهو أداة مهمة في التحليل البصري، والتي سنناقشها بالتفصيل في بحث الانكسار. هنا، نبدأ في تحليل التداخل متعدد الشقوق من خلال أخذ النتائج من تحليلنا للشق المزدوج ( $N = 2$ ) وتوسيع نطاقه ليشمل أجساماً تحوي ثلاثة شقوق أو أربعة أو أعداداً أكبر بكثير. يوضح **الشكل 9.3** أبسط حالة للتداخل متعدد الشقوق، أي بثلاثة شقوق ( $N = 3$ ) والمسافة بين الشقوق هي  $d$ ، وفرق طول المسار بين الشقوق المجاورة هو  $d \sin \theta$ ، كما في حالة الشق المزدوج. ويكمن الجديده هنا في أن الفرق بين طول المسار لأجل الشعاع الأول والثالث هو  $2d \sin \theta$ . شرط التداخل البناء هو نفسه كما في حالة الشق المزدوج، وهو  $d \sin \theta = m\lambda$  عندما يتم الحصول على هذه الحالة، فإن  $2d \sin \theta$  هي تلقائياً تكون مضاعفات لطول الموجة  $\lambda$ ، لذلك تتجمع جميع الأشعة الثلاثة بشكل بناء، تُسمى الأهداب المضيقية، والتي تحدث في هذه الحالة **القمة العظمى الرئيسية**. ولكن ماذا يحدث عندما يكون فرق طول المسار بين الشقوق المجاورة هو  $\lambda / 2$  فقط؟ يمكننا أن نفكر في أن الشعاعين الأول والثاني سوف يتداخلان بشكل هدام، ولكن يبقى الشعاع الثالث دون تغيير. بدلاً من الحصول على أهداب مظلمة، أو حد أدنى، كما فعلنا في حالة الشق المزدوج، سوف نرى القمة العظمى الثانوية مع شدة أقل من القمة العظمى الرئيسية.



**الشكل 9.3:** التداخل بثلاثة شقوق. يمكن أن تتحد الأزواج المختلفة من الأشعة الناشئة بشكل بناء أو هدام في الوقت نفسه، مما يؤدي إلى ظهور القمة العظمى الثانوية.

بشكل عام، من أجل عدد  $N$  من الشقوق، تتشكل القمم العظمى الثانوية عندما يوجد شعاع مفرد، والذي لا يتلاشى بسبب التداخل الهدام. ويُحدث هذا عند  $(N - 2)$  مواضع متساوية البعد عن القمة العظمى الرئيسية. ويتقلص مطال الموجة الكهرطيسية طردياً إلى  $\frac{1}{N}$  من الموجة عند القمة العظمى الرئيسية، وتقل شدة الضوء، والتي تتناسب مع مربع مطال الموجة، إلى  $\frac{1}{N^2}$  من شدتها

مقارنةً بالقمة العظمى الرئيسية. ويوضح **الشكل 10.3** وجود هدب مظلم بين كل قمة عظمى (رئيسية أو ثانوية). وكلما أخذ عدد الشقوق  $N$  بالازدياد، ازداد عدد الأهداب المضيئة والمظلمة، ليصبح عرض القمة العظمى أضيق بسبب وجود الأهداب المظلمة المجاورة. ونظراً لأن إجمالي معدل الطاقة الضوئية يبقى دون تغيير، تتطلب القمة العظمى الأضيق بالمقابل أن تصل كل قمة عظمى إلى أعلى شدة في الإضاءة.



**الشكل 10.3:** أنماط أهداب ناتجة عن التداخل من أجل شقين (وثلاثة وأربعة شقوق). يظهر مع ازدياد عدد الشقوق مزيد من القمم العظمى الثانوية، تصبح القمة العظمى الرئيسية أكثر إضاءةً وأضيق. (a) رسم بياني و (b) صور لأنماط الأهداب.

#### 4.3 | التداخل في الأفلام الرقيقة: Interference in Thin Films

##### الأهداف التعليمية

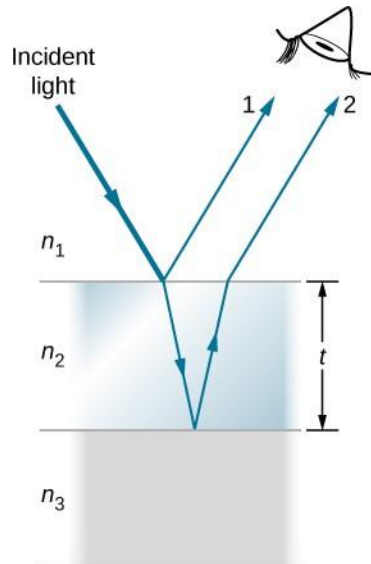
- في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:
- وصف التغيرات الطورية المبنية على الانعكاس.
- وصف الأهداب، التي يتم إنشاؤها بواسطة الأشعة المنعكسة لمصدر مشترك.
- تفسير ظهور الألوان في الأفلام الرقيقة.

إن الألوان الزاهية، التي تظهر في بقعة نفطية تطفو على سطح الماء أو في فقاعة صابون مضاءة بضوء الشمس، تكون ناتجة عن التداخل. أكثر هذه الألوان سطوعاً هي تلك التي تتداخل بشكل بناء. ويكون هذا التداخل بين الضوء المنعكس من الأسطح المختلفة للفيلم الرقيق؛ وبالتالي، يُعرف هذا التأثير باسم تداخل الأفلام الرقيقة. كما شرحنا سابقاً، تكون تأثيرات التداخل أكثر وضوحاً عندما يتفاعل الضوء مع جسم (أو كائن ولم نقل جسم فعلي سبيل المثال فقاعات الصابون لا تشكل جسماً) له مقياس مماثل لطول الموجة. يتمتع الفيلم الرقيق بثخانة واحدة  $t$  وهي أصغر بعدة أضعاف من طول الموجة ( $\lambda$ ). ولما كان اللون يرتبط بشكل غير مباشر بطول الموجة  $\lambda$  ولأن كل التداخل يعتمد بطريقة ما على نسبة  $\lambda$  إلى مقياس الكائن، يجب أن نتوقع أن نرى ألواناً مختلفة لشخانة مختلفة من الفيلم كما في **الشكل 11.3**.



**الشكل 11.3:** تُظهر فقاعات الصابون ألواناً رائعة عندما تتعرض لأشعة الشمس (الائتمان: سكوت روبنسون (Scott Robinson)).

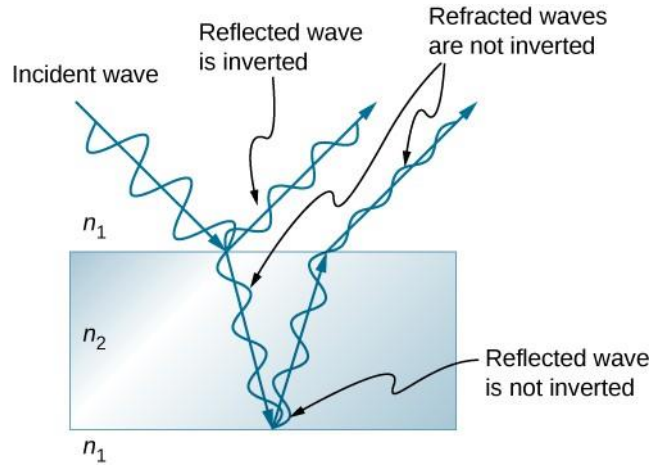
ما الذي يُسبب تداخل الأفلام الرقيقة؟ يوضح **الشكل 12.3** كيف يمكن أن يتداخل الضوء المنعكس عن السطوح العلوية والسفلية للفيلم. ينعكس الضوء الوارد جزئياً فقط عن السطح العلوي للفيلم (الشعاع 1). ويدخل باقي الضوء هذا الفيلم، وينعكس جزئياً عن سطحه السفلي. يمكن أن ينشأ جزء من الضوء المنعكس من السطح السفلي، من أعلى الفيلم (الشعاع 2) (ينتشر أي يغادر الفيلم)، ويتداخل مع الضوء المنعكس من الأعلى (الشعاع 1). ينتقل الشعاع، الذي يدخل الفيلم، لمسافة أكبر، لذلك قد يوجد هذا الشعاع ضمن الطور أو خارجه مع الأشعة المنعكسة عن الطبقة العلوية. ومع ذلك، ففكر للحظة مرة أخرى، في الفقاعات المبينة في **الشكل 11.3**. تكون بعض هذه الفقاعات مظلمة عندما تكون أكثر رقة (أي رقيقة أكثر). علاوة على ذلك، إذا أمعنت النظر بفقاعة صابون، فستلاحظ أنها تصبح مظلمة عند النقطة، التي يحدث فيها الانكسار. وبالنسبة للأفلام الرقيقة جداً، يكون الفرق في أطوال مساري الشعاعين 1 و 2 في **الشكل 12.3** ضئيلاً، ولهذا لماذا يكون تداخل هذين الشعاعين بشكل هدام وليس بناءً؟ والجواب هو أن تغير الطور يمكن أن يحدث عند الانعكاس، كما سنناقش ذلك فيما بعد.



**الشكل 12.3:** ينعكس الضوء، الذي يصدم فيلماً رقيقاً، بشكل جزئي (الشعاع 1)، وينعكس جزئياً على سطحه العلوي. تنعكس الأشعة المنكسرة جزئياً عن سطحه السفلي، وتخرج على شكل الشعاع 2. تتداخل هذه الأشعة بطريقة تعتمد على كل من ثخانة الفيلم وقرائن انكسار الأوساط المختلفة.

## تغيرات الطور المتعلقة بالانعكاس:

رأينا سابقاً ([Waves \(http://cnx.org/content/m58367/latest/\)](http://cnx.org/content/m58367/latest/)) أن انعكاس الأمواج الميكانيكية يمكن أن يتضمن تغيراً طورياً بنحو 180 درجة. على سبيل المثال، يتم عكس اتجاه موجة متحركة على سلسلة (أي يتغير طورها بمقدار 180 درجة) حين انعكاسها عند الحدود، التي تربطها بسلسلة أثقل. ومع ذلك، إذا كانت السلسلة الثانية أخف (أو أكثر دقة، أو تتمتع بكثافة خطية منخفضة)، فهذا الانقلاب لن يحدث. تعطي الأمواج الضوئية التأثير نفسه، لكن الوسيط الخاص بالضوء هو قرينة الانكسار. تخضع الأمواج الضوئية لتغير في طورها بمقدار 180 درجة (أو  $\pi$  راديان) حين انعكاسها عن واجهة، بحيث الوسط الموجود خلفها يتمتع بقرينة انكسار أكبر. ولا يحدث تغير في الطور عند الانعكاس من وسط يتمتع بقرينة انكسار أصغر (**الشكل 13.3**). وبسبب الطبيعة الدورية للأمواج، فإن هذا التغير في الطور أو انقلابه يكون مساوياً إلى  $\pm \frac{\lambda}{2}$  في المسافة المقطوعة (أو في طول المسار). ويُعدُّ كلٌّ من طول المسار وقرائن الانكسار عوامل مهمة في تداخل الأفلام الرقيقة.



**الشكل 13.3** انعكاس الضوء عند السطح البيني، وذلك عند انتقاله من وسط يتمتع بقرينة انكسار  $n_1$  إلى وسط يتمتع بقرينة انكسار  $n_2$ ، حيث  $n_1 < n_2$ ، مما يؤدي إلى تغير في طور الموجة بمقدار  $\pi \text{ rad}$ .

إذا كان الفيلم في **الشكل 13.3** عبارة عن فقاعة صابون (أساسها ماء مع هواء على كلا جانبيها)، تحدث الإزاحة في الطور بمقدار  $\frac{\lambda}{2}$  في الشعاع 1، ولكن ليس في الشعاع 2. وهكذا، عندما يكون الفيلم رقيقاً للغاية، وفرق طول المسار بين هذين الشعاعين يكاد لا يُذكر، فهي خارج الطور تماماً، ويحدث التداخل الهدّام في جميع الأطوال الموجية. وبالتالي، تكون فقاعة الصابون مظلمة في هذه الحالة.

تُعدُّ ثخانة الفيلم العامل الحاسم الآخر بالنسبة لطول موجة الضوء عند تداخل الأفلام الرقيقة. يجتاز الشعاع 2 في **الشكل 12.3** مسافة أكبر بالمقارنة مع الشعاع 1. وعندما يسقط الضوء عمودياً على السطح، يجتاز الشعاع 2 مسافة تقارب  $2t$  أبعد من الشعاع 1. وعندما تكون كامل هذه المسافة أو نصفها هي من مضاعفات طول الموجة في الوسط، ( $\lambda_n = \frac{\lambda}{n}$ )، حيث  $\lambda$  هو طول الموجة في الفراغ و  $n$  هي قرينة الانكسار)، يمكن أن يحدث التداخل البنّاء أو الهدّام، معتمداً أيضاً على ما إذا كان هناك تغير في الطور لأيٍّ من الشعاعين.

### مثال 3.3

#### حساب ثخانة طلاء عدسة غير عاكس:

تستخدم الكاميرات المتطورة عدة عدسات. ويمكن أن ينعكس الضوء من أسطح هذه العدسات المختلفة مما يقلل من وضوح الصورة. وللحد من هذه الانعكاسات، يتم طلاء العدسات بطبقة رقيقة من فلور المغنيزيوم، مما يتسبب في تداخل الفيلم الرقيق الهدّام. ما هي أقل ثخانة لهذا الفيلم، إذا كانت قرينة انكساره 1.38، وتم تصميمه للحد من انعكاس الضوء ذي طول الموجة 550 nm، إذ عادةً ما يكون هذا الطول الموجي الأكثر شدة؟ افترض أن قرينة انكسار الزجاج هي 1.52.

#### خطة الحل:

بالرجوع إلى الشكل 12.3 واستخدام قرينة انكسار للهواء  $n_1 = 1.00$ ،  $n_2 = 1.38$ ، و  $n_3 = 1.52$ . يتغير انتقال كل من الشعاع 1 والشعاع 2 بمقدار  $\lambda/2$  عند انعكاسهما. وبالتالي، للحصول على التداخل الهدّام، يحتاج الشعاع 2 إلى السير بمقدار نصف طول موجة إضافي عن الشعاع 1. وحتى تسقط الأشعة بشكل عمودي، فإن الفرق في طول مسارها هو  $2t$ .

#### الحل:

للحصول على التداخل الهدّام هنا، يجب أن يكون:

$$2t = \frac{\lambda n_2}{2}$$

حيث  $\lambda_{n_2}$  هي طول الموجة في الفيلم، وتعطى بالعلاقة:  $\lambda_{n_2} = \frac{\lambda}{n_2}$ ، وبالتالي، فإن:

$$2t = \frac{\lambda/n_2}{2}$$

ولحساب قيمة  $t$ ، يتم إدخال القيم المعروفة، فنحصل على:

$$t = \frac{\lambda/n_2}{4} = \frac{500 \text{ (nm)}/1.38}{4} = 90.6 \text{ nm}$$

#### ملاحظة:

تكون الأفلام، كتلك الموجودة في هذا المثال، أكثر فاعلية في إنتاج التداخل الهدّام عند استخدام الطبقة الأكثر رقة (الأنحف)، وذلك نظراً لأن الضوء الوارد، على نطاق أوسع من الزوايا، تقل شدة اضاءته. وتُسمى هذه الأفلام بالطلاء غير العاكس. وهذا مجرد وصف صحيح تقريباً، ذلك لأن الأطوال الموجية الأخرى يتم إلغاؤها جزئياً فقط. كما تستخدم الطلاءات غير العاكسة في نوافذ السيارات والنظارات الشمسية وغيرها.

#### الجمع بين فرق طول المسار مع تغيير الطور:

يكون تداخل الأفلام الرقيقة إما بناءً للغاية أو أكثر هدماً، وذلك عندما يكون الفرق في طول المسار لشعاعين مساوياً لطول موجة كاملة أو نصف كامل طولها. وذلك من أجل سقوط عمودي للأشعة:

$$2t = \lambda n, 2\lambda n, 3\lambda n, \dots$$

أو

$$2t = \frac{\lambda n}{2}, \frac{3\lambda n}{2}, \frac{5\lambda n}{2}, \dots$$

لمعرفة ما إذا كان التداخل بناءً أو هداماً، يجب عليك أيضاً تحديد ما إذا كان هناك تغير في الطور عند الانعكاس. وبالتالي، يعتمد تداخل الفيلم الرقيق على كل من ثخانة الفيلم وطول موجة الضوء وقرائن الانكسار. بالنسبة للضوء الأبيض الظاهر على فيلم تتفاوت ثخاناته، يمكنك ملاحظة ألوان قوس قزح للتداخل البناء لأطوال موجية مختلفة مع تباين الثخانة.

### مثال 4.3

#### فقاعات الصابون:

(أ) ما هي أصغر ثلاث ثخانات لفقاعة صابون تنتج تداخلاً ببناءً للضوء الأحمر بطول موجة يبلغ 650 nm؟

تُعد قرينة انكسار الصابون هي نفسها قرينة انكسار الماء.

(ب) ما هي أصغر ثلاث ثخانات لحدوث تداخل هدام؟

#### خطة الحل:

استخدم **الشكل 12.3** لتصور الفقاعة، التي تعمل كفيلم رقيق بين طبقتين من الهواء. وهكذا  $n_1 = n_3 = 1.00$  للهواء و  $n_2 = 1.333$  للصابون (أي ما يعادل قرينة انكسار الماء). هناك إزاحة بمقدار  $\frac{\lambda}{2}$  للشعاع 1 المنعكس عن السطح العلوي للفقاعة وعدم وجود إزاحة للشعاع 2 المنعكس عن سطحها السفلي. للحصول على تداخل بناءً، يجب أن يكون الفرق في طول المسار ( $2t$ ) من مضاعفات نصف طول كامل الموجة - أول ثلاث ثخانات  $\frac{\lambda_n}{2}, \frac{3\lambda_n}{2}, \frac{5\lambda_n}{2}$  وللحصول على التداخل الهدام، يجب أن يكون فرق طول المسار من مضاعفات طول الموجة - الثخانات الثلاث الأولى هي  $(0, \lambda_n, 2\lambda_n)$ .

#### الحل:

أ. يحدث هنا تداخل بناءً عندما:

$$2t_c = \frac{\lambda_n}{2}, \frac{3\lambda_n}{2}, \frac{5\lambda_n}{2}, \dots$$

وبالتالي، فإن أصغر ثخانات ببناءً هي  $t_c$ :

$$t_c = \frac{\lambda_n}{4} = \frac{\lambda/n}{4} = \frac{(650 \text{ nm})/1.333}{4} = 122 \text{ nm}$$

الثخانة الثانية، التي تعطي تداخل بناءً هي  $t'_c = \frac{3\lambda_n}{4}$ ، لذلك:

$$t'_c = 366 \text{ nm}$$

أخيراً، الثخانة الثالثة التي تعطي تداخلاً ببناءً هي  $t''_c = \frac{5\lambda_n}{4}$ ، لذلك:

$$t''_c = 610 \text{ nm}$$

ب. بالنسبة إلى التداخل الهدام، يمثل فرق طول المسار هنا مضاعفاً لا يتجزأ من طول الموجة. يحدث الأول بالنسبة لثخانة مساوية إلى الصفر، وذلك نظراً لوجود تغيير في الطور في السطح العلوي، أي أن:

$$t_d = 0$$

لحالة فيلم رقيق جداً تمت مناقشتها أعلاه. أول ثخانة غير صفرية تحدث التداخل الهدام:

$$2t'_d = \lambda_n$$

باستبدال القيم المعروفة:

$$2t'_d = \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda/n}{2} = \frac{650 \text{ (nm)}/1.333}{2} = 244 \text{ nm}$$

أخيراً، الثخانة الهدامة الثالثة هي  $2t''_d = 2\lambda_n$ ، لذلك:

$$t''_d = \lambda_n = \frac{\lambda}{n} = \frac{650 \text{ (nm)}}{1.333} = 488 \text{ nm}$$

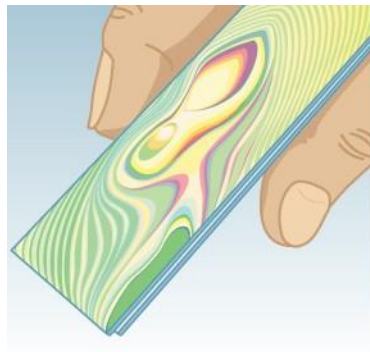
#### ملاحظة:

إذا كانت الفقاعة مضاءة بضوء أحمر نقي، فسنشاهد حزاماً مضيئة ومظلمة عند الزيادات المتجانسة في الثخانة. أولاً، سيكون هناك خط مظلم بثخانة معدومة، ثم مضيء (ساطع) بثخانة 122 nm، ثم مظلم عند 244 nm، ومضيء عند 366 nm، ومظلم عند

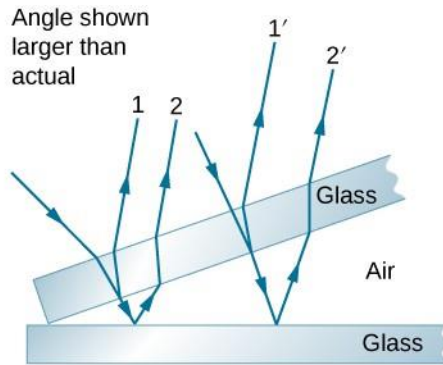
488 nm، ومضيء عند 610 nm. إذا كانت الفقاعة تتميز بتغيير سلس في الشخانة، فسيتم توزيع المسافات بين هذه الخطوط بشكل متساوٍ.

✓ 2.3 تحقق من فهمك للمضي قدماً في المثال 4.3، ما هي الشخانتان التاليتان لفقاعة الصابون، والتي من شأنهما أن تؤديا إلى (أ) تداخل بناءً، و (ب) تداخل هدامًا؟

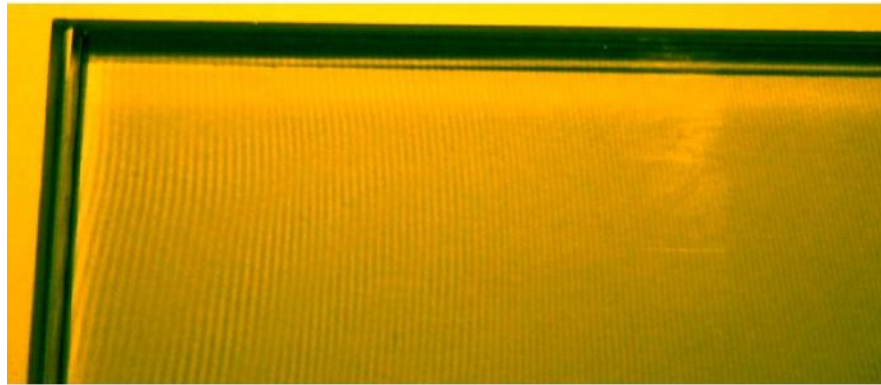
يمكن رؤية مثال آخر للتداخل في الأفلام الرقيقة عند فصل شرائح المجهر (انظر الشكل 14.3). حيث الشرائح مسطحة جداً، بحيث تزداد ثخانة طبقة الهواء بين الجانبين. حيث يحدث تغيير الطور على السطح الثاني ولكن ليس على الأول، لذا يتشكل خط (شريط) مظلم حيث تتلامس الشرائح. تتكرر ألوان قوس قزح للتداخل البناء، حيث تنتقل من اللون البنفسجي إلى اللون الأحمر مراراً وتكراراً مع زيادة المسافة بين الشرائح. مع زيادة طبقة الهواء، يصبح من الصعب رؤية هذه الخطوط، لأن التغييرات الطيفية في الزاوية المتشكلة لها تأثيرات أكبر على اختلافات طول المسار. إذا تم استخدام ضوء أحادي اللون بدلاً من الضوء الأبيض، فسيتم الحصول على خطوط مضيئة ومظلمة بدلاً من تكرار ألوان قوس قزح.



(a)



(b)

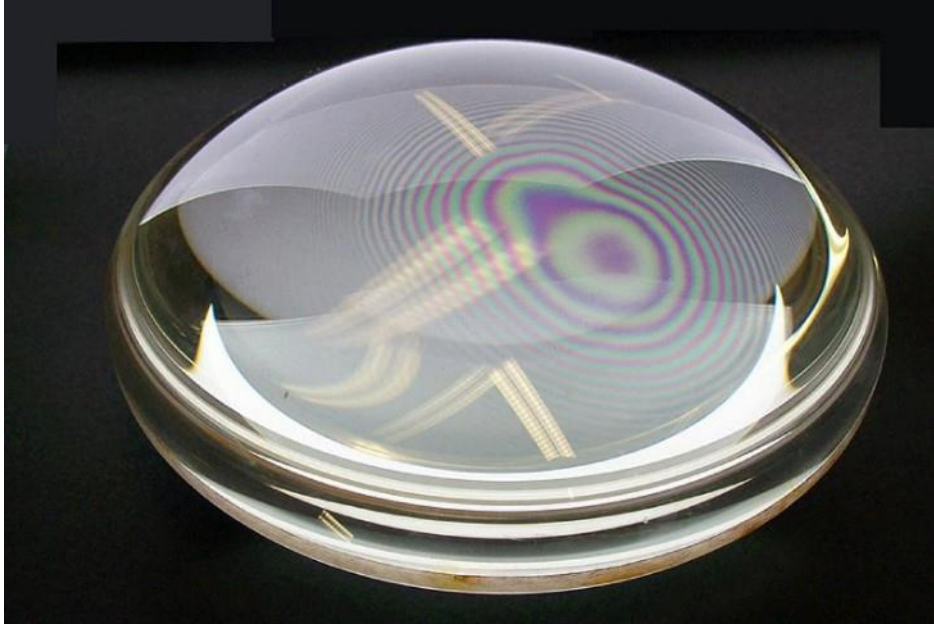


(c)

**الشكل 14.3: (a)** يتم إنتاج خطوط ألوان قوس قزح من خلال تداخل فيلم رقيق في الهواء بين اثنتين من الشرائح الزجاجية. **(b)** رسم تخطيطي للمسارات التي اتخذتها الأشعة في الهواء (وسط الهواء الذي له شكل وتد أو إسفين) بين الشرائح. **(c)** إذا كان الهواء مضاءً بضوء أحادي اللون، يتم الحصول على خطوط مضيئة ومظلمة بدلاً من تكرار ألوان قوس قزح.

يوجد تطبيق مهم لتداخل الأفلام الرقيقة في تصنيع الأدوات البصرية. يمكن استخدام سطح العدسة أو المرآة كمواد لتشكيل

الأدوات البصرية بالدقة المطلوبة. يوضح **الشكل 3.15** الظاهرة المسماة حلقات نيوتن، التي تتشكل عندما يتم وضع السطحين المستويين لعدستين فوق بعضهما. (تُسمى الأهداب الدائرية حلقات نيوتن لأن إسحاق نيوتن وصفها واستخدمها بالتفصيل. نيوتن لم يكتشفها؛ روبرت هوك هو الذي اكتشفها، نيوتن لم يعتقد أنها كانت بسبب الطبيعة الموجية للضوء). يشير اللون المحدد إلى زيادة بمقدار نصف الطول الموجي في المسافة بين العدسة والفجوة بينهما، وتجري معالجة سطح العدسة حتى اختفاء جميع حلقات نيوتن.



**الشكل 15.3:** "حلقات نيوتن" أهداب تداخلية عندما يتم وضع عدستين مستويتين محدبتين (يكون أحد وجهي هذه العدسة محدباً والآخر مستوياً) توضع، بحيث يكون الطرفان المستويان على تماس مباشر. تظهر الحلقات عن طريق التداخل بين الضوء المنعكس على السطحين نتيجة للفجوة الطفيفة بينهما، مما يشير إلى أن هذه الأسطح ليست مستوية بدقة (تماماً) ولكنها محدبة قليلاً (الائتمان: أولف سيفرت (credit: Ulf Seifert)).

تستخدم الأفلام الرقيقة في العديد من التطبيقات الأخرى، سواءً في الطبيعة أو في التصنيع. تتميز أجنحة بعض العث والفرشات بألوان قزحية. تتكون هذه الألوان بسبب تداخل الأفلام الرقيقة. بالإضافة إلى التصبغ، يتأثر لون الجناح إلى حد كبير بالتداخل البناء لبعض الأطوال الموجية المنعكسة من سطحه المغلف بفيلم. تقدم بعض الشركات المصنعة للسيارات وظائف (خدمات) الطلاء الخاصة التي تستخدم تداخل الأفلام الرقيقة لإنتاج ألوان تتغير مع الزاوية. يعتمد هذا الخيار المكلف (باهظ الثمن) على الاختلاف بين أطوال مسار الفيلم المختلفة مع الزاوية. يُستخدم تداخل الأفلام الرقيقة أو شبكة الحيود الضوء أو الصور المجسمة لتحضير سمات الأمان على بطاقات الائتمان والأوراق النقدية ورخص القيادة والعناصر المماثلة المعرضة للتزوير. في وقت مبكر من عام 1998، قادت أستراليا الطريق مع سندات الدولار المطبوعة على البولييمر مع سمة أمان هي شبكة حيود الضوء، مما يجعل من الصعب تزوير العملة. تستخدم بلدان أخرى، مثل كندا ونيوزيلندا وتايوان، تقنيات مماثلة، بينما تشتمل العملة الأمريكية على تأثير تداخل الأفلام الرقيقة.



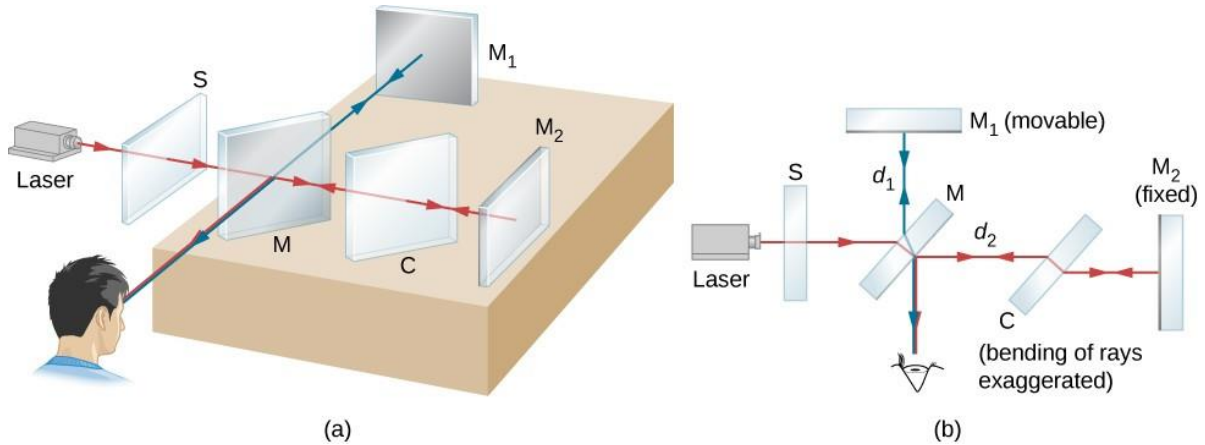
### 5.3 | مقياس ميكلسون للتداخل The Michelson interferometer

#### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- شرح التغيرات الحاصلة في الأهداب باستخدام مقياس ميكلسون للتداخل الناتج عن حركة المرآة.
- شرح التغيرات الحاصلة في الأهداب باستخدام مقياس ميكلسون للتداخل الناتج عن التغيرات في الوسط.

يعد مقياس ميكلسون للتداخل، الذي تم اختراعه من قبل الفيزيائي الأمريكي Albert A. Michelson، الذي عاش في الفترة (1852-1931)، أداة دقيقة تنتج أهداب تداخل من خلال تقسيم الشعاع الضوئي إلى جزأين ثم إعادة تجميعهما بعد أن تسلك مسارات بصرية مختلفة. يوضح الشكل 16.3 مقياس التداخل ومسار حزمة ضوئية صادرة عن المصدر S، حيث هذا المصدر هو صفيحة زجاجية تعمل على بعثرة الضوء الصادر عن مصباح أحادي اللون بطول الموجة  $\lambda_0$ . تصطدم هذه الحزمة بمرآة نصف مفضضة M، حيث ينعكس نصفها على الجانب ويمر نصفها عبر المرآة. ينتقل الضوء المنعكس إلى مرآة مستوية قابلة للحركة  $M_1$ ، حيث ينعكس مرة أخرى من خلال M إلى المراقب (الناظر). ينعكس النصف النافذ، الذي تابع المرور، بواسطة المرآة الثابتة  $M_2$  ثم باتجاه المراقب بواسطة M.

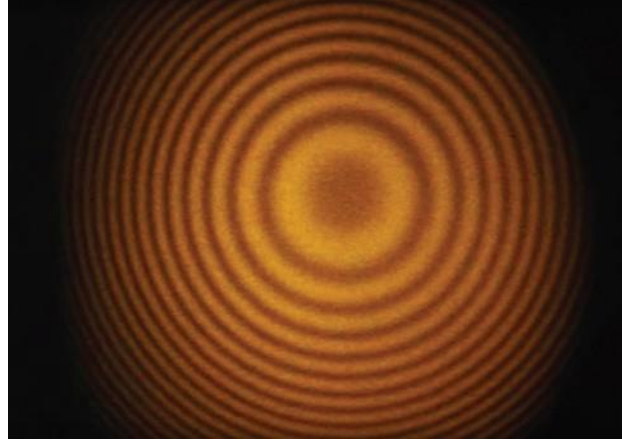


**الشكل 16.3: (a) مقياس ميكلسون للتداخل. مصدر الضوء الممتد عبارة عن صفيحة زجاجية مبعثرة لضوء الليزر. (b) منظر علوي لمقياس للتداخل.**

لأن كلتا الحزمتين تتبعان من النقطة نفسها من المصدر، فهي متماسكة (مترابطة تم شرح حالة التماسك سابقاً)، وبالتالي تتداخل. لاحظ من الشكل أن حزمة واحدة تمر عبر M ثلاث مرات، والأخرى تمر مرة واحدة فقط. لضمان أن كلا الحزمتين تعبران ثخانة الزجاج نفسها، يتم وضع لوحة تعويضية C من الزجاج الشفاف في المسار الذي يحتوي على  $M_2$ . هذه اللوحة هي نسخة مكررة من M (بدون طلاء الفضة) وعادةً ما يتم قطعها من قطعة الزجاج نفسها المستخدمة لإنتاج M مع وجود لوحة التعويض في مكانها (C)، يرجع أي فرق طوري بين الحزمتين فقط إلى الفرق في المسافات التي يجتازونها، ويكون الفرق في مسار الحزمتين عند إعادة توحيدها هو  $2d_1 - 2d_2$ ، حيث  $d_1$  هي المسافة بين M و  $M_1$ ، و  $d_2$  هي المسافة بين M و  $M_2$ . لنفترض أن هذا الاختلاف في المسار هو عدد صحيح من الأطوال الموجية  $m\lambda_0$ ، ثم يحدث تداخل بناءً ويظهر خيال مضى للنقطة عن المصدر، وتكون مرئية من قبل المراقب. الآن يخضع الضوء من أي نقطة أخرى من المصدر، الذي له حزمتان لهما اختلاف المسار نفسه، إلى تداخل بناءً

وينتج خيال مضيء. تعد مجموعة الأحيولة النقطية هذه هدباً مضيئاً يقابل اختلاف المسار  $m\lambda_0$  (الشكل 17.3). عندما يتم نقل  $M_1$  مسافة  $\Delta d = \lambda_0/2$ ، يتغير فرق المسار هذا بمقدار  $\lambda_0$ ، وينتقل كل هدب كان مشغولاً من قبل هدب مجاور آخر. وبالتالي، من خلال حساب عدد الأهداب  $m$ ، التي تمر بنقطة معينة عند نقل  $M_1$ ، يمكن للمراقب قياس حالات الإزاحة الدقيقة التي تكون صغيرة بالمقارنة مع طول الموجة، من خلال العلاقة التالية:

$$\Delta d = m \frac{\lambda_0}{2} \quad (3.7)$$



**الشكل 17.3:** الأهداب الناتجة من مقياس ميكلسون للتداخل (الانتمان: "مقاطع فيديو سيلز" / يوتيوب).  
(credit: "SILLAGESvideos"/YouTube)

### مثال 5.3

#### قياسات دقيقة للمسافة بواسطة مقياس ميكلسون للتداخل:

يُستخدم ضوء الليزر الأحمر بطول موجة  $630 \text{ nm}$  في مقياس ميكلسون للتداخل مع الحفاظ على المرآة  $M_1$  ثابتة والمرآة  $M_2$  قابلة للحركة (تحريكها مسافة معينة)، الأهداب التي تم العثور عليها لأجل الإزاحة السابقة كانت عند نقطة التعامد بالنسبة للناظر. أوجد المسافة التي تم تحريك المرآة  $M_2$  بها عن الخط المرجعي للحصول على هدب واحد.

#### خطة الحل:

نستخدم شرط التداخل في مقياس ميكلسون للتداخل لإيجاد المسافة  $\Delta d$  التي تم تحريك المرآة  $M_2$  بها (الشكل 16.3).

#### الحل:

للحصول على ضوء الليزر الأحمر  $630 \text{ nm}$ ، من أجل كل هدب عند نقطة التقاطع يكون  $(m=1)$ ، المسافة التي تحركت بها المرآة  $M_2$  إذا كانت المرآة  $M_1$  تحافظ على ثباتها هي:

$$\Delta d = m \frac{\lambda_0}{2} = 1 \times \frac{630 \text{ (nm)}}{2} = 0.315 \mu\text{m}$$

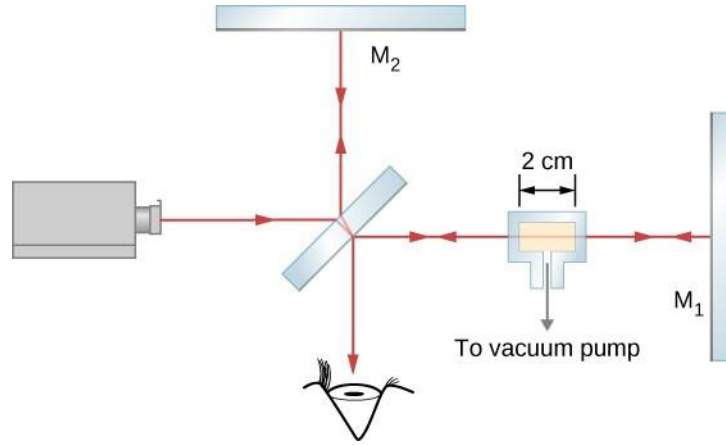
#### ملاحظة:

أحد التطبيقات المهمة لهذا المقياس هو إيجاد مقياس معياري. كما هو مذكور في فقرة **الوحدات والقياس** (<http://cnx.org/content/m58268/latest/>) تم تعريف طول المقياس المعياري على أنه إزاحة المرآة في مقياس ميكلسون للتداخل بنحو 1,650,763.73 من الطول الموجي لهدب معين من الكريبتون 86 (krypton-86) الموجود في أنبوب انقراض غازي.

### مثال 6.3

#### قياس قرينة الانكسار للغاز

في إحدى أذرع مقياس ميكلسون، يتم وضع حجرة زجاجية مع مرفقات لإخلاء ما بداخلها ووضع الغازات فيها. عد الفراغ (العرض) داخل الحاوية (الحجرة) 2 سم. في البداية، تكون الحاوية فارغة. كما يتم السماح للغاز بالدخول ببطء إلى الغرفة، تلاحظ أن الأهداب المظلمة تتخطى خطأ مرجعياً (أي الخط المرجعي يعبر من داخلها) في مجال المراقبة. في الوقت الذي تملأ فيه الحجرة بالضغط المرغوب فيه، تكون قد أحصيت 122 هدباً لأجل الإزاحة السابقة عن الخط المرجعي (إزاحة المرآة). طول موجة الضوء المستخدم هو  $632.8 \text{ (nm)}$ ، ما هي قرينة الانكسار لهذا الغاز؟



#### خطة الحل:

تُشكل  $m=122$  هدباً الفرق بين عدد الأطوال الموجية، التي تتناسب مع الحجرة وهي فارغة، وعدد الأطوال الموجية التي تتناسب مع الحجرة نفسها عندما تمتلئ بالغاز. ويكون طول الموجة في الحجرة، وهي مملوءة، أقصر بمقدار المعامل  $n$ ، الذي يعبر عن قرينة الانكسار.

#### الحل:

ينتقل الشعاع مسافة  $t = 2 \text{ (cm)}$  إلى اليمين عبر الغرفة الزجاجية ومسافة أخرى  $t$  إلى اليسار عند الانعكاس. المسافة المقطوعة الكلية هي  $L = 2t$  عندما تكون الحجرة فارغة، ويكون عدد الأطوال الموجية التي تناسب هذه الحجرة:

$$N_0 = \frac{L}{\lambda_0} = \frac{2t}{\lambda_0}$$

حيث:  $\lambda_0 = 632.8 \text{ (nm)}$  هي الطول الموجي في الفراغ للضوء المستخدم. لكن في أي وسط آخر، فإن الطول الموجي هو  $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$  وبالتالي عدد أطوال الأمواج وعدد الأهداب المشاهدة في الانتقال هو:

$$m = N - N_0$$

$$m = \frac{2t}{\lambda_0/n} - \frac{2t}{\lambda_0}$$

$$m = \frac{2t}{\lambda_0}(n - 1)$$

وعند الحل لأجل  $(n-1)$  نحصل على:


$$n - 1 = m \left( \frac{\lambda_0}{2t} \right) = 122 \left( \frac{632.8 \times 10^{-9} \text{ m}}{2 \times 10^{-2} \text{ m}} \right) = 0.0019$$

وبالتالي يكون:

$$n = 1.0019$$

## ملاحظة

تكون قرائن انكسار الغازات قريبة جداً من تلك الخاصة بالفراغ (في حالة الفراغ)، بحيث نعتبرها عادةً مساوية (1). الفرق بين (1) و (1.0019) صغير جداً لدرجة أن القياس يتطلب تقنية حساسة بشكل مماثل لتقنية مقياس التداخل، على سبيل المثال، لا يمكننا أن نأمل في قياس هذه القيمة باستخدام تقنيات تعتمد ببساطة على قانون سنيل (قانون الانعكاس والانكسار أي قوانين سنيل ديكرت).

 **3.3 تحقق من تفهمك على الرغم من أن  $m$  هو عدد الأهداب التي تمت ملاحظتها، هو عدد صحيح، وهو غالباً ما يعتبر عدم اليقين صفرًا، من الناحية العملية، من السهل جداً فقدان المسار عند حساب عدد الأهداب. في المثال 3.6، إذا كنت قد سهوت (غاب عنك) خمسة أهداب عند تقدير الرقم  $m = 122$ ، (a) هل تكون قيمة قرينة الانكسار، التي تم حسابها في المثال 3.6، كبيرة جداً أو صغيرة جداً؟ (b) وكم هي؟**

## خطة حل المسائل في الأمواج البصرية

- الخطوة (1): دراسة الحالة لتحديد ما إذا كان التداخل ينطوي عليها. حدد ما إذا كانت حالة تداخل الشقوق أو الأغشية الرقيقة أو مقياس التداخل تؤخذ في الحسبان في المسألة المطروحة.
- الخطوة (2): في حالة وجود شقوق، لاحظ أن شبكات الحيود أو الشقوق المزدوجة تنتج أنماط تداخل متشابهة للغاية، لكن شبكة الحيود لها قمم عظمى ضيقة (أي أكثر حدة). تتميز الأنماط ذات الشق الواحد بقمة عظمى مركزية كبيرة وقيم عظمى أصغر على الجانبين.
- الخطوة (3): في حالة تداخل الفيليم الرقيق أو مقياس التداخل، لاحظ فرق طول المسار بين الأشعة التي تتداخل. تأكد من استخدام طول الموجة في الوسط المعني، لأنه يختلف عن الطول الموجي في الفراغ. لاحظ أيضاً وجود تحول إضافي في الطور بمقدار  $\frac{\lambda}{2}$  عندما ينعكس الضوء من وسط به قرينة أكبر.
- الخطوة (4): حدد بالضبط ما يجب تحديده في المسألة (تحديد المجهول). وتعد كتابة قائمة بالمعطيات مفيدة في هذه الحالة. ارسم مخططاً للحالة. ثم ضع العلامات المفيدة على الرسم.
- الخطوة (5): قم بإعداد قائمة بما يمكن استخلاصه أو يمكن استنتاجه من المسألة كما هو مذكور في الأمثلة السابقة (يتم هنا تحديد المعاريف).
- خطوة (6): حل المعادلة المناسبة للمقدار المراد تحديده (المجهول) وأدخل القيم المعروفة: الشقوق وشبكية الحيود واستخدام حدود معادلات رايلي Rayleigh.
- الخطوة (7): بالنسبة إلى تداخل الأغشية الرقيقة، يكون لديك تداخل بناء من أجل تحول كلي يمثل عدداً صحيحاً من مضاعفات الأطوال الموجية. لديك تداخل هدام لتحول كلي يمثل عدداً نصفياً من الأطوال الموجية. ضع في اعتبارك دائماً أن القمة إلى القمة تكون تداخل بناء، بينما تكون القمة إلى القاع تداخل هدام.
- الخطوة (8): تحقق لمعرفة ما إذا كانت الإجابة معقولة: هل الإجابة منطقية؟ لا يمكن أن تكون الزوايا في أنماط التداخل أكبر من 90 درجة، على سبيل المثال.

## مراجعة الفصل الثالث:

### الكلمات المفتاحية:

- الأمواج المتماسكة: أمواج في الطور نفسه أو توجد علاقة تربط بين الأطوار.
- الهدب: أنماط مضيئة أو مظلمة من التداخل.
- غير متماسكة: أمواج لها علاقة عشوائية للطور.
- مقياس التداخل: آلة (جهاز) تستخدم تداخل الأمواج لإجراء قياسات معينة.
- أحادي اللون: ضوء يتكون من طول موجة واحدة فقط.
- حلقات نيوتن: نمط التداخل الدائري الناتج عن التداخل بين ضوء ينعكس على سطحين نتيحة الفجوة الطفيفة بينهما.
- المرتبة: عدد صحيح  $m$  المستخدم في المعادلات للتداخل البناء والهدم لشق مزدوج.
- القمة العظمى الرئيسية: أشد أهداب التداخل إضاءة والمرئية من خلال الشقوق المتعددة.
- القمة العظمى الثانوية: أهداب تداخل مضاءة، لكن أقل شدة من القمة العظمى الرئيسية.
- تداخل الأغشية الرقيقة: هو التداخل بين الضوء المنعكس من الأسطح المختلفة للفيلم الرقيق.

### المعادلات المفتاحية:

- $\Delta l = m\lambda, \text{ for } m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$  (التداخل البناء)
- $\Delta l = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda, \text{ for } m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$  (التداخل الهدم)
- $\Delta l = d \sin \theta$  (اختلاف طول المسار للأمواج من شقين إلى نقطة مشتركة على الشاشة)
- $d \sin \theta = m\lambda, \text{ for } m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$  (التداخل البناء)
- $d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda, \text{ for } m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$  (التداخل الهدم)
- $y_m = \frac{m\lambda D}{d}$  (المسافة من الحد الأقصى المركزي إلى هدب مضاء ذي مرتبة  $m$ )
- $\Delta d = m \frac{\lambda_0}{2}$  (الإزاحة المقاسة بواسطة مقياس التداخل نوع ميكلسون)

### الملخص

#### 1.3 التداخل مزدوج الشق (تداخل شقي Young):

- أعطت تجربة شقي يونغ دليلاً قاطعاً على أن الضوء له طبيعة موجية.
- يتم الحصول على نمط التداخل من خلال تراكب الضوء من شقين.

#### 2.3 رياضيات التداخل:

- في الحيود مزدوج الشق، يحدث تداخل بناءً عندما تكون  $d \sin \theta = m\lambda$  (من أجل  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ ) حيث:
- $d$  هي المسافة بين الشقوق،  $\theta$  هي الزاوية المرتبطة باتجاه ورود الشعاع، و  $m$  هي مرتبة التداخل.
- يحدث التداخل الهدم عندما تكون  $d \sin \theta = (m + 1)\lambda$  (من أجل  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ ).

### 3.3. التداخل متعدد الشقوق:

- عند التداخل من شقوق متعددة (حيث تكون  $N > 2$ ) تنتج القمة العظمى الأساسية والثانوية، حيث  $N$ : عدد الشقوق.
- مع زيادة عدد الشقوق، تزداد شدة القمة العظمى الرئيسية وينخفض العرض (عرض الهدب).

### 3.4. التداخل في الأفلام الرقيقة:

- عندما ينعكس الضوء من وسط له قرينة انكسار أكبر من قرينة انكسار الوسط الذي كان فيه، يحدث تغير في الطور بمقدار  $180$  درجة (أو إزاحة بزاوية  $\frac{\lambda}{2}$ ).
- يحدث تداخل فيلم رقيق بين الضوء المنعكس من السطوح العلوية والسفلية للفيلم. بالإضافة إلى اختلاف طول المسار، ويمكن أن يكون هناك تغير في الطور.

### 3.5. مقياس ميكلسون لقياس التداخل:

عندما تحرك المرآة في أحد أذرع جهاز القياس مسافة  $\frac{a}{2}$ ، ينتقل كل هدب في نمط التداخل إلى الموضع الذي كان يشغله الهدب المجاور سابقاً.

### أسئلة نظرية:

#### 1.3. التداخل مزدوج الشق (تداخل شقي يونغ):

1. تقسم تجربة شقي يونغ شعاع ضوء واحد إلى مصدرين (ثانويين). هل سيتم الحصول على النمط نفسه لمصدرين مستقلين للضوء، مثل المصاييح الأمامية لسيارة بعيدة؟ فسّر ذلك.
2. هل من الممكن القيام بتجربة عملية لا يوجد فيها سوى تداخل هدام؟ فسّر ذلك.
3. لماذا لا ينتج مصباحا صوديوم صغيران، محكما الإغلاق معاً، نمط تداخل على شاشة بعيدة؟ ماذا لو تم استبدال مصاييح الصوديوم بمؤشرين ليزر مثبتين بالقرب من بعضهما؟

#### 2.3. رياضيات التداخل:

4. لنفترض أنك تستخدم الشق المزدوج نفسه لإجراء تجربة شقي يونغ في الهواء ثم كرر التجربة في الماء. هل تصبح الزوايا المتشكلة في الأجزاء نفسها لنمط التداخل أكبر أم أصغر؟ هل يتغير لون الضوء؟ فسّر ذلك.
5. لماذا يتم استخدام الضوء أحادي اللون في تجربة الشق المزدوج؟ ماذا سيحدث لو تم استخدام الضوء الأبيض؟

#### 3.3. التداخل في الأفلام الرقيقة:

6. ما تأثير زيادة زاوية الوتد (الاسفين) على تباعد أهداب التداخل؟ إذا كانت زاوية الوتد (الاسفين) كبيرة جداً، فلن يتم ملاحظة هدب. فسّر ذلك؟
7. كيف يكون الفرق في المسارات المأخوذة لموجتين من الضوء متوافقتين في الطور إذا كانتا تتداخلان بشكل بناء أو هدام؟ كيف يمكن أن يتأثر ذلك بواسطة الانعكاس؟ بواسطة الانكسار؟
8. هل هناك تغير في طور الضوء المنعكس من أي سطح من العدسات اللاصقة التي تطفو على طبقة دمعية لشخص؟ علماً أن قرينة انكسار العدسة نحو  $1.5$ ، وسطحها العلوي جاف.
9. عند وضع عينة على شريحة مجهرية، يتم وضع غطاء زجاجي فوق قطرة ماء على شريحة زجاجية. يمكن أن ينعكس الضوء الموجود من أعلى الغطاء الزجاجي وأسفله ومن الشريحة الزجاجية أسفل قطرة الماء. في أي السطوح سيكون هناك تغيير في الطور للضوء المنعكس؟

10. أجب عن السؤال أعلاه إذا كان السائل بين قطعتي الزجاج عبارة عن ثاني كبريتيد الكربون.
11. أثناء التفكير في القيمة الغذائية لشريحة لحم الخنزير، لاحظت وجود قوس قزح من اللون ينعكس من سطحه الرطب. اشرح سببه؟
12. يلاحظ المخترع أن فقاعة الصابون مظلمة في أنحفها (أخف أجزاءها) ويدرك أن التداخل الهدام يحدث لجميع أطوال الأمواج. كيف يمكن أن تستخدم هذه المعرفة لصنع طلاء غير عاكس للعدسات حيث يكون فعالاً في جميع الأطوال الموجية؟ بمعنى، ما هي القيم التي ستكون هناك على قرينة الانكسار وثخانة الطلاء؟ كيف يمكن أن يكون هذا غير عملي (متى يصعب تحقيقه)؟
13. الطلاء غير العاكس، مثل الذي تم وصفه في المثال 3.3، يعمل بشكل مثالي لطول موجة أحادية ولسقوط عمودي للضوء. ماذا يحدث للأطوال الموجية الأخرى واتجاهات السقوط الأخرى؟ كن دقيقاً بالإجابة (حدد بدقة).
14. لماذا يكون أكثر صعوبة رؤية هدب التداخل لضوء ينعكس من قطعة سميكة من الزجاج من فيلم رقيق؟ هل سيكون من الأسهل إذا كان قد استخدمت ضوء أحادي اللون؟

### 5.3. مقياس ميكلسون للتداخل:

15. صف كيف يمكن استخدام مقياس ميكلسون لقياس قرينة انكسار الغاز (بما في ذلك الهواء).

### مسائل:

#### 2.3. رياضيات التداخل:

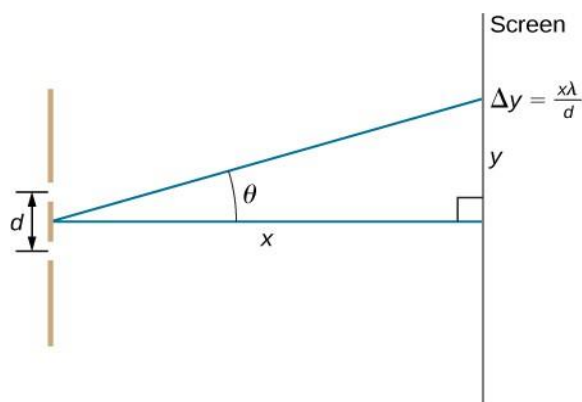
16. في أي زاوية، تكون القمة العظمى من المرتبة الأولى للضوء الأزرق ذي طول الموجة  $(nm) 450$  الذي يرد على الشقوق المزدوجة والتي يفصل بينها مسافة تساوي  $(mm) 0.0500$ ؟
17. احسب زاوية القمة العظمى من المرتبة الثالثة وهو ضوء أصغر طول موجته  $(nm) 580$  يرد على الشقوق المزدوجة المفصولة بمسافة  $(mm) 0.100$ .
18. ما هو البعد الفاصل بين شقين، بحيث يتكون للضوء البرتقالي ذي طول الموجة  $610 nm$  قمة عظمى أولى بزاوية  $30.0$  درجة؟
19. أوجد المسافة بين الشقين التي تنتج القمة الصغرى الأولى للضوء البنفسجي ذي طول الموجة  $410 nm$  بزاوية  $45.0$  درجة.
20. احسب طول الموجة للضوء الذي له القمة الصغرى الثالثة بزاوية  $30.0$  درجة عند وروده على الشقوق المزدوجة المفصولة بمسافة  $(\mu m) 3.00$  عن بعضها. أظهر بوضوح كيفية اتباعك خطوات (خطة حل مسائل بصريات الموجة: Wave Optics)، الموجودة في نهاية الفصل.
21. ما هو طول موجة للضوء الوارد على الشقوق المزدوجة التي تفصل بينها مسافة  $(\mu m) 2.00$ ، إذا كانت القمة العظمى من المرتبة الثالثة تحدث عند زاوية  $60.0$  درجة؟
22. عند أي زاوية تتكون القمة العظمى من المرتبة الرابعة عند التطبيق في المثال السابق؟
23. ما هو أعلى مرتبة للقمة العظمى للضوء ذي طول الموجة  $400 nm$  يرد على الشقوق المزدوجة المفصولة عن بعضها بمسافة  $(\mu m) 25.0$ ؟
24. ابحث عن أكبر طول موجة للضوء الذي يرد على الشقوق المزدوجة المفصولة بمسافة  $(\mu m) 1.20$ ، وحيث تكون القمة العظمى من المرتبة الأولى. هل هذا في الجزء المرئي من الطيف؟
25. ما هي أصغر مسافة بين شقين من شأنها أن تُنتج القمة العظمى من المرتبة الثانية للضوء الأحمر بطول موجة  $720 nm$ ؟

26. (أ) ما هي أصغر مسافة بين شقين من شأهما أن تُنتج القمة العظمى من المرتبة الثانية لأي ضوء مرئي؟ (ب) لجميع أطواف الضوء المرئي؟

27. (أ) إذا كانت القمة العظمى من المرتبة الأولى للضوء أحادي اللون الوارد على شق مزدوج بزاوية 10.0 درجات، عند أي زاوية تكون القمة العظمى من المرتبة الثانية؟ (ب) ما هي زاوية القمة الصغرى الأولى؟ (ج) ما هي أعلى مرتبة ممكنة هنا؟

28. يظهر أدناه شق مزدوج يقع على مسافة  $x$  من الشاشة، مع التعبير عن المسافة من مركز الشاشة بواسطة المقدار  $y$  عندما تكون  $d$  المسافة بين الشقوق كبيرة نسبياً، تظهر العديد من البقع المضئية، والتي تُسمى الأهداب. بيّن ذلك، بالنسبة للزوايا الصغيرة ( $\sin \theta = \theta$ ) (حيث  $\theta$  تقدر بالراديان)، ويتم إعطاء المسافة بين الأهداب بالعلاقة التالية:

$$\Delta y = \frac{x\lambda}{d}$$



29. باستخدام نتيجة المسألة السابقة، (أ) حساب المسافة بين الأهداب للضوء ذي طول موجة  $633 \text{ nm}$  الوارد على الشقوق المزدوجة المفصولة بمسافة  $0.0800 \text{ (mm)}$ ، وتقع على بعد  $3.00 \text{ (m)}$  من الشاشة. (ب) ما هي المسافة بين الأهداب إذا كان الجهاز بأكمله مغموراً في الماء، حيث تكون قرينة الانكسار للماء هي 1.33.

30. باستخدام نتيجة المسألتين السابقتين، ابحث عن طول الموجة للضوء الذي ينتج أهداب مفصولة بمقدار  $7.50 \text{ (mm)}$  وتقع على شاشة تبعد  $2.00 \text{ (m)}$  عن الشقوق المزدوجة المفصولة بمقدار  $1.20 \text{ (mm)}$ ؟

31. في تجربة يونغ ذات الشقين، البعد بين القمة العظمى الخامسة هو  $2.8 \text{ (cm)}$  عن القمة العظمى المركزية على شاشة تبعد  $1.5 \text{ (m)}$  عن الشقوق. إذا كانت الشقوق مفصولة بمقدار  $0.15 \text{ (mm)}$ ، فما هو طول موجة الضوء المستخدم؟

32. بفرض المصدر في تجربة يونغ يرسل اثنين من الأطوال الموجية. على شاشة العرض، توجد القمة العظمى الرابعة لطول موجة واحدة في المكان نفسه للقمة العظمى الخامسة لطول الموجة الأخرى، ما هي النسبة بين أطوال الموجتين؟

33. إذا كان ضوء بطول موجتين  $500 \text{ nm}$  و  $650 \text{ nm}$  يُضيء شقين مفصولين بمسافة  $0.50 \text{ (mm)}$ ، ما هو مقدار البعد بين القمم العظمى الرئيسية من المرتبة الثانية من أجل هذه الأطوال الموجية على شاشة تبعد مسافة  $2.0 \text{ (m)}$  عن هذه الشقوق؟

34. يرد الضوء الأحمر بطول موجة  $700 \text{ nm}$  على شق مزدوج مفصولة مسافة  $400 \text{ nm}$ . (أ) في أي زاوية تتشكل القمة العظمى من المرتبة الأولى في حالة الانكسار؟ (ب) ما هو الشيء غير المعقول بشأن هذه النتيجة؟ (ج) ما هي الافتراضات غير المعقولة أو المتضاربة؟



### 3.3. التداخل متعدد الشقوق:

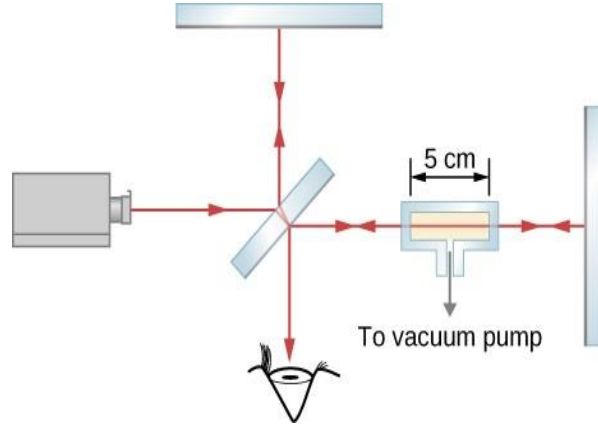
35. بفرض لدينا عشرة ثغوب متساوية البعد بينها بمقدار  $0.25 \text{ (mm)}$  ومضائة بضوء أصفر ذي طول موجة  $580 \text{ nm}$ ، (أ) ما هي المواضع الزاوية للقمم العظمى الرئيسة الثالثة والرابعة؟ (ب) ما هو مقدار البعد بين هذه القمم العظمى على شاشة تبعد  $2 \text{ (m)}$  عن هذه الشقوق؟
36. يمكن حساب عرض الأهداب المضائة كفاصل بين الحدين المظلمين المتجاورين على كلا الجانبين. ابحث عن العرض المقابل للزاوية للهدبين المضئين الثالث والرابع من المسألة السابقة؟
37. لأجل نمط تداخل ثلاثي الشقوق، حدد نسبة شدة الذروة في القمة العظمى الثانوية إلى القمة العظمى الرئيسة؟
38. ما هو العرض المقابل لزاوية الهدب المركزي لنمط تداخل مؤلف من: (أ)  $20$  شقاً مفصولة بمقدار  $(d = 2.0 \times 10^{-3} \text{ (m)})$ ؟ (ب)  $50$  شقاً مع مقدار التباعد نفسه  $(d)$ ؟ افترض أن  $\lambda = 600 \text{ nm}$ .

### 4.3. التداخل في الأفلام الرقيقة:

39. يبلغ ثخانة فقاعة الصابون  $100 \text{ nm}$  ومضائة بضوء يرد عمودياً على سطحها. ما هو طول الموجة ولون الضوء المرئي الذي ينعكس بشكل بناء، مع افتراض أن قرينة الانكسار هي ذاتها قرينة الانكسار للماء؟
40. تبلغ ثخانة بقعة نفطية (اوكتان) على الماء  $120 \text{ (nm)}$ ، وتضاء بفعل الضوء الأبيض الوارد بشكل عمودي على سطحها. ما هو اللون الذي يظهر به النفط (ما هو طول الموجة الأكثر انعكاساً بشكل بناء)، بافتراض أن قرينة الانكسار هي  $1.40$ ؟
41. احسب القمة الصغرى لثخانة بقعة النفط الموجودة على الماء، التي تظهر باللون الأزرق عند الإضاءة بالضوء الأبيض الوارد بشكل عمودي على سطحها. بفرض طول موجة اللون الأزرق  $470 \text{ nm}$  وقرينة انكسار النفط هي  $1.4$ ؟
42. ابحث عن القمة الصغرى لثخانة فقاعة الصابون، التي تظهر باللون الأحمر عند الإضاءة بالضوء الأبيض الوارد بشكل عمودي على سطحها. افترض أن طول الموجة  $680 \text{ nm}$ ، وأن قرينة الانكسار هي نفسها قرينة الانكسار للماء.
43. تبلغ ثخانة فيلم الماء الصابوني ( $n=1.33$  قرينة الانكسار) الموجود على سطح لوح التقطيع البلاستيكي  $233 \text{ nm}$ . ما هو اللون الذي ينعكس بشدة إذا كان مضاءً بشكل عمودي على سطحه؟
44. ما هي أصغر ثلاثة ثخانات غير صفيرية من الماء الصابوني ( $n = 1.33$ ) الموجود على بلكري كلاس وظاهر بلون أخضر (يعكس بشكل بناء ضوء طول موجته  $520 \text{ nm}$  عند الإضاءة العمودية بواسطة الضوء الأبيض)؟
45. لنفترض أن لديك نظام عدسات يستخدم بصورة رئيسة الضوء الأحمر ذا طول موجة  $700 \text{ nm}$ . ما هو ثاني أنحف طلاء من فلوريت (فلور المغنيزيوم) الذي سيكون غير عاكس لهذا الطول الموجي؟
46. (أ) عندما تصبح فقاعة الصابون رقيقة تصبح مظلمة، فإن فرق طول المسار يصبح صغيراً مقارنةً بطول موجة الضوء، ويحدث إزاحة في الطور عند السطح العلوي. إذا أصبحت مظلمة عندما يكون فرق طول المسار أقل من ربع طول الموجة، فما هي الثخانة التي تكون عندها الفقاعة مظلمة لأجل جميع الأطوال الموجية المرئية؟ افترض أن قرينة الانكسار هي نفسها للماء. (ب) ناقش هشاشة الفيلم بالمقارنة مع الثخانة الموجودة.
47. لتوفير المال من خلال جعل الطائرة العسكرية غير مرئية للرادار، يقرر المخترع أن يغطي هذه المواد بمادة غير عاكسة ولها قرينة انكسار تساوي  $1.20$ ، والتي ستوضع كعازل ما بين الهواء وسطح الطائرة. هذا، كما يقول، ويجب أن يكون أخص بكثير من تصميم قاذفات الشبح. (أ) ما الثخانة التي يجب أن تكون للطلاء لمنع انعكاس أمواج رادار ذات الطول الموجي  $4.00 \text{ (cm)}$ ؟ (ب) ما هو الشيء غير المعقول بشأن هذه النتيجة؟ (ج) ما هي الافتراضات غير المعقولة أو المتضاربة؟

### 5.3. مقياس ميكلسون للتداخل:

48. بفرض لدينا مقياس ميكلسون له ذراعان متساويان. يستخدم ضوء الزئبق بطول الموجة  $540 \text{ nm}$  ويوجد هذب مستقر. يتم نقل واحد من الأذرع مقدار  $(1.5 \mu\text{m})$ ، كم عدد الأهداب سوف تعبر مجال الرصد؟
49. ما هي المسافة التي تحركها المرآة القابلة للحركة لمقياس التداخل والتي تتوافق مع 1500 هدباً تمر بنقطة من شاشة المراقبة؟ افترض أن مقياس التداخل مضاء بشعاع طول موجته  $606 \text{ nm}$  طيفي من الكريبتون 86.
50. عند تحريك المرآة القابلة للحركة لمقياس التداخل مسافة  $(2.40 \times 10^{-5} \text{ m})$ ، يمر 90 هدباً بنقطة على شاشة المراقبة. ما هو طول الموجة للضوء المستخدم؟
51. في مقياس التداخل لميكلسون، يُستخدم ضوء طول موجته  $632.8 \text{ nm}$  من ليزر He-Ne. عندما يتم نقل إحدى المرايا من خلال المسافة  $D$ ، تنتقل 8 أهذاب إلى ما بعد مجال الرؤية. ما هي قيمة المسافة  $D$ ؟
52. توضع حجرة طولها  $5.0 \text{ cm}$  مع نوافذ مسطحة متوازية عند الأطراف في أحد أذرع مقياس التداخل من نمط ميكلسون (انظر أدناه). يبلغ طول الموجة المستخدمة  $500 \text{ nm}$  في الفراغ. حينما يتم ضخ كل الهواء خارج الغرفة، يمر 29 هدباً بنقطة على شاشة المراقبة. ما هي قرينة الانكسار للهواء؟

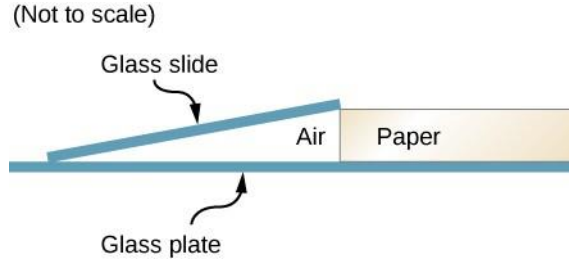


### مسائل إضافية:

53. بفرض ضوء طول موجته  $600 \text{ nm}$  والفواصل للشق نحو  $0.12 \text{ mm}$ ، ما هي المواضع الزاوية للقمم العظمى الأولى والثالثة في حالة نمط التداخل ذي الشق المزدوج؟
54. إذا تم تغيير مصدر الضوء في المسألة السابقة، فإن المواضع الزاوي للقمة العظمى الثالثة يكون  $0.57$  درجة. ما هو طول موجة الضوء المستخدم في هذه الحالة؟
55. بفرض لدينا ضوء أحمر طول موجته  $\lambda = 710 \text{ nm}$  ينير الشقوق المزدوجة المفصولة بمسافة  $d = 0.150 \text{ mm}$ ، والبعد بين الشاشة والشقوق  $3 \text{ m}$ . (أ) أوجد المسافة على الشاشة بين القمة العظمى المركزية والقمة العظمى الثالثة. (ب) ما هي المسافة بين القمم العظمى الثانية والرابعة؟
56. بفرض لدينا مصدران في الطور نفسه وتنبعث منهما أمواج طولها  $\lambda = 0.42 \text{ m}$ ، حدد ما إذا كان التداخل من النوع البناء أو الهدام الحادث في النقاط التي تبلغ مسافتها عن المصدرين (أ)  $0.84$  و  $0.42$ ، (ب)  $0.21$  و  $0.42$ ، (ج)  $1.26$  و  $0.42$ ، (د)  $1.87$  و  $1.45$ ، (هـ)  $0.63$  و  $0.84$  و (و)  $1.47$  و  $1.26$ ، حيث جميع المسافات تقدر بالمتري  $\text{m}$ .

57. بفرض لدينا شقان البعد بينهما  $4.0 \times 10^{-6} m$  ومضاءان عن طريق ضوء طول موجته  $600 nm$ . ما هو أعلى مرتبة لهذب ممكن الحصول عليه في نمط التداخل الحادث؟
58. لنفترض أن أعلى هذب يمكن ملاحظته هو الثامن في تجربة شقي يونغ، حيث يتم استخدام ضوء طول موجته  $550 nm$ . ما هو الحد الأدنى للمسافة الفاصلة بين الشقين؟
59. نمط التداخل من ضوء الليزر He-Ne طول موجته  $632.9 nm$  ،  $\lambda = 632.9 nm$  ، تمر عبر شقين متباعدين بمسافة مقدارها  $0.031 mm$  ، والذي يقع على شاشة تبعد مسافة  $10.0 m$ . المطلوب تحديد المسافة بين الأهداب المضاءة المجاورة.
60. يتم تنفيذ تجربة يونغ المزدوجة الشق وهي مغمورة الماء ( $n = 1.333$ ). حيث مصدر الضوء هو ليزر He-Ne ، وطول موجته  $632.9 nm$  في الفراغ. (أ) ما هو طول الموجة لهذا الضوء في الماء؟ (ب) ما هي زاوية الحد الأقصى للطلب الثالث حيث الشقان مفصولان بمسافة مقدارها  $0.100 nm$ ؟
61. من المقرر إجراء تجربة يونغ ذات شقين بحيث ظهر الفاصل بين الأهداب المضئية بمقدار  $1.27 cm$  على شاشة تبعد  $2.31 m$  عن الشقين، حيث كان مصدر الضوء له طول موجة  $500 nm$ . ما ينبغي أن يكون مقدار الفاصل بين الشقين؟
62. يمكن أن يحدث تأثير مماثل للتداخل ذي الشقين مع الأمواج الصوتية، بدلاً من الضوء. في حقل (مجال) مفتوح، يتم تشغيل مكبرين اثنين منفصلين بمسافة  $1.30 m$  عن طريق مولد أحادي الوظيفة ينتج أمواجاً جيبية بتردد  $1200 Hz$ ، حيث يمشي الطالب على طول خط  $12.5 m$  ومتوازٍ مع الخط الفاصل بين السماعات، يسمع نمطاً متناوباً بصوت عالٍ وهادئ نظراً للتداخل البناء والهدام. ما هو (أ) طول الموجة لهذا الصوت. و(ب) المسافة بين الحد الأقصى للاكزي والموقع الأقصى (الصاحب) الأول على طول هذا الخط؟
63. يصدر مصباح تصريف (تفريغ) غاز الهدروجين ضوءاً مرئياً عند أربعة أطوال موجية  $410, 434, 486, 656 nm$  ، (أ) إذا وقع الضوء من هذا المصباح على عدد  $N$  من الشقوق المفصولة عن بعضها مسافة  $0.25 mm$ ، ما هي المسافة التي يبعد بها الحد الأقصى الثالث عن الحد الأقصى المركزي عند عرضها على شاشة تبعد مسافة  $2.0 m$  من الشقوق؟ (ب) من خلال المسافة التي يتم تفصل الحد الأقصى الثاني والثالث والتي مقدارها  $I = 486 nm$ .
64. يسقط ضوء أحادي اللون ذو تردد  $(5.5 \times 10^{14} Hz)$  على 10 فتحات مفصولة عن بعضها مسافة  $0.020 mm$ . ما هو الفاصل بين الحد الأقصى الأول والثالث على الشاشة يبعد مسافة  $2.0 m$  عن الشقوق؟
65. ثمانية شقوق مفصولة مسافة متساوية مقدارها  $0.149 mm$  ومضاءة بضوء أحادي اللون طول موجته  $523 nm$  . ما هو عرض الحد الأقصى الرئيس على الشاشة يبعد عن الشقوق مسافة  $2.35 m$ ؟
66. ثمانية شقوق مفصولة عن بعضها بمسافات متساوية وبمقدار  $0.149 mm$  ومضاءة بشكل موحد بواسطة ضوء أحادي اللون طول موجته  $0.149 mm$ . ما هي شدة القمة العظمى الثانوية بالمقارنة مع القمة العظمى الرئيسة؟
67. فيلم شفاف ذو ثخانة  $250 nm$  وقرينة انكساره  $1.40$  محاط بالهواء. ما هو طول موجة الضوء الأبيض، الذي عندما يصطدم بشكل شبه طبيعي بالفيلم، يتعرض لتداخل هدام حينما ينعكس؟
68. تم العثور على الحد الأدنى من الشدة لضوء طول موجته  $450 nm$  العابرة لفيلم شفاف ( $n=1.20$ ) موجود في الهواء. (أ) ما هو الحد الأدنى لثخانة الفيلم؟ (ب) إذا كان هذا الطول الموجي هو الطول الذي يحدث عنده الحد الأدنى من الشدة، فما هي القمم الثلاثة الأدنى لـ  $\lambda$  التي يحدث عندها ذلك؟
69. فيلم رقيق عامل انكساره ( $n=1.32$ ) يحيط به الهواء. ما هو الحد الأدنى لثخانة هذا الفيلم الذي يقلل انعكاس الضوء الساقط عليه بشكل طبيعي بطول موجة  $500 nm$  ؟

70. كرر حسابك للمسألة السابقة حيث الفيلم الرقيق موجود على سطح زجاج مسطح حيث  $(n=1.50)$ ؟
71. بعد تسرب بسيط للنفط، فيلم رقيق من النفط (أوكتان)  $(n=1.40)$  بثخانة  $450 \text{ nm}$  على سطح الماء في الخليج. (أ) ما هو اللون السائد الذي تراه الطيور التي تحلق في سماء المنطقة؟ (ب) ما هو اللون السائد الذي يراه السباح الغاطس تحت الماء؟
72. يتم فصل شريحة مجهرية طولها  $10 \text{ cm}$  عن صفيحة زجاجية من خلال أحد أطراف ورقة. كما هو موضح أدناه، فإن الطرف الآخر من الشريحة ملامس للوحة. تضاء الشريحة من الأعلى بضوء من خلال مصباح الصوديوم طول موجته  $589 \text{ nm}$  ، ويظهر 14 هدباً في كل سنتيمتر واحد على طول الشريحة. ما هو ثخانة قطعة الورق؟



73. لنفترض أن أجزاء (عناصر) التجربة للمسألة السابقة مغمور في سائل غير معروف. إذا شاهدت في هذه الحالة 18 هدباً لكل سنتيمتر واحد على طول الشريحة، فما هي قرينة انكسار السائل؟
74. يتم إنتاج إسفين رقيق مملوء بالهواء عند وضع لوحين زجاجيين مسطحين فوق بعضهما، ويتم وضع طبقة من الورق بينهما على حافة واحدة، حيث يتم ملاحظة هدب التداخل عند رؤية ضوء أحادي اللون يسقط عمودياً على الألواح عند الانعكاس. هل الهدب الأول بالقرب من الحافة، حيث تكون الألواح في حالة ملامسة لبعضها، هو هدب مضيء أو هدب مظلم؟ فسّر ذلك.
75. تستخدم قطعتين متطابقتين من الزجاج المستطيل الشكل لقياس ثخانة الشعير. تكون الألواح الزجاجية على اتصال مباشر من أحد الأهداب، ويوضع شعرة واحدة بينهما يُسمع الحافة المقابلة. عند إضاءة مصباح الصوديوم طول موجته  $\lambda = 589 \text{ nm}$  من أحد الأهداب، تظهر الشعرة بين الأهداب المظلمة 180 و 181. ما هي الحدود الدنيا والعليا لقطر الشعرة؟
76. تضيء شريحتان من المجهر مصنوعة من الزجاج من خلال ضوء أحادي اللون وارد عمودياً طول موجته  $589 \text{ nm}$  . تلامس الشريحة العليا الشريحة السفلى في أحد طرفيها، وتستقر على سلك نحاسي رفيع في الطرف الآخر، وتشكل إسفيناً من الهواء. قطر السلك النحاسي  $29.45 \mu\text{m}$  . كم عدد الأهداب المضاءة، التي تظهر عبر هذه الشرائح؟
77. "عدسات" الكاميرا ذات النوعية الجيدة هي في الواقع نظام من العدسات بدلاً من عدسة واحدة، ولكن من الآثار الجانبية أن الانعكاس من سطح إحدى العدسات يمكن أن يترد مرات عديدة داخل النظام، مما يخلق آثاراً في الصورة. لمواجهة هذه المشكلة، يتم طلاء إحدى العدسات في مثل هذا النظام بطبقة رقيقة من المواد  $(n=1.28)$  على جانب واحد. قرينة الانكسار لزجاج العدسة هي 1.68. ما هي أصغر ثخانة للطلاء حتى يقلل من الانعكاس عند طول موجة  $640 \text{ nm}$  بسبب التداخل الهدام؟ (معنى آخر، يجب تحسين تأثير الطلاء على طول  $640 \text{ nm}$  .
78. لوحظ تداخل بناء من فوق بقعة نفط (بولي إيثيلين) مباشرة للأطوال الموجية (في الهواء)  $440 \text{ nm}$  و  $616 \text{ nm}$  ، حيث قرينة الانكسار لهذا النفط هي  $n=1.54$  . ما هي أقل ثخانة ممكنة لهذا الفيلم؟
79. يتم نفخ فقاعة صابون في الهواء الطلق. ما هي الألوان (التي تشير إلى الطول الموجي الذي يتم تعزيزه) المنعكسة من أشعة الشمس التي يتم تعزيزها؟ فقاعة الصابون لديها قرينة الانكسار  $1.36 \text{ nm}$  و ثخانة  $380 \text{ nm}$  .

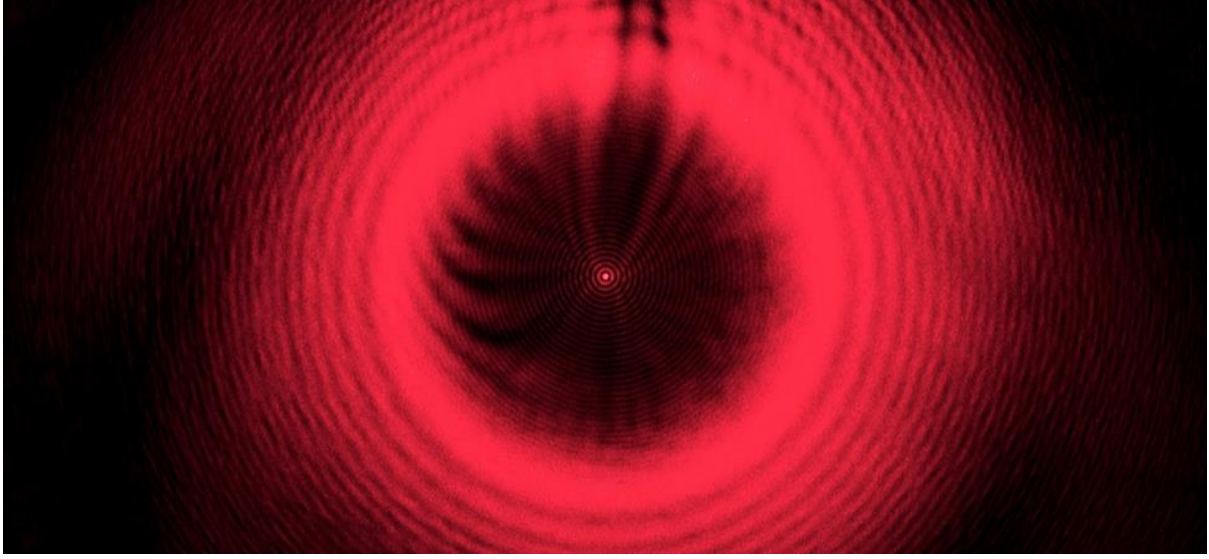
80. يعرض مقياس تداخل ميكلسون مع مصدر ضوء الليزر ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$  He-Ne) نمط التداخل الخاص به على شاشة. إذا كانت المرآة القابلة للحركة تم تحريكها مسافة 8.54 ميكرون، كم عدد الأهداب التي سيتم ملاحظتها تتحرك من خلال نقطة مرجعية على الشاشة؟
81. يكشف المختبر عن 251 هدباً عندما يتم ازاحة المرآة القابلة للحركة في مقياس تداخل ميكلسون، حيث مصدر الضوء المستخدم هو مصباح الصوديوم، ولما كان طول الموجة  $589 \text{ nm}$ ، أوجد مسافة التي تحركت بها المرآة القابلة للحركة؟
82. يُستخدم مقياس التداخل من نوع ميكلسون لقياس طول الموجة للضوء الذي يمر من خلاله. عندما يتم نقل المرآة القابلة للحركة بمقدار  $0.100 \text{ (mm)}$  بالضبط، فإن عدد الأهداب التي يتم ملاحظتها وهي تتحرك خلاله هو 316. ما هو طول موجة الضوء المستخدم؟
83. يتم إدخال حجرة زجاجية مستطيلة طولها  $5.08 \text{ (cm)}$  في ذراع واحد (اتجاه واحد) لمقياس ميكلسون، باستخدام مصدر إضاءة طول موجته  $633 \text{ nm}$ . تمتلئ هذه الغرفة في البداية بالهواء ( $n=1.000293$ ) عند الضغط الجوي القياسي ولكن يتم سحب الهواء تدريجياً باستخدام مضخة تخلية حتى يتحقق فراغ مثالي تقريباً. كم هدباً يتم ملاحظتها تتحرك خلال فترة الانتقال؟
84. في ذراع واحد من مقياس التداخل من نوع ميكلسون، يتم إدخال ورقة بلاستيكية بشخانة 75 ميكرون، مما يؤدي إلى تحول في نمط التداخل بنسبة 86 هدباً. مصدر الضوء لديه طول الموجة في الهواء  $610 \text{ nm}$ . ما هي قرينة انكسار هذا البلاستيك؟
85. يتم قياس ثخانة رقائق الألومنيوم باستخدام مقياس التداخل من نوع ميكلسون، حيث تم تثبيت المرآة القابلة للحركة على مقياس ميكرومتر. فوجد أن هناك فرق قدره 27 هدباً في نمط التداخل الملحوظ عندما يكون الميكرومتر على الرقاقة متصلاً مقارنةً بالحالة التي يكون بها الميكرومتر بعيداً عنها. المطلوب حساب ثخانة الرقاقة؟
86. المرآة القابلة للحركة لمقياس التداخل من نوع ميكلسون متصلة بنهاية قضيب معدني رفيع يبلغ طوله  $23.3 \text{ (mm)}$ . يتم تثبيت الطرف الآخر من القضيب بحيث لا يتحرك. عند تغير درجة حرارة القضيب من 15 درجة مئوية إلى 25 درجة مئوية، يلاحظ تغير 14 هدباً. مصدر الضوء هو ليزر He-Ne بطول موجة  $632.8 \text{ nm}$ . ما هو التغير في طول القضيب المعدني، وما هو معامل التمدد الحراري له؟
87. في مختبر مستقر حرارياً، يستخدم مقياس التداخل من نوع ميكلسون لمراقبة درجة الحرارة لضمان بقائه ثابتاً. يتم وضع المرآة المتحركة في نهاية قضيب من الألمنيوم طوله  $1.00 \text{ (m)}$ ، ومثبتاً من الطرف الآخر. مصدر الضوء هو ليزر He-Ne، وطول موجته  $632.8 \text{ nm}$ . قيم هذا الجهاز تتوقف مع اختلاف درجة الحرارة، عند ملاحظة تغير هدب واحد فقط. ما هو هذا الفرق في درجة الحرارة؟
88. ينتج إزاحة 65 هدباً في مقياس التداخل من نوع ميكلسون عندما يتم وضع فيلم ذي ثخانة 42.0 ميكرون مصنوع من مادة غير معروفة في ذراع واحد (اتجاه واحد من اتجاهات المقياس). وبفرض مصدر الضوء لديه طول الموجة  $632.9 \text{ nm}$ . حدد ما هي المادة بالاعتماد على قرائن الانكسار الموجودة في الجدول 1.1؟

## مسائل للتحدي

89. حدد ما يحدث لنمط تداخل ذي شق مزدوج إذا كان أحد الشقوق مغطى بفيلم رقيق وشفاف وذو ثخانة  $\frac{\lambda}{2(n-1)}$  حيث  $\lambda$  هو طول الموجة للضوء الساقط و  $n$  هي قرينة انكسار الفيلم.

90. بفرض لدينا واحد وخمسون من الشقوق الضيقة المتساوية البعد بينها ويفصل بينهما  $(0.10 \text{ mm})$ . وتضاء الشقوق بواسطة الضوء الأزرق بطول موجة  $400 \text{ nm}$ . ما هو الموضع الزاوي للحد الأقصى الخامس والعشرين؟ ما هي ذروة شدة الإضاءة بالمقارنة مع الحد الأقصى الأساسي؟
91. فيلم رقيق من النفط (أوكتان) على الماء فإنه سيظهر بشكل مظلم عندما يكون رقيقاً للغاية، لأن اختلاف طول المسار يصبح صغيراً مقارنة بطول موجة الضوء، ويوجد تحول في الطور عند السطح العلوي. إذا كان الفيلم يصبح مظلماً عندما يكون فرق طول المسار أقل من ربع طول الموجة، فما هي أكبر ثخانة التي يمكن أن يكون عليها فيلم النفط ويظهر مظلماً من أجل جميع الأطوال الموجية المرئية؟ بفرض قرينة انكسار النفط هو  $1.40$ ؟
92. يوضح الشكل 14.3 شريحتين زجاجيتين مضاءتين بضوء أحادي اللون ساقط بشكل عمودي. الميكرومتر العلوي فارغ الشريحة تلامس الشريحة السفلية في أحد طرفيها وتستقر على شعرة يبلغ قطره  $(0.100 \text{ mm})$  في الطرف الآخر، مما يشكل إسفيناً من الهواء. (أ) ما هي المسافة بين الحواف المظلمة، إذا كان طول الشرائح  $7.50 \text{ cm}$  وتم استخدام طول موجة  $589 \text{ nm}$ ؟ (ب) هل هناك فرق إذا كانت الشرائح مصنوعة من الزجاج التاجي أو مثيله الصوان؟ فسّر ذلك.
93. يوضح الشكل 14.3 شريحتين زجاجيتين طولهما  $(7.50 \text{ cm})$  مضاءة بضوءٍ نقيٍّ (صافٍ أو أحادي اللون) يسقط عليهما بشكل عمودي وله طول موجة قدرها  $\lambda = 589 \text{ nm}$ . تلامس الشريحة العليا الشريحة السفلى عند أحد طرفيها وتستقر على بعض الحطام في الطرف الآخر، وتشكل إسفيناً من الهواء. كم ثخانة هذا الحطام، إذا كان الفاصل بين الأهداب المظلمة  $(1.00 \text{ mm})$ ؟
94. تبلغ ثخانة فقاعة الصابون  $100 \text{ nm}$  ويتم إضاءتها بواسطة الضوء الأبيض الوارد بزاوية  $45$  درجة على سطحها. ما هو طول الموجة ولون الضوء المرئي المنعكس بشكل بناء، مفترضاً أن قرينة الانكسار ذاتها قرينة الانكسار للماء؟
95. تبلغ ثخانة البقعة النفطية الموجودة على الماء  $120 \text{ nm}$  ويتم إضاءتها بواسطة الضوء الأبيض الوارد بزاوية  $45$  درجة على سطحها. ما هو اللون الذي يظهر به النفط (ما هو طول الموجة الأكثر انعكاساً بشكل بناء)، بالنظر إلى أن قرينة الانكسار هي  $1.40$ ؟

## الفصل الرابع | حيود (انعراج) الضوء DIFFRACTION



**الشكل 1.4:** لا يُعطي الرولمان الفولاذي، المضاء بواسطة الليزر، ظلالاً دائرية حادة، وإنما بقعة ساطعة مركزية محاطة بسلسلة من أهداب الحيود. وتُعرف هذه البقعة باسم بقعة بويسون Poisson's spot، إذ تم التنبؤ بهذه الظاهرة لأول مرة من قبل العالم فريسnel Augustin-Jean Fresnel (1788-1827) كنتيجة لحيود الأمواج الضوئية. وقد نقض العالم بويسون قبل العالم فريسnel (1781-1840) Siméon-Denis Poisson هذه الفرضية بناءً على مبادئ علم بصريات الأشعة. (credit: modification of work by Harvard Natural Science Lecture Demonstrations) (الانتماء: جرى تعديل العمل من خلال عروض لمحاضرة في العلوم الطبيعية بجامعة هارفارد)

### مخطط الفصل

1.4 الحيود أحادي الشق

2.4 الشدة في الحيود أحادي الشق

3.4 الحيود مزدوج الشق

4.4 شبكة الحيود

5.4 الحيود عند الفتحات الدائرية ومقدرة الفصل

6.4 حيود الأشعة السينية

7.4 التصوير المجسم (الهولوجرافي)

### مقدمة

تحيل مرور شعاع ضوئي أحادي اللون من خلال شق ضيق، بحيث يكون الشق أوسع بقليل من الطول الموجي للضوء. فبدلاً من ظهور ظل بسيط للشق على الشاشة، ستلاحظ ظهور نمط تداخل على الرغم من وجود شق واحد فقط. رأينا في الفصل المتعلق بالتداخل، أننا بحاجة إلى مصدرين من الأمواج حتى يحدث التداخل. كيف يمكن ظهور نمط التداخل عندما يكون لدينا شق واحد فقط؟ في الفصل الأول "طبيعة الضوء"، وانطلاقاً من مبدأ هيغنز، يمكن عدُّ جبهة الموجه بمنزلة مصادر نقطية

لأمواج لامتناهية العدد. وبالتالي، يمكن للموجة الصادرة من الشق أن تسلك سلوك عدد لا نهائي من المصادر النقطية. وعليه فإن هذه الأمواج يمكن أن تتداخل مع بعضها، مما يؤدي إلى ظهور نمط التداخل دون وجود شق آخر. وتُسمى هذه الظاهرة بالحيود. هناك طريقة أخرى لعرض ذلك، تكمن في إدراك أن عرض الشق صغير ولكنه محدود. اعتبرنا ضمناً في الفصل السابق أن الشقوق هي أجسام لها مواضع ولكن ليس لها أبعاد، أي كان من الممكن إهمال عرض الشق. وعندما تكون الشقوق محدودة العرض، فإنه يمكن عد كل نقطة على طول الشق بمنزلة مصدر نقطي للضوء – بحسب مبدأ هيغنز. نظراً لأن الأدوات البصرية في العالم الحقيقي يجب أن تحتوي على فتحات محدودة (وإلا فلا يمكن للضوء أن يدخل)، فإن الحيود يؤدي دوراً رئيساً في الطريقة التي نفسر بها مخرج هذه الأدوات البصرية. على سبيل المثال، يُقيد الحيود من قدرتنا على تحليل الأحيولة أو الأجسام. وسندرس هذه المشكلة لاحقاً في هذا الفصل.

## 1.4 | الحيود أحادي الشق Single-Slit Diffraction

### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- تفسير ظاهرة الحيود وشروط ملاحظتها.
- وصف الحيود أحادي الشق

بعد مرور موجة في اتجاه معين عبر شق ضيق، فإن الموجة تميل إلى الانتشار. وعلى سبيل المثال، يمكن سماع الأمواج الصوتية التي تدخل غرفة عبر باب مفتوح حتى إذا كان المستمع موجوداً في جزء معين من هذه الغرفة، حيث تقتضي هندسة انتشار الأشعة وجود السكون في هذه المنطقة. وبالمثل، فإن أمواج المحيط المارة عبر فتحة في كاسر الأمواج يمكن أن تنتشر في جميع أنحاء الخليج **الشكل 2.4**. يعد الانتشار والانحناء، الذي يحدث للأمواج المحيط والأمواج الصوتية، مثالين على **الحيود (diffraction)**، والذي يكمن في انحناء الموجة حول حواف فتحة أو عقبة - تبدو هذه الظاهرة عند جميع أنواع الأمواج.



**الشكل 2.4** بسبب ظاهرة حيود الأمواج، يمكن للأمواج المحيط، الداخلة من خلال فتحة كاسر الأمواج، أن تتبعثر في جميع أنحاء الخليج.

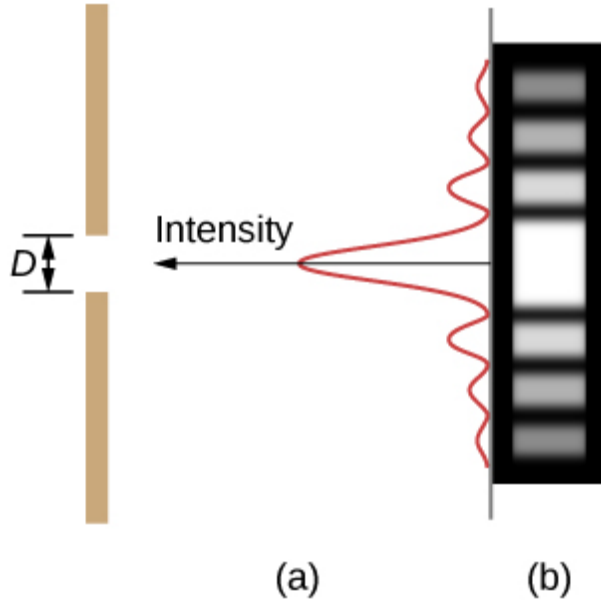


يمكننا ملاحظة حيود الأمواج الصوتية لأن أطوالها الموجية تقع ضمن النطاق القابل للسمع، ولها تقريباً الأبعاد نفسها للأجسام التي تعترضها، وهو الشرط الواجب تحقيقه لملاحظة الحيود بسهولة. بما أن الأطوال الموجية للضوء المرئي تتراوح في المجال 390 nm إلى 770 nm، فإن معظم الأجسام لا تحيد الضوء بشكل واضح.

ومع ذلك، فإن هنالك حالات تكون فيها الفتحات صغيرة بدرجة كافية، بحيث يمكن ملاحظة حيود الضوء. على سبيل المثال، إذا وضعت الأصبع الوسطى والسبابة قريبة من بعضهما البعض، ونظرت من خلالهما إلى مصباح ضوئي، فإنك ستري نمط حيود بوضوح مكون من خطوط فاتحة وخطوط مظلمة موازية لأصابعك.

### الحيود عبر شق أحادي

يشكل الضوء، الذي يمر عبر شق أحادي، نمط حيود يختلف إلى حدٍ ما عن ذلك الذي تشكله الشقوق المزدوجة أو شبكة الحيود، والتي تمت مناقشتها في فصل التداخل. يُبين الشكل 3.4 نمط حيود أحادي الشق. لاحظ أن القمة (النهاية) العظمى المركزية أكبر من القمة العظمى على جانبيها، وتتناقص شدة هذه القمم بسرعة على كلا الجانبين. في المقابل، تُنتج شبكة الحيود خطوطاً متباعدة بانتظام ومتخامدة ببطء على جانبي القمة العظمى المركزية.

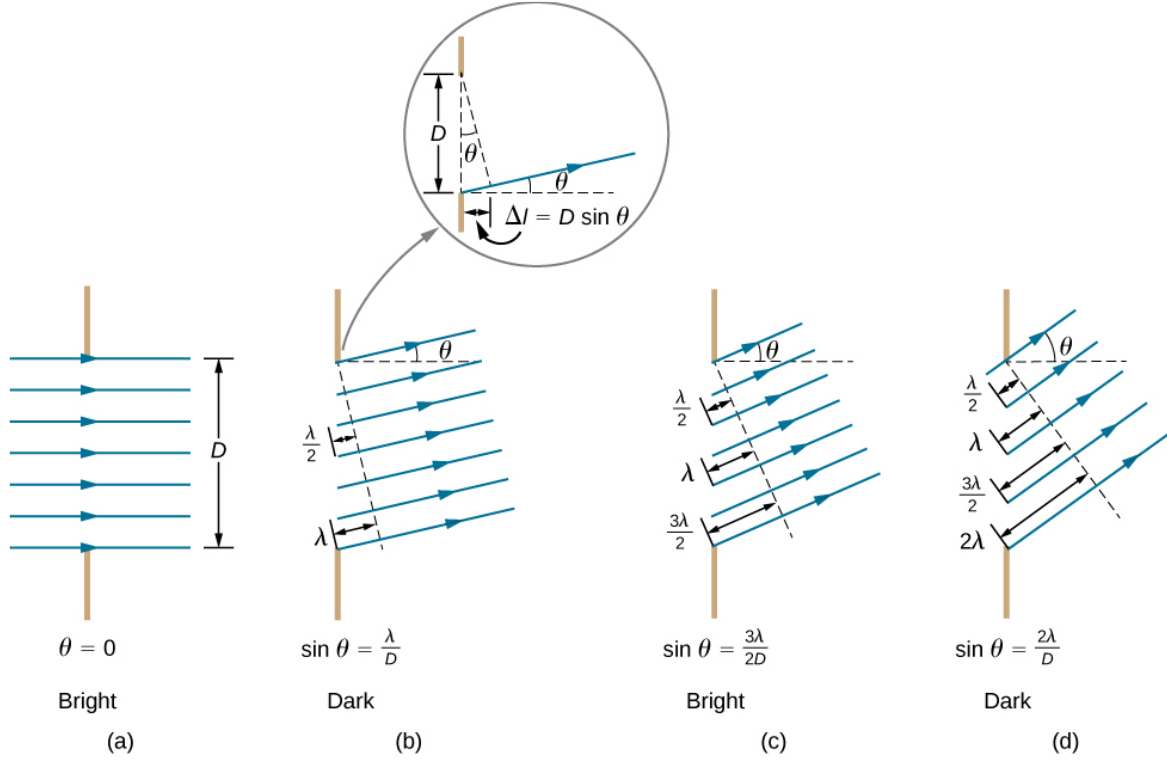


**الشكل 3.4** نمط حيود أحادي الشق. (a) ضوء أحادي اللون يمر عبر شق أحادي يتمتع بقمة عظمى مركزية والعديد من القمم الأصغر على كلا الجانبين. القمة العظمى المركزية هي ستة أضعاف ما هو مُبين في هذا الشكل. (b) يُظهر الرسم البياني القمة العظمى المركزية الساطعة والقمم الأضيق والأقل سطوعاً في كلا الجانبين.

يُبين الشكل 4.4 تحليل الحيود أحادي الشق، حيث يصل الضوء إلى الشق مضيئاً إياه بشكل متجانس، ويكون في الطور نفسه على امتداد عرضه. نعتبر بأن الضوء ينتشر إلى الأمام من أجزاء مختلفة من الشق نفسه. ووفقاً لمبدأ هيغنز، فإن الأمواج تنبعث من كل جزء من جبهة الموجة في هذا الشق، كما تم تبيانها في الفصل الأول "طبيعة الضوء".

تشبه هذه الأمواج الأشعة التي تكون في الطور نفسه عند انطلاقها، ثم تنتشر في جميع الاتجاهات. ويكون كل شعاع منها عمودياً على جبهة الموجة. وعلى اعتبار أن الشاشة بعيدة جداً مقارنةً بمقاس الشق، فإن الأشعة تتجه نحو وجهة مشتركة بشكلٍ متوازٍ تقريباً. وعندما تتحرك هذه الأشعة للأمام مباشرةً، كما في الجزء (a) من هذا الشكل، فإنها تبقى في الطور نفسه، وهو ما يُفسّر ظهور القمة العظمى المركزية. ولكن عندما تمر الأشعة بزاوية  $\theta$  (بالنسبة إلى الاتجاه الأصلي للحزمة)، فإن كل شعاع سيقطع مسافة

مختلفة إلى الوجهة المشتركة، وبالتالي فإن هذه الأشعة قد تصل في الطور نفسه أو في أطوار أخرى. في الجزء (b)، سيقطع الشعاع المنطلق من الأسفل مسافة تزيد بمقدار طول موجة واحدة على ذلك الذي ينطلق من الأعلى. وهكذا، فإن الشعاع المنطلق من المركز يقطع مسافة أقل بمقدار  $\lambda/2$  من الشعاع المنطلق من الحافة السفلية للشق، ويصل خارج الطور، ويتداخل بشكل هدام. إذا انطلق شعاعان من نقطتين إحداهما أعلى من المركز بقليل، والأخرى تحت الأسفل بقليل، فسيلغي أحدهما الآخر. في الواقع، فإن كلا الشعاعين المنطلقين من الشق يتداخلان بشكل هدام. وبعبارة أخرى، فإن الإلغاء المزدوج لجميع الأشعة يؤدي إلى قمة مظلمة منخفضة الشدة عند هذه الزاوية. وبسبب التناظر، تظهر قمة مظلمة منخفضة الشدة أخرى عند الزاوية نفسها ولكن على يمين اتجاه ورود الضوء (باتجاه أسفل الشكل).



**الشكل 4.4:** يجيد الضوء، الذي يمر عبر شق أحادي، في جميع الاتجاهات، وقد يتداخل بشكل بناء أو هدام وفقاً للزاوية.

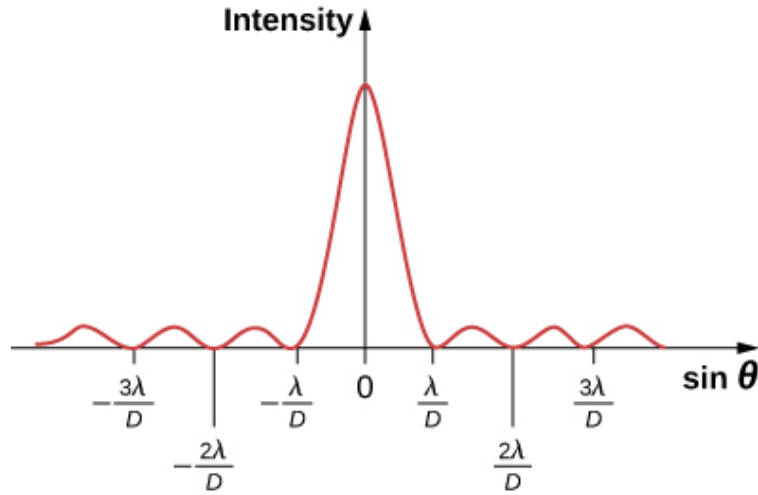
الفرق بين أطوال مسارات الأشعة من جانبي الشق هو  $D \sin \theta$

عند الزاوية الأكبر والموضحة في الجزء (c)، يختلف طول المسار بمقدار  $3\lambda/2$  بالنسبة للأشعة المنطلقة من أعلى الشق وأسفله. يقطع أحد الأشعة مسافة تختلف بمقدار  $\lambda$  عن نظيره المنطلق من الأسفل، ويصل الشعاعان في الطور نفسه، ويتداخلان بشكل بناء. شعاعان مجاوران لهذين الشعاعين يتم تداخلهما أيضاً بشكل بناء. معظم أشعة الشق لديها أشعة أخرى للتداخل بشكل بناء، والقمة العظمى للشدة تحدث عند هذه الزاوية. ومع ذلك، لا تتداخل جميع الأشعة بشكل بناء في هذه الحالة، وبالتالي فإن القمة العظمى لا تكون كما هي عليه في الحالة المركزية. أخيراً، في الجزء (d)، تكون الزاوية كبيرة بدرجة كافية للحصول على النهاية الصغرى الثانية. وكما هو موضح في هذا الشكل، فإن الفرق في أطوال مسارات الأشعة من جانبي الشق هو  $D \sin \theta$ ، ويمكن أيضاً ملاحظة ظهور منطقة الهدم عندما تكون أطوال المسارات هي من المضاعفات الصحيحة لطول الموجة.

وبالتالي، فإنه للحصول على التداخل الهدام للشق الأحادي:

$$D \sin \theta = m\lambda, \text{ for } m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \text{(هدام)} \quad (4.1)$$

حيث:  $D$  هو عرض الشق،  $\lambda$  هو طول موجة الضوء،  $\theta$  هي الزاوية بالنسبة للاتجاه الأصلي للضوء، و  $m$  هو ترتيب النهاية الصغرى. يوضح **الشكل 5.4** رسماً بيانياً لشدة التداخل أحادي الشق، ومن الواضح أن القمم العظمى على جانبي القمة العظمى المركزية أقل شدة ولا تكون عريضة. تم استكشاف هذا التأثير في حيود مزدوج الشق.

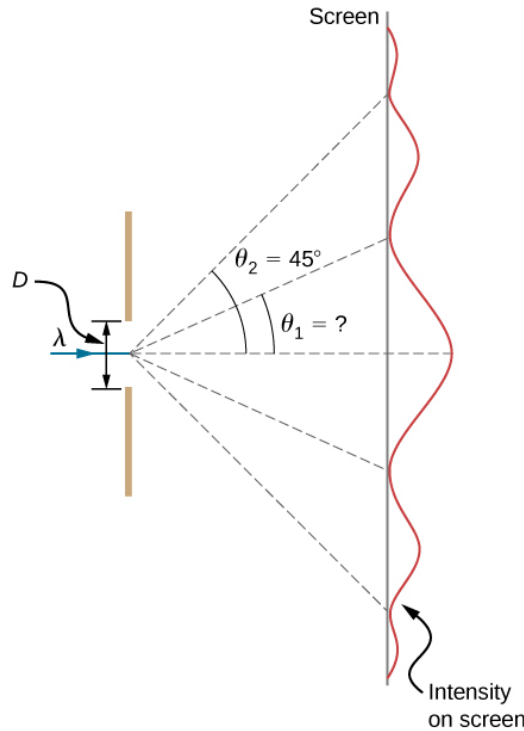


**الشكل 5.4** رسم بياني لشدة الحيود أحادي الشق يُظهر القمة العظمى المركزية بشكلٍ أوسع وأكثر شدة مما هو عليه على كلا جانبيهما. في الواقع، القمة العظمى المركزية هي ست مرات أعلى مما هو مُبين هنا.

#### المثال 1.4

##### حساب الحيود أحادي الشق

يسقط ضوء مرئي بطول موجة 550 nm على شق أحادي، وينتج النهاية الصغرى الثانية للحيود بزاوية 45.0 درجة بالنسبة لاتجاه الضوء الوارد كما هو مبين في الشكل 6.4. (أ) ما هو عرض الشق؟ (ب) في أي زاوية تظهر النهاية الصغرى الأولى للحيود؟



**الشكل 6.4** في هذا المثال، نقوم بتحليل رسم بياني لنمط الحيود أحادي الشق.

## خطة الحل:

من المعلومات المقدمة، وبافتراض أن الشاشة بعيدة عن الشق، يمكننا استخدام المعادلة  $D \sin \theta = m\lambda$  أولاً لإيجاد  $D$ ، ونطبقها مرة أخرى لتحديد زاوية النهاية الصغرى الأولى  $\theta_1$

## الحل:

أ. من المعطيات:  $\lambda = 550 \text{ nm}$ ،  $m = 2$ ،  $\theta_2 = 45.0^\circ$ ، بجمل المعادلة  $D \sin \theta = m\lambda$  واستبدال القيم المعروفة نجد:

$$D = \frac{m\lambda}{\sin \theta_2} = \frac{2(550 \text{ nm})}{\sin 45.0^\circ} = \frac{1100 \times 10^{-9} \text{ m}}{0.707} = 1.56 \times 10^{-6} \text{ m}.$$

ب. بجمل المعادلة  $D \sin \theta = m\lambda$  من أجل قيمة  $\sin \theta_1$  وتعويض القيم المعروفة نحصل على:


$$\sin \theta_1 = \frac{m\lambda}{D} = \frac{1(550 \times 10^{-9} \text{ m})}{1.56 \times 10^{-6} \text{ m}}.$$

وبالتالي فإن قيمة الزاوية  $\theta_1$ ، هي:

$$\theta_1 = \sin^{-1} 0.354 = 20.7^\circ.$$

## ملاحظة:

نرى أن الشق ضيق (وهو أكبر بعدة مرات من الطول الموجي للضوء). وهذا يتفق مع حقيقة أن الضوء يجب أن يتفاعل مع جسم مماثل في الأبعاد لطول الموجة من أجل إظهار التأثيرات الموجية مثل نمط الحيود أحادي الشق. نرى أيضاً أن القمة العظمى المركزية تمتد 20.7 درجة على جانبي الحزمة الأصلية، ويعرض نحو 41 درجة. الزاوية بين القمة الصغرى الأولى والثانية هي فقط نحو 24 درجة (45.0 درجة - 20.7 درجة). وبالتالي، فإن عرض القمة العظمى الثانية هو تقريباً نصف عرض القمة العظمى المركزية.

 **1.4 تحقق من فهمك:** افترض أن عرض الشق في المثال 1.4 قد ازداد إلى المقدار  $1.8 \times 10^{-6} \text{ m}$ . ما هي المواضع الزاوية الجديدة للقمم الصغرى الأولى والثانية والثالثة؟ هل توجد قمة صغرى رابعة؟

## 2.4 | الشدة في الحيود أحادي الشق Intensity in Single-Slit Diffraction

### الأهداف التعليمية

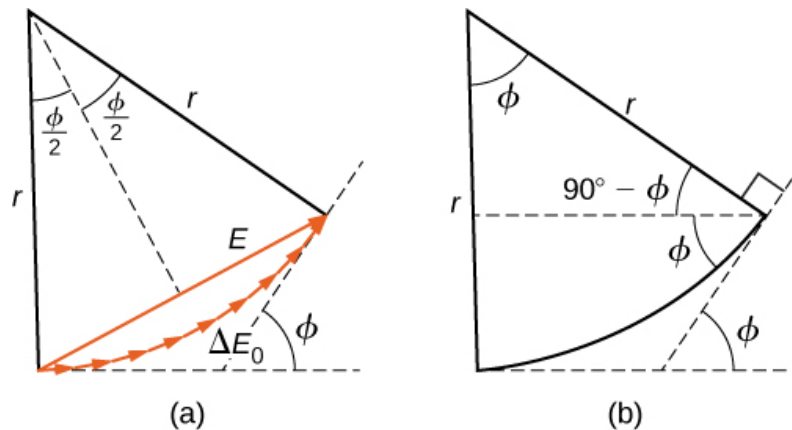
في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- حساب الشدة بالنسبة إلى القمة العظمى المركزية لقمم الحيود أحادي الشق.
- حساب الشدة بالنسبة إلى القمة العظمى المركزية لنقطة عشوائية على الشاشة.

حساب شدة نمط الحيود، تتبع طريقة مخطط الأطوار phasor diagram المستخدمة في العمليات الحسابية في دارات التيار المتناوب. إذا اعتبرنا أن هناك عدد  $N$  من مصادر هيغنز تمر خلال الشق المبين في الشكل 4.4، بحيث يبعد كل مصدر عن مجاوره مسافة  $D/N$ ، عندئذ يكون فرق المسار بين الأمواج من المصادر المجاورة، التي تصل إلى نقطة عشوائية  $P$  على الشاشة هو  $(D/N) \sin \theta$ . وتعاود هذه المسافة فرق الطور  $\sin \theta$   $(2\pi D/\lambda N)$ . يُبين الشكل 7.4 مخطط الأطوار للأمواج، التي تصل إلى النقطة ذات الموقع الزاوي  $\theta$ . نرمز لمطال الطور لكل موجة هيغنز  $\Delta E_0$ ، ومطال الطور الناتج هو  $E$ ، وفرق الطور بين الأمواج من المصدر الأول والأخير هو:

$$\phi = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) D \sin \theta$$

باعتبار  $N \rightarrow \infty$ ، فإن مخطط الأطوار يأخذ شكل قوس دائري بطول يساوي  $N\Delta E_0$  ونصف قطر  $r$ . ولما كان طول القوس هو  $N\Delta E_0$  لأي قيمة للزاوية  $\phi$ ، فإن نصف القطر  $r$  يتناقص بازدياد  $\phi$  (أو بكلمات أخرى كلما شكلت الأطوار أشكالاً لولبية أضيق).

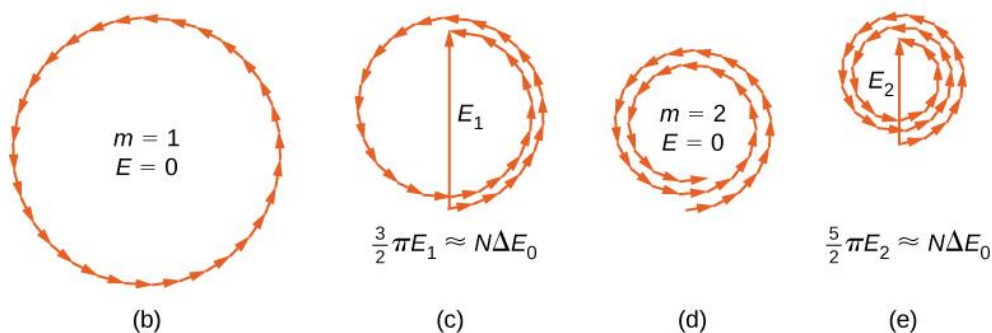
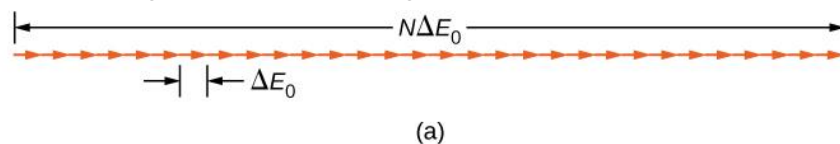


**الشكل 7.4** (a) مخطط الأطوار الموافق للموضع الزاوي  $\theta$  لنمط الحيود أحادي الشق. الفرق الطوري بين الأمواج من المصدر الأول والأخير هو  $\phi = (2\pi D/\lambda N) \sin \theta$ . الشكل الهندسي لمخطط الأطوار.

يُبين **الشكل 8.4** (a) مخطط الأطوار من أجل  $\phi = 0$  (مركز نمط الحيود) عند القيمة  $N = 30$ . في هذه الحالة، يتم وضع الأطوار من طرف إلى طرف في خط مستقيم طوله  $N\Delta E_0$ ، وتكون القيمة الناتجة أعظمية وتساوي  $E = N\Delta E_0$ . يمكن الحصول على شدة الضوء باستخدام العلاقة  $I = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E^2$  من الأمواج الكهرومغناطيسية. تُعطي شدة القمة العظمى بالعلاقة:

$$I_0 = \frac{1}{2} c \epsilon_0 (N\Delta E_0)^2 = \frac{1}{2\mu_0 c} (N\Delta E_0)^2$$

حيث:  $\epsilon_0 = 1/\mu_0 c^2$  مخططا الطور لأول صفرين من نمط الحيود والمبينة في الجزأين (b) و (d) من هذا الشكل. في كلتا الحالتين، تضيف الأطوار إلى الصفر بعد الدوران خلال  $\phi = 2\pi \text{ rad}$  من أجل  $m = 1$  و  $4\pi \text{ rad}$  من أجل  $m = 2$ .



**الشكل 8.4** مخططات الطور (مع 30 طوراً) لنقاط مختلفة على نمط الحيود أحادي الشق. تم فصل دورات متعددة حول دائرة معينة قليلاً بحيث يمكن رؤية الأطوار. (a) القمة العظمى المركزية، (b) القمة الدنيا الأولى، (c) القمة العظمى الأولى بعد القمة العظمى المركزية، (d) القمة الدنيا الثانية، (e) القمة العظمى الثانية بعد القمة العظمى المركزية.

يتم تمثيل القمتين العظميين التاليتين للقمة العظمى المركزية بمخططات الطور في الأشكال (c) و (e). في الجزء (c)، تدور الأطوار بزواوية  $\phi = 3\pi \text{ rad}$  وتشكل طوراً ناتجاً ذا مطال  $E_1$ . طول القوس الذي تشكله الأطوار هو  $N\Delta E_0$ . وهذا يكافئ الدوران بنحو 1.5 دورة حول دائرة قطرها  $E_1$ ، فإنه:

$$N\Delta E_0 \frac{3}{2} \pi E_1 \approx$$

وبالتالي:

$$E_1 = \frac{2N\Delta E_0}{3\pi}$$

و

$$I_1 = \frac{1}{2\mu_0 c} E_1^2 = \frac{4(N\Delta E_0)^2}{(9\pi^2)(2\mu_0 c)} \approx 0.045I_0,$$

حيث:

$$I_0 = \frac{(N\Delta E_0)^2}{2\mu_0 c}.$$

في الجزء (e)، تدور الأطوار بزواوية  $\phi = 5\pi \text{ rad}$ ، أي مايعدل 2.5 دورة حول دائرة قطرها  $E_2$  وطول القوس  $N\Delta E_0$ . مما ينتج عنه أن:  $I_2 \approx 0.016I_0$ . يتم ترك الإثبات كتمرين للطلاب (التمرين 119.4).

تتوافق هاتان النهايتان العظميان فعلياً مع قيم  $\phi$  التي تكون أقل بقليل من  $3\pi \text{ rad}$  و  $5\pi \text{ rad}$ . ونظراً لأن الطول الإجمالي لقوس مخطط الطور يكون دائماً  $N_0 E_0$ ، فإن نصف قطر القوس ينخفض كلما ازدادت  $\phi$ . ونتيجة لذلك، يتضح أن  $E_1$  و  $E_2$  أكبر قليلاً بالنسبة للأقواس التي لم تتجدد تماماً عند الزوايا  $3\pi \text{ rad}$  و  $5\pi \text{ rad}$  على التوالي. يتم فحص القيم الدقيقة للقمة العظمى في التمرين 120.4. عند حل هذه المسألة، ستجد أنها أقل ولكن قريبة جداً من القيم التالية:

$$\dots \text{rad}\phi = 3\pi, 5\pi, 7\pi, \dots$$

لحساب الشدة عند نقطة عشوائية P على الشاشة، نعود إلى مخطط الطور المبين في الشكل 7.4. ولما كانت القوس تقابل الزاوية  $\phi$  في منتصف الدائرة، فإن:

$$N\Delta E_0 = r\phi$$

و

$$\sin\left(\frac{\phi}{2}\right) = \frac{E}{2r}.$$

حيث: إن E هو مطال الحقل الناتج. بحل المعادلة الثانية من أجل قيمة E، ومن ثم استبدال r من المعادلة الأولى، نجد أن:

$$E = 2r \sin\frac{\phi}{2} = 2 \frac{N\Delta E_0}{\phi} \sin\frac{\phi}{2}.$$

وبالتالي:

$$\beta = \frac{\phi}{2} = \frac{\pi D \sin \theta}{\lambda} \quad (4.2)$$

فنحصل على:

$$E = N\Delta E_0 \frac{\sin \beta}{\beta} \quad (4.3)$$

تربط هذه المعادلة مطال الحقل الناتج عند أي نقطة في نمط الحيود بالمطال  $N\Delta E_0$  عند القمة العظمى المركزية. تتناسب الشدة مع مربع المطال، وعليه فإن:

$$I = I_0 \left( \frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \quad (4.4)$$

حيث إن:  $I_0 = (N\Delta E_0)^2 / 2\mu_0$  هي الشدة في مركز النمط. عند القمة العظمى المركزية  $\phi = 0$  و  $\beta$  أيضاً تساوي الصفر، ونلاحظ من قاعدة هوبيتال أن:  $\lim_{\beta \rightarrow 0} \sin(\beta/\beta) = 1$  وبالتالي  $\lim_{\phi \rightarrow 0} I = I_0$ . وعند القمة العظمى التالية  $\phi = 3\pi \text{ rad}$ ، يصبح لدينا  $\beta = 3\pi/2 \text{ rad}$ ، وبتعويضها في المعادلة 4.4 نعطينا:

$$I_1 = I_0 \left( \frac{\sin 3\pi/2}{3\pi/2} \right)^2 \approx 0.045I_0,$$

بالتوافق مع ما وجدناه سابقاً في هذا القسم باستخدام أقطار أنماط الأطوار ومحيطها، وبتعويض قيمة  $\phi = 5\pi \text{ rad}$  في المعادلة 4.4، سنحصل على نتيجة مماثلة للشدة  $I_2$ .

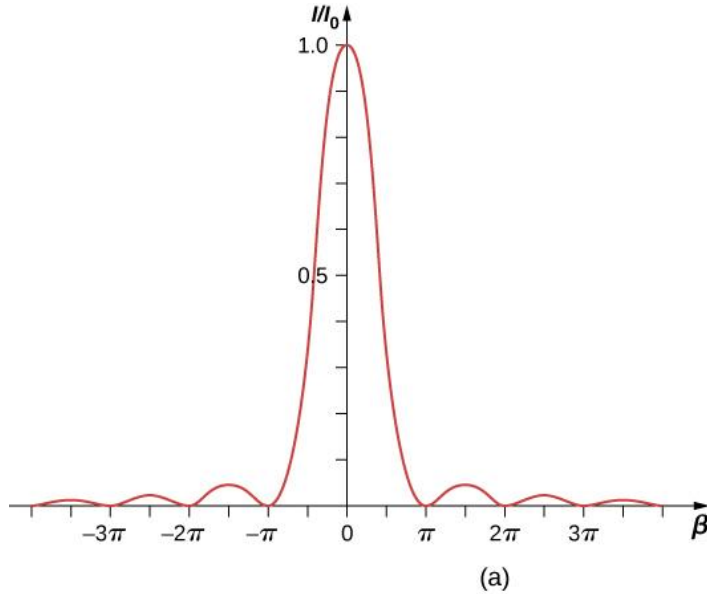
يوضح **الشكل 9.4** مخطط المعادلة 4.4 وتحت مباشرة صورة لنمط الحيود الفعلي. لاحظ أن القمة العظمى المركزية أكثر سطوعاً من غيرها، وأن أصفار النموذج تقع في تلك النقاط، حيث يكون  $\sin \beta = 0$ ، والتي تحدث عند  $\beta = m\pi \text{ rad}$ . وهذا يطابق:

$$\frac{\pi D \sin \theta}{\lambda} = m\pi$$

أو

$$D \sin \theta = m\lambda$$

والتي هي **المعادلة 1.4**.



**الشكل 9.9** (a) توزيع الشدة المحسوبة لنمط الحيود أحادي الشق. (b) نمط الحيود الفعلي.

## المثال 2.4

### الشدة في الحيود أحادي الشق:

بمضوء، الطول الموجي له 550 nm ، عبر شق بعرض  $2.00 \mu\text{m}$  ، وينتج نمط حيود مماثل لذلك الموضح في الشكل 9.4. (أ) أوجد مواقع القمتين الصغريين الأولين من حيث الزاوية مع القمة العظمى المركزية. (ب) حدد الشدة بالنسبة إلى القمة العظمى المركزية عند نقطة منتصف المسافة بين هاتين القمتين الصغريين.

### خطة الحل:

تُعطى القمة الصغرى بالعلاقة  $4.1$ ،  $D \sin \theta = m\lambda$ . تكون القمتان الصغريان الأوليان عند القيم  $m=1$  و  $m=2$ . يمكن استخدام المعادلتين 4.4 و 4.2 لتحديد الشدة فور حساب الزاوية.

### الحل:

أ- بحل المعادلة 1.4 من أجل  $\theta$  نحصل على  $\theta_m = \sin^{-1}(m\lambda/D)$  ، وبالتالي:  
وبالتالي:

$$\theta_1 = \sin^{-1}\left(\frac{(+1)(550 \times 10^{-9} \text{m})}{2.00 \times 10^{-6} \text{m}}\right) = +16.0^\circ$$

و

$$\theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{(+2)(550 \times 10^{-9} \text{m})}{2.00 \times 10^{-6} \text{m}}\right) = +33.4^\circ$$

ب- النقطة التي تقع في منتصف المسافة بين  $\theta_1$  و  $\theta_2$  هي:

$$\theta = (\theta_1 + \theta_2)/2 = \frac{16.0^\circ + 33.4^\circ}{2} = 24.7^\circ$$

تعطي المعادلة 2.4:


$$\beta = \frac{\pi D \sin \theta}{\lambda} = \frac{\pi(2.00 \times 10^{-6} \text{m}) \sin(24.7^\circ)}{(550 \times 10^{-9} \text{m})} = 1.52\pi \text{ أو } 4.77 \text{rad}$$

من المعادلة 4.4 يمكن حساب:

$$\frac{I}{I_0} = \left(\frac{\sin \beta}{\beta}\right)^2 = \left(\frac{\sin(4.77)}{4.77}\right)^2 = \left(\frac{-0.9985}{4.77}\right)^2 = 0.044$$

### ملاحظة:

تكون النقطة، الواقعة في منتصف المسافة بين هاتين القمتين، قريبة جداً من موقع القمة العظمى المتوقع قربه  $\beta = 3\pi/2$  أو  $1.5\pi$ .

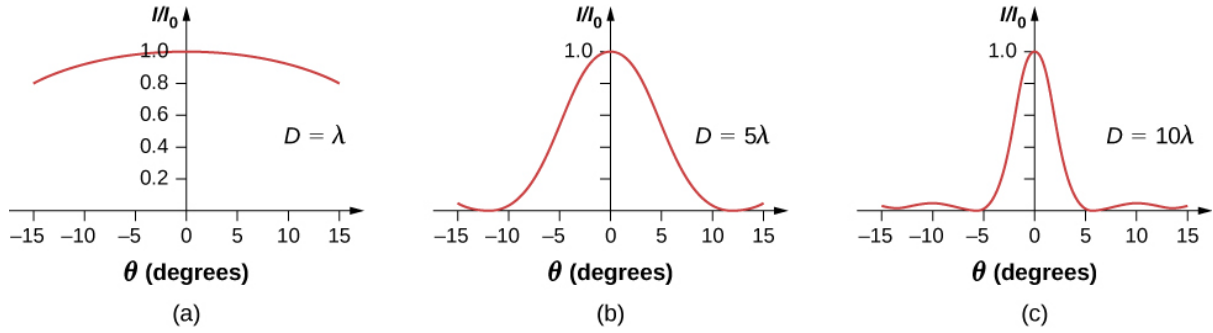
 **2.4 لتتحقق من فهمك** للتجربة في المثال 2.4، في أي زاوية من المركز لكون القمة العظمى الثالثة وما هي شدتها بالنسبة إلى القمة العظمى المركزية؟

إذا كان عرض الشق  $D$  متغيراً، سيتغير توزيع الشدة كما هو موضح في الشكل 10.4. يتم توزيع القمة العظمى المركزية على المنطقة

المحصورة بين  $\sin \theta = -\lambda/D$  و  $\sin \theta = +\lambda/D$ . من أجل قيم  $\theta$  الصغيرة، وهذا يوافق العرض الزاوي  $\Delta\theta \approx 2\lambda/D$

وعليه تؤدي أي زيادة في عرض الشق إلى تناقص في عرض القمة المركزية. من أجل شق فيه  $\lambda \gg D$ ، تكون القمة المركزية حادة جداً، بينما إذا كانت  $\lambda \approx D$ ، فإنها تصبح واسعة جداً.





**الشكل 10.4.** أنماط الحيود أحادي الشق من أجل قيم مختلفة لعرضه. مع زيادة عرض الشق من  $D = \lambda$  إلى  $5\lambda$  ثم إلى  $10\lambda$ ، يتناقص عرض القمة المركزية، وذلك بسبب انخفاض زوايا القمة الصغرى الأولى كما هو متوقع من المعادلة 4.1.

تتطلب تجربة الحيود في علم البصريات الكثير من التحضير، لكن هذه المحاكاة <https://openstaxcollege.org/l/21diffrexpoptsi> من إعداد أندرو دوفي تقدم إعداداً سريعاً، وتتيح أيضاً تغيير عرض الشق مباشرة. قم بتشغيل المحاكاة واختر "شق أحادي"، يمكنك ضبط عرض الشق ومعرفة تأثيره في نمط الحيود على الشاشة وكرسم بياني.

### 3.4 | الحيود مزدوج الشق Double-Slit Diffraction

#### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- وصف التأثير المشترك للتداخل والحيود مع شقين، لكل منهما عرض محدود.
- تحديد الشدة النسبية لأهداب التداخل ضمن مخطط الحيود.
- تحديد المراتب المفقودة، إن وجدت.

عندما درسنا التداخل في تجربة شقي يونغ، تجاهلنا تأثير الحيود في كل شق. افترضنا أن عرض الشقين كان ضيقاً جداً لدرجة أننا لم نشاهد على الشاشة سوى تداخل الضوء من مصدري نقطتين فقط. إذا كان عرض الشق أصغر من الطول الموجي، فإن **الشكل 10.4 (a)** يدل على أن هناك مجرد انتشار للضوء وليس هناك قمم على الشاشة. لذلك، كان من الممكن تجاهل الحيود في هذا الفصل. ومع ذلك، إذا قمت بتوسيع الشق، يُظهر **الشكل 10.4 (b)** و **(c)** أنه لا يمكن تجاهل الحيود. في هذا القسم، ندرس تعقيدات تجربة الشق المزدوج التي تنشأ عندما نأخذ بالحسبان تأثير الحيود لكل شق.

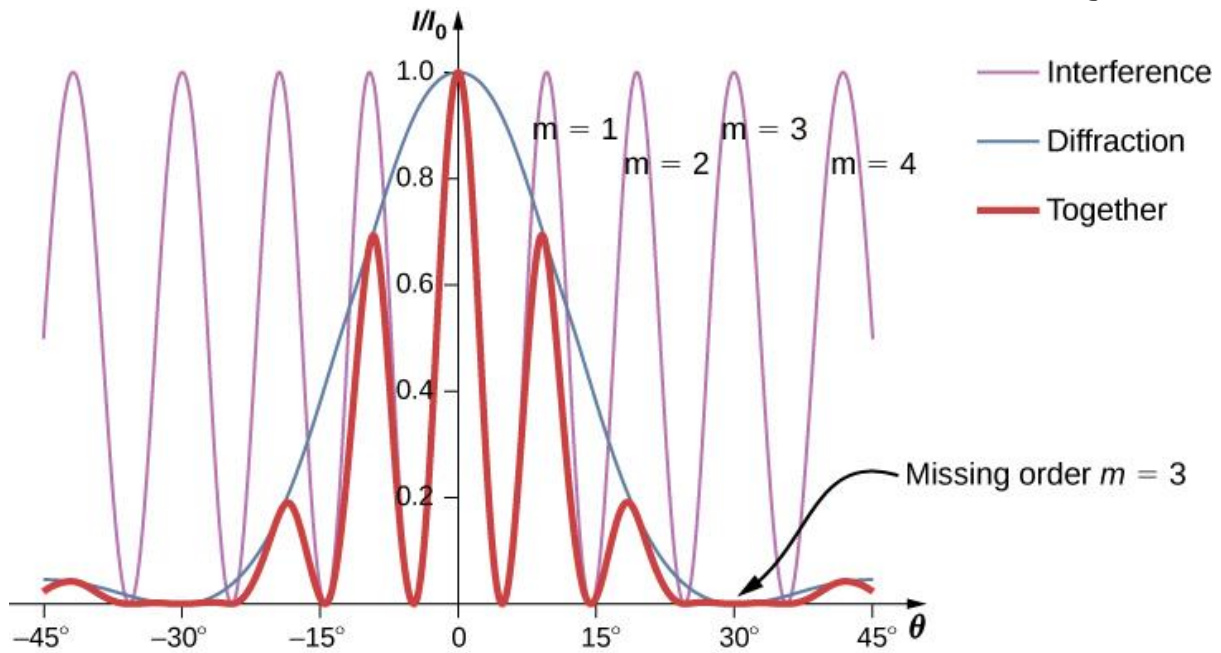
نحتاج لحساب نمط الحيود لشقين (أو أي عدد) من الشقوق إلى تعميم الطريقة التي استخدمناها للتو للشق الأحادي. ويتم ذلك من خلال التوزيع الموحد للمصادر النقطية التي تشع أمواج هيغنز عبر كل شق، ثم نجمع الأمواج من جميع الشقوق. هذا يعطينا الشدة عند أي نقطة على الشاشة. على الرغم من أن تفاصيل هذا الحساب يمكن أن تكون معقدة، فإن النتيجة النهائية بسيطة للغاية:

#### نمط حيود الشق المزدوج

نمط الحيود لشقين بعرض  $D$ ، تفصل بينهما المسافة  $d$ ، هو نمط التداخل لمصدرين نقطيين، تفصل بينهما المسافة  $d$ ، وهو ضعف نمط الحيود لشق بعرض  $D$ .

بمعنى آخر، يتم حساب مواقع أهداب التداخل باستخدام المعادلة  $d \sin \theta = m\lambda$  كما في الحالة عندما اعتبرنا أن الشقوق مصادر نقطية، لكن شدة الهداب تنخفض بتأثيرات الحيود وفقاً للمعادلة 4.4. [لاحظ أنه في الفصل الخاص بالتداخل، كتبنا  $d \sin \theta = m\lambda$  واستخدمنا العدد الصحيح  $m$  للإشارة إلى أهداب التداخل. تستخدم المعادلة 1.4 أيضاً  $m$ ، لكن هذه المرة للإشارة إلى القمة الدنيا للحيود. إذا تم استخدام كلتا المعادلتين في وقت واحد، فمن الأفضل استخدام متغير مختلف (مثل  $n$ ) لأحد هذه الأعداد الصحيحة لتمييزه عن الآخر].

تعمل تأثيرات التداخل والحيود في وقت واحد، وتنتج عموماً القمم الصغرى بزوايا مختلفة. يؤدي هذا إلى ظهور نمط معقد على الشاشة، يفقد فيه بعض القمم العظمى للتداخل من الشقين إذا كانت القمة العظمى للتداخل في اتجاه القمة الصغرى للحيود. تُسمى هذه القمة المفقودة بالترتيب المفقود (missing order). يوضح الشكل 11.4 مثالاً على نمط الحيود على الشاشة. الخط العريض ذو القمم المتعددة من ارتفاعات مختلفة هو الشدة الملاحظة على الشاشة. إنه نتاج نمط تداخل لأمواف من الشقوق المنفصلة وحيود الأمواج من شق أحادي.



**الشكل 11.4** الحيود من شق مزدوج. ينتج الخط الأرجواني ذ القمم متساوية الارتفاع عن تداخل الأمواج من الشقين؛ وينتج الخط الأزرق مع قمة واحدة كبيرة في الوسط هو حيود الأمواج من داخل شق واحد؛ وينتج الخط الأحمر التخين عن الاثنين، وهو النمط الملاحظ على الشاشة. يوضح الرسم البياني النتيجة المتوقعة لعرض الشق  $D = 2\lambda$  والمسافة بين الشقوق  $d = 6\lambda$ . يشير إلى أن القمة العظمى  $m = \pm 3$  التداخل مفقود لأن القمة الصغرى من الحيود تحدث في الاتجاه نفسه.

### مثال 3.4

#### شدة الأهداب

يوضح الشكل 11.4 أن شدة الهدب عند القيمة  $m = 3$  تساوي صفرًا، ولكن ماذا عن الأهداب الأخرى؟ احسب شدة الهدب عند  $m = 1$  بالنسبة لشدة القمة المركزية  $I_0$

### خطة الحل:

حدد زاوية هدب التداخل ذي الشق المزدوج باستخدام المعادلة من فصل التداخل، ثم حدد الشدة النسبية في هذا الاتجاه الناتجة عن الحيود باستخدام المعادلة 4.4.

### الحل:

من فصل التداخل، نعلم أن هدب التداخل المضيء يحدث عند  $d \sin \theta = m\lambda$ ، أو

$$\sin \theta = \frac{m\lambda}{d}.$$

من المعادلة 4.4

$$I = I_0 \left( \frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \quad \text{حيث: } \beta = \frac{\phi}{2} = \frac{\pi D \sin \theta}{\lambda}$$

بالتعويض نجد:

$$\beta = \frac{\pi D \sin \theta}{\lambda} = \frac{\pi D}{\lambda} \cdot \frac{m\lambda}{d} = \frac{m\pi D}{d}$$

من أجل القيم:  $D = 2\lambda$ ،  $d = 6\lambda$  و  $m = 1$

$$\beta = \frac{(1)\pi(2\lambda)}{6\lambda} = \frac{\pi}{3}$$

عندئذ تكون الشدة:

$$I = I_0 \left( \frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 = I_0 \left( \frac{\sin(\pi/3)}{\pi/3} \right)^2 = 0.684I_0$$

### ملاحظة

لاحظ أن هذه الطريقة واضحة ومباشرة وتعطي نتيجة تقريبية تماماً كما في حالة التحليل الأكثر تعقيداً، الذي يستخدم أطواراً لتحديد قيم شدة التداخل ذي الشق المزدوج (الممثل بالخط الرفيع في الشكل 11.4). تبين حسابات الأطوار للخط المائل المنحدر في شدة الحيود (الخط الأزرق) حدوث القمة بالقرب من  $m = 1$  بقيمة  $\theta$  أصغر قليلاً مما هو مبين هنا.

### مثال 4.4

#### حيود الشق المزدوج

لنفترض أنه في تجربة يونغ أن عرض الشق  $0.020 \text{ mm}$ ، ويتم فصل الشقين بمقدار  $0.20 \text{ mm}$ . فإذا كان هذان الشقان مضاءين بضوء أحادي اللون بطول موجة  $500 \text{ nm}$ ، فكم عدد الأهداب المضيئة، التي يتم ملاحظتها في القمة المركزية لمخطط الحيود؟

### الحل:

من المعادلة 4.1، يكون الموضع الزاوي لقمة الحيود الصغرى هو:

$$\theta \approx \sin \theta = \frac{\lambda}{D} = \frac{5.0 \times 10^{-7} \text{ m}}{2.0 \times 10^{-5} \text{ m}} = 2.5 \times 10^{-2} \text{ rad}.$$

باستخدام العلاقة  $\sin \theta = m\lambda$  من أجل قيمة  $\theta = 2.5 \times 10^{-2}$  نجد أن:

$$m = \frac{d \sin \theta}{\lambda} = \frac{(0.20 \text{ mm})(2.5 \times 10^{-2} \text{ rad})}{(5.0 \times 10^{-7} \text{ m})} = 10,$$

وهو الترتيب الأقصى للتداخل ضمن القمة المركزية. نلاحظ أن  $m = \pm 10$  هي مراتب مفقودة وتتطابق مع  $\theta$ . بالأسلوب نفسه،

يمكن ملاحظة الأهداب المضيئة للقيم التالية:

$$m = -9, -8, -7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4, +5, +6, +7, +8, +9$$

ليصبح المجموع 19 هدباً مضيئاً.

3.4 تحقق من فهمك للتجربة في المثال 4.4، أثبت أن  $m = 20$  هو حد مفقود أيضاً.



التعرف على آثار حيود الشق المزدوج. في هذه المحاكاة (<https://openstaxcollege.org/l/21doubleslitdiff>)، والتي كتبها Fu-Kwun Hwang، اختر  $N = 2$ ، وشاهد ما يحدث عند تغيير عرض الشق والمسافة بين الشقين وطول الموجة. هل تستطيع إظهار "المفقود"؟

## 4.4 | شبكة الحيود Diffraction Gratings

### الأهداف التعليمية

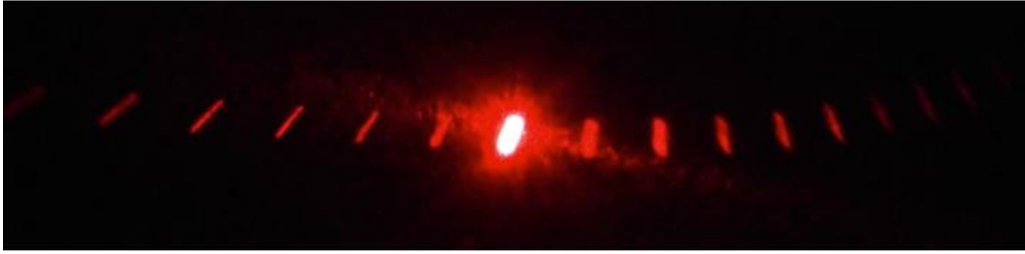
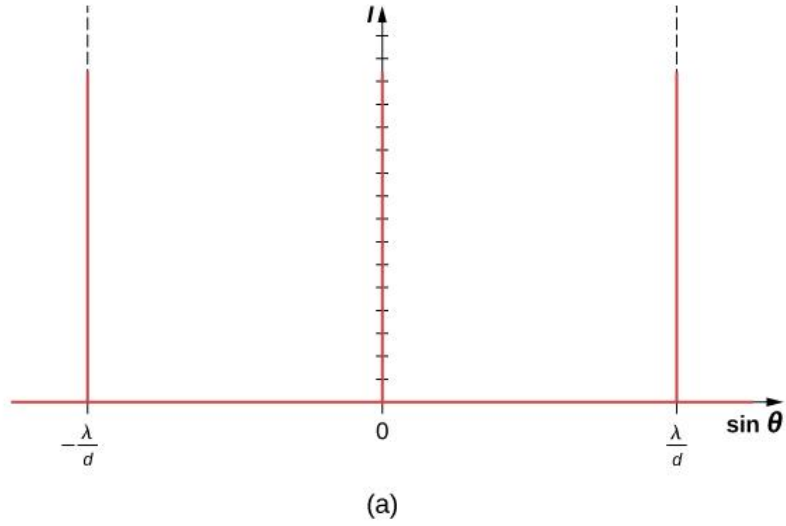
في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- مناقشة النمط الذي تم الحصول عليه من شبكة الحيود.
- تفسير تأثير شبكة الحيود.

إنّ تحليل تداخل الضوء، المار عبر شقين، يضع الإطار النظري للتداخل، ويعطينا نظرة تاريخية حول تجارب توماس يونغ. ومع ذلك، فإن معظم التطبيقات الحديثة للتداخل الشقي لا تستخدم شقين فقط بل أكثر من ذلك بكثير، حيث يقترب عددها من اللانهاية. يُسمى العنصر البصري الرئيس بشبكة الحيود، وهي أداة مهمة في التحليل البصري.

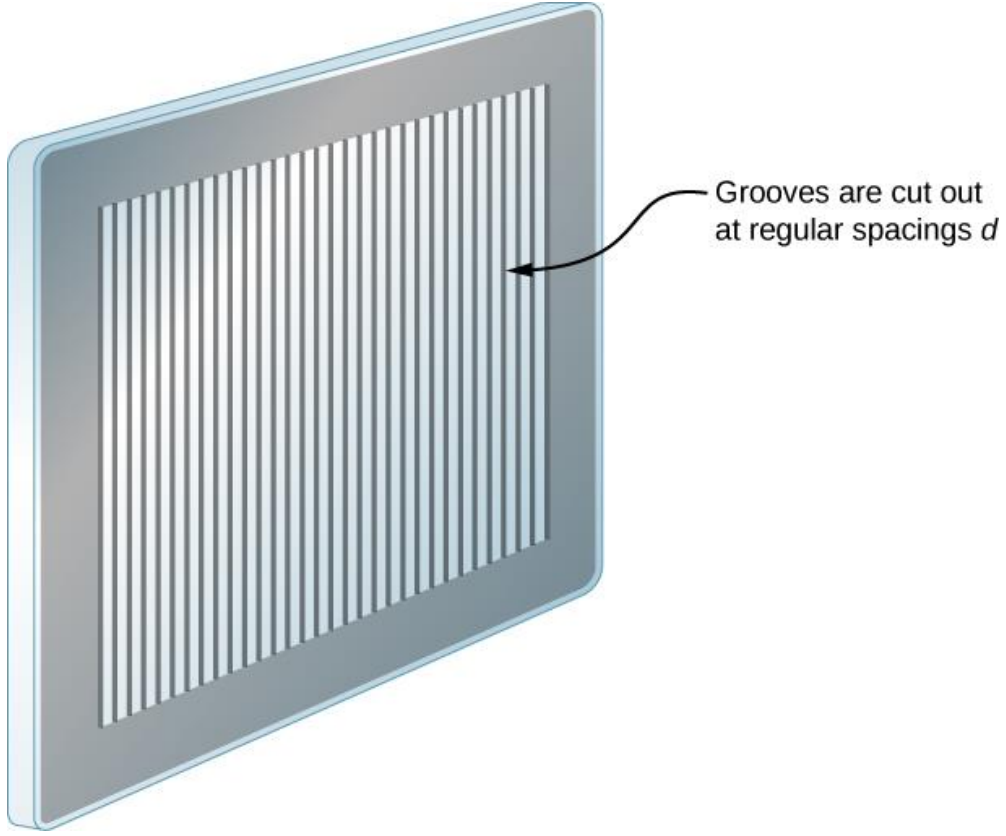
### شبكة الحيود: عدد لا حصر له من الشقوق

يتيح لنا تحليل التداخل متعدد الشقوق دراسة ما يحدث عندما يقترب عدد الشقوق  $N$  من اللانهاية. باعتبار  $N - 2$  هو القمة العظمى الثانوية، التي تظهر بين القمم العظمى الرئيسة، يمكننا ملاحظة عدد لا حصر له من القمم العظمى، وعدد لا حصر له من الأهداب المظلمة بينهما، مما يجعل المسافة بين الأهداب، وبالتالي عرض القمة العظمى صغيراً بلا حدود. علاوة على ذلك، تتناسب شدة القمة العظمى الثانوية مع  $1/N^2$ ، فإنها تقترب من الصفر، بحيث لا يمكن رؤية القمة العظمى الثانوية. وكل ما يبقى هي القمة العظمى الرئيسة شديدة الأضاءة وضيقة للغاية (الشكل 12.4).



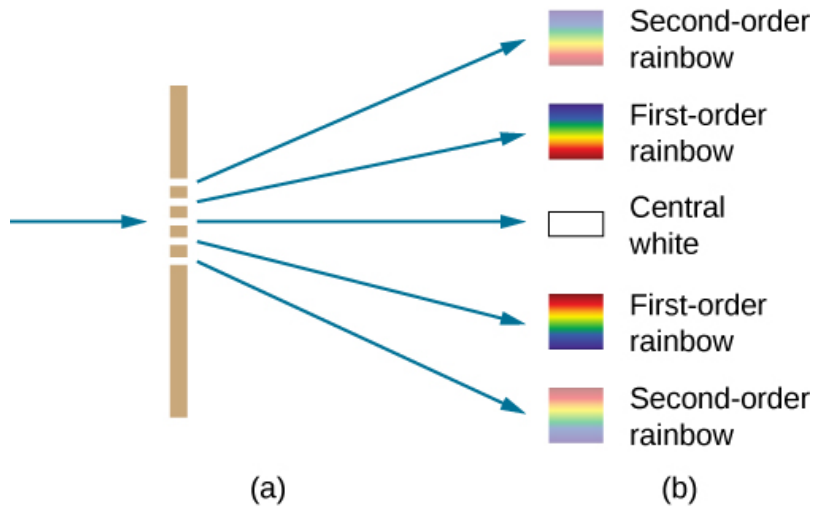
**الشكل 12.4 (a)** شدة الضوء المار عبر عدد كبير من الشقوق. عندما يقترب  $N$  من اللانهاية، تبقى القمة العظمى الرئيسية فقط كخطوط شديدة الإضاءة وضيقة للغاية. **(b)** شعاع الليزر المار عبر شبكة الحيود.

في الواقع، فإن عدد الشقوق ليس لانهاية، لكنه يمكن أن يكون كبيراً جداً - بما يكفي لإنتاج التأثير المكافئ. والمثال الرئيس هو عنصر بصري يسمى شبكة الحيود. يمكن تصنيع شبكة الحيود بنحت الزجاج باستخدام أداة حادة لإحداث عدد كبير من الخطوط المتوازية (الحزوز) والمحددة بدقة كالشقوق **(الشكل 13.4)**. هذا النوع من الشبكات يمكن أن يُصنَّع بكميات كبيرة، ويتم إنتاجه بثمن منخفض. ونظراً لأنه يمكن أن يكون هناك أكثر من 1000 حز لكل ميليمتر على امتداد الشبكة، فعندما يتم إضاءة جزء صغير نحو بضعة ميليمترات بواسطة شعاع وارد، تكون الشقوق المضئية لا حصر لها.



**الشكل 13.4** يمكن تصنيع شبكة الحيود بنحت الزجاج باستخدام أداة حادة لإحداث عدد كبير من الخطوط (الحرز) المتوازية والمحددة بدقة.

يُبين **الشكل 14.4** أثر شبكة الحيود على حدٍ سواء في عملية نفوذية الضوء، ويظهر **الشكل 15.4** انعكاس الضوء كما في أجنحة الفراشة والأوبال الأسترالي. تظهر شبكة الحيود الطبيعية أيضاً في ريش بعض الطيور مثل الطائر الطنان. هيكل صغيرة تشبه الإصبع في أنماط منتظمة تعمل كشبكة للانعكاس، مما ينتج عنه تداخلٌ بَنَاء يعطي ألوان الريش ليس فقط بسبب صبغتها. وهذا ما يُسمى التفرج اللوني.



**الشكل 14.4** (a) يحدد الضوء، الذي يمر عبر شبكة الحيود في نمط مماثل لحالة الشق المزدوج مع وجود مناطق مضيئة عند زوايا مختلفة. (b) النمط الناتج عن ورود الضوء الأبيض على الشبكة. القمة العظمى المركزية باللون الأبيض، وتتبعثر القمم العظمى للضوء الأبيض على شكل قوس قزح من الألوان.



(a)



(b)

**الشكل 15.4** (a) تحتوي أجنحة الأوبال الأسترالية و (b) الفراشة الأسترالية على صفوف من العواكس التي تعمل كشبكة للانعكاس، تعكس ألواناً مختلفة بزوايا مختلفة.

(credit a: modification of work by "Opals-On-Black"/Flickr; credit b: modification of work by "whologwhy"/Flickr)

الائتمان a : تعديل العمل بواسطة "أوبلاس - أن - بلاك" / فليكر؛ الائتمان b: تعديل العمل من قبل "هولوجوي" / فليكر.

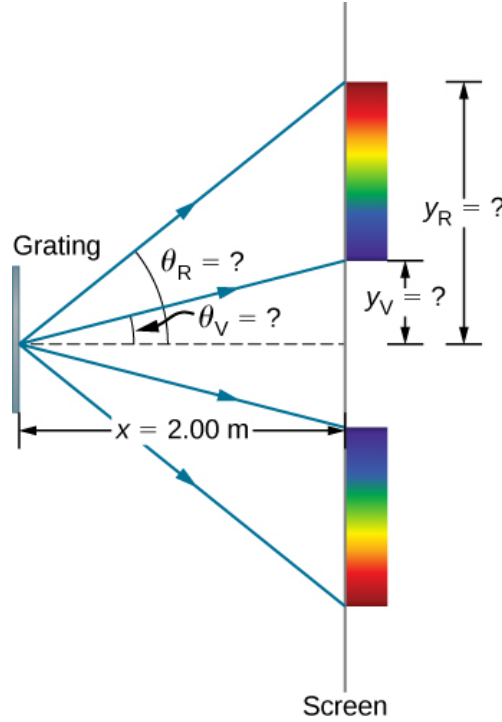
### تطبيقات شبكة الحيود

أين يتم استخدام شبكة الحيود في التطبيقات العملية؟ تُستخدم شبكة الحيود عادةً للتبعثر الطيفي وتحليل الضوء. ما يجعلها مفيدة بشكل خاص هو حقيقة أنها تشكل نمطاً أكثر حدة بالمقارنة مع الشقوق المزدوجة. وبالتالي تكون الأهداب مضبوطة وأضيق وأكثر إشراقاً، وتكون مناطقها المظلمة أعمق. تُعدُّ شبكة الحيود المكون الرئيس للموحّد اللوني المستخدم، على سبيل المثال، في التصوير البصري للعينات البيولوجية أو الطبية. يمكن اختيار شبكة الحيود لتحليل طول الموجة، الذي تبعثه جزيئات الخلايا المريضة في عينة الخزعة على وجه التحديد، أو للمساعدة في إثارة الجزيئات الاستراتيجية في العينة بطول موجة محدد من الضوء. استخدام حيوي آخر هو في تقنيات الألياف البصرية، حيث تم تصميم الألياف لتوفير الأداء الأمثل عند أطوال موجية محددة. تتوافر مجموعة من شبكات الحيود لاختيار الأطوال الموجية لهذا الاستخدام.

### مثال 5.4

#### حساب تأثيرات شبكة الحيود النموذجي

تتوافر شبكة الحيود بواقع 10.000 حز لكل سنتيمتر. افترض أنّ لديك واحدة، وأنك ترسل شعاعاً من الضوء الأبيض من خلالها إلى شاشة تبعد مسافة 2.00 m. (a) أوجد زوايا الحيود من الدرجة الأولى لأقصر الأطوال الموجية وأطولها للضوء المرئي (380 nm و 760 nm بالترتيب). (b) ما هي المسافة بين نهايات قوس قزح من الضوء المرئي المنتجة على الشاشة للتداخل من الدرجة الأولى؟ (انظر الشكل 16.4).



**الشكل 16.4 (a)** تُنتج شبكة الحيود المذكورة في هذا المثال قوس قزح من الألوان على الشاشة على بعد من الشبكة  $x=2.00\text{ m}$ . يتم قياس المسافات على طول الشاشة بشكل عمودي على اتجاه  $x$ . بمعنى آخر، يمتد نمط قوس قزح خارج الصفحة. **(b)** من منظور عين الطير، يمكن رؤية نمط قوس قزح على الطاولة الموجود عليها الجهاز.

### خطة الحل:

بمجرد تحديد قيمة المسافة بين الشقين  $d$ ، يمكن إيجاد زوايا الخطوط الحادة باستخدام المعادلة التالية:

$$d \sin \theta = m\lambda \quad \text{من أجل قيم } m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

نظراً لوجود 10,000 سطر لكل سنتيمتر، يتم فصل كل سطر بمقدار  $1/10000$  من سنتيمتر. بمجرد معرفة الزوايا، نجد المسافات على الشاشة باستخدام علم المثلثات البسيط.

### الحل:

**a.** المسافة بين الشقين هي:  $d = (1\text{ cm})/10,000 = 1.00 \times 10^{-4}\text{ cm}$  أو  $1.00 \times 10^{-6}\text{ m}$ . باعتبار الزاويتين  $\theta_V$  للبنفسجي (380 nm) و

$\theta_R$  للأحمر (760 nm). وبجمل المعادلة  $d \sin \theta_V = m\lambda$  من أجل قيمة  $\sin \theta_V$ ،

$$\sin \theta_V = \frac{m\lambda_V}{d}$$

حيث:  $m = 1$  للترتيب الأول و  $\lambda_V = 380\text{ nm} = 3.80 \times 10^{-7}\text{ m}$ . باستبدال هذه القيم نحصل على:

$$\sin \theta_V = \frac{3.80 \times 10^{-7}\text{ m}}{1.00 \times 10^{-6}\text{ m}} = 0.380.$$

وعليه فإنّ الزاوية  $\theta_V$  تساوي:

$$\theta_V = \sin^{-1} 0.380 = 22.33^\circ.$$

وبالمثل يمكن إيجاد:

$$\sin \theta_R = \frac{7.60 \times 10^{-7}\text{ m}}{1.00 \times 10^{-6}\text{ m}} = 0.760.$$

وعليه فإنّ الزاوية  $\theta_R$  تساوي:

$$\theta_R = \sin^{-1} 0.760 = 49.46^\circ.$$



لاحظ أنه في كلتا المعادلتين، وجدنا نتائج هذه الحسابات الوسيطة بدقة أربعة أرقام مهمة لاستخدامها مع الحساب في الجزء (b). تم ترميز المسافات على الشاشة بالعلامات  $y_V$  و  $y_R$  في الشكل 16.4. لاحظ أن  $\tan \theta = y/x$ . يمكننا حل المعادلة من أجل  $y_V$  و  $y_R$  وبالتالي:

$$y_V = x \tan \theta_V = (2.00m)(\tan 22.33^\circ) = 0.815m$$

و


$$y_R = x \tan \theta_R = (2.00m)(\tan 49.46^\circ) = 2.338m$$


وعليه فإن المسافة بينهما تكون:

$$y_R - y_V = 1.523m.$$

### ملاحظة:

تشير المسافة الكبيرة بين النهايات الحمراء والبنفسجية لقوس قزح الناتج من الضوء الأبيض إلى أن شبكة الحيود هي أداة طيفية. كلما ازداد انتشار الأطوال الموجية (أي كلما كان التبعر أكبر)، فإنه يمكن رؤية المزيد من التفاصيل في الطيف. ويعتمد هذا على جودة شبكة الحيود، حيث يجب أن تكون مصنعة بشكلٍ دقيق جداً، بحيث المسافات بين الخطوط متساوية ومتوازية.

 **4.4 تحقق من فهمك** بجل السؤال التالي: إذا كانت المسافات بين خطوط شبكة الحيود  $d$  غير معروفة بشكل دقيق، فيمكننا استخدام مصدر ضوء بطول موجة محدد جيداً لقياسه. افترض أن الهدب البناء من الدرجة الأولى لخط انبعاث  $H_\beta$  من الهدروجين ( $\lambda = 656.3 \text{ nm}$ ) يقاس عند الزاوية  $11.36^\circ$  درجة باستخدام مقياس الطيف مع شبكة الحيود. ما هي المسافة بين خطوط هذه الشبكة؟

 خذ المحاكاة نفسها (<https://openstaxcollege.org/l/21doubleslitdiff>) التي استخدمناها في حيود الشق المزدوج، وحاول زيادة عدد الشقوق من  $N = 2$  إلى  $N = 3$ ،  $4$ ،  $5$ .... تصبح القمم الأساسية أكثر وضوحاً، وتصبح القمم الثانوية أقل وضوحاً. في الوقت الذي تصل فيه إلى أكبر عدد ممكن ( $N = 20$ )، يتصرف النظام تماماً كشبكة حيود.

## 5.4 | الحيود من الفتحات الدائرية ومقدرة الفصل Circular Apertures and Resolution

### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- وصف حد الحيود على الدقة.
- وصف حد الحيود على انتشار الحزمة الضوئية.

يحيد الضوء أثناء تحركه في الفراغ، وينحني حول العقبات، ويتداخل بشكل بناء وهدام. يمكن استخدام هذا كأداة طيفية، على سبيل المثال، تقوم شبكة الحيود بتشتيت الضوء وفقاً للطول الموجي، وتستخدم في إنتاج الأطياف - لكن الحيود يحد أيضاً من التفاصيل، التي يمكننا الحصول عليها في الأحيولة.

يبين الشكل 17.4 (a) تأثير تمرير ضوء عبر فتحة دائرية صغيرة. بدلاً من الحصول على نقطة مضيئة ذات حواف حادة، نحصل على بقعة ذات حواف غامضة محاطة بدوائر من الضوء. يحدث هذا النمط بسبب الحيود، على غرار ذلك الناتج عن شق أحادي. يتداخل الضوء من أجزاء مختلفة من الفتحة الدائرية بشكل بناء وهدام. يكون التأثير ملحوظاً عندما تكون الفتحة صغيرة، لكن التأثير موجود أيضاً في الفتحات الكبيرة.



(a)

(b)

(c)

**الشكل 17.4 (a)** يُنتج ضوء أحادي اللون، عند مروره عبر فتحة دائرية صغيرة، هذا النمط من الحيود. (b) يُنتج مصدران ضوئيان نقطيان قريبان من بعضهما البعض أحيلاً متداخلة بسبب الحيود. (c) إذا كان المصدران قريبين من بعضهما البعض، لا يمكن تمييز الأحيلة أو فصلها.

كيف يؤثر الحيود على التفاصيل التي يمكن ملاحظتها عندما يمر الضوء عبر فتحة؟ يوضح **الشكل 17.4 (b)** نمط الحيود الناتج عن مصدرين ضوئيين نقطيين قريبين من بعضهما البعض. يشبه ذلك النمط حالة النمط من مصدر نقطي، ولكنه لا يزال من الممكن معرفة أن هناك مصدرين للضوء بدلاً من واحد. إذا كانا أقرب إلى بعضهما بعضاً كما في **الشكل 17.4 (c)**، فلن تتمكن من التمييز بينهما، مما يحد من التفاصيل أو الدقة التي يمكننا الحصول عليها. هذا الأثر هو نتيجة لا مفر منها للطبيعة الموجية للضوء. يحد الحيود من الدقة في كثير من الحالات. حدة رؤيتنا محدودة لأن الضوء يمر عبر بؤبؤ العين، والذي هو فتحة دائرية في العين. انتبه إلى أن انتشار الضوء الذي يشبه الحيود سببه هو القطر المحدود للحزمة الضوئية، وليس التفاعل مع الفتحة. وهكذا، فإن الضوء، الذي يمر عبر عدسة بقطر  $D$ ، يوضح هذا التأثير وينتشر، مما يؤدي إلى تشويش الصورة، تماماً كما يفعل الضوء الذي يمر عبر فتحة قطرها  $D$ . وبالتالي، يحد الحيود من دقة أي نظام له عدسة أو مرآة. تتأثر التلسكوبات أيضاً بالحيود بسبب القطر المحدود  $D$  للمرآة الأولية.

ما هو الحد للحيود فقط؟ للإجابة عن هذا السؤال، يجب الأخذ بالحسبان نمط حيود عبر فتحة دائرية، والتي لها قمة عظمى مركزية أوسع وأكثر إشراقاً من القمة العظمى المحيطة بها (مشابه للشق) **الشكل 18.4 (a)**. يُلاحظ في حالة فتحة دائرية بقطر  $D$ ، حدوث القمة الصغرى الأولى في نمط الحيود عند  $\theta = 1.22\lambda/D$  (بشرط أن تكون الفتحة كبيرة مقارنةً بطول موجة الضوء، وهو ما ينطبق على معظم الأجهزة البصرية). يُعرف المعيار المقبول لتحديد حد الحيود استناداً إلى هذه الزاوية باسم معيار رايلي، الذي طوره اللورد رايلي في القرن التاسع عشر.

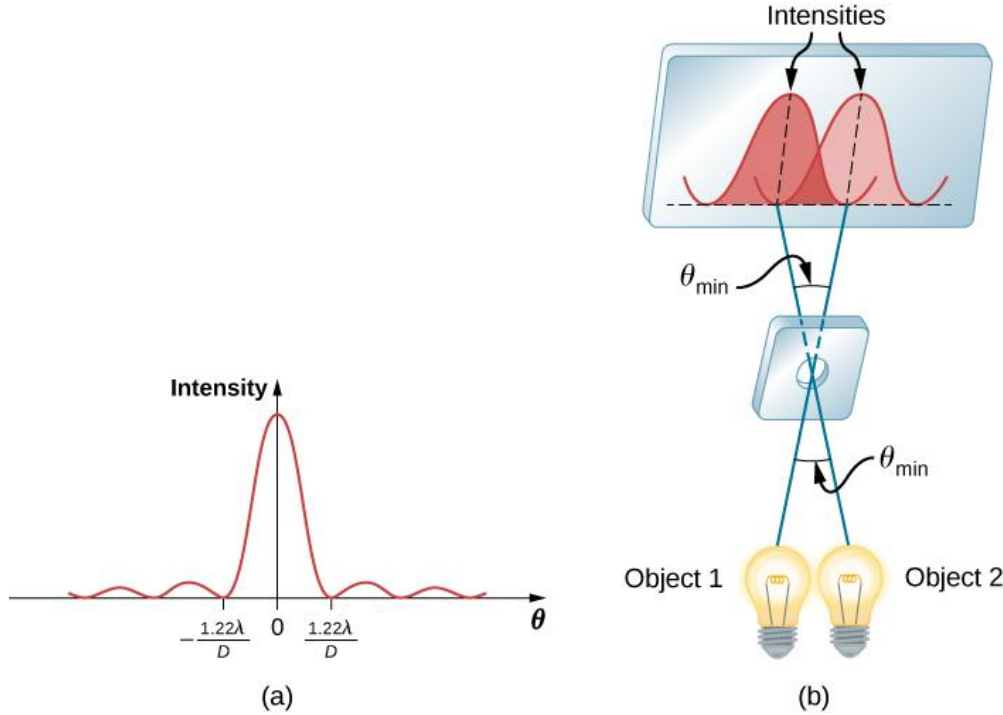
### معيار رايلي Rayleigh Criterion

ينص حد الحيود للدقة على أنه يمكن التمييز بين خيالين فقط عندما يكون مركز نمط الحيود في أحدهما مباشرةً فوق القمة الصغرى الأولى لنمط الحيود في الأخرى **الشكل 18.4 (b)**.

إذا كانت القمة الصغرى الأولى عند الزاوية  $\theta = 1.22\lambda/D$ ، بحيث يمكن التمييز بين الخيالين فقط إذا كانا مفصولين بالزاوية:

$$(4.5)\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

حيث:  $\lambda$  هي الطول الموجي للضوء (أو الإشعاع الكهرومغناطيسي) و  $D$  هو قطر الفتحة أو العدسة أو المرآة أو غيرها المستخدمة في الملاحظة. تقاس  $\theta$  بالراديان في هذه العلاقة. وتُعرف هذه الزاوية أيضاً باسم حد الحيود (diffraction limit).



**الشكل 18.4 (a)** رسم بياني لشدة نمط حيود عبر فتحة دائرية. لاحظ أنه على غرار الشق الأحادي، فإن القمة العظمى المركزية أوسع وأكثر إشراقاً من تلك الموجودة على جوانبها. (b) يُنتج جسمان نقطيان أنماط حيود متداخلة. يظهر هنا معيار رايلي لكونه قابلاً للحل. تتوضع القمة العظمى المركزية لنمط واحد على القمة الصغرى الأولى.

جميع محاولات مراقبة شكل الأجسام ومقاسها محدودة بطول موجة المسير، حتى طول موجة الضوء القصيرة يحول دون الحصول على الدقة العالية. عند استخدام مسابر لطول موجة صغير للغاية، كما هو في حالة المجهر الإلكتروني، فإن النظام يضطرب، ويظل يجد من معرفتنا. يؤكد مبدأ عدم اليقين للعالم هايزنبرغ Heisenberg أن هذا الحد أساسي ولا مفر منه كما سنرى في الفصل الخاص بميكانيك الكم.

## مثال 6.4

### حساب حدود الحيود في تليسكوب هابل الفضائي

يبلغ قطر المرآة الأساسية لتلسكوب هابل الفضائي المداري 2.40 m. ونظراً لكونه في المدار، فإن هذا التلسكوب يتعرض للتأثيرات المشوشة من الغلاف الجوي، والتي تحد من دقته. (a) ما هي الزاوية بين مصدرين ضوئيين نقطيين قابلة للفصل (نجمان مثلاً)؟ افترض متوسط طول موجة الضوء 550 nm. (b) إذا كان هذان النجمان على مسافة مليوني سنة ضوئية، وهي مسافة مجرة أندروميديا، ما هو أقرب مسافة بينهما يمكن تمييزها عندها؟ (السنة الضوئية، أو ly، هي المسافة التي يقطعها الضوء في عام واحد).

### خطة الحل:

يعطي معيار رايلي الوارد في المعادلة 4.5،  $\theta = 1.22\lambda / D$  أصغر زاوية ممكنة  $\theta$  بين المصادر النقطية، أو أفضل مقدرة فصل يمكن الحصول عليها. بمجرد معرفة هذه الزاوية، يمكننا حساب المسافة بين هذين النجمين.

### الحل:

a. معيار رايلي للزاوية الدنيا هو:

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

بإدخال القيم المعطاة نجد أن:

$$\theta = 1.22 \frac{550 \times 10^{-9} m}{2.40 m} = 2.80 \times 10^{-7} rad.$$

b. جسمان (نجمان) يبعدان بمسافة  $r$  وتفصل بينهما زاوية  $\theta$ ، فإن المسافة بينهما  $s$  تعطى بالعلاقة:  $s=r\theta$

بتعويض القيم المعطاة نجد أن:

$$s = (2.0 \times 10^6 ly)(2.80 \times 10^{-7} rad) = 0.56 ly.$$

### ملاحظة:

الزاوية الموجودة في الجزء (a) صغيرة جداً (أقل من 1/50000 درجة) لأن المرآة الأساسية كبيرة جداً مقارنةً بطول موجة الضوء. كما لاحظنا، تكون تأثيرات الحيود ملحوظة للغاية عندما يتفاعل الضوء مع الأجسام ذات الأبعاد من رتبة طول موجة الضوء. ومع ذلك، فإن التأثير لا يزال موجوداً، وهناك حد يفرضه الحيود لما تم ملاحظته. ليست الدقة الفعلية للتلسكوب هابل جيدة كما وجدنا هنا. كما هو الحال مع جميع الأدوات، هناك تأثيرات أخرى، مثل عدم التماثل في المرايا أو الزيوغ في العدسات التي تحد من الدقة. ومع ذلك، يعطي الشكل 19.4 إشارة إلى مدى التفاصيل التي يمكن ملاحظتها مع هابل بسبب مقاسها وجودتها، وخاصة لأنها من أعلى الغلاف الجوي للأرض.



(a)



(b)

**الشكل 19.4** تعطي هاتان الصورتان لجهاز M82 Galaxy فكرة عن التفاصيل التي يمكن ملاحظتها باستخدام (a) تلسكوب أرضي و (b) تليسكوب هابل الفضائي. (الانتمان (a): تعديل العمل من قبل "Ricinun" / ويكيبيديا كومنز؛ الانتمان (b): تعديل العمل من قبل ناسا، وكالة الفضاء الأوروبية، وفريق هابل للتراث (AURA / STScI)).

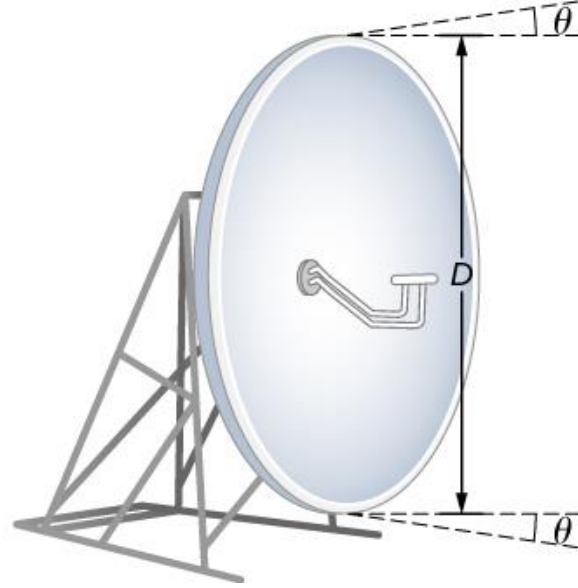
تشير الإجابة في الجزء (b) إلى أنه يمكن التمييز بين نجمين يفصل بينهما نحو نصف سنة ضوئية. يبلغ متوسط المسافة بين النجوم في المجرة خمس سنوات ضوئية في الأجزاء الخارجية ونحو سنة ضوئية بالقرب من مركز المجرة. لذلك، يمكن لجهاز هابل من تحليل معظم النجوم الفردية في مجرة أندروميديا جالاكسي على الرغم من أنها تقع على مسافة كبيرة لدرجة أن نورها يستغرق مليوني عام للوصول إلينا. يوضح الشكل 20.4 مرآة أخرى مستخدمة لرصد موجات الراديو من الفضاء الخارجي.



**الشكل 20.4:** عاكس على شكل قطع مكافئ بقطر 305 m في أريسيبو في بورتوريكو مزود بمواد عاكسة تجعل منه تلسكوب لاسلكي. إنه أكبر طبق تركيز منحنى في العالم. على الرغم من أن قطره أكبر بكثير من قطر تلسكوب هابل، إلا إنه يكتشف إشعاعات بأطوال موجة أكبر بكثير، كما أن حد الحيود له أقل مما هو عليه في هابل. يظل هذا التلسكوب مفيداً للغاية لأن المعلومات المهمة تنقلها موجات الراديو التي لا يحملها الضوء المرئي (الائتمان: جيف هيتشكوك).

**5.4 تحقق من فهمك:** ما هي الدقة الزاوية لتلسكوب أريسيبو الموضح في **الشكل 20.4** عند تشغيله عند طول موجة 21cm؟ وكيف تقارنها مع دقة تلسكوب هابل؟

الحيود ليس مشكلة للأجهزة الضوئية فحسب، بل للإشعاع الكهرومغناطيسي نفسه. تعاني أي حزمة ضوئية بقطر محدد  $D$  وطول موجة  $\lambda$  من مشكلة الحيود. تنتشر هذه الحزمة بزاوية  $\theta$  تُعطى بالمعادلة 4.5، وهي:  $\theta = 1.22\lambda / D$ . خذ على سبيل المثال، شعاع ليزر مكوناً من أشعة متوازية قدر الإمكان. وعلى الرغم من أن الزوايا بين هذه الأشعة قريبة من الصفر قدر الإمكان ( $\theta = 0$ ) فإنها تنتشر بزاوية  $\theta = 1.22\lambda / D$ ، حيث  $D$  هو قطر الحزمة و  $\lambda$  هو طول الموجة. من المستحيل ملاحظة هذا الانتشار لمصباح كهربائي لأن شعاعه ليس متوازياً تماماً منذ البداية. ومع ذلك، بالنسبة للانتقال لمسافات طويلة لحزم الليزر أو إشارات الأمواج الميكروية، يمكن أن يكون انتشار الحيود كبيراً (**الشكل 21.4**). يمكننا تجنب ذلك بزيادة  $D$ . يتم ذلك من أجل ضوء الليزر المرسل إلى القمر لقياس بعده عن الأرض. يتم توسيع الحزمة الليزرية من خلال التلسكوب لجعل  $D$  أكبر بكثير والزاوية  $\theta$  أصغر.



**الشكل 21.4** تنتشر الحزمة التي ينتجها هوائي إرسال الأمواج الميكروية عند زاوية صغيرة  $\theta = 1.22\lambda / D$  بسبب الحيود. من المستحيل إنتاج حزمة شبه متوازية لأن لها قطر محدود.

في معظم المختبرات البيولوجية، تُعدُّ مقدرة الفصل مشكلة عند استخدام المجهر. كلما كانت المسافة  $x$  أصغر (المسافة التي تفصل بين جسمين مع المحافظة على امكانية تمييزهما عن بعضهما) زادت الدقة. تُعرَّف مقدرة الفصل للعدسة على أنها المسافة  $x$ . يتم استخراج العلاقة الواصفة لمقدرة الفصل من معيار رايلي. يوضح **الشكل 22.4 (a)** جسمين نقطيين مفصولين بمسافة  $x$ . ووفقاً لمعيار رايلي، فإنه يوجد دقة عندما يكون الحد الأدنى للفصل الزاوي هو:

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D} = \frac{x}{d}$$

حيث:  $d$  هي المسافة بين العينة والعدسة الجسيمية، وقد استخدمنا تقريب الزاوية الصغيرة (على سبيل المثال، افترضنا أن  $x$  أصغر بكثير من  $d$ )، لذلك  $\theta \approx \sin \theta \approx \tan \theta$ . ولهذا، فإن مقدرة الفصل، هي:

$$x = 1.22 \frac{\lambda d}{D}$$

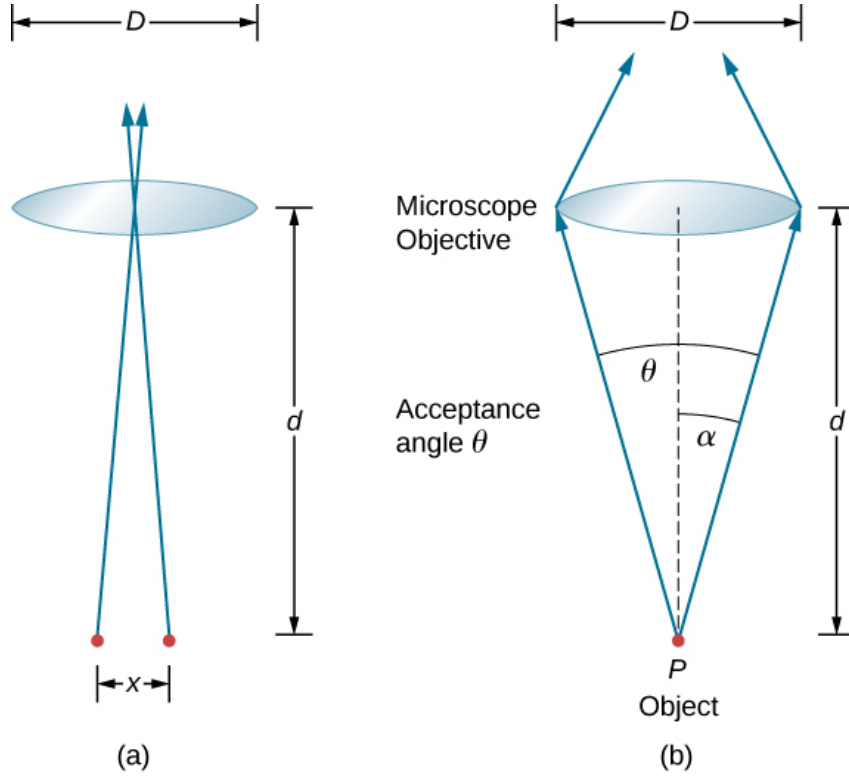
هناك طريقة أخرى لذلك، وهي مفهوم الفتحة الرقمية ( $NA$ )، وهو مقياس لزاوية القبول العظمى، التي تأخذ بها العدسة الضوء وتحتفظ بها داخلها. يوضح **الشكل 22.4 (b)** العدسة والجسم عند النقطة  $P$ . إن  $NA$  هنا هو مقياس قدرة العدسة على جمع الضوء وتحليل التفاصيل الدقيقة للجسم. الزاوية التي يتم التقاطها بواسطة العدسة عند تركيزها تحسب من العلاقة  $\theta = 2\alpha$ . من الشكل وباستخدام تقريب الزاوية الصغيرة مرة أخرى، نجد أن:

$$\sin \alpha = \frac{D/2}{d} = \frac{D}{2d}$$

$NA$  للعدسة هو  $NA = n \sin \alpha$ ، حيث  $n$  هو قرينة الانكسار للوسط بين العدسة الجسيمية والجسم عند النقطة  $P$ . من هذا التعريف لـ  $NA$ ، يمكن كتابة مايلي:

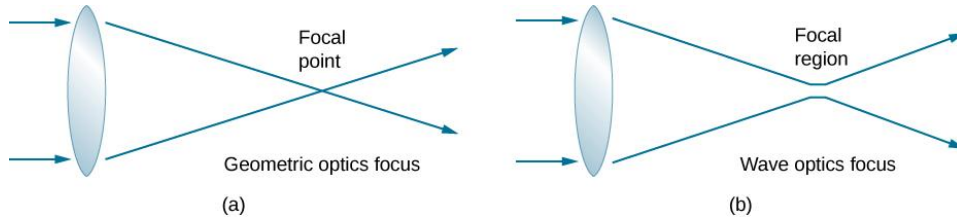
$$x = 1.22 \frac{\lambda d}{D} = 1.22 \frac{\lambda}{2 \sin \alpha} = 0.61 \frac{\lambda n}{NA}$$

في المجهر،  $NA$  مهم لأنه يرتبط بقدرة فصل العدسة. تكون العدسة، التي تتمتع بقيمة  $NA$  كبيرة تكون قادرة على تحليل تفاصيل أدق. تجمع العدسات، التي يكون فيها  $NA$  أكبر، المزيد من الضوء، وبالتالي تعطي خيلاً أكثر سطوعاً. وهناك طريقة أخرى لوصف ما سبق، وهي أنه كلما ازداد  $NA$ ، ازداد مخروط الضوء الذي يمكن تجميعه من قبل العدسة، بحيث يتم جمع المزيد من أنماط الحيود، وبالتالي يعطي المجهر مزيداً من المعلومات لتكوين خيال واضح، ويزيد قدرته على التحليل.



**الشكل 22.4** (a) نقطتان تفصل بينهما مسافة  $x$  وتقعان على بعد  $d$  من الجسم. (b) المصطلحات والرموز المستخدمة في مناقشة مقدرة الفصل للعدسة والجسم عند النقطة  $P$ .

إحدى عواقب الحيود هي أن المحرق للحزمة الضوئية له عرض شدة محددة وتوزعها. تخيل القيام بالتمحرق (التبشير) آخذين بالحسبان البصريات الهندسية فقط كما في **الشكل 23.4 (a)**. يُعد المحرق نقطة صغيرة بشكل لا نهائي ولها شدة هائلة وقدرة على حرق معظم العينات بغض النظر عن قيمة  $NA$  للعدسة الجسيمية - تبسيط غير فيزيائي. بالنسبة للبصريات الموجية، وبسبب الحيود، فإننا نأخذ بالحسبان الظاهرة التي ينتشر فيها المحرق لتتحول إلى بقعة محرقية (**الشكل 23.4 (b)**))، حيث يتناقص مقياس البقعة بزيادة  $NA$ . وبالتالي، تزداد شدة البقعة المحرقية بزيادة  $NA$ . وكلما ازدادت قيمة  $NA$ ، ازدادت فرص التصوير الضوئي للعينة. ومع ذلك، فإن البقعة لا تتحول إلى نقطة حقيقية.



**الشكل 23.4 (a)** في البصريات الهندسية، يتم تمثيل المحرق بنقطة، ولكن ليس من الممكن فعلياً الوصول إلى هذه النقطة لأنها تشير إلى شدة لا نهائية. (b) في مجال البصريات الموجية، يكون المحرق منطقة ممتدة.

في نوع آخر من المجاهر، يتم صنع جزئيات داخل العينة لإصدار الضوء من خلال آلية تُسمى التآلق. من خلال التحكم في الجزئيات المصدرة للضوء، أصبح من الممكن إنشاء خيال بدقة أعلى بكثير من معيار رايلي، وبالتالي التغلب على حد الحيود. وأدى ابتكار مجهر مع مادة وميضية فائقة الفصل إلى نيل جائزة نوبل في الكيمياء عام 2014.

يظهر في نموذج الفصل البصري، الموجود في الرابط، مخططاً حيود للضوء من خلال فتحتين دائريتين جنباً إلى جنب في هذه المحاكاة (<https://openstaxcollege.org/l/21optresmodsim>) من إعداد فو كوون هوانج. لاحظ اندماج الأنماط عند تصغير أقطار الفتحة.

## 6.4 | حيود الأشعة السينية X-Ray Diffraction

### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

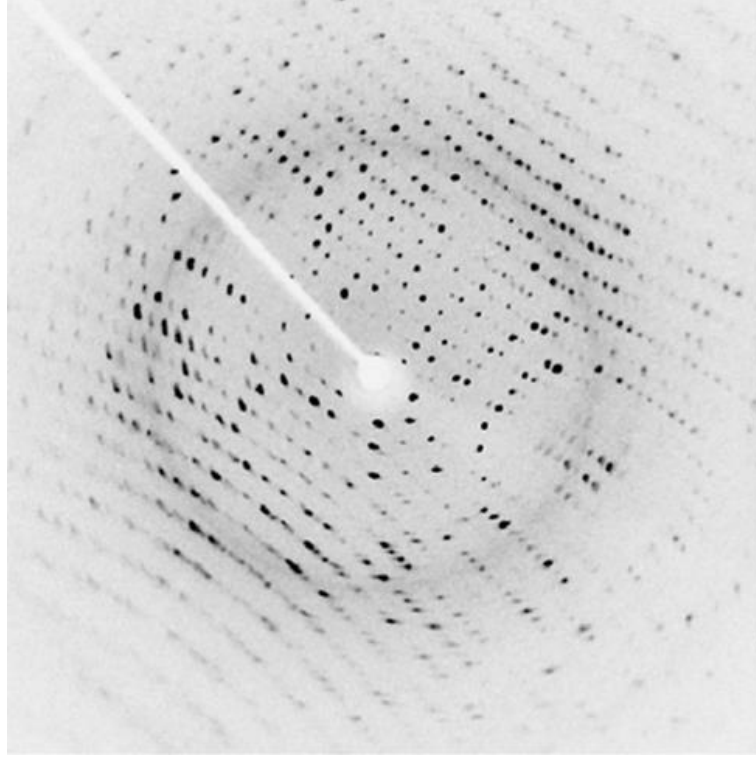
- وصف تأثيرات التداخل والحيود التي تظهرها الأشعة السينية عند تفاعلها مع البنية الذرية.

نظراً لأن فوتونات الأشعة السينية عالية الطاقة، فإن لها أطوالاً موجية قصيرة نسبياً تتراوح من  $10^{-8}$  m إلى  $10^{-12}$  m. وبالتالي، تسلك فوتونات الأشعة السينية النموذجية سلوك الأشعة عندما تعترضها أجسام، كالأسنان مثلاً، وتنتج ظلالاً حادة. ومع ذلك، ونظراً لأن أبعاد الذرات من مرتبة 0.1 nm، فإنه يمكن استخدام الأشعة السينية للكشف عن موقع الذرات والجزيئات وشكلها وأبعادها. وتُسمى هذه العملية بحيود الأشعة السينية، وهي تتضمن تداخل الأشعة السينية لإنتاج أنماط يمكن تحليلها للحصول على معلومات حول البنية الدقيقة، التي انتشرت فيها هذه الأشعة السينية.

ولعل أشهر الأمثلة على حيود الأشعة السينية هو اكتشاف البنية المزدوجة للحمض النووي DNA في عام 1953 من قبل فريق دولي من العلماء العاملين في مختبر كافينديش بإنجلترا - الأمريكي جيمس واتسون وروزاليند فرانكلين ووريس ويلكينز Wilkins المولود في نيوزيلندا. وباستخدام بيانات حيود الأشعة السينية، التي أنتجتها روزاليند فرانكلين Rosalind Franklin، والتي كانت أول من قام بتصميم هيكل الحلزون المزدوج للحمض النووي الذي يعد بالغ الأهمية للحياة. لهذا العمل، تم منح كلٍ من واتسون و كريك وويلكينز جائزة نوبل في علم وظائف الأعضاء أو الطب عام 1962. (هناك بعض الجدل حول قضية عدم إدراج اسم روزاليند فرانكلين في الجائزة، على الرغم من أنها توفيت في عام 1958 قبل منح الجائزة).

وضح الشكل 24.4 نمط الحيود الناتج عن تبعثر الأشعة السينية من بلورة. تُعرف هذه العملية بعلم البلورات بالأشعة السينية بسبب المعلومات التي يمكن أن تعطيها عن التركيب البلوري، وهي البيانات نفسها التي قدمتها روزاليند فرانكلين إلى واتسون و كريك عن الحمض النووي. لا تُعطي الأشعة السينية مقياس الذرات وشكلها فحسب، بل إنها تعطي معلومات حول الترتيبات الذرية في المواد. على سبيل المثال، أظهرت الأبحاث الحديثة في النواقل الفائقة ذات درجة الحرارة المرتفعة وجود مواد معقدة، بحيث يكون ترتيبها الذري ضرورياً للحصول على خاصية الناقلية الفائقة فيها. ويمكن دراسة بنية هذه المواد باستخدام الأشعة السينية.





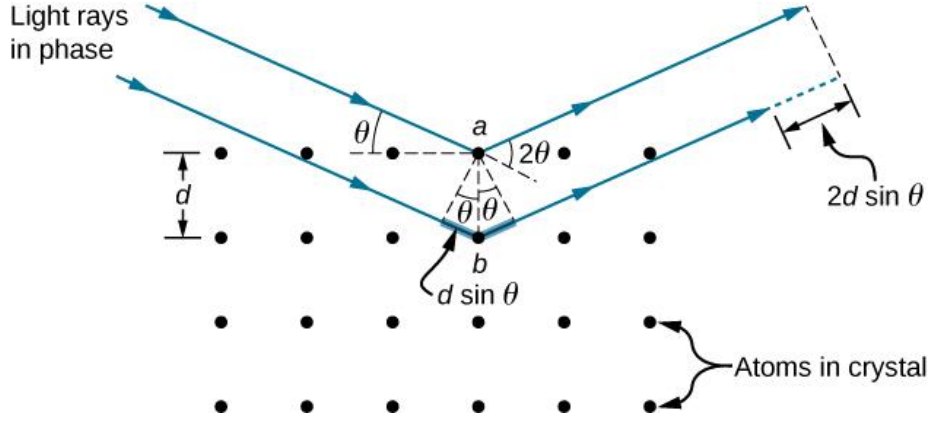
**الشكل 24.4** نمط حيود الأشعة السينية من بلورة البروتين (بيض دجاجة الليزوزيم *lysozyme*)، وينتج هذا النمط من التداخل. يعطي تحليل النمط معلومات حول بنية البروتين. (الائتمان: "De/45" / ويكيبيديا كومنز Wikimedia Common)

تاريخياً، تم استخدام تبعثر الأشعة السينية من البلورات لإثبات أن الأشعة السينية هي أمواج طاقة كهرومغناطيسية. كان هذا مشكوكاً فيه منذ اكتشاف الأشعة السينية في عام 1895، لكن هذا استمر حتى عام 1912 عندما استطاع الألماني ماكس فون لاو (1879-1960) اقناع اثنين من زملائه ببعثرة الأشعة السينية عن البلورات. حين قال مُعللاً أنه إذا تم الحصول على نمط الحيود، فهذا يعني أن الأشعة السينية هي عبارة عن أمواج، ويمكن تحديد طولها الموجي. (كانت المسافات بين الذرات في البلورات المختلفة معروف تماماً في ذلك الوقت استناداً إلى القيم الجيدة لعدد أفوغادرو). كانت التجارب مقنعة، ومنحت جائزة نوبل في الفيزياء لعام 1914 لفون لاو عن اقتراحه، الذي أدى إلى إثبات أن الأشعة السينية هي أمواج كهرومغناطيسية. في عام 1915، حصل فريق الوالد والابن الفريد للسير وليم هنري براغ وابنه سير ويليام لورنس براغ على جائزة نوبل المشتركة لاختراعهما مطياف الأشعة السينية وعلم تحليل الأشعة السينية الجديد في تلك الفترة.

هناك طرائق تُدكَرنا بتداخل الأغشية الرقيقة، نأخذ موجتين مستويتين بالطول الموجي للأشعة السينية، وتنعكس كل واحدة عن مستوى مختلف داخل الشبكة البلورية كما هو مبين في **الشكل 25.4**. هندسياً، يكون الفرق في المسار بينهما هو  $2d \sin \theta$ . ينتج التداخل البناء عندما تكون هذه المسافة هي من المضاعفات الصحيحة لطول الموجة. ويتم تحديد هذا الشرط من معادلة براغ (Bragg equation):

$$m\lambda = 2d \sin \theta, m = 1, 2, 3 \dots \quad (4.6)$$

حيث:  $m$  هو عدد صحيح موجب و  $d$  هو البعد بين المستويات البلورية. ووفقاً لقانون الانعكاس، يتم وصف كل من الأمواج العارضة والمنعكسة بالزاوية نفسها  $\theta$ ، ولكن على عكس ما هو شائع في البصريات الهندسية، يتم قياس  $\theta$  بالنسبة للسطح نفسه بدلاً من الناظم.



**الشكل 25.4** حيود الأشعة السينية في بلورة. تنعكس موجتان منفصلتان عن مستويين بلوريين. يشار إلى الفرق بين طولي المسارين بخط منقطع.

## مثال 7.4

### حيود الأشعة السينية في بلورات الملح

يتكون ملح الطعام العادي من بلورات كلور الصوديوم NaCl. في بلورة NaCl، هناك مجموعة من المستويات المسافة بينها 0.252 nm. إذا كان القمة العظمى من المرتبة الأولى عند زاوية ورود قدرها 18.1 درجة، فما هو الطول الموجي لتبعثر الأشعة السينية عن هذه البلورة؟

### خطة الحل

استخدام معادلة براغ، أي المعادلة 4.6،  $m\lambda = 2d \sin \theta$ .

### الحل:

عند المرتبة الأولى  $m=1$ ، والمسافة بين المستويات معروفة  $d$ ، بحل معادلة براغ نحصل على طول الموجة:

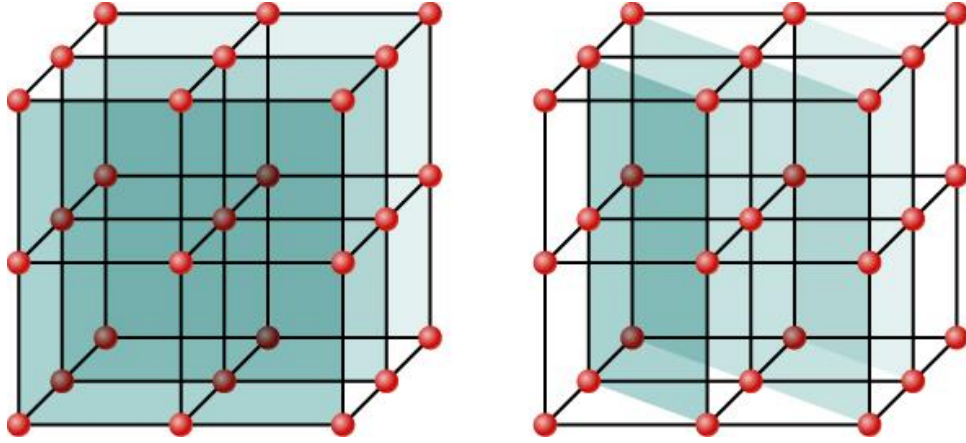
$$\lambda = \frac{2d \sin \theta}{m} = \frac{2(0.252 \times 10^{-9} \text{m}) \sin(18.1^\circ)}{1} = 1.57 \times 10^{-10} \text{m} = 0.157 \text{nm}.$$

### ملاحظة:

يتناسب الطول الموجي المحدد مع منطقة الأشعة السينية من الطيف الكهرومغناطيسي. ومرة أخرى، تظهر طبيعة موجة الضوء عندما يكون طول الموجة ( $\lambda = 0.157 \text{nm}$ ) مشابهاً لمقاس البنى الفيزيائية ( $d = 0.252 \text{nm}$ ) التي يتفاعل معها.

**6.4 للتحقق من فهمك** للتجربة الموضحة في المثال 7.4، احسب الزاويتين الأخرين اللتين يمكن عندهما ملاحظة القمة العظمى للتداخل؟ وما الذي يحد من عدد القمم العظمى؟

على الرغم من أن **الشكل 25.4** يصور البلورة كمصفوفة ثنائية الأبعاد لمراكز التبعثر لتبسيطها، إلا أن البلورات الحقيقية هي بني ثلاثية الأبعاد. يمكن أن يحدث التبعثر في وقت واحد عن مجموعات مختلفة من المستويات، والتي تتمتع باتجاهات مختلفة ومسافات مختلفة فيما بينها، والتي تعرف باسم مستويات براغ كما هو مبين في **الشكل 26.4**. يمكن أن يكون نمط التداخل الناتج معقداً جداً.



**الشكل 26.4** بسبب انتظام البنية البلورية، يمكن أن تحتوي البلورة الواحدة على العديد من أسر (مجموعات) المستويات داخلها، وتسهم كل واحدة منها في حيود الأشعة السينية.

## 7.4 | التصوير المجسم أو الهولوجرافي Holography

### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

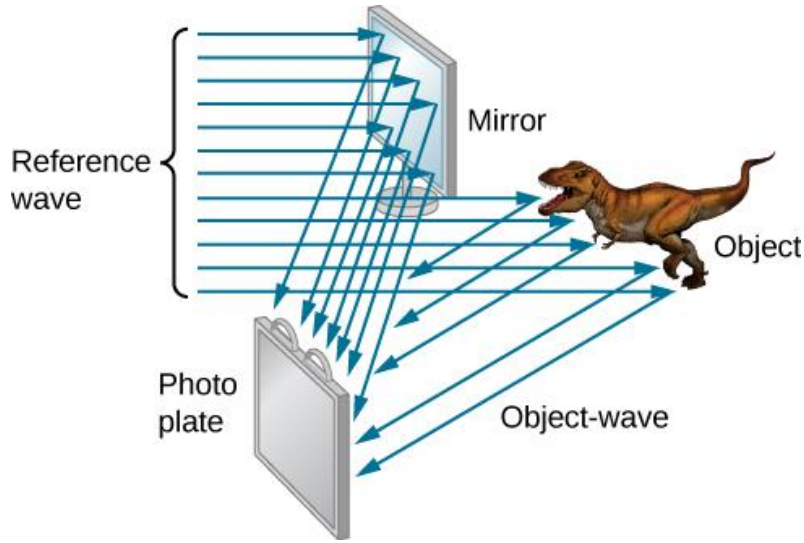
- وصف كيفية تسجيل الخيال ثلاثي الأبعاد على شكل صورة مجسمة (هولوجرام).
- وصف كيفية تكوين الخيال ثلاثي الأبعاد من صورة مجسمة (هولوجرام).

الهولوجرام، كما في **الشكل 27.4**، هو خيال ثلاثي الأبعاد حقيقي مسجل على الفيلم بواسطة الليزر. تستخدم الأحيلة المجسمة للتسليمة، وتزيين القطع الجديدة وأغلفة المجلات؛ كما تستخدم لمنع تزوير بطاقات الائتمان ورخص القيادة (يتم ذلك باستخدام جهاز ليزر ومعدات أخرى)؛ ولتخزين المعلومات الخطيرة ثلاثية الأبعاد. يمكن رؤية الخيال المجسم كصورة حقيقية ثلاثية الأبعاد بسبب تغير المواضع النسبية لمكونات الجسم في الخيال عند النظر إليه من زوايا مختلفة.



**الشكل 27.4** تحتوي بطاقات الائتمان عادة على صورة ثلاثية الأبعاد للشعارات، مما يجعل من الصعب إعادة إنتاجها. (الائتمان: دومينيك ألفيس) (credit: Dominic Alves)

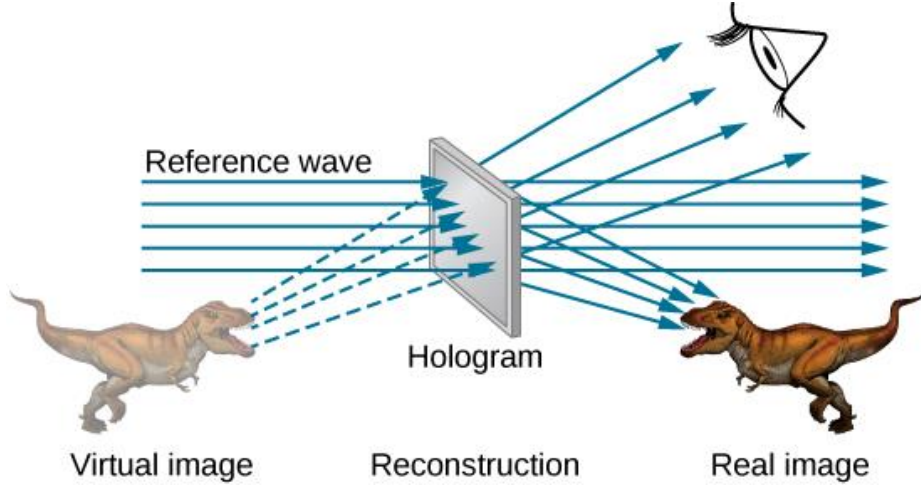
تعني الهولوجرام "الصورة (الخيال) بأكملها" (من holo اليونانية، كما في كلمة holistic وتعني الشمولية)، لأن الخيال ثلاثي الأبعاد. التصوير المجسم هو عملية إنتاج الأحيولة المجسمة، وعلى الرغم من تسجيلها في فيلم فوتوغرافي، إلا أن العملية مختلفة تماماً عن التصوير العادي. يستخدم التصوير المجسم البصري تداخل الضوء أو البصريات الموجية، بينما يستخدم التصوير العادي البصريات الهندسية. يوضح **الشكل 28.4** إحدى طرائق إنتاج الهولوجرام. تتم تجزئة ضوء الليزر المتناسك بواسطة مرآة، بحيث إنّ جزءاً من هذا الضوء يقوم بإضاءة الجسم. أما الباقي، والذي يُسمى الحزمة المرجعية، فيتم إسقاطه مباشرة على قطعة من فيلم. يتداخل الضوء المتبعثر من الجسم مع الحزمة المرجعية، مما ينتج عنه تداخل بناءً وهداماً. ونتيجة لذلك، يبدو الفيلم ضبابياً، لكن الفحص الدقيق يكشف عن نمط تداخل معقد مخزن عنده. في أماكن حدوث التداخل البناء، يكون الفيلم (سالباً في الحقيقة) مظلماً. أحياناً ما يطلق على التصوير المجسم التصوير الفوتوغرافي دون عدسة، لأنه يستخدم الخصائص الموجية للضوء، على عكس التصوير العادي، الذي يستخدم البصريات الهندسية ويتطلب عدسات.



**الشكل 28.4** إنتاج خيال ثلاثي الأبعاد. ينتج الضوء الليزري المتناسك وحيد الطول الموجي نمط تداخل محدد جيداً على فيلم. تتم تجزئة شعاع الليزر بواسطة مرآة مفضضة جزئياً، بحيث إنّ جزءاً من هذا الضوء يضيء الجسم والباقي يسقط مباشرة على الفيلم مسبباً لمعانه. (credit: modification of work by Mariana Ruiz Villarreal).

(الائتمان: جرى تعديل العمل من قبل ماريانا رويز فيلارريل)

يمكن أن يشكل الضوء الوارد على الصورة المجسمة خيلاً ثلاثي الأبعاد للجسم الأصلي. العملية معقدة التفاصيل، ولكن يمكن فهم مبدئها كما هو موضح في **الشكل 29.4**، حيث استخدم ليزر لإضاءة الفيلم من النوع نفسه، الذي يستخدم لكشفه أو عرضه. تكون الكثير من المناطق المكشوفة الصغيرة من الفيلم مظلمة وتمنع مرور الضوء، بينما تسمح المناطق الأقل كشافاً بمروره. يتصرف الفيلم كمجموعة من شبكات الحيود مع أنماط تباعد مختلفة. يحيد الضوء، الذي يمر عبر الهولوجرام، في اتجاهات مختلفة، مما ينتج عنه أحيولة حقيقية ووهمية للجسم المستخدم. نمط التداخل هو نفسه الذي ينتج عن الجسم. بتحريك عينيك إلى أماكن مختلفة في نمط التداخل تحصل على منظورات مختلفة، تماماً كما لو كنت تنظر إلى الجسم المصور مباشرة. وهكذا يبدو الخيال كمجسم ثلاثي الأبعاد كما هو الحال في الجسم الذي تم تصويره.



**الشكل 29.4** - خيال مجسم بالنفوذ وهو خيال حقيقي وافتراضي عندما يمر خلاله ليزر من النوع نفسه، الذي يكشف الصورة المجسمة. ينتج الحيود عن أجزاء مختلفة من الفيلم النمط نفسه للتداخل، الذي ينتج عن الجسم الذي تم استخدامه للعرض. (credit: modification of work by Mariana Ruiz Villarreal).

(الائتمان: جرى تعديل العمل من قبل ماريانا رويز فيلارريل)

الهولوجرام الموضح في **الشكل 29.4** هو خيال ثلاثي الأبعاد بالنفوذ. الهولوجرام، المعروض بالضوء المنعكس، كالهولوجرام بالضوء الأبيض الموجود على بطاقات الائتمان، وهو الأكثر شيوعاً. غالباً ما يُظهر هولوجرام الضوء الأبيض ضبابية وذات حواف قوس قزح، ذلك لأن أنماط الحيود بألوان مختلفة من الضوء توجد في مواقع مختلفة قليلاً بسبب أطوال موجاتها المختلفة. تشمل الاستخدامات الأخرى للأخيلة ثلاثية الأبعاد جميع أنواع تخزين المعلومات ثلاثية الأبعاد، مثل التماثيل في المتاحف والدراسات الهندسية للهيكل والأعضاء البشرية.

اخترع الهولوجرام في أواخر الأربعينيات من القرن الماضي من قبل دينيس غابور (1900-1970)، الذي حصل على جائزة نوبل في الفيزياء عام 1971، وتطورت عملية التصوير المجسم مع تطور الليزر. ونظراً لأن أشعة الليزر متماسكة ووحيدة الطول الموجي، فإن أنماط تداخلها تكون أكثر وضوحاً. وتكون دقة الخيال رائعة، ومن الممكن حتى تسجيل العديد من الصور المجسمة على فيلم واحد فقط عن طريق تغيير زاوية الفيلم لكل صورة متتالية. هذه الطريقة، التي يتم بها إنتاج الصور المجسمة، فهي التي تتحرك عند النظر إليها - وهو نوع من الأفلام الخالية من العدسات. بطريقة مماثلة، في المجال الطبي، سمحت الهولوجرام بعرض ثلاثي الأبعاد كامل للأجسام بمراكمه مجموعة من الصور. تخزين هذه الصور للاستخدام في المستقبل سهل نسبياً. مع استخدام المنظار، يمكن إجراء صور ثلاثية الأبعاد عالية الدقة للأعضاء والأنسجة الداخلية.

## مراجعة الفصل الرابع:

### الكلمات المفتاحية:

مستويات براغ: مجموعة من المستويات البلورية، التي يمكن أن تؤدي إلى حيود الأشعة السينية.

التداخل الهدّام للشق الأحادي: يحدث عندما يكون عرض الشق مشابهاً لطول موجة الضوء الذي يضيئه.

الحيود (الحيود): هو انحناء الموجة حول حواف فتحة أو حاجز.

شبكة الحيود: هي عدد كبير من الشقوق (الحزوز) المتوازية، والتي تفصل بينها مسافات متساوية.

حد الحيود هو الحد الأساس لمقدرة الفصل الناتجة عن الحيود.

الهولوجرام (الخيال المجسم): هو خيال ثلاثي الأبعاد مسجل على فيلم باستخدام الليزر؛ الهولوجرام كلمة تعني الصورة بأكملها (من الكلمة اليونانية holo).

التصوير المجسم: هو عملية إنتاج الأحيلة المجسمة باستخدام الليزر.

الترتيب المفقود: هو الحد الأقصى للتداخل، الذي لا يظهر كونه يتزامن مع الحد الأدنى للحيود.

معيار رايلي: هو أن الصورتين تكونان قابلتين للتمييز عندما يكون مركز نمط الحيود لإحدهما أعلى مباشرةً من القمة العظمى الأولى لنمط الحيود في الأخرى.

مقدرة الفصل: هي القدرة على التمييز بين التفاصيل الصغيرة في الخيال.

نمط الحيود مزدوج الشق: نمط الحيود لشقين بعرض  $D$  تفصل بينهما المسافة  $d$ ، وهو مخطط التداخل لمصدرين نقطيين تفصل بينهما مسافة  $d$ ، وهو ضعف نمط الحيود أحادي الشق بعرض  $D$ .

عرض القمة المركزية: هو زاوية بين الحدين  $m = 1$  و  $m = -1$ .

حيود الأشعة السينية: هو تقنية توفر معلومات مفصلة حول التركيب البلوري للمواد الطبيعية والمصنعة.

### المعادلات المفتاحية:

التداخل الهدّام في الشق الأحادي

$$m \lambda = D \sin \theta \text{ من أجل قيم: } m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

زاوية نصف الطور

$$\beta = \frac{\phi}{2} = \frac{\pi D \sin \theta}{\lambda}$$

مطال الحقل في نمط الحيود

$$E = N \Delta E_0 \frac{\sin \beta}{\beta}$$

الشدة في نمط الحيود

$$I = I_0 \left( \frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2$$

معيار رايلي للفتحات الدائرية

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

معادلة براغ

$$m \lambda = 2d \sin \theta, m = 1, 2, 3, \dots$$

## ملخص الفصل:

### 1.4 الحيود أحادي الشق:

- يستطيع الحيود إرسال الموجة حول حواف فتحة أو أي حاجز آخر.
- يتميز نمط التداخل الناتج عن شق واحد بوجود قمة عظمية مركزية عريضة مع قمم عظمية أضيق وباهتة على الجانبين.

### 2.4 الشدة في الحيود أحادي الشق:

- يمكن حساب الشدة في نمط الحيود الناجم عن الشق الأحادي باستخدام الأطوار كما يلي:

$$I = I_0 \left( \frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2$$

حيث  $\beta = \frac{\phi}{2} = \frac{\pi D \sin \theta}{\lambda}$  هو عرض الشق،  $\lambda$  هو طول الموجة، و  $\theta$  هي الزاوية من القمة المركزية.

### 3.4 الحيود مزدوج الشق

- باستخدام الشقوق الحقيقية ذات العرض المحدود، تعمل تأثيرات التداخل والحيود في وقت واحد لتشكيل نمط شدة معقد.
- يمكن تحديد الشدة النسبية لأهداب التداخل ضمن نمط الحيود.
- تحدث المراتب المفقودة عند وجود قمة عظمية للتداخل وقمة صغرى للحيود معاً.

### 4.4 شبكة الحيود

- تتكون شبكة الحيود من عدد كبير من الشقوق المتوازية والمتباعدة فيما بينها بشكل متساوٍ، والتي تنتج نمط تداخل مشابهاً لحالة الشق المزدوج.
- يحدث التداخل البناء عندما تكون  $m\lambda = 2d \sin \theta$ ،  $m = 1, 2, 3, \dots$ ، حيث:  $d$  هي المسافة بين الشقوق،  $\theta$  هي الزاوية بالنسبة لاتجاه الورد، و  $m$  هي مرتبة التداخل.

### 5.4 الحيود عند الفتحات الدائرية ومقدرة الفصل

- يجد الحيود من مقدرة الفصل.
- ينص معيار رايلي على أنه يمكن التمييز بين خيالين فقط عندما يكون مركز نمط الحيود في أحدهما أكبر مباشرةً من القمة الصغرى الأولى لنمط الحيود في الأخرى.

### 6.4 حيود الأشعة السينية

- الأشعة السينية هي أمواج كهرومغناطيسية قصيرة طول الموجة نسبياً، ويمكن أن تظهر خصائص الموجة مثل التداخل عند تفاعلها مع الأجسام الصغيرة المقاربة لها بالأبعاد.

### 7.4 التصوير المجسم

- التصوير المجسم (هولوجرافي) عبارة عن تقنية تعتمد تداخل الأمواج لتسجيل أحيولة ثلاثية الأبعاد.
- يوفر الليزر طريقة عملية لإنتاج أحيولة ثلاثية الأبعاد حادة بسبب وحدانية لونه وتماسكه مما يعطي أنماط تداخل واضحة.

## أسئلة نظرية:

### 1.4 الحيود أحادي الشق

1. مع انخفاض عرض الشق، الذي ينتج نمط الحيود أحادي الشق، كيف سيتغير نمط الحيود الناتج؟
2. قارن بين التداخل والحيود.

3. إذا كنت أنت وصديقك على جانبي تلة (هضبة)، يمكنكم التواصل باستخدام أجهزة الاتصال اللاسلكية وليس باستخدام المصايح اليدوية. فسّر ذلك.

4. ماذا يحدث لنمط الحيود أحادي الشق عندما يتم غمر الجهاز البصري بأكمله في الماء؟

5. في دراستنا للحيود أحادي الشق، نفترض أن طول الشق أكبر بكثير عرضه. ماذا يحدث لنمط الحيود إذا كان هذان البعدان قابلين للمقارنة؟

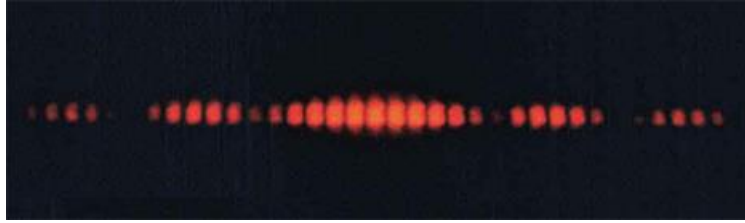
6. يبلغ عرض الشق المستطيل ضعفي ارتفاعه. هل يبلغ الحيود المركزي ذروته في الاتجاه العمودي أم في الاتجاه الأفقي؟

#### 2.4 الشدة في حيود الشق الأحادي

7. في المعادلة 4.4،  $\beta$  تبدو كزاوية ولكنها ليست زاوية يمكنك قياسها بمنقلة في العالم المادي. اشرح ماذا تمثل  $\beta$ .

#### 3.4 الحيود مزدوج الشق

8. يظهر في الشكل المبين أدناه الجزء الرئيس من نمط التداخل لطول موجة نقية من الضوء الأحمر الوارد على شق مزدوج. هذا النمط هو في الواقع مزيج من التداخل أحادي الشق ومزدوج الشق. لاحظ أن البقع المضيفة متباعدة فيما بينها بالتساوي. هل هذه خاصية الشق المزدوج أم الأحادي؟ لاحظ أن بعض البقع المضيفة تبدو باهتة على جانبي المركز. هل هذه خاصية الشق المزدوج أم الأحادي؟ ما هو الأصغر، عرض الشق أم المسافة بين الشقوق؟ فسّر إجاباتك.



#### 5.4 الحيود عند الفتحات الدائرية ومقدرة الفصل

9. هل يتم الحصول على دقة أعلى في المجهر مع الضوء الأحمر أم الأزرق؟ فسّر إجاباتك.

10. تزداد مقدرة الفصل للتلسكوب الكاسر للضوء بازدياد مقاس العدسة الجسيمية. ما هي الميزة الأخرى المكتسبة بوجود عدسة أكبر؟

11. تبلغ المسافة بين الذرات في الجزيء نحو  $10^{-8}$  cm. هل يمكن استخدام الضوء المرئي "الرؤية" الجزيئات؟

12. تنتشر الحزمة الضوئية دائماً. لماذا لا يمكن إنشاء حزمة بأشعة متوازية لمنع انتشارها؟ لماذا لا يمكن استخدام العدسات أو المرايا أو الفتحات لتصحيح الانتشار؟

#### 6.4 حيود الأشعة السينية

13. يمكن فحص الشبكات البلورية باستخدام الأشعة السينية، وليس الأشعة فوق البنفسجية. لماذا؟

#### 7.4 التصوير المجسم

14. كيف يمكنك معرفة أن الخيال المجسم هو صورة ثلاثية الأبعاد حقيقية، وأن تلك الموجودة في الأفلام ثلاثية الأبعاد ليست كذلك؟

15. إذا تم تسجيل خيال ثلاثي الأبعاد باستخدام ضوء أحادي اللون بطول موجة واحدة ولكن تم عرض خياله بطول موجة أخرى، أقل مثلاً بنسبة 10٪، ماذا سنرى؟ ماذا لو تم عرضه باستخدام ضوء بنصف طول الموجة الأصلي بالضبط؟



16. ما هو الخيال الذي يمكن للمرء أن يراه ما إذا كان الهولوغرام مسجلاً باستخدام ضوء أحادي اللون، ولكن يتم عرضه في الضوء الأبيض؟ فسّر اجابتك.

## مسائل:

### 1.4 الحيود أحادي الشق

17. (a) في أي زاوية، تكون القمة الصغرى الأولى لضوء طول موجته  $550 \text{ nm}$  يسقط على فتحة واحدة بعرض  $1.00 \mu\text{m}$ ؟  
(b) هل سيكون هناك قمة صغرى ثانية؟
18. (a) احسب الزاوية التي يُنتج عندها شق يبلغ طوله  $2.00 \mu\text{m}$  القمة الصغرى الأولى لضوء بنفسجي طول موجته  $410 \text{ nm}$ .  
(b) أين تقع القمة الصغرى الأولى لضوء أحمر طول موجته  $700 \text{ nm}$ ؟
19. (a) ما هو عرض الشق الأحادي الذي يُنتج قمة صغرى أولى لضوء طول موجته  $633 \text{ nm}$  عند زاوية  $28.0^\circ$ ؟  
(b) في أي زاوية ستكون القمة الصغرى الثانية؟
20. (a) ما هو عرض الشق الأحادي الذي يُنتج القمة الصغرى الأولى عند  $60.0^\circ$  درجة لضوء طول موجته  $600 \text{ nm}$ ؟  
(b) أوجد الطول الموجي لضوء تقع القمة الصغرى الأولى له عند الزاوية  $62.0^\circ$  درجة.
21. احسب الطول الموجي لضوء القمة الصغرى الثالثة له عند زاوية  $48.6^\circ$  درجة عندما يرد على فتحة واحدة بعرض  $3.00 \mu\text{m}$ .
22. (a) يسقط ضوء بخار الصوديوم بمتوسط طول موجي  $589 \text{ nm}$  على فتحة واحدة بعرض  $7.50 \mu\text{m}$ . عند أي زاوية ينتج القمة الصغرى الثانية؟ (b) ما هي أعلى قمة صغرى يمكن انتاجها؟
23. إذا تم إسقاط مخطط حيود أحادي الشق لضوء طول موجته  $\lambda = 589 \text{ nm}$  على شاشة تبعد مسافة  $1.00 \text{ m}$  عن شق يبلغ عرضه  $0.25 \text{ mm}$ . ما هو بعد مركز المخطط عن مراكز الأهداب المظلمة الأول والثاني؟
24. (a) أوجد الزاوية بين القمتين الصغريين الأوليين لخطي بخار الصوديوم، اللذين يبلغ طولهما الموجي  $589.1 \text{ nm}$  و  $589.6 \text{ nm}$ ، عندما يسقطان على شق واحد بعرض  $2.00 \text{ m}$ . (b) ما هي المسافة بين هذه القمم الصغرى إذا وقع نمط الحيود على شاشة تبعد مسافة  $1.00 \text{ m}$  عن الشق؟ (c) ناقش مدى سهولة أو صعوبة قياس مثل هذه المسافة.
25. (a) ما هي أقل قيمة لعرض شق أحادي (مقاساً بمضاعفات طول الموجة) والذي سيُنتج القمة الصغرى الأولى لطول الموجة؟  
(b) ما هي أقل قيمة للعرض إذا كان ينتج  $50$  قمة صغرى؟ (c)  $1000$  قمة صغرى؟
26. (a) إذا كان شق أحادي يُنتج القمة الصغرى الأولى عند زاوية  $14.5^\circ$  درجة، فما هي الزاوية التي ينتج عندها القمة الصغرى الثانية؟ (b) وما هي الزاوية التي ينتج عندها القمة الصغرى الثالثة؟ (c) هل يوجد قمة صغرى رابعة؟ (d) استخدم إجابتك لتوضيح كيف يكون العرض الزاوي للقمة العظمى المركزية نحو ضعف العرض الزاوي للقمة العظمى التالية (وهو الزاوية بين القمة الصغرى الأولى والثانية).
27. إذا كان البعد الفاصل بين القمة الصغرى الأولى والثانية لنمط الحيود أحادي الشق يبلغ  $6.0 \text{ mm}$ ، فما هي المسافة بين الشاشة والشق؟ على اعتبار طول موجة الضوء  $500 \text{ nm}$  وعرض الشق هو  $0.16 \text{ mm}$ .
28. تنكسر المياه عند مدخل الميناء على حاجز صخري له فتحة عرضها  $50.0 \text{ m}$ . تصل أمواج المحيط ذات الطول الموجي  $20.0 \text{ m}$  إلى الفتحة مباشرة. في أي زاوية في الاتجاه المباشر تكون القوارب الموجودة داخل المرفأ محمية بدرجة أكبر من حركة الأمواج؟

29. يسير في صيانة طائرات عبر باب حظيرة مرتفع يعد بمنزلة شق أحادي تمر عبره الأصوات الداخلة إلى الحظيرة. في الخارج، وعلى خط عمودي فتحة في الباب، يصدر محرك نفاث صوت تردده 600 Hz. في أي زاوية من الباب سيلاحظ الفني القمة الصغرى الأولى لشدة الصوت إذا كانت الفتحة العمودية بعرض 0.800 m متر وسرعة الصوت 340 m/s؟

### 2.4 الشدة في الحيود أحادي الشق

30. تتم إضاءة شق أحادي بعرض  $3.0 \mu\text{m}$  ميكرون بواسطة ضوء أصفر من الصوديوم يبلغ طول موجته 589 nm. أوجد الشدة عند زاوية 15 درجة مع المحور من حيث شدة القمة العظمى المركزية.

31. تتم إضاءة شق أحادي بعرض 0.1 mm بواسطة ضوء زئبقي طول موجته 576 nm. أوجد الكثافة عند زاوية 10 درجات مع المحور من حيث شدة القمة العظمى المركزية.

32. عرض الذروة المركزية في نمط حيود أحادي الشق هو 5.0 mm. الطول الموجي للضوء هو 600 nm، والشاشة على بعد 2.0 m من الشق. (a) ما هو عرض الشق؟ (b) احسب النسبة بين الشدة على بعد 4.5 mm من مركز النمط والشدة في المركز.

33. باعتبار نمط حيود أحادي الشق لضوء طول موجته  $\lambda = 600 \text{ nm}$ ،  $D = 0.025 \text{ mm}$ ، و  $x = 2.0 \text{ m}$ . احسب شدة  $I_0$  عند القيم التالية  $\theta = 0.5^\circ, 1.0^\circ, 1.5^\circ, 3.0^\circ, 10.0^\circ$ .

### 3.4 الحيود مزدوج الشق

34. شقان بعرض  $2 \mu\text{m}$ ، يتم فصل كل منهما في مادة غير شفافة، بحيث يكون البعد بين مركزيهما  $6 \mu\text{m}$ . يسقط ضوء أحادي اللون طول موجته 450 nm بشكل مباشر على الشق المزدوج. عندئذ يمكن ملاحظة نمط مشترك للتداخل والحيود على الشاشة. (a) ما هو عدد قمم التداخل التي ستظهر في أقصى مركز نمط الحيود؟ (b) ما هو عدد قمم التداخل التي ستظهر إذا تم مضاعفة عرض الشق مع الحفاظ على المسافة بين الشقوق نفسها؟ (c) ما عدد قمم التداخل التي ستظهر إذا تم فصل الشقوق بمقدار ضعف المسافة، أي  $12 \mu\text{m}$ ، مع الحفاظ على عرض الشقوق نفسه؟

(d) ماذا سيحدث في البند (a) إذا تم استخدام ضوء آخر بطول موجة 680 nm بدلاً من 450 nm؟ (e) ما هي قيمة نسبة شدة القمة المركزية إلى شدة القمة المضيفة التالية في البند (a)؟ (f) هل تعتمد هذه النسبة على الطول الموجي للضوء؟ (g) هل تعتمد هذه النسبة على عرض الشقوق أو فصلها؟

35. ينتج الشق المزدوج نمط حيود هو مزيج من التداخل أحادي الشق وثنائي الشق. أوجد نسبة عرض الشقوق إلى المسافة الفاصلة بينهما، إذا كانت القمة الصغرى الأولى لنمط الشق الأحادي تقع في القمة العظمى الخامسة لنمط الشق المزدوج. (هذا سوف يقلل كثيراً من القمة العظمى الخامسة).

36. في حالة الشق المزدوج إذا كانت المسافة الفاصلة بين الشقين تبلغ أربعة أضعاف عرض الشق، فما هو عدد أهداب التداخل الموجودة في القمة المركزية لنمط الحيود؟

37. يسقط ضوء طول موجته 500 nm بشكل طبيعي على شقاً، عرض كل منها  $2.5 \times 10^{-3} \text{ mm}$ ، وتفصل بينهم مسافة 5.0  $\times 10^{-3} \text{ mm}$ . كم عدد أهداب التداخل الموجودة في الذروة المركزية لنمط الحيود؟

38. ضوء أحادي اللون طول موجته 589 nm يسقط على شق مزدوج، حيث يبلغ عرض الشق  $2.5 \mu\text{m}$ ، وتفصل بين الشقين مسافة غير معروفة مما يؤدي إلى ظهور نمط حيود يحتوي على تسع قمم تدخل في القمة العظمى المركزية. احسب المسافة الفاصلة بين الشقوق.

39. عند إسقاط ضوء أحادي اللون طول موجته 430 nm على شقين تفصل بينهما مسافة 5 μm، ينتج 11 هدباً للتداخل في القمة العظمى المركزية. ما هو عدد أهذاب التداخل في القمة العظمى المركزية إذا تم إسقاط ضوء طول موجته 632.8 nm على الشق المزدوج نفسه؟

40. احسب الشدة في ذروي التداخل اللتين تليان الذروة المركزية في القمة العظمى المركزية للحيود، إن أمكن، وذلك عند إسقاط ضوء طول موجته 628 nm على شق مزدوج، عرض الشق فيه 500 nm، وتفصل بين الشقين مسافة 1500 nm. باعتبار الشدة في القمة المركزية 1 mW/cm<sup>2</sup>.

#### 4.4 شبكة الحيود

41. تحتوي شبكة حيود على 2000 خط في السنتيمتر. في أي زاوية سيكون القمة العظمى من الدرجة الأولى عند إسقاط ضوء أخضر طول موجته 520 nm؟

42. أوجد زاوية القمة العظمى الثالثة لضوء أصفر بطول موجة 580 nm عند إسقاطه على شبكة حيود لها 1500 خط لكل سنتيمتر.

43. ما هو عدد الأسطر في السنتيمتر الموجودة على شبكة حيود إذا كانت تعطي القمة العظمى الأولى لضوء أزرق طول موجته 470 nm عند زاوية 25.0 درجة؟

44. ما هي المسافة بين الخطوط الموجودة على شبكة حيود إذا كانت تعطي القمة العظمى الثانية لضوء أحمر طول موجته 760 nm عند زاوية 60.0 درجة؟

45. احسب الطول الموجي للضوء، الذي يبلغ القمة العظمى من الدرجة الثانية عند زاوية 45.0 درجة عند السقوط على شبكة حيود تحتوي على 5000 خط لكل سنتيمتر.

46. ينتج التيار الكهربائي المار عبر غاز الهدروجين عدة أطوال موجية مباشرة من الضوء المرئي. ما هي الأطوال الموجية لطيف الهدروجين، إذا كانت تشكل قمة عظمى أولى عند الزوايا 24.2 درجة و 25.7 درجة و 29.1 درجة و 41.0 درجة عند إسقاطها على شبكة حيود تحوي 10000 خط لكل سنتيمتر؟

47. (a) كيف ستتغير قيم الزوايا الأربعة في المسألة السابقة إذا تم استخدام شبكة حيود تحوي 5000 سطر لكل سنتيمتر؟  
(b) باستخدام هذه الشبكة، ماهي قيم زوايا القمة العظمى من الدرجة الثانية؟ (c) اشرح العلاقة بين التخفيضات المتكاملة في عدد الأسطر في كل سنتيمتر وقيم الزوايا الجديدة للحدود القصوى من ترتيب مختلفة.

48. احسب البعد بين البنى في ريشة تعمل بمنزلة شبكة حيود، إذا علمت أنها تُنتج القمة العظمى الأولى لضوء طول موجته 525 nm عند زاوية 30.0 درجة؟

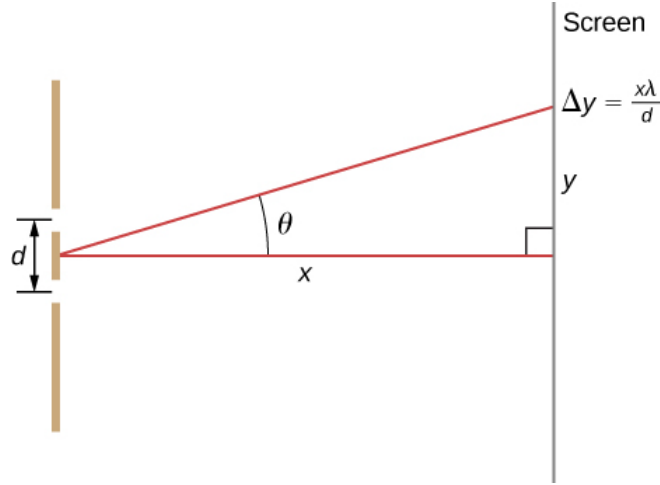
49. حجر الأوبال كذلك الموضح في الشكل 15.4 يعمل بمنزلة شبكة حيود، يفصل بين سطورها مسافة نحو 8 μm إذا كان هذا الحجر مضاء بشكل طبيعي، (a) في أي زاوية يمكن رؤية الضوء الأحمر (b) وفي أي زاوية يمكن رؤية الضوء الأزرق؟

50. في أي زاوية تنتج شبكة الحيود قمة عظمى من الدرجة الثانية للضوء، تظهر قمته العظمى من الدرجة الأولى عند زاوية 20.0 درجة؟

51. (a) أوجد العدد الأقصى للخطوط في السنتيمتر الواحد الذي يمكن أن يكون لشبكة الحيود وينتج قمة عظمى لأصغر طول موجي في الضوء المرئي. (b) هل ستكون هذه الشبكة مفيدة لأطياف الأشعة فوق البنفسجية؟ (c) ولأطياف الأشعة تحت الحمراء؟

52. (a) بيّن أن شبكة حيود لها 30000 خطّ في السنتمتر لن تنتج قمة عظمية للضوء المرئي (b) ما هو أطول طول موجة تنتج عنه أول قمة عظمية؟ (c) ما هو أكبر عدد من السطور لكل سنتمتر يمكن أن يكون لشبكة الحيود، بحيث تُنتج طيفاً كاملاً من الدرجة الثانية للضوء المرئي؟

53. ينطبق التحليل الموضح أدناه أيضاً على حواجز شبكة الحيود، والتي تفصل بين خطوطها مسافة  $d$ . ما هي المسافة بين الأهداب التي تنتجها شبكة حيود لها 125 خطاً لكل سنتمتر لضوء طول موجته 600 nm، إذا كانت الشاشة على بعد 1.50 m؟ (تلميح: المسافة بين الأهداب المجاورة  $\Delta y = x\lambda/d$ ، على افتراض أن المسافة بين الشقوق  $d$  قريبة جداً  $\lambda$ ).



#### 5.4 الحيود عند الفتحات الدائرية ومقدرة الفصل

54. يكشف تلسكوب أريسيبو الراديوي المبين في الشكل 20.4، والذي يبلغ قطره 305 m عن الأمواج الراديوية بمتوسط طول موجي يبلغ 4.00 cm. (a) ما هي الزاوية بين المصدرين النقطيين القابلين للتمييز فيما بينها باستخدام هذا التلسكوب؟ (b) ما مدى قرب هذه المصادر النقطية من بعضها على مسافة 2 مليون سنة ضوئية من مجرة أندروميدا؟

55. على افتراض الدقة الزاوية الموجودة في تليسكوب هابل في المثال 6.4، ما هي أصغر التفاصيل التي يمكن ملاحظتها على سطح القمر؟

56. يُعدّ انتشار الحيود لمصباح يدوي ضئيلاً مقارنةً بالقيود الأخرى في البصريات، كالزبوغ الكروي في المرآة. لبيان ذلك، احسب الحد الأدنى للانتشار الزاوي لشعاع المصباح الذي يبلغ قطره في الأصل 5.00 cm ويبلغ متوسط طول الموجة 600 nm

57. (a) ما هو الحد الأدنى للانتشار الزاوي لشعاع ليزر He-Ne طول موجته 633 nm ويبلغ قطره في الأصل 1.00 mm؟

(b) إذا كان هذا الليزر موجهاً إلى جرف جبلي على بعد 15.0 km، فكم ستكون أبعاد البقعة المضيئة؟

(c) ما أبعاد بقعة مضاءة على القمر، بإهمال التأثيرات الجوية؟ (تتم العملية بإسقاط الضوء على عاكس زاوي لقياس الزمن الذي يستغرقه الشعاع ذهاباً وإياباً، وبالتالي معرفة المسافة المقطوعة).

58. يمكن استخدام التلسكوب لتكبير قطر شعاع الليزر والحد من الانتشار المنعرج. يتم إرسال شعاع الليزر من خلال التلسكوب بعكس الاتجاه الطبيعي وبالتالي إسقاطه على القمر الصناعي أو القمر. (a) إذا تم ذلك من خلال تلسكوب Mount Wilson، الذي ينتج شعاعاً يبلغ قطره 2.54 m من ضوء طول موجته 633 nm، فما هو الحد الأدنى للانتشار الزاوي للحزمة؟ (b) بإهمال التأثيرات الجوية، ما هي أبعاد البقعة التي يمكن لهذا الشعاع أن يشكلها على سطح القمر، بفرض أنّ بعد القمر هو  $3.84 \times 10^8$  m؟

59. يرتبط الحد الأقصى لحدة الرؤية للعين في الواقع بالحيود الذي يحدث في بؤبؤ العين. (a) ما هي الزاوية بين نقطتين قابلتين للتحليل في بؤبؤ عين قطره 3.00 mm، بفرض أن متوسط الطول الموجي للضوء الساقط على البؤبؤ هو 550 nm؟ (b) باعتبار هذه النتيجة هي الحد العملي للعين. ما هي أكبر مسافة ممكنة يمكن أن تكون عندها سيارة بحيث تتمكن العين من تحليل المصباحين الأماميين، باعتبار أن المسافة الفاصلة بينهما تبلغ 1.30 متر؟ (c) ما هي المسافة بين نقطتين قابلتين للتحليل على مسافة ذراع (0.800 m) من العين؟ (d) كيف تقارن إجابتك في البند (c) بالتفاصيل التي تلاحظها عادة في حياتك اليومية؟
60. ما هو الحد الأدنى لقطر مرآة التلسكوب الذي يسمح لك بمشاهدة تفاصيل صغيرة كمسافة 5.00 km على سطح القمر الذي يبعد نحو 380,000 km؟ افترض أن متوسط الطول الموجي للضوء المستقبل هو 550 nm
61. احسب نصف قطر صورة النجمة على شبكة العين إذا كان بؤبؤها مفتوحاً بمقدار 0.65 cm، والمسافة بين البؤبؤ وشبكة العين هي 2.8 cm. افترض أن  $\lambda = 550 \text{ nm}$
62. (a) الكوكب القزم بلوتو وقمره شارون تفصل بينهما مسافة 19600 km. بإهمال التأثيرات الجوية، هل بإمكان التلسكوب Palomar Mountain الذي يبلغ قطره 5.08 m تحليل هذه الأجسام عندما تكون على بعد  $4.50 \times 10^9 \text{ km}$  من الأرض؟ بافتراض متوسط الطول الموجي للضوء 550 nm. (b) في الواقع، بصعوبة يكون من الممكن تمييز أن بلوتو وشارون هما جسمان منفصلان باستخدام التلسكوب الأرضي. ما السبب وراء ذلك؟
63. يدور قمر صناعي لأغراض تجسسية حول الأرض على ارتفاع 180 km. ما هو الحد الأدنى لقطر العدسة الجسيمية في التلسكوب الذي يجب استخدامه لتحليل صفتين من الجنود تفصل بينهما مسافة 2.0 m؟ افترض  $\lambda = 550 \text{ nm}$
64. ما هو الحد الأدنى للفصل الزاوي بين نجمين يمكن تحليلهما بواسطة تلسكوب الجوزاء الجنوبي البالغ طوله 8.1 nm، إذا كانت الآثار الجوية لا تحد من مقدرة الفصل؟ استخدم 550 nm لطول موجة الضوء الساقط من النجوم.
65. المصباح الأمامية للسيارة يبعد بعضها عن الآخر بمقدار 1.3 m. ما هي أقصى مسافة يمكن للعين تحليل هذين المصباحين؟ باعتبار قطر بؤبؤ العين 0.40 cm
66. عند وضع النقاط على صفحة من طباعة ليزرية، يجب أن تكون قريبة بما فيه الكفاية حتى لا نرى نقاط الحبر الفردية. للقيام بذلك، يجب أن تكون المسافة بين النقاط أقل من معيار رايلي. باعتبار قطر بؤبؤ العين 3.0 mm، والمسافة من الورق إلى العين 35 cm؛ احسب الحد الأدنى للمسافة الفاصلة بين نقطتين، بحيث لا يمكن تحليلها. ما عدد النقاط في البوصة (dpi) التي توافق هذه المسافة؟
67. لنفترض أنك تنظر للأسفل إلى طريق سريع من طائرة نفاثة تحلق على ارتفاع 6.0 km. يجب أن تكون المسافة بين سيارتين حتى تستطيع التمييز بينهما؟ افترض أن  $\lambda = 550 \text{ nm}$ ، وأن قطر بؤبؤ العين هو 4.0 mm
68. هل يستطيع رائد فضاء يدور حول الأرض في قمر صناعي على مسافة 180 km من السطح أن يميز ناطحات سحاب تفصل بينهما مسافة 20 m؟ افترض أن قطر بؤبؤ العين عند رائد الفضاء يبلغ 5.0 mm ويتركز معظم الضوء حول 500 nm.
69. يتم تشكيل الشخصيات، التي تظهر على لوحة النتائج في الملعب، باستخدام مصابيح ضوئية متباعدة بشكل قريب، تشع الضوء الأصفر بشكلٍ أساس. (بفرض أن  $\lambda = 600 \text{ nm}$ )، ما هي المسافة التي يجب أن تفصل بين المصابيح حتى يتمكن مراقب على بعد 80 m من رؤية خطوط متصلة بدلاً من المصابيح الفردية؟ افترض أن قطر بؤبؤ عين المراقب يبلغ 5.0 mm
70. إذا كان الجهر يستقبل الضوء من الأجسام عند زوايا أكبر من  $\alpha = 70^\circ$ ، فما هي أصغر بنية يمكن تحليلها عند سقوط ضوء طول موجته 500 nm في الحالات التالية (a) إذا كانت العينة في الهواء؟ (b) عندما يتم غمر العينة بزييت، قرينة الانكسار له 1.52؟

71. تستخدم الكاميرا عدسة بفتحة 2.0 cm. ما هي الدقة الزاوية للصورة التي التقطت في ضوء طول موجته 700 nm؟ هل يمكن تحليل علامات المليمتر الموجودة في مسطرة وُضعت على بعد 35 m؟

#### 6.4 حيود الأشعة السينية

72. تنعكس الأشعة السينية ذات الطول الموجي 0.103 nm على بلورة، ويتم تسجيل القمة العظمى من الدرجة الثانية عند زاوية براغ البالغة 25.5 درجة. ما هي المسافة بين المستويات في هذه البلورة؟

73. تلاحظ القمة العظمى من الدرجة الأولى عن انعكاس براغ عندما تسقط الأشعة السينية أحادية اللون على بلورة عند الزاوية 32.3 درجة إلى مستوى عاكس. ما هو الطول الموجي لهذه الأشعة السينية؟

74. يتم إجراء تجربة تبعثر الأشعة السينية على بلورة تشكل ذراتها مستويات مفصولة عن بعضها بمسافة 0.440 nm. باستخدام مصدر للأشعة السينية من الطول الموجي 0.548 nm، ما هي الزاوية (فيما يتعلق بالمستويات المذكورة) التي يحتاج المحرّب إلى إسقاط الضوء عندها على البلورة من أجل مراقبة القمة العظمى من الدرجة الأولى؟

75. تشكل بنية بلورات كلور الصوديوم مستويات متباعدة فيما بينها بمقدار 0.541 nm. ما هي أصغر زاوية، تقاس من هذه المستويات، والتي يمكن عندها ملاحظة حيود الأشعة السينية، إذا تم استخدام الأشعة السينية ذات الطول الموجي 0.085 nm؟

76. على بلورة معينة، تُلاحظ وجود قمة عظمى لحيود الأشعة السينية من الدرجة الأولى عند الزاوية 27.1 درجة بالنسبة لسطحها، وذلك باستخدام مصدر للأشعة السينية بطول موجة غير معروف. كذلك، عند استخدام إضاءة مختلفة، ولكن هذه المرة بطول موجي معروف ويساوي 0.137 nm، تظهر القمة العظمى من الدرجة الثانية عند الزاوية 37.3 درجة. احسب: (a) المسافة بين المستويات العاكسة، (b) الطول الموجي غير المعروف.

77. تحتوي بلورات الكالسيت على مستويات مشتتة المسافة فيما بينها 0.30 nm. ما هو الفصل الزاوي بين القمم العظمى للحيود من الدرجة الأولى والثانية عند استخدام الأشعة السينية ذات الطول الموجي 0.130 nm؟

78. إذا كانت زاوية براغ من الدرجة الأولى لبلورة ما هي 12.1 درجة. ما هي زاوية الترتيب الثاني؟

#### مسائل إضافية

79. يسقط ضوء أبيض على شقين ضيقين المسافة بينهما 0.40 mm. لوحظ نمط التداخل على شاشة تبعد مسافة 3.0 m. (a) ما هو البعد بين القمة العظمى الأولى لضوء أحمر طول موجته  $\lambda = 700$  nm والقمة العظمى الأولى لضوء بنفسجي طول موجته  $\lambda = 400$  nm؟ (b) عند أي نقطة قرب القمة العظمى المركزية ستترامن القمة العظمى لضوء أصفر طول موجته  $\lambda = 600$  nm مع القمة العظمى للضوء البنفسجي؟ حدد الترتيب لكل قمة عظمى.

80. تسقط أمواج ميكروية ذات طول موجي 10.0 mm بشكل طبيعي على صفيحة معدنية تحتوي على شق عرضه 25 mm (a) أين تقع القمة الصغرى الأولى لنمط الحيود؟ (b) هل ستكون هناك قمم صغرى لو كان الطول الموجي 30.0 mm؟

81. الكوازارات، أو المصادر الراديوية شبه النجمية، هي أجسام فلكية اكتُشفت في عام 1960. على الرغم من بعدها إلا أنها تصدر أمواج راديوية قوية ذات حجم زاوي صغير، لم تكن محللة في الأصل كما هو الحال بالنسبة للنجوم. الكوازار 3C405 هو في الواقع مصدران منفصلان للأمواج الراديوية يشكّلان فيما بينهما زاوية 82 arcsec. إذا تمت دراسة هذا الجسم باستخدام البث اللاسلكي بتردد 410 MHz، فما هو الحد الأدنى لقطر التلسكوب الراديوي الذي يمكنه تمييز المصدرين؟

82. شقان عرض كل منهما 1800 nm، وتفصل بين مركزيهما مسافة مقدارها 1200 nm، تتم إضاءتهما بواسطة أمواج مستوية لضوء ليزر منبعثة لأيونات الكريبتون، حيث يبلغ طول الموجة 461.9 nm. أوجد عدد قمم التداخل في قمة الحيود المركزية.

- 83.** تسقط موجة ميكروية ذات طول موجي غير معروف على شق أحادي بعرض 6 cm. فإذا علمت أن العرض الزاوي للقمة المركزية هو 25 درجة. احسب طول الموجة.
- 84.** يتم اسقاط ضوء أحمر (الطول الموجي له 632.8 nm في الهواء) من ليزر الهليوم - النيون بالاتجاه المباشر على شق عرضه 0.05 mm. يتم غمر الجهاز بأكمله في الماء ذي قرينة الانكسار 1.333. احسب العرض الزاوي للقمة المركزية.
- 85.** تبعث أشعة ضوئية بطول موجة 561.9 nm من فتحة دائرية بقطر 2 mm من ليزر الكريبتون. وبسبب الحيود، تتوسع الحزمة أثناء خروجها. كم تبلغ أبعاد النقطة المضيئة المركزية عند القيم التالية (a) 1 m، (b) 1 km، (c) 1000 km، و (d) على سطح القمر على مسافة 400000 km من الأرض.
- 86.** ما هي المسافة، التي يجب أن تفصل بين جسمين على سطح القمر، حتى يمكن تمييزهما عن طريق العين إذا كانت تأثيرات حيود بؤبؤ العين هي فقط التي تحد من مقدرة الفصل؟ باعتبار طول موجة الضوء 550 nm، وقطر بؤبؤ العين 5.0 mm، والمسافة إلى القمر 400000 km.
- 87.** ما هي المسافة، التي يجب أن تفصل بين جسمين على سطح القمر، حتى يمكن تمييزهما بواسطة تلسكوب Gemini North في موناكيا- هاواي، والذي يبلغ قطره 8.1 m، إذا كانت تأثيرات الحيود الخاصة بفتحة التلسكوب هي فقط ما يحد من الدقة؟ باعتبار طول موجة الضوء 550 nm، والمسافة إلى القمر 400000 km.
- 88.** قمر صناعي لأغراض التجسس يشتهر بقدرته على مقدرة الفصل للأجسام التي تفصل بينها مسافة 10 cm، بينما يعمل على بعد 197 km فوق سطح الأرض. ما هو قطر فتحة التلسكوب إذا كانت مقدرة الفصل محدودة فقط بآثار الحيود؟ باعتبار طول موجة الضوء 550 nm.
- 89.** يمر ضوء أحادي اللون بطول موجة 530 nm عبر شق واحد أفقي بعرض  $1.5 \mu\text{m}$  في صفيحة معتمة. أبعاد الشاشة  $2.0 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$  وتبعد 1.2 m عن الشق. (a) ما الطريقة التي ينتشر بها نمط الحيود على الشاشة؟ (b) ما هي زوايا القمة الصغرى بالنسبة للمركز؟ (c) ما هي زوايا القمة العظمى؟ (d) احسب عرض الهدب المركزي على الشاشة؟ (e) احسب عرض الهدب المضيء التالي على الشاشة؟
- 90.** يسقط ضوء أحادي اللون بطول موجي غير معروف على شق بعرض  $20 \mu\text{m}$ . يظهر نمط الحيود على شاشة تبعد مسافة 2.5 m حيث تنتشر القمة العظمى المركزية على مسافة 10.0 cm. احسب الطول الموجي للضوء.
- 91.** باعتبار مصدر للضوء له طولان موجيان 550 nm و 600 nm متساويان في الشدة، يسقط على شق بعرض  $1.8 \mu\text{m}$  أوجد البعد بين البقع المضيئة لطولي الموجة على شاشة تبعد مسافة 30.0 cm من أجل قيمة  $m=1$ .
- 92.** يُضاء شق واحدة بعرض 2100 nm بشكل طبيعي بضوء طوله الموجي 632.8 nm. احسب فرق الطور بين الأمواج من الأعلى والثلث من أسفل الشق بالنسبة لنقطة على شاشة تبعد أفقياً بمقدار 2.0 m وعمودياً 10.0 cm عن المركز.
- 93.** يُضاء شق أحادي بعرض  $3.0 \mu\text{m}$  بواسطة ضوء أصفر من الصوديوم بطول موجة 589 nm. أوجد الكثافة عند زاوية 15 درجة بالنسبة للمحور من حيث شدة الحد الأقصى المركزي.
- 94.** يُضاء شق أحادي بعرض 0.10 mm بواسطة مصباح زئبقي بطول موجي 576 nm. أوجد الشدة عند الزاوية 10 درجات بالنسبة للمحور من حيث شدة القمة العظمى المركزية.
- 95.** تنتج شبكة حيود قمة عظمى ثانية على بعد 89.7 cm عن القمة العظمى المركزية على شاشة تبعد 2.0 m. إذا كان للشبكة 600 خطاً لكل سنتيمتر، فما هو الطول الموجي للضوء الذي يُنتج نمط الحيود؟

96. يتم استخدام شبكة حيود لها 4000 خط لكل سنتيمتر لتشتيت الضوء، الذي يحتوي على جميع الأطوال الموجية بين 400 nm و 650 nm. ما هو عرض الطيف من الدرجة الأولى على شاشة تبعد 3.0 m عن الشبكة؟

97. تستخدم شبكة حيود لها 2000 خط لكل سنتيمتر لقياس الأطوال الموجية المنبعثة من أنبوب تشبيكة غاز الهيدروجين.

(a) عند أي زوايا ستظهر القمة العظمى لخطين من اللون الأزرق من الدرجة الأولى بأطوال موجية 410 nm و 434 nm؟

(b) احسب القمة العظمى لخطين آخرين من الدرجة الأولى عند  $\theta_1 = 0.097 \text{ rad}$  و  $\theta_2 = 0.132 \text{ rad}$  والأطوال الموجية لهذه

الخطوط؟

98. باعتبار ضوء أبيض ( $400 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$ ) يسقط بشكل طبيعي على شبكة حيود، أظهر أن أطيايف الترتيب الثاني والثالث تتداخل بغض النظر عن ثابت الشبكة d.

99. ما هو عدد الحدود الكاملة للطيف المرئي ( $400 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$ ) التي يمكن إنتاجها بشبكة حيود تحتوي على 5000 خط لكل سنتيمتر؟

100. يتم تثبيت مصباحين ينتجان ضوء طوله الموجي 589 nm على لوح خشبي، بحيث تفصل بينهما مسافة 1m. ما هي أقصى مسافة يمكن للمراقب أن يقف عندها ويظل قادراً على تمييز المصباحين كمصدرين منفصلين للضوء، إذا تأثرت مقدرة الفصل فقط بفعل حيود الضوء الذي يدخل العين؟ افترض أن الضوء يدخل العين من خلال بؤبؤ بقطر 4.5 mm

101. لنفرض أنه في يوم صافٍ مشرق، وقفت على قمة جبل ونظرت إلى مدينة تبعد مسافة 12 km. وكان هناك برجان طويلان في هذه المدينة متباعداً مسافة 20.0 m. هل تستطيع عينك التمييز بين البرجين إذا كان قطر البؤبؤ مساوياً 4.0 mm؟ إذا لم تستطع ذلك، فماذا ينبغي أن يكون الحد الأدنى من قوة تكبير للتلسكوب اللازمة للتمييز بين البرجين؟ استخدم في حساباتك طول موجة الضوء 550 nm.

102. التلسكوبات الراديوية هي تلسكوبات تُستخدم للكشف عن الانبعاثات الراديوية من الفضاء. ونظراً لأن الأمواج الراديوية لها أطوال موجية أطول بكثير من الضوء المرئي، يجب أن يكون قطر التلسكوب الراديوي كبيراً جداً لتوفير مقدرة فصل جيدة. على سبيل المثال، يبلغ قطر التلسكوب الراديوي في Penticton BC، في كندا، 26 m ويمكن تشغيله بترددات تصل إلى 6.6 GHz. (a) ما هو الطول الموجي المقابل لهذا التردد؟ (b) ما هو الفصل الزاوي لمصدر راديوي يمكن تمييزها بواسطة هذا التلسكوب؟ (c) قارن مقدرة الفصل التلسكوب بالبعد الزاوي للقمر.



الشكل 30.4 (credit: modification of work by Jason Nishiyama) (الائتمان: جرى تعديل العمل من قبل جاسون نيشياما)



**103.** احسب طول موجة الضوء، الذي يُنتج القمة الصغرى الأولى عند زاوية 36.9 درجة عند السقوط على شق أحادي بعرض  $1.00 \mu\text{m}$ .

**104.** (a) أوجد زاوية القمة الصغرى الثالثة للحيود لضوء طول موجته  $633 \text{ nm}$ ، ويسقط على شق بعرض  $20.0 \mu\text{m}$ .

(b) ما هو عرض الشق الذي يجعل هذه القمة الصغرى تظهر عند الزاوية  $85.0$  درجة؟

**105.** كمثال على الحيود بفتحات ذات أبعاد من حياتنا اليومية، تخيل مدخل بناء بعرض  $1.0 \text{ m}$ . (a) ما هو الموضع الزاوي للقمة الصغرى الأولى في نمط الحيود لضوء طول موجته  $600 \text{ nm}$ ؟ (b) كرر هذا الحساب لنوتة موسيقية بتردد  $440 \text{ Hz}$  (A) فوق منتصف (C). باعتبار سرعة الصوت  $343 \text{ m/s}$ .

**106.** ما هي المواضع الزاوية للقمم الصغرى الأولى والثانية في نمط حيود ينتج عن شق بعرض  $0.20 \text{ mm}$  مُضاء بضوء طول موجته  $400 \text{ nm}$ ؟ ما هو العرض الزاوي للقمة المركزية؟

**107.** كم يجب أن تبعد الشاشة عن الشق الوارد في المسألة السابقة، بحيث تكون القمة الصغرى الثانية على بعد  $2.5 \text{ mm}$  من مركز نمط الحيود؟

**108.** ما هو عرض الشق الذي يُنتج نمط حيود على شاشة تبعد عنه مسافة  $1.8 \text{ m}$  إذا كانت قممها المركزية بعرض  $1.0 \text{ m}$ ؟ باعتبار طول موجة الضوء  $\lambda = 589 \text{ nm}$

**109.** افترض أن القمة المركزية لنمط الحيود أحادي الشق واسعة جداً، بحيث يمكن افتراض أن القمة الصغرى الأولى يحدث في المواضع الزاوية  $\pm 90$  درجة. في هذه الحالة، ما هي نسبة عرض الشق إلى الطول الموجي للضوء؟

**110.** تحتوي قمة الحيود المركزية لنمط التداخل ذي الشق المزدوج على تسعة أهداب بالضبط. ما هي نسبة البعد بين الشقوق إلى عرض الشق؟

**111.** حدد شدة ثلاث قمم للتداخل بخلاف القمة المركزية في القمة العظمى المركزية للحيود، إن أمكن، عندما يكون هناك ضوء طول موجته  $500 \text{ nm}$  يسقط مباشرة على شق مزدوج بعرض  $1000 \text{ nm}$  ومسافة فصل بين الشقوق  $1500 \text{ nm}$ . باعتبار شدة البقعة المركزية  $1 \text{ mW/cm}^2$ .

**112.** يُعدُّ الضوء الأصفر، الصادر من مصباح بخار الصوديوم، نقي طول الموجة، ولكنه يُنتج قمميتين عظيمتين من الدرجة الأولى عند الزوايا  $36.093$  درجة و  $36.129$  درجة عند إسقاطه على شبكة حيود لها  $10000$  خطاً لكل سنتيمتر. احسب طولي الموجة لمقدرة فصل  $0.1 \text{ nm}$ ؟

**113.** تعمل البنى الموجودة على ريشة طائر بمنزلة شبكة حيود لها  $8000$  خطاً لكل سنتيمتر. ما هي زاوية القمة العظمى الأولى لضوء طول موجته  $600 \text{ nm}$ ؟

**114.** إذا كانت شبكة الحيود تُنتج قمة عظمى من الدرجة الأولى لأقصر طول موجي للضوء المرئي عند  $30.0$  درجة، فما هي الزاوية التي ستكون عندها القمة العظمى من الدرجة الأولى لأكبر طول موجة من الضوء المرئي؟

**115.** (a) ما هو طول موجة الضوء المرئي الذي ينتج القمة العظمى من الدرجة الرابعة له عند الزاوية  $25.0$  درجة عند إسقاطه على شبكة حيود لها  $25000$  خطاً لكل سنتيمتر؟ (b) ما هو الشيء غير المنطقي في هذه النتيجة؟ (c) ما هي الافتراضات غير المنطقية في المسألة؟

**116.** بفرض أن لدينا مقياس طيف مبنياً على شبكة حيود. شكّل مسألة تقوم فيها بحساب المسافة بين أطوال موجتين من الإشعاع الكهرومغناطيسي في مقياس الطيف. من ضمن الأشياء التي يجب أن تؤخذ بالحسبان هي الأطوال الموجية المراد تمييزها، وعدد الخطوط

لكل متر على شبكة الحيود، والمسافة بين الشبكة والشاشة أو الكاشف. ناقش التطبيق العملي للجهاز من حيث القدرة على التمييز بين الأطوال الموجية المثيرة للاهتمام.

117. يريد أحد علماء الفلك الهواة بناء تلسكوب مع حد حيود يسمح له بمعرفة ما إذا كان هناك أشخاص على أقمار كوكب المشتري. (a) ما هو قطر المرآة اللازم للتمكن من رؤية تفاصيل طولها 1.00 متر على سطح قمر جوفيان على مسافة  $7.50 \times 10^8$  km من الأرض باعتبار طول موجة الضوء 600 nm؟ (b) ما هو الشيء غير المنطقي في هذه النتيجة؟ (c) ما هي الافتراضات غير المنطقية في هذه المسألة؟

### مسائل للتحدي:

118. يسقط ضوء أزرق طول موجته 450 nm على شق بعرض 0.25 mm. يتم وضع عدسة مقربة بطول محرقى 20 cm خلف الشق لتركيز نمط الحيود على الشاشة. (a) كم تبعد الشاشة عن العدسة؟ (b) ما هي المسافة بين القمة الصغرى الأولى والثالثة لنمط الحيود؟

119. بفرض أن القمة العظمى تقع في منتصف المسافة بين القمم الصغرى لنمط الحيود أحادي الشق. باستخدام قطر ومحيط منحنى الطور كما هو مبين في فصل (الشدة في حيود الشق الأحادي)، لتحديد شدة القمة العظمى الثالثة والرابعة من حيث شدة القمة العظمى المركزية. (ب) قم بالحساب نفسه باستخدام العلاقة 4.4.

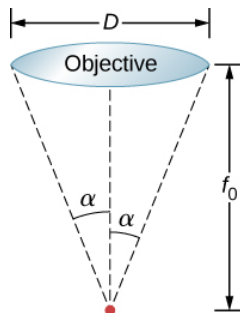
120. بمكاملة العلاقة 4.4، بين أن الترتيب الأعلى للقمة العظمى لنمط الحيود أحادي الشق يحدث عند قيم  $\beta$  المحققة للعلاقة  $\tan \beta = \beta$ . (b) ارسم  $y = \tan \beta$  و  $y = \beta$  مقابل  $\beta$  وأوجد تقاطعات هذين المنحنيين. ما هي المعلومات التي يقدمها لنا هذا المنحني عن مواقع القمم العظمى؟ (c) لماذا لا تظهر هذه النقاط بالضبط عند  $\beta = \left(n + \frac{1}{2}\right) \pi$ ، حيث تكون قيم  $(n = 0, 1, 2, \dots)$  ولكنها قريبة جداً من هذه القمم.

121. ما هي القمة العظمى لعدد الخطوط لكل سنتيمتر، التي يجب أن تمتلكها شبكة حيود لكي تستطيع إنتاج طيفاً أولاً كاملاً للضوء المرئي؟

122. بين لماذا لا يمكن لشبكة الحيود أن تنتج قمة عظمى من الدرجة الثانية لضوء طول موجته محدد إلا إذا ظهرت القمة العظمى من الدرجة الأولى عند الزاوية أقل من 30.0 درجة.

123. ينعكس شعاع الليزر He-Ne عن سطح قرص مضغوط إلى الحائط. النقطة الأكثر سطوعاً هي الخزمة المنعكسة بزاوية تساوي زاوية ورود الشعاع. ومع ذلك، يلاحظ وجود أهداب أيضاً. فإذا كان الجدار على بعد 1.50 m من القرص المضغوط، والهذب الأول على بعد 0.600 m من القمة العظمى المركزية، فما هو البعد بين الأخاديد الموجودة على القرص المضغوط؟

124. توضع الأجسام التي يتم مشاهدتها من خلال المجهر بالقرب من النقطة المحورية للعدسة الجسيمية. بين لماذا يجب أن يكون الحد الأدنى للمسافة الفاصلة بين جسيمين محسوبة بالعلاقة  $x = (1.22\lambda f_0)/D$  حتى يمكن تمييزها بالمجهر، حيث:  $f_0$  هو البعد المحرقى و  $D$  هو قطر العدسة الجسيمية كما هو موضح في الشكل أدناه.





**الشكل 1.5** تُفسّر النسبية الخاصة مرور الزمن بشكل مختلف قليلاً على الأرض وبالمقارنة مع موقع فضائي عالمي (GPS) سريع الحركة. تُعدّ على وحدات GPS الموجودة داخل المركبات التمكن من تحديد موقعها الصحيح على الأرض دون الأخذ بهذا الاختلاف بالحسبان. (credit: modification of work by U.S. Air Force)

(الائتمان: تعديل العمل من قبل القوات الجوية الأمريكية)

### مخطط الفصل

1.5 ثبات (صمود) القوانين الفيزيائية

2.5 نسبية التزامن

3.5 تمدد الزمن

4.5 تقلص الطول

5.5 تحويل لورنتز

6.5 التحويل في السرعة النسبية

7.5 ظاهرة دوپلر

8.5 العزم النسبي

9.5 الطاقة النسبية

### مقدمة

تم اقتراح نظرية النسبية الخاصة في عام 1905 من قبل ألبرت أينشتاين (1879-1955). تصف هذه النظرية كيف يظهر الزمان والمكان والظواهر الفيزيائية ضمن أطر مرجعية مختلفة تتحرك بسرعة ثابتة بالنسبة لبعضها البعض. ويختلف هذا عن عمل أينشتاين اللاحق في النسبية العامة، والذي يتعامل مع أي إطار مرجعي، بما في ذلك الإطارات المتسارعة.

أدت النظرية النسبية إلى إحداث تعبير عميق في طريقة إدراكنا للزمان والمكان. وتختلف قواعد "المنطق السليم"، التي نستخدمها لربط قياسات المكان والزمان في النظرة العالمية النيوتونية اختلافاً كبيراً عن القواعد الصحيحة عند السرعات القريبة من سرعة الضوء. على سبيل المثال، تخبرنا النظرية النسبية الخاصة أن قياسات الفواصل الزمنية والطولية ليست هي نفسها في الأطر المرجعية التي تتحرك بشكلٍ نسبي فيما بينها. يمكن ملاحظة أن عمر جسيم ما في إطار مرجعي ما يبلغ نحو  $1.0 \times 10^{-8}$  s، ولكن عمر هذا الجسيم في إطار مرجعي آخر قد يصل إلى  $2.0 \times 10^{-8}$  s؛ وكذلك الحال عند قياس طول جسيم في إطار معين، يكون طوله 2.0 m، فإنه في إطار آخر قد يصل إلى 3.00 m. تكون هذه التأثيرات مهمة عادةً عند سرعات مقاربة لسرعة الضوء فقط، ولكن حتى عند سرعات منخفضة للغاية، كسرعة قمر صناعي لتحديد المواقع، والذي يتطلب قياسات زمنية دقيقة للغاية لتنفيذ وظيفته، فإن الأطوال المختلفة للمسافة نفسها في أطر مرجعية مختلفة هي كبيرة بما يكفي لتؤخذ بالحسبان. على عكس الميكانيك النيوتوني، التي تصف حركة الجسيمات أو معادلات ماكسويل وتحدد سلوك الحقل الكهرومغناطيسي، فإن النسبية الخاصة لا تقتصر على نوع معين من الظواهر، بل إن قواعدنا حول المكان والزمان تؤثر في جميع النظريات المادية الأساسية. لا تبطل تعديلات الميكانيك النيوتوني في النسبية الخاصة الميكانيك النيوتوني الكلاسيكي أو تستوجب استبدالها. بل إن معادلات الميكانيك النسبي تختلف بشكلٍ كبير عن معادلات الميكانيك النيوتوني الكلاسيكي فقط عند التعامل مع الأجسام التي تتحرك بسرعات نسبية (أي السرعات التي تكون أقل من سرعة الضوء ولكنها مقاربة له). في العالم الماكروسكوبي (عالم الأجسام الكبيرة)، والذي تواجهه في حياتك اليومية، تتحول المعادلات النسبية إلى معادلات كلاسيكية، وتتوافق تنبؤات الميكانيك النيوتوني الكلاسيكي بشكلٍ قريب بما فيه الكفاية مع النتائج التجريبية لتجاهل التصحيحات النسبية.

## 1.5 | ثبات (صمود) القوانين الفيزيائية Invariance of Physical Laws

### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- وصف القضايا النظرية والتجريبية التي تناولتها نظرية أينشتاين في النسبية الخاصة. تفسير مسلمتي نظرية النسبية الخاصة.
- تفسير مسلمتي نظرية النسبية الخاصة.

افتراض أنك تقوم بحساب طول الوتر في مثلث قائم معلوم فيه زاوية القاعدة وطولي الضلعين القائمين. سواءً أكنت تحسب طول الوتر باستخدام طول الضلع الجانبي وجيب التمام لزاوية القاعدة، أو من نظرية فيثاغورث، فإنّ النتائج يجب أن تتطابق. كذلك يجب أن تتوافق التنبؤات القائمة على المبادئ المختلفة للفيزياء، سواءً اعتبرناها مبادئ للميكانيك أو مبادئ للكهرطيسية. لاحظ ألبرت أينشتاين فرقا بين التوقعات المبنية على قوانين الكهرطيسية والافتراضات المقدمة في الميكانيك الكلاسيكي. وتحديدًا، لنفترض أن أحد المراقبين يقيس سرعة نبضات الضوء في إطار السكون؛ أي في الإطار المرجعي الذي يكون فيه المراقب في حالة راحة. فوفقاً للافتراضات، التي طالما اعتبرت واضحة في الميكانيك الكلاسيكي، إذا كان أحد المراقبين يقيس سرعة  $v$  في إطار مرجعي معين، وكان هذا الإطار المرجعي يتحرك بسرعة  $u$  ماراً بإطار مرجعي ثانٍ، فإن السرعة الأصلية لمراقب في الإطار الثاني تعطى بالعلاقة  $v' = v + u$ . وغالباً ما يشار إلى مجموع السرعات هذا بالنسبية للعالم غاليليو (Galilean relativity). فإذا كان هذا المبدأ صحيحاً، فإن سرعة نبضات الضوء، التي يقيسها مراقب أثناء انتقاله بسرعة  $c$ ، سيكون بالنسبة لمراقب آخر في إطار مرجعي ثانٍ هو  $c + u$ . وإذا افترضنا منطقياً أن قوانين الديناميكا الكهربائية هي نفسها في كلا الإطارين المرجعيين، فعندئذ

يجب أن تكون سرعة نبضات الضوء المتوقعة (في الفراغ) في كلا الإطارين  $c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ . ويجب أن يقيس كل مراقب سرعة نبضات الضوء نفسها بالنسبة لإطار السكون الخاص به. للتخلص من الصعوبات من هذا النوع، بنى أينشتاين نظريته الخاصة في النسبية، والتي قدمت أفكاراً جديدة جذرية حول الزمان والمكان تم إثباتهما تجريبياً منذ ذلك الحين.

### إطارات القصور الذاتي

يتم قياس جميع السرعات بالنسبة لإطار مرجعي معين. على سبيل المثال، يتم قياس حركة السيارة بالنسبة إلى موضع البداية على الطريق الذي تسير فيه؛ ويتم قياس حركة المقذوفات بالنسبة للسطح الذي تم إطلاقها منه؛ كما يتم قياس الحركة المدارية للكوكب بالنسبة للنجم الذي يدور حوله. الأطر المرجعية التي يأخذ الميكانيك فيها أبسط أشكاله هي تلك التي لا تتسارع. ويُستخدم في مثل هذه الأطر كلٌّ من قانون نيوتن الأول وقانون القصور الذاتي تماماً.

### الإطار المرجعي القصوري

الإطار المرجعي القصوري هو إطار مرجعي يحافظ فيه الجسم الساكن على سكونه، ويتحرك فيه الجسم المتحرك بسرعة ثابتة وفق خط مستقيم ما لم تطبق عليه أي قوة خارجية.

على سبيل المثال، بالنسبة لراكب داخل طائرة تطير بسرعة ثابتة وعلى ارتفاع ثابت، يبدو أن الفيزياء تعمل تماماً كما لو كان الراكب يقف على سطح الأرض. عندما تنطلق الطائرة، تكون الأمور أكثر تعقيداً إلى حد ما. في هذه الحالة، يستنتج الراكب، الذي يستريح داخل الطائرة، أن صافي القوة  $F$  على جسم ما لا تساوي جداء الكتلة بالتسارع. بل إنَّ القوة  $F$  تساوي  $ma$  بالإضافة إلى قوة وهمية. الموضوع ليس بهذه البساطة كما هو الحال في الإطار القصوري. تشير كلمة "خاص" في مصطلح "النسبية الخاصة" إلى أنها تتعامل فقط مع الأطر المرجعية القصورية. تتناول نظرية أينشتاين اللاحقة للنظرية النسبية العامة جميع أنواع الأطر المرجعية، بما في ذلك الأطر المرجعية المتسارعة، وبالتالي الأطر المرجعية اللاقصورية.

### مسلمة أينشتاين الأولى (Einstein's First Postulate)

لم تكن مبادئ الميكانيك الكلاسيكي فقط الأبسط في الإطارات القصورية، ولكنها لا تتغير في جميع الإطارات القصورية. اعتمد أينشتاين في المسلمة الأولى لنظريته على فكرة أن هذا صحيح بالنسبة لجميع قوانين الفيزياء، وليس لتلك الموجودة في الميكانيك فحسب.

### المسلمة الأولى في النسبية الخاصة (First Postulate of Special Relativity)

قوانين الفيزياء هي نفسها في جميع الأطر المرجعية القصورية. ينفي هذا الافتراض وجود إطار قصوري خاص أو مفضل. لا تمنحنا قوانين الطبيعة وسيلة لإعطاء أي إطار قصوري ميزات خاصة. على سبيل المثال، لا يمكننا القول عن أي إطار قصوري أنه في حالة "السكون المطلق". ولكن يمكننا فقط تحديد الحركة النسبية لإطار ما بالنسبة لآخر.

وعلى أية حال، فإنَّ هذه الفرضية أعمق مما تبدو عليه للوهلة الأولى. تشمل قوانين الفيزياء فقط تلك التي توافق هذه الفرضية. سوف نرى أنه يجب تغيير تعاريف الطاقة والعزم لتناسب هذه الفرضية. النتيجة الأخرى لهذه الفرضية هي المعادلة الشهيرة  $E = mc^2$ ، والتي تربط الطاقة بالكتلة.

### مسلمة أينشتاين الثانية (Einstein's Second Postulate)

تتعلق الفرضية الثانية، التي اعتمد عليها أينشتاين في نظرية النسبية الخاصة، بسرعة الضوء. في أواخر القرن التاسع عشر، كانت المبادئ الأساسية للفيزياء الكلاسيكية راسخة ومعروفة. وكان أهمها قوانين الكهربية وقوانين نيوتن. أثبتت الأبحاث التجريبية مثل تجربة شقي يونغ في أوائل القرن التاسع عشر بشكل مقنع أن الضوء هو موجة. تنص معادلات ماكسويل للكهربية على أن

الأمواج الكهروضوئية تنتقل بسرعة  $c = 3.00 \times 10^8$  m/s في الفراغ، لكنها لا تحدد إطار المرجع الذي يكون للضوء فيه هذه السرعة. كان قد عُرف الكثير من أنواع الأمواج، وتبيّن أنها كلها تتحرك في وسط ما. لذلك افترض العلماء أن بعض الأوساط تحمل الضوء، حتى في الفراغ، وأن الضوء ينتقل بسرعة  $c$  بالنسبة لذلك الوسط (تُسمى غالباً بالأيثير). ابتداءً من منتصف الثمانينيات من القرن التاسع عشر، قام عالم الفيزياء الأمريكي أ. أ. ميكلسون، بإجراء سلسلة من القياسات المباشرة لسرعة الضوء وانضم إليه فيما بعد العالم مورلي. كانوا يعتمدون استنتاج السرعة التي تتحرك بها الأرض  $v$  عبر الوسط الغامض للأمواج الضوء من خلال بياناتهم. يجب أن تساوي سرعة الضوء المقاسة على الأرض  $c + v$  عندما كانت حركة الأرض معاكسة لتدفق الوسط ذي السرعة  $u$  عبر الأرض، و  $c - v$  عندما تتحرك الأرض في الاتجاه نفسه للوسط. كانت نتائج قياساتهم مذهلة.

### تجربة ميكلسون ومورلي (Michelson-Morley Experiment)


أثبتت تجربة ميكلسون ومورلي أن سرعة الضوء في الفراغ مستقلة عن حركة الأرض حول الشمس. والاستنتاج النهائي المستخلص من هذه النتيجة هو أن الضوء، على عكس الأمواج الميكانيكية كالصوت مثلاً، لا يحتاج إلى وسط يحمله. علاوةً على ذلك، فإن نتائج تجربة ميكلسون ومورلي تعني أن سرعة الضوء  $c$  مستقلة عن حركة المصدر بالنسبة للمراقب. أي أن الضوء يتحرك بسرعة  $c$  بغض النظر عن كيفية تحرك المراقبين بالنسبة لمصدر الضوء أو لبعضهم البعض. لعدة سنوات، حاول العديد من العلماء دون جدوى شرح هذه النتائج في إطار قوانين نيوتن.

بالإضافة إلى ذلك، كان هناك تناقض بين مبادئ الكهروضوئية والفرضية الواردة في قوانين نيوتن حول السرعة النسبية. تقليدياً، ينبغي الجمع بين سرعة جسيم ما في إطار مرجعي ما وسرعة ذلك الجسيم في إطار مرجعي ثانٍ متعلق بالأول كأشعة بسيطة لإعطاء السرعة المرئية في الإطار الثاني. لو كان هذا صحيحاً، فإن مراقبين يتحركان بسرعات مختلفة سيشاهدان الضوء يتحرك بسرعات مختلفة. تحليل كيف تبدو موجة الضوء لشخص يسافر معها (في الفراغ) بسرعة  $c$ . إذا كانت هذه الحركة ممكنة، فستكون الموجة ثابتة بالنسبة للمراقب. وسيكون لها حقول كهربائية ومغناطيسية تتغير قوتها بتغير الوضع، ولكنها ثابتة مع الزمن. هذا غير مسموح به في معادلات ماكسويل. لذلك إما أن تكون معادلات ماكسويل مختلفة في الأطارات القصورية المختلفة، أو أن الجسيم، الذي له كتلة، لا يمكن أن ينتقل بسرعة  $c$ . استنتج أينشتاين أن الخيار الأخير هو الصحيح: لا يمكن للجسيم الذي له كتلة أن ينتقل بسرعة  $c$ . معادلات ماكسويل صحيحة، لكن إضافة نيوتن للسرعات غير صحيحة للضوء.

في عام 1905، عندما نشر أينشتاين بحثه الأول حول النسبية الخاصة، كان قد أثبت الاستنتاج المقبول حالياً. واستناداً إلى تحليله بأن قوانين الكهرباء والمغناطيسية لا تسمح بوجود سرعة أخرى للضوء، ومعرفة بسيطة لتجربة ميكلسون ومورلي، قام أينشتاين بتفصيل فرضيته الثانية في النسبية الخاصة.

### المسلمة الثانية للنسبية الخاصة (Second Postulate of Special Relativity)

ينتقل الضوء في الفراغ بالسرعة نفسها  $c$  في أي اتجاه في جميع الأطارات القصورية. بمعنى آخر، فإن سرعة الضوء لها القيمة نفسها المحددة بالنسبة لأي مراقب بغض النظر عن حركته بالنسبة للمصدر. هذه المسلمة البسيطة بشكل مخادع وغير المنطقية، إلى جانب المسلمة الأولى، تترك كل شيء مفتوحاً للتغيير. من ضمن هذه التغييرات هو فقدان الاتفاق على الزمن بين الأحداث، وتباين المسافة مع السرعة، وإدراك أن المادة والطاقة يمكن تحويل أحدهما للآخرى. وتتم مناقشة هذه المفاهيم في الأقسام التالية.

 **1.5 تحقق من فهمك:** فسّر كيف تختلف النسبية الخاصة عن النسبية العامة.

## 2.5 | نسبية التزامن | Relativity of Simultaneity

### الأهداف التعليمية

- في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:
  - أن تُبين من خلال مسلمات أينشتاين أن الحدثين المتزامنين في إطار قصوري ما ليس بالضرورة أن يكونا متزامنين في جميع الأطر القصورية.
  - وصف كيف أن التزامن مفهوم نسبي للمراقبين في مختلف الأطر القصورية في الحركة النسبية.

هل تعتمد الفواصل الزمنية على من يلاحظها؟ حدسياً، يبدو أن زمن العملية، كالزمن المنقضي في سباق جري مثلاً (الشكل 2.5)، يجب أن يكون هو نفسه بالنسبة لجميع المراقبين. في التجارب اليومية، تتعلق الخلافات حول الزمن المستهلك بدقة قياس الزمن. من غير المحتمل أن يجادل أحد بأن الفاصل الزمني الفعلي كان مختلفاً بالنسبة للعداء المتحرك وللساعة الثابتة المعروضة. لكن التفكير بعناية في كيفية قياس الزمن، يدل على أن الزمن المنقضي يعتمد على الحركة النسبية للمراقب بالنسبة للعملية التي يجري قياسها.



**الشكل 2.5:** الزمن المنقضي للعداء هو نفسه بالنسبة لجميع المراقبين، ولكن في السرعات النسبية، يعتمد الزمن المنقضي على حركة المراقب بالنسبة للمكان الذي تحدث فيه العملية التي يجري توقيتها.

(credit: "Jason Edward Scott Bain"/Flickr) (الائتمان: "جيسون إدوارد سكوت باين" / فليكر)

لنناقش كيف يتم قياس الزمن المنقضي. إذا استخدمنا ساعة توقيت، على سبيل المثال، كيف نعرف متى يجب تشغيل الساعة أو إيقافها؟ إحدى الطرائق هي باستخدام الضوء الواصل من الحدث. على سبيل المثال، إذا كنت في سيارة متحركة ولاحظت الضوء القادم من إشارة المرور من انتقاله من اللون الأخضر إلى اللون الأحمر، فأنت تعلم أن الزمن قد حان للضغط على دواسة الفرامل.

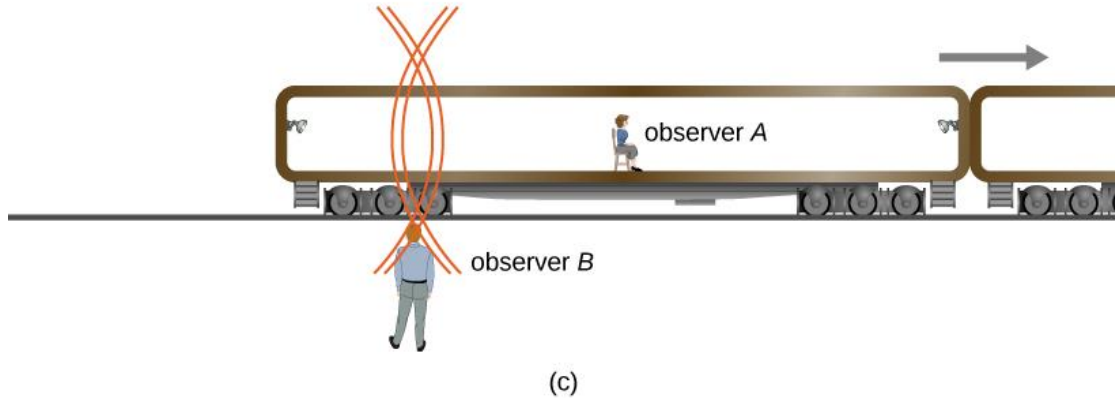
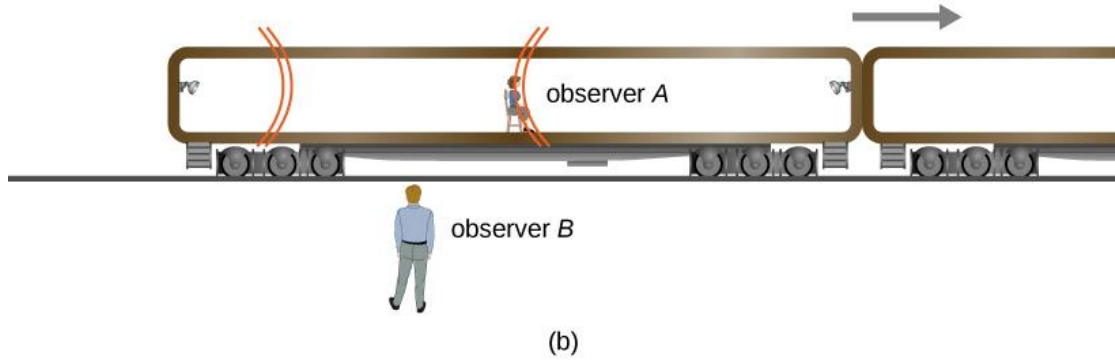
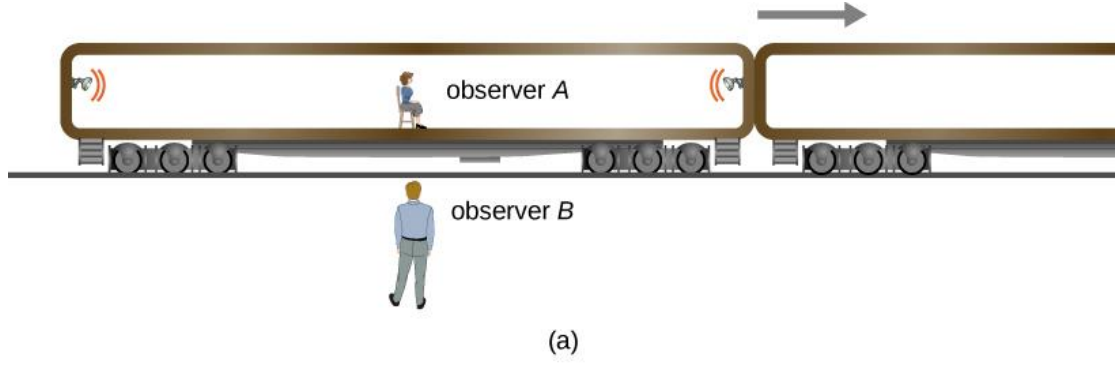
يكون التوقيت أكثر دقة إذا تم استخدام أي نوع من الكواشف الإلكترونية، والتي تجنبنا التأخر في رد الفعل البشري والتعقيدات الأخرى.

لنفترض الآن أن هناك مراقبين اثنين يستخدمان هذه الطريقة لقياس الفاصل الزمني بين وميضين للضوء منبعثين من مصابيح تفصل بينهما مسافة (الشكل 3.5). يجلس المراقب A في منتصف عربة قطار، حيث يوجد مصباحان مثبتان في مقدمة العربة ومؤخرتها بشكل متقابل، ويبعدان عن المراقب المسافة نفسها. تنبعث نبضة الضوء من كل مصباح وتتحرك نحو المراقبة A، كما هو موضح في الجزء (a) من هذا الشكل. تتحرك العربة بسرعة في الاتجاه المشار إليه بشعاع السرعة في المخطط. المراقب B، الذي يقف على المنصة قرب السكة الحديدية، يشاهد العربة وهي تمر ويلاحظ وصول كل من ومضات الضوء له في وقت واحد كما هو موضح في الجزء (c). يقيس المسافات من حيث رأى النبضات قد نشأت، فيجدها متساوية، ويخلص إلى أن النبضات قد أُصدرت في وقت واحد.

ومع ذلك، بسبب حركة المراقب A، فإن النبضة الصادرة من يمين عربة القطار، ومن الاتجاه الذي تتحرك فيه العربة، يصل إليها قبل النبضة الصادرة من اليسار كما هو موضح في الجزء (b). وهي أيضاً تقيس المسافات من داخل إطارها المرجعي، فتجدها متساوية، وتخلص إلى أن النبضات لم تصدر في وقت واحد.

توصل المراقبان إلى استنتاجات متضاربة حول ما إذا كان الحدثان الحاصلان في مواقع منفصلة متزامنين تماماً. كلا الإطارين المرجعيين صالحان، وكلا الاستنتاجين صالحان. تحديد فيما إذا كان حدثان حاصلان في موقعين منفصلين، أنهما متزامنين يعتمد على حركة المراقب بالنسبة لمواقع الأحداث.





**الشكل 3.5 (a)** تتبعث نبضتان من الضوء في وقت واحد بالنسبة للمراقب B. (c) تصل النبضتان إلى موقف المراقب B في وقت واحد. (b) بسبب حركة A، ترى النبضة من اليمين أولاً، وتخلص إلى أن المصابيح لم تنبض في وقت واحد. وكلا الاستنتاجين صحيحان.

هنا، تؤثر السرعة النسبية بين المراقبين على ما إذا كان حدثان منفصلان عن بعضهما متزامنين. التزامن ليس مطلقاً. ربما ظننا (بشكل غير صحيح) أنه إذا تم إصدار نبضة الضوء في وقت واحد، فإن مراقبين إثنين في منتصف المسافة بين المصادر سيريان نبضة الضوء في وقت واحد. لكن التحليل الدقيق يظهر أن هذا لا يمكن أن يكون هو الحال إذا كانت سرعة الضوء هي نفسها في جميع الإطارات القصورية.

يوضح هذا النوع من التجارب الفكرية (باللغة الألمانية، "Gedankenexperiment") أنه يجب تغيير الاستنتاجات التي تبدو وكأنها واضحة لتتوافق مع مسلمة النسبية. لا يمكن تحديد صحة تجارب التفكير إلا من خلال الملاحظة الفعلية، وقد أكدت التجارب الدقيقة مراراً وتكراراً نظرية النسبية لأينشتاين.

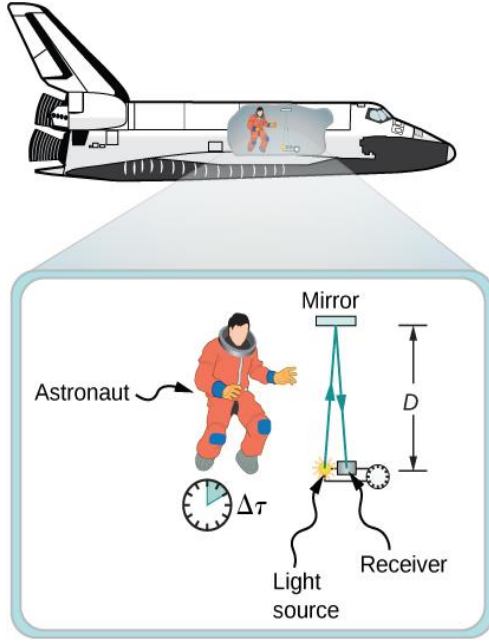
## الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

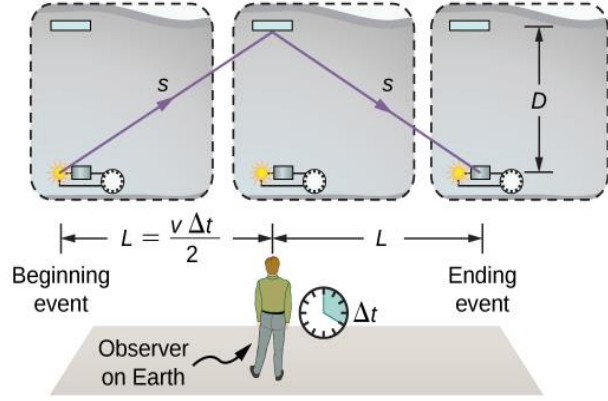
- توضيح كيف يمكن قياس الفواصل الزمنية بشكل مختلف في الأطر المرجعية المختلفة.
- وصف كيفية التمييز بين الفاصل الزمني المناسب والفاصل الزمني الموسع.
- وصف وصف أهمية تجربة الميون.
- شرح لماذا تناقضية التوأم ليست تناقضاً.
- حساب تمدد الزمن بالنظر إلى سرعة الجسم في إطار معين.

يوضح تحليل التزامن أن مسلمات أينشتاين تنطوي على تأثير مهم: تتمتع الفواصل الزمنية بقيم مختلفة عند قياسها في إطارات قصورية مختلفة. لنفترض، على سبيل المثال، أن رائد فضاء يقيس الزمن الذي تستغرقه نبضة من الضوء لتقطع مسافة عمودية على اتجاه حركة سفينته (بالنسبة إلى المراقب على الأرض)، حيث تصل إلى المرآة، وتنعكس عائدة إليه (**الشكل 4.5**). كيف يقارن الزمن المستهلك الذي يقيسه رائد الفضاء في المركبة الفضائية بمثيله المستهلك، الذي يقيسه المراقب على الأرض من خلال مراقبته لما يحدث في المركبة الفضائية؟

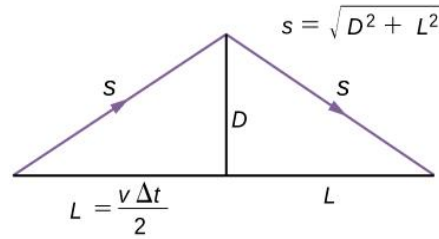
تؤدي دراسة هذا السؤال إلى نتيجة عميقة. يعتمد الزمن المستهلك في عملية ما على المراقب الذي يقيسه. في هذه الحالة، يكون الزمن الذي يقيسه رائد الفضاء (داخل سفينة الفضاء، والتي يكون فيها رائد الفضاء في حالة راحة) أصغر من الزمن الذي يقيسه المراقب على الأرض (الذي يتحرك إليه رائد الفضاء). يختلف الزمن المستهلك للعملية نفسها بالنسبة للمراقبين، ذلك لأن المسافة التي تقطعها نبضة الضوء في إطار رائد الفضاء أصغر من تلك الموجودة في الإطار الأرضي كما هو موضح في **الشكل 4.5**. ينتقل الضوء بنفس السرعة في كلا الإطارين، لذلك يستغرق وقتاً أطول ليقطع مسافة أكبر في الإطار الأرضي.



(a)



(b)



(c)

**الشكل 4.5 (a)** يقيس رائد الفضاء الفترة الزمنية  $\Delta\tau$  حتى يقطع الضوء المسافة  $2D$  في إطار رائد الفضاء. (b) يرى أحد علماء ناسا على الأرض أن الضوء يقطع المسار الأطول  $2s$  ويستغرق زمناً أطول. (c) تُستخدم هذه المثلثات لإيجاد العلاقة بين المسافتين  $D$  و  $s$ .

### تمدد الزمن

تمدد الزمن هو إتساع الفاصل الزمني بين حدثين بالنسبة لمراقب في إطار قصوري يتحرك بالنسبة للإطار الباقي للأحداث (والذي ضمنه تأخذ الأحداث مكانها في الموقع نفسه).

لمقارنة قياسات الزمن في الإطارين القصوريين، يمكننا ربط المسافات في **الشكل 4.5** ببعضها، ثم التعبير عن كل مسافة من حيث زمن الانتقال (إما  $\Delta t$  أو  $\Delta\tau$  بالترتيب) للنبضة في الإطار المرجعي المقابل. يمكن بعد ذلك حل المعادلة الناتجة عن  $\Delta t$  بـ  $\Delta\tau$ .

الطولان  $D$  و  $L$  في **الشكل 4.5** هما ضلعاً مثلث قائم وتره  $s$ . ومن نظرية فيثاغورث نجد أن:

$$s^2 = D^2 + L^2.$$

الطولان  $2s$  و  $2L$ : هما المسافة التي تقطعها كل من نبضة الضوء والمركبة الفضائية على التوالي خلال الزمن  $\Delta t$ ، وذلك في إطار المراقب الأرضي. الطول  $D$ : هو المسافة التي تقطعها نبضة الضوء خلال الزمن  $\Delta\tau$  في إطار رائد الفضاء. وهذا يعطي هذا ثلاث

معادلات، هي:

$$2s = c\Delta t; \quad 2L = v\Delta t; \quad 2D = c\Delta\tau.$$

لاحظ أننا استخدمنا مسلمة أينشتاين الثانية من خلال اعتبار أنّ سرعة الضوء تساوي  $c$  في كلا الإطارين القصوريين. وبتعويض هذه النتائج في العلاقة السابقة من نظرية فيثاغورث نجد:

$$s^2 = D^2 + L^2.$$

$$\left(c\frac{\Delta t}{2}\right)^2 = \left(c\frac{\Delta \tau}{2}\right)^2 + \left(v\frac{\Delta t}{2}\right)^2.$$

وبإعادة الترتيب نحصل على:

$$(c\Delta t)^2 - (v\Delta t)^2 = (c\Delta \tau)^2.$$

وأخيراً بحل المعادلة من أجل قيم  $\Delta t$  باستخدام  $\Delta \tau$  نجد:

$$\Delta t = \frac{\Delta \tau}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \quad (5.1)$$

وهذا يكافئ العلاقة:

$$\Delta t = \gamma \Delta \tau,$$

حيث  $\gamma$  هو المعامل النسبي (وغالباً ما يُسمى معامل لورنتز) ويعطى بالعلاقة:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (5.2)$$

و  $v$  و  $c$  هما سرعتا المراقب المتحرك والضوء، على التوالي.

لاحظ عدم التناسق بين القياسين. واحد منهم فقط هو قياس الفاصل الزمني بين حدثين - انبعاث نبضة الضوء ووصولها - في الموضع نفسه. إنه قياس للفاصل الزمني في الإطار الباقي لساعة واحدة. يتضمن القياس في الإطار الأرضي مقارنةً بالفاصل الزمني بين حدثين يحدثان في مواقع مختلفة. للفاصل الزمني بين الأحداث، التي تحدث في مكان واحد، اسم منفصل لتمييزه عن الزمن الذي يقيسه المراقب الأرضي، ونحن نستخدم الرمز المنفصل  $\Delta \tau$  للإشارة إليه في هذا الفصل.

### الزمن المناسب

الفاصل الزمني المناسب  $\Delta \tau$  بين حدثين هو الفاصل الزمني، الذي يقيسه مراقب، يأخذ كلا الحدثين مكانه في الموقع نفسه بالنسبة لهذا المراقب.

العلاقة التي تربط بين  $\Delta t$  و  $\Delta \tau$  هي علاقة مميزة حقاً. أولاً، وكما ذكر سابقاً، الزمن المستهلك ليس هو نفسه بالنسبة لكلا المراقبين، الذين يتحركان بالنسبة لبعضهما، على الرغم من أن كليهما يوجدان في إطارات قصورية. الفاصل الزمني المناسب  $\Delta \tau$  بالنسبة للمراقب، الذي يتحرك مع الجهاز، كرائد الفضاء مثلاً، يكون أصغر من الفاصل الزمني للمراقبين الآخرين، وهو أصغر زمن ممكن قياسه بين حدثين. يرى المراقب الأرضي الفواصل الزمنية داخل النظام المتحرك على أنها موسّعة (أي مطوّلة) بالنسبة إلى الكيفية، التي يرى بها المراقب المتحرك بالنسبة إلى الأرض داخل النظام المتحرك. بدلاً من ذلك، ووفقاً للمراقب الأرضي، فإنه يمر وقت أقل بين الأحداث داخل الإطار المتحرك. لاحظ أن أقصر زمن مستهلك بين الأحداث يكون في الإطار القصوري، الذي يرى فيه المراقب أن الأحداث (كانبعاث الإشارة الضوئية ووصولها مثلاً) تحدث في النقطة نفسها.

هذا التأثير الزمني حقيقي وليس ناتجاً عن ساعات غير دقيقة أو قياسات غير صحيحة. تختلف قياسات الفاصل الزمني للحدث نفسه بالنسبة للمراقبين في الحركة النسبية. تمدد الزمن هو خاصية متأصلة في الزمن نفسه. جميع الساعات، التي تتحرك بالنسبة

للمراقب، بما في ذلك الساعات البيولوجية، مثل ضربات القلب، أو الشيوخوخة، يُلاحظ بأنها تعمل بشكلٍ أبطأ مقارنةً بساعة ثابتة بالنسبة للمراقب.

لاحظ أنه إذا كانت السرعة النسبية أقل بكثير من سرعة الضوء ( $v \ll c$ )، فإن  $v^2/c^2$  تكون صغيرة جداً، الأزمنة المستهلكة  $\Delta t$  و  $\Delta \tau$  متساوية تقريباً. عند السرعات المنخفضة، تقترب الفيزياء القائمة على النسبية الحديثة من الفيزياء الكلاسيكية - تتضمن التجارب اليومية آثاراً نسبية صغيرة للغاية. ومع ذلك، بالنسبة للسرعات القريبة من سرعة الضوء، تكون  $v^2/c^2$  قريبة من الواحد، لذلك  $\sqrt{1 - v^2/c^2}$  تكون صغيرة جداً و  $\Delta t$  تصبح أكبر بكثير من  $\Delta \tau$ .

### عمر النصف للميون

هناك دليل تجريبي معتمد على أن المعادلة  $\Delta t = \gamma \Delta \tau$  صحيحة. تم العثور على مثال واحد في جزئيات الأشعة الكونية التي تتساقط باستمرار على الأرض من الفضاء السحيق. تؤدي بعض تصادمات هذه الجسيمات مع النوى في الغلاف الجوي العلوي إلى إنتاج جزئيات قصيرة العمر تُسمى الميونات. عمر النصف للميون (أي مقدار الزمن اللازم لنصف المادة حتى تتحلل) هو  $1.52 \mu s$  عندما يكون في حالة راحة بالنسبة للمراقب، الذي يقيس عمر النصف. هذا هو الفاصل الزمني المناسب  $\Delta \tau$ .

يسمح هذا الزمن القصير لعدد قليل جداً من الميونات بالوصول إلى سطح الأرض، ويمكن اكتشافها إذا كانت الافتراضات النيوتونية حول الزمان والمكان صحيحة. ومع ذلك، فإن الميونات التي تنتجها جسيمات الأشعة الكونية لها نطاق من السرعات، حيث إن بعضها يتحرك بسرعة تقارب سرعة الضوء. لقد وجد أن عمر نصف الميون عند قياسه من قبل مراقب أرضي ( $\Delta t$ ) يختلف باختلاف السرعة تماماً كما تنبأت العلاقة  $\Delta t = \gamma \Delta \tau$ . كلما تحرك الميون بشكلٍ أسرع، كلما ازداد عمره. نرى على الأرض أن الميون يدوم لفترة أطول بكثير مما يتنبأ به عمر النصف في إطار السكون الخاص به. كما هو موضح من إطارنا، يتحلل الميون ببطء أكثر مما هو عليه عند السكون بالنسبة لنا. يصل جزء أكبر بكثير من الميونات إلى الأرض نتيجة لذلك.

قبل تقديم المثال الأول لحل مسألة في النسبية، نذكر بخطة يمكن استخدامها كمبدأ توجيهي لهذه الحسابات.

### خطة حل مسائل النسبية:

1. قم بعمل قائمة لما تم إعطاؤه، أو يمكن استنتاجه من نص المسألة، كما هو مبين (أي حدد المعلوم). إبحث بشكلٍ خاص عن المعلومات المتعلقة بالسرعة النسبية  $v$ .
  2. حدد بالضبط ما يجب حسابه في المسألة (تحديد المجهول).
  3. تأكد من فهمك للجوانب المفاهيمية للمسألة قبل إجراء أي حسابات (اكتب الإجابة على شكل معادلة). حدد، على سبيل المثال، أي مراقب يرى الزمن ممتداً أو متقلصاً قبل العمل مع المعادلات أو استخدامه لإجراء الحساب. إذا كنت قد حددت من يرى وماذا يرى، من الذي يتحرك مع الحدث الذي يتم رصده، ومن يرى الزمن المناسب وهكذا، ستجد أنه من الأسهل بكثير تحديد ما إذا كان حسابك معقولاً أم لا.
  4. حدد النموذج الأساس للحساب المطلوب إجراؤه للعثور على المجهولين (نفذ الحساب). ستجد ملخص القسم مفيداً في تحديد ما إذا كان التقلص في الطول أو الطاقة الحركية النسبية أو أحد المفاهيم الأخرى هو المطلوب.
- لاحظ أنه لا يجب التقريب (تدوير الأرقام) أثناء الحساب. وكما هو مذكور في النص، يجب عليك في كثير من الأحيان إجراء العمليات الحسابية الخاصة للعديد من الأرقام للدقة ولمعرفة التأثير المطلوب. يمكنك التقريب في نهاية حل المسألة، لكن لا تستخدم رقماً مقرباً في أي عملية حساب لاحقة. تحقق أيضاً من الإجابة لمعرفة ما إذا كان ذلك معقولاً: هل هي منطقية؟ قد يكون هذا أكثر صعوبة بالنسبة للنسبية، التي لها عدد قليل من الأمثلة اليومية لإيجاد الخبرة وتحديد ما هو معقول. ولكن يمكنك البحث عن سرعات أكبر من  $c$  أو التأثيرات النسبية التي تكون في الاتجاه الخاطئ (كتقلص الزمن حيث كان تمدده هو المتوقع).

## مثال 1.5

### تمدد الزمن في سيارة عالية السرعة

المركبة التقانية فائقة الصوت (HTV-2) هي مركبة صاروخية تجريبية قادرة على السفر بسرعة 21000 km/h (5830 m/s). إذا كانت الساعة الإلكترونية في HTV-2 تقيس فترة زمنية مدتها 1s بالضبط، فما هي قيمة الفاصل الزمني الذي يمكن أن يقيسه مراقبون على الأرض؟

### خطة الحل

طبق علاقة تمدد الزمن لربط الفاصل الزمني المناسب للإشارة في HTV-2 بالفاصل الزمني المقاس على الأرض.

### الحل

a. تحديد المعطيات:  $v = 5830 \text{ m/s}$  و  $\Delta\tau = 1 \text{ s}$ .

b. تحديد المجهول:  $\Delta t$ .

c. كتابة الإجابة على شكل معادلة:

$$\Delta t = \gamma \Delta\tau = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

d. قم بإجراء الحسابات. استخدم علاقة  $\gamma$  لحساب  $\Delta t$  من  $\Delta\tau$ .

$$\begin{aligned}\Delta t &= \frac{1 \text{ s}}{\sqrt{1 - \left(\frac{5830 \text{ m/s}}{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}\right)^2}} \\ &= 1.000000000189 \text{ s} \\ &= 1 \text{ s} + 1.89 \times 10^{-10} \text{ s}.\end{aligned}$$

### ملاحظة:

لاتزال السرعة العالية جداً للمركبة HTV-2 تبلغ  $10^{-5}$  فقط من سرعة الضوء. تكاد التأثيرات النسبية للمركبة HTV-2 لا تُذكر في جميع التطبيقات تقريباً، ولكنها لا تساوي صفرًا.

## مثال 2.5

### ما هي السرعات التي تعد نسبية؟

ما مدى السرعة التي يجب أن تسافر بها السيارة لمدة ثانية واحدة، والتي تقاس بساعة شخص يركب في هذه السيارة، حتى تختلف بنسبة 1٪ بالنسبة للمراقب، الذي يقيسها من الخارج؟

### خطة الحل

استخدم علاقة تمدد الزمن لإيجاد  $v/c$  بالنسبة المعطاة في المسألة.

### الحل

a. تحديد المعلوم:

$$\frac{\Delta\tau}{\Delta t} = \frac{1}{1.01}$$

b. تحديد المجهول:  $v/c$ .

c. كتابة الإجابة على شكل معادلة:

$$\Delta t = \gamma \Delta \tau = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \Delta \tau$$

$$\frac{\Delta \tau}{\Delta t} = \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

$$\left(\frac{\Delta \tau}{\Delta t}\right)^2 = 1 - \frac{v^2}{c^2}$$

$$\frac{v}{c} = \sqrt{1 - (\Delta \tau/\Delta t)^2}.$$

d. قم بإجراء الحسابات:

$$\frac{v}{c} = \sqrt{1 - (1/1.01)^2}$$

$$= 0.14.$$

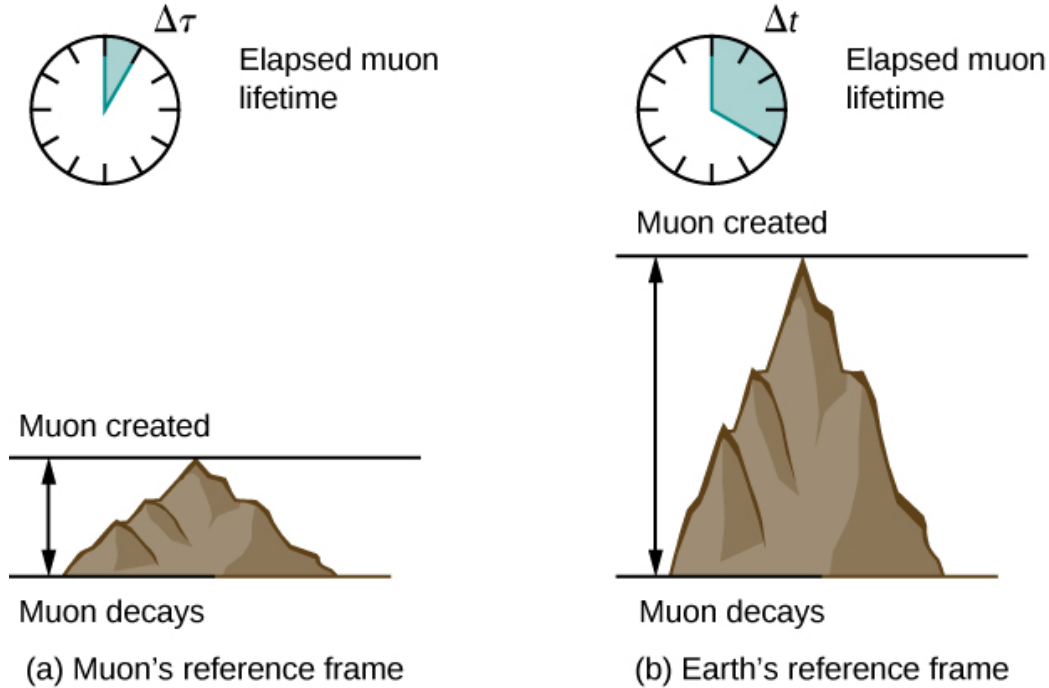
**ملاحظة:**

تظهر النتيجة أن الجسيم يجب أن يسافر بسرعة تعادل 10٪ تقريباً من سرعة الضوء حتى تعطي تأثيرات تمدد الزمن نسبيةً يمكن ملاحظتها.

### مثال 3.5

حساب الفاصل الزمني لحدث نسبي

لنفترض أن أشعة كونية تصطدم مع نواة في الغلاف الجوي العلوي للأرض وتنتج ميون له سرعة  $v = 0.950c$ ، ثم يسافر الميون بسرعة ثابتة ويعيش لمدة  $2.20 \mu s$  كما جرى قياسها في الإطار المرجعي للميون. (يمكنك أن تعد هذا على أنه الساعة الداخلية للميون). كم من الزمن يعيش الميون وفقاً لمراقب على الأرض (الشكل 5.5)؟



**الشكل 5.5** يعيش الميون في الغلاف الجوي للأرض فترة أطول كما تم قياسها بواسطة مراقب على الأرض مقارنةً بالساعة الداخلية للميون.

كما سنناقش لاحقاً، فإن الميون في إطاره المرجعي يسافر مسافة أقصر بالمقارنة مع ما تظهره القياسات في الإطار المرجعي للأرض.

### خطة الحل

تقيس الساعة التي تتحرك مع الميون الزمن المناسب لعملية التقلص، وبالتالي فإن الزمن المعطى هو  $\Delta\tau = 2.20 \mu\text{s}$ . يقيس المراقب الأرضي  $\Delta t$  على النحو الوارد في المعادلة  $\Delta t = \gamma\Delta\tau$ . يمكننا حساب الزمن في الإطار المرجعي للأرض لأن السرعة معطاة.

### الحل

a. تحديد المعطيات:  $v = 0.950c$  و  $\Delta\tau = 2.20 \mu\text{s}$ .

b. تحديد المجهول:  $\Delta t$ .

c. كتابة الإجابة على شكل معادلة باستخدام العلاقة:

$$\Delta t = \gamma\Delta\tau$$

والعلاقة:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

d. قم بإجراء الحسابات. استخدم علاقة  $\gamma$  لحساب  $\Delta t$  من  $\Delta\tau$ .

$$\begin{aligned}\Delta t &= \gamma\Delta\tau \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}\Delta\tau \\ &= \frac{2.20\mu\text{s}}{\sqrt{1 - (0.950)^2}} \\ &= 7.05 \mu\text{s}.\end{aligned}$$

لا تنس أن تحتفظ بالأرقام الإضافية بعد الفاصلة حتى الإجابة النهائية.

### ملاحظة:

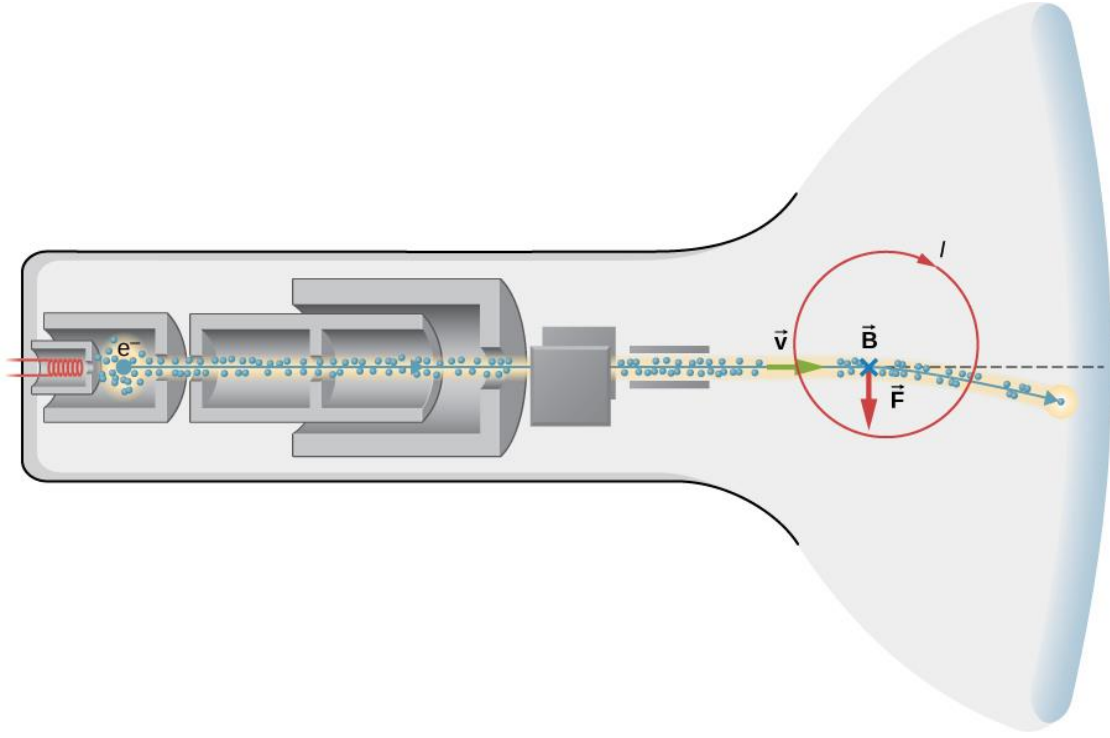
أحد الآثار المترتبة على هذا المثال هو أنه نظرًا لأن  $\gamma = 3.20$  عند  $95.0\%$  من سرعة الضوء ( $v = 0.950c$ )، فإن التأثيرات النسبية كبيرة. الفاصلان الزمنيان يختلفان بمعامل  $3.20$ ، في حين أنهما تقليدياً يجب أن يكونا متساويين. إذا تحرك شيء ما بسرعة تساوي  $0.950c$  فإنه يُسمى نسبياً بشكل كبير.

## مثال 4.5

### التلفزيون النسبي

تعمل شاشة التلفزيون غير المسطحة ذات الطراز الأقدم (**الشكل 6.5**) على تسريع حزمة من الإلكترونات ضمن مسافة قصيرة للوصول إلى السرعة النسبية، ثم يتم استخدام حقول كهربائية للتحكم في مكان ورود هذه الحزمة الإلكترونية على طبقة مغلورة في مقدمة الأنبوب. لنفترض أن الإلكترونات تسير بسرعة  $6.00 \times 10^7 \text{ m/s}$  على مسافة  $0.200 \text{ m}$  من البداية إلى الشاشة. (a) ما هو زمن انتقال الإلكترون في الإطار المتبقي لجهاز التلفزيون؟ (b) ما هو زمن انتقال الإلكترون في إطار السكون الخاص به؟





**الشكل 6.5** حزمة الإلكترونات في شاشة تلفزيون أنبوب أشعة المهبط (الكاثود).

### خطة الحل للطلب (a)

(a) احسب الزمن من العلاقة:  $\Delta t = \frac{d}{v}$ . على الرغم من أن السرعة نسبية، إلا أن الحساب يتم بالكامل في إطار مرجعي واحد، وبالتالي فإن النسبية غير مطلوبة.

### الحل

a. تحديد المعطيات:  $v = 6.00 \times 10^7 \text{ m/s}$ ;  $d = 0.200 \text{ m}$

b. تحديد المجهول:  $\Delta t$

c. كتابة الإجابة على شكل معادلة باستخدام العلاقة:  $\Delta t = \frac{d}{v}$

d. قم بإجراء الحسابات:  $\Delta t = \frac{0.200 \text{ m}}{6.00 \times 10^7 \text{ m/s}} = 3.33 \times 10^{-9} \text{ s}$

### ملاحظة:

زمن الانتقال قصير للغاية، كما هو متوقع. نظراً لأن الحساب يقع بالكامل ضمن إطار مرجعي واحد، فإن النسبية غير مستخدمة على الرغم من أن سرعة الإلكترون قريبة من c.

### خطة الحل للطلب (b)

(b) في الإطار المرجعي للإلكترون، يكون الإلكترون ثابتاً والأنبوب المفرغ من الهواء هو الذي يتحرك. حيث إن المهبط هو الباعث للإلكترونات، فإن الإلكترون يغادر، أما الجزء الأمامي من الأنبوب المفرغ من الهواء فإنه يؤدي إلى تصادم الإلكترون مع الإلكترون في الموقع نفسه. لذلك نستخدم علاقة تمدد الزمن لربط الزمن المناسب في إطار راحة الإلكترون بالزمن في إطار التلفزيون.

## الحل

a. تحديد المعطيات (من الطلب a):

$$\Delta t = 3.33 \times 10^{-9} \text{ s}; v = 6.00 \times 10^7 \text{ m/s}; d = 0.200 \text{ m}.$$

b. تحديد المجهول:  $\tau$ .

c. كتابة الإجابة على شكل معادلة:


$$\Delta t = \gamma \Delta \tau = \frac{\Delta \tau}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$
$$\Delta \tau = \Delta t \sqrt{1 - v^2/c^2}.$$

d. قم بإجراء الحسابات.

$$\Delta \tau = (3.33 \times 10^{-9} \text{ s}) \sqrt{1 - \left( \frac{6.00 \times 10^7 \text{ m/s}}{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}} \right)^2}$$
$$= 3.26 \times 10^{-9} \text{ s}.$$

## ملاحظة:

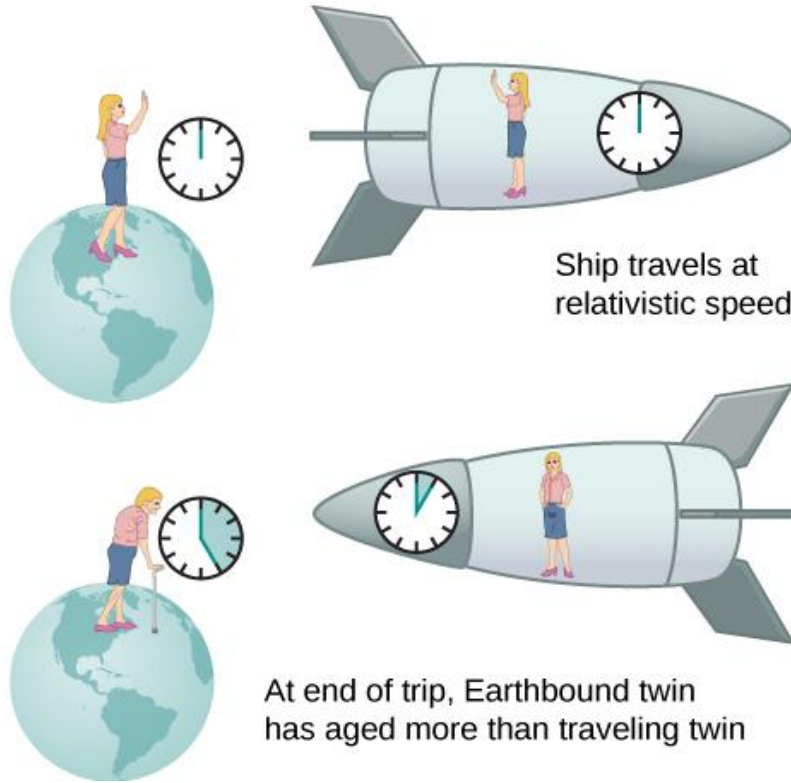
زمن الانتقال أقصر في الإطار المرجعي للإلكترون. نظراً لأنه في هذه المسألة مطلوب إيجاد الفاصل الزمني المقاس في أطر مرجعية مختلفة للعملية نفسها، فإن النسبية مطلوبة. إذا حاولنا حساب الزمن في إطار راحة الإلكترون بقسمة 0.200 m على السرعة، فستكون النتيجة ليست صحيحة تماماًً بسبب السرعة النسبية للإلكترون.

2.5 تحقق من فهمك: ما هي  $\gamma$  إذا كانت  $v = 0.650c$ ؟ 

## مفارقة (تناقضية) التوأم

من النتائج المثيرة للاهتمام لتمدد الزمن أن رائد الفضاء الذي يتحرك بسرعة عالية في الفضاء بالنسبة إلى الأرض سيتقدم في العمر بسرعة أقل من توأمه الموجود الأرض. وغالباً ما يُعرف هذا بمفارقة التوأم. تخيل رائد فضاء يتحرك بسرعة، حيث  $\gamma = 30.0$  كما في الشكل 7.5. ستستغرق الرحلة التي تستغرق عامين في إطاره 60.0 عاماً في إطار توأمه الموجود على الأرض. لنفترض أن رائد الفضاء يسافر عاماً واحداً إلى نظام نجمي آخر، ويستكشف المنطقة لفترة وجيزة، ثم يسافر عائداً لمدة عام واحد. رائد الفضاء، الذي كان عمره 40 عاماً في بداية الرحلة، سيكون عمره 42 عاماً عند عودته سفينة الفضاء. ومع ذلك فإن كل شيء على الأرض، سيكون قد تقدم في العمر نحو 60.0 سنة. وسيبلغ عمر توأم رائد الفضاء حينها 100 عام، إن بقي على قيد الحياة. يبدو الوضع مختلفاً بالنسبة لرائد الفضاء في الشكل 7.5. لأن الحركة نسبية، سيبدو أن سفينة الفضاء ثابتة، وأن الأرض تتحرك. (هذا هو إحساسنا عند الطيران في طائرة نفاثة) عند النظر عبر نافذة سفينة الفضاء، يرى رائد الفضاء أن الزمن يتباطأ على الأرض بمعامل  $\gamma = 30.0$ . عند النظر من المركبة الفضائية، وسيكون الأشقاء الموجودون على الأرض قد تقدموا بالسن بنحو 2/30 فقط أو 0.07 من السنة، بينما يكون عمر رائد الفضاء قد زاد بمقدار عامين.


At start of trip, both twins are same age



**الشكل 7.5:** تكمن مفارقة التوأم في الاستنتاجات المتضاربة حول أي من التوأمين سيتقدم في السن أكثر نتيجةً لرحلة طويلة في الفضاء عند سرعة نسبية.

المفارقة هنا هي أن التوأم لا يمكن أن يكونا كلاهما صحيحين. كما هو الحال مع جميع المفارقات، تأتي الاستنتاجات المتضاربة من فرضية خاطئة. في الواقع، تختلف حركة رائد الفضاء اختلافاً كبيراً عن حركة التوأم الأرضي. يتسارع رائد الفضاء ليبلغ سرعة عالية ثم يتباطأ ليستعرض نظام النجوم الذي سافر إليه. وعند العودة إلى الأرض، فإنه يتسارع ويتباطأ مرة أخرى. ليست المركبة الفضائية في إطار قصوري واحد حتى يمكن تطبيق علاقة تمدد الزمن فيه مباشرة. بمعنى أن يغير التوأم (رائد الفضاء) الإطارات القصورية. لا يواجه التوأم (الأرضي) هذا التسارع، ويبقى في الإطار القصورية نفسه. وبالتالي، فإن الوضع ليس متماثلاً، ومن غير الصحيح الادعاء بأن رائد الفضاء يلاحظ الآثار نفسها التي لحقت بتوأمه. سيظل عدم التناسق بين التوأمين أكثر وضوحاً عندما نحلل الرحلة في وقت لاحق من هذا الفصل، وذلك من حيث المسار، الذي يتبعه رائد الفضاء خلال الزمان المكاني ثلاثي الأبعاد.

في عام 1971، تحقق الفيزيائيان الأمريكيان جوزيف هافيلي وريتشارد كيتينج **Joseph Hafele and Richard Keating** من تمدد الزمن عند السرعات النسبية المنخفضة من خلال الطيران مع ساعات ذرية دقيقة حول العالم على متن طائرات تجارية. لقد قاموا بقياس الزمن المنقضي بدقة تصل إلى بضع نانوثانية وقارنوها بالزمن المقاس بساعات أخرى تركوها في نقطة البداية. كانت نتائج هافيلي وكيتينج ضمن حالات عدم اليقين التجريبية لتنبؤات النسبية. كان لا بد من مراعاة النسبية الخاصة والعامية على حدٍ سواء، لأن الجاذبية والتسارع كان لهما الأثر في ذلك، وكذلك الحركة النسبية.

**3.5 تحقق من فهمك:**   $a$ . ينتقل جسيم بسرعة  $1.90 \times 10^8 \text{ m/s}$  ويعيش  $2.10 \times 10^{-8} \text{ s}$  عند السكون بالنسبة للمراقب. كم

من الزمن يعيش هذا الجسيم كما هو مبين في المختبر؟

b. تمر مركبتان فضائيتان A و B في اتجاهين متعاكسين بسرعة نسبية تبلغ  $4.00 \times 10^7$  m/s. ترسل الساعة الداخلية في المركبة الفضائية A إشارة راديوية لمدة 1.00 s. يُصحح الكمبيوتر الموجود في المركبة الفضائية B بداية ونهاية هذه الإشارة التي قطعت مسافات مختلفة، لحساب الفاصل الزمني لإرسال الإشارة من السفينة A. ما هو الفاصل الزمني الذي يحسبه الكمبيوتر في المركبة الفضائية B؟

## 4.5 | تقلص الطول Length Contraction

### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- توضيح العلاقة بين التزامن وتقلص الطول.
- وصف العلاقة بين تقلص الطول وتمدد الزمن واستخدامها لاشتقاق معادلة تقلص الطول.

طول عربة القطار في **الشكل 8.5** هو نفسه لجميع الركاب. يتفق جميعهم على الموقع المتزامن لنهائي العربة ويحصلون على المسافة نفسها. لكن لا تكون الأحداث المتزامنة في إطار قصوري متزامنة في إطار آخر. إذا تمكن القطار من السفر بسرعات نسبية، فإن مراقباً على الأرض سيرى الموقعين المتزامنين لنقطتي النهاية في العربة على مسافة مختلفة عما يراها مراقبون داخل العربة. لا ينبغي أن تكون المسافات المقاسة هي نفسها بالنسبة للمراقبين المختلفين عند استخدام السرعات النسبية.



**الشكل 8.5** قد يصف الأشخاص المسافات بشكل مختلف، ولكن في السرعات النسبية، فإن المسافات مختلفة حقاً.

### الطول المناسب

إذا مر مراقبان معاً فإنهما دائماً يرون القيمة نفسها من السرعة النسبية. وعلى الرغم من أن تمدد الزمن يعني أن راكب القطار والمراقب، اللذين يقفان بمحاذاة السكة الحديدية يقيسان أزمنة مختلفة لعبور القطار، إلا أنهما يتفقان على أن السرعة النسبية، وهي المسافة المقسومة على الزمن المنقضي، هي نفسها. إذا كان هناك مراقب على الأرض وآخر في القطار يقيسان زمناً مختلفاً لعبور كامل القطار بمحاذاة مراقب أرضي، فإن اتفاقهم على سرعته النسبية يعني أنه يجب عليهما أيضاً رؤية مسافات مختلفة مقطوعة.

يوضح الميون، الذي تمت مناقشته في المثال 3.5، هذا المفهوم (الشكل 9.5). بالنسبة لمراقب على الأرض، يسافر الميون بسرعة  $0.950c$  لمدة  $7.05 \mu\text{s}$  منذ لحظة إنتاجه حتى يتحلل. لذلك، يسافر مسافة بالنسبة إلى الأرض تبلغ:

$$L_0 = v\Delta t = (0.950)(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})(7.05 \times 10^{-6} \text{ s}) = 2.01 \text{ km.}$$

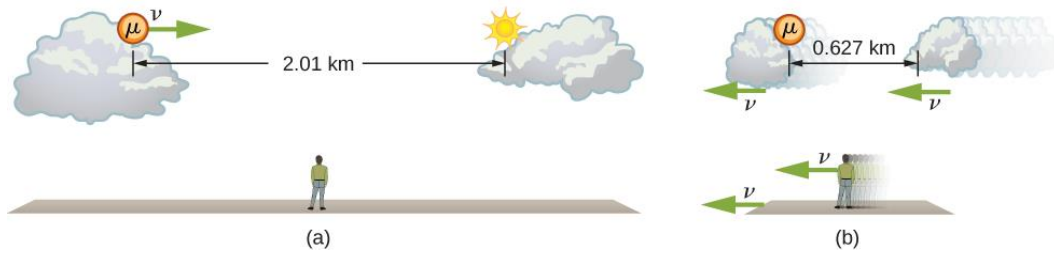
في إطار الميون، يبلغ عمر الميون  $2.20 \mu\text{s}$ . في هذا الإطار المرجعي، فإن كوكب الأرض والهواء وسطح الأرض لديهم وقت كافٍ للتنقل:

$$L = v\Delta\tau = (0.950)(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})(2.20 \times 10^{-6} \text{ s}) \text{ km} = 0.627 \text{ km.}$$

المسافة بين الحدثين نفسيهما (إنتاج الميون وتحلله) تعتمد على من يقيسها وكيف يتحرك بالنسبة لها.

### الطول المناسب

الطول المناسب  $L_0$  هو المسافة بين نقطتين، التي يقيسها مراقب، يكون في حالة راحة بالنسبة لكلا النقطتين. يقيس المراقب الأرضي الطول المناسب  $L_0$  لأن النقاط التي يتم فيها إنتاج الميون وتحليله ثابتة بالنسبة إلى الأرض. بالنسبة للميون فإن الأرض والهواء والسحب تتحرك، وبالتالي فإن المسافة  $L$  التي يراها ليست هي الطول المناسب.



**الشكل 9.5 (a)** يرى المراقب الأرضي بأن الميون تقطع مسافة  $2.01 \text{ km}$ . **(b)** يبلغ طول المسار نفسه  $0.627 \text{ km}$  من الإطار المرجعي للميون. تتحرك الأرض والهواء والسحب بالنسبة إلى الميون في إطارها، ولها أطوال أصغر على طول اتجاه الحركة.

### تقلص الطول

لربط المسافات التي يقيسها عدة مراقبين، لاحظ أن السرعة بالنسبة للمراقب الأرضي في مثال الميون تُعطى بالعلاقة:

$$v = \frac{L_0}{\Delta t}$$

الزمن بالنسبة للمراقب الأرضي هو  $\Delta\tau$ ، لأن الجسم الذي يتم قياس سرعته يتحرك بالنسبة لهذا المراقب. وتُعطى السرعة النسبية للمراقب المتحرك بالعلاقة:

$$v = \frac{L}{\Delta\tau}$$

يسافر المراقب المتحرك مع الميون، وبالتالي يُلاحظ الزمن المناسب  $\Delta\tau$ . السرعتان متطابقتان؛ وبالتالي:

$$\frac{L_0}{\Delta t} = \frac{L}{\Delta\tau}$$

نحن نعلم أن  $\Delta t = \gamma\Delta\tau$ . باستبدال هذه المعادلة في العلاقة أعلاه نجد:

$$L = \frac{L_0}{\gamma} \quad (5.3)$$

بتعويض قيم  $\gamma$  نحصل على علاقة تربط المسافات التي يقيسها عدة مراقبين.

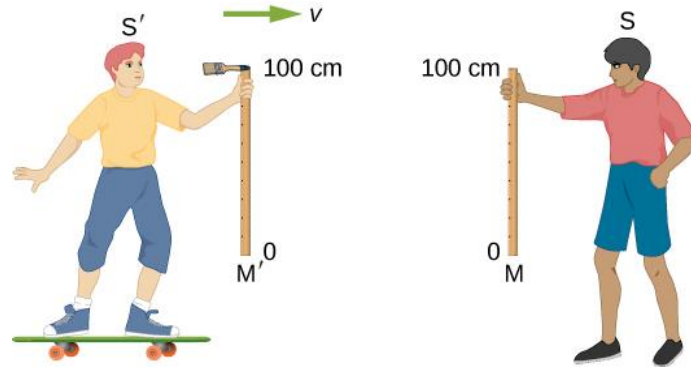
## تقلص الطول

تقلص الطول هو النقص في الطول المقاس لجسيم ما من طوله الصحيح عند قياسه في إطار مرجعي يتحرك بالنسبة للجسيم.

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (5.4)$$

حيث:  $L_0$  هو طول الجسيم في إطار السكون الخاص به، و  $L$  هو الطول في الإطار الذي يتحرك بسرعة  $v$ . إذا قمنا بقياس طول أي جسيم يتحرك بالنسبة لإطارنا، نجد أن طوله  $L$  أصغر من الطول المناسب  $L_0$  الذي سيتم قياسه إذا كان هذا الجسيم ثابتاً. على سبيل المثال، في إطار راحة الميون، المسافة التي تقطعها الأرض بين المكان الذي تم إنتاج الميون فيه ومكان تحلله أقصر من المسافة المقطوعة كما تبدو من إطار الأرض. هذه النقاط ثابتة بالنسبة إلى الأرض، ولكنها تتحرك بالنسبة إلى الميون. الغيوم والأجسام الأخرى على امتداد اتجاه الحركة هي أيضاً مشمولة كما تبدو في إطار راحة الميون. وبالتالي، يقيس مراقبان مسافات مختلفة على طول اتجاههما للحركة النسبية، وهذا يتوقف على أيهما يقيس المسافات بين الأجسام في حالة السكون.

ولكن ماذا عن المسافات المقاسة في اتجاه عمودي على الحركة النسبية؟ تخيل اثنين من المراقبين يتحركان على طول المحور  $x$  ويمران بمحاذاة بعضها، وهما يمسكان بمساطر قياس بشكل عمودي على اتجاه المحور. يبين الشكل 10.5 مسطرتي قياس  $M$  و  $M'$  موجودتين عند حالة السكون في الإطارين المرجعيين للولدين  $S$  و  $S'$  على التوالي. فرشاة صغيرة مثبتة في الأعلى عند (علامة 100 cm) من المسطرة  $M'$ . لنفترض أن  $S'$  يتحرك إلى اليمين بسرعة عالية جداً  $v$  بالنسبة إلى  $S$ ، وأن المساطر موجهة بحيث تكون عمودية، أو تقطع عرضياً شعاع السرعة النسبية. يتم تعليق المساطر بحيث تتقاطع أطرافها السفلية (عند العلامة 0cm) عندما يمران بمحاذاة بعضهما. افترض أنه عندما ينظر  $S$  إلى مسطرته  $M$  بعد ذلك، يجد خطأً مرسوماً عليها أسفل قمة المسطرة مباشرة. ونظراً لأن الفرشاة مثبتة بأعلى مسطرة الولد الآخر  $M'$ ، فإن  $S$  يمكن أن يستنتج فقط أن طول المسطرة  $M'$  أقل من 1.0 m.



**الشكل 10.5:** المسطرتان  $M$  و  $M'$  ثابتتان في الإطارين المرجعيين للمراقبين  $S$  و  $S'$ ، على التوالي. عند مرور

المسطرتين بمحاذاة بعضهما، فإن فرشاة صغيرة مثبتة عند العلامة 100 cm للمسطرة  $M'$  ترسم خطأ على  $M$ .

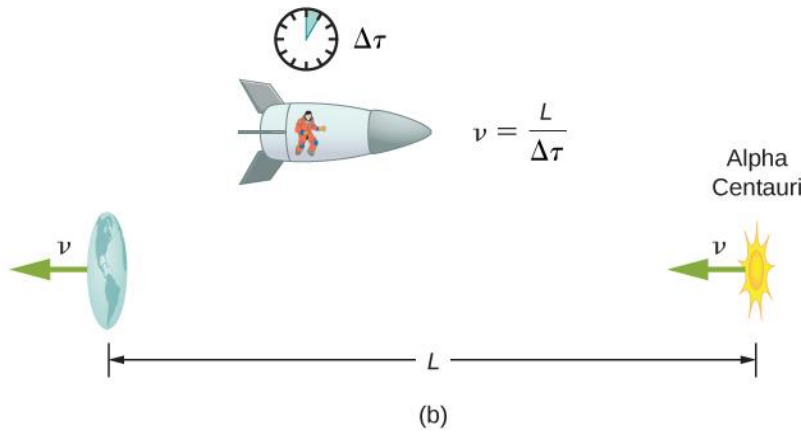
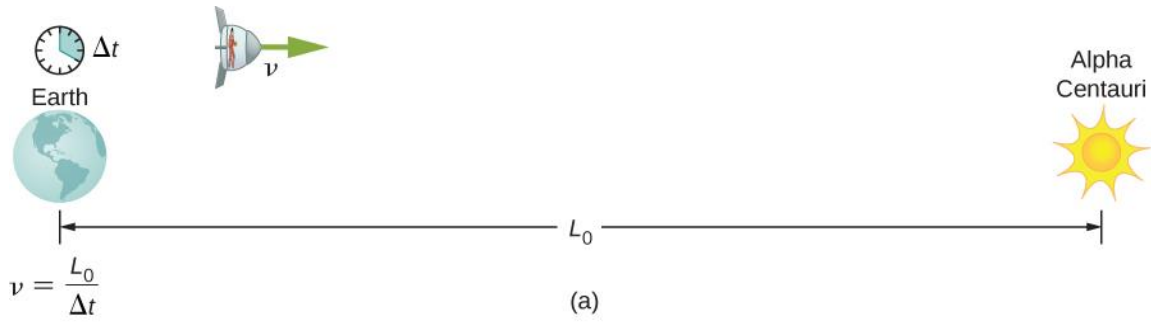
الآن عندما يقترب الأولاد من بعضهم، فإن  $S$  كما هو الحال عند  $S'$ ، يرى أن المسطرة تتحرك نحوه بسرعة  $v$ . ونظراً لأن مواقفهم متماثلة، فإنه يجب على كل ولد إجراء القياس نفسه للمسطرة في الإطار الآخر. لذلك، إذا قام  $S$  بقياس المسطرة  $M'$  على أنها أقل من 1.0 m، فإن  $S'$  يجب أن يقيس المسطرة  $M$  على أنها أيضاً أقل من 1.0 m، ويجب أن يرى بأن فرشاته فوق قمة المسطرة  $M$  دون أن ترسم خطأً عليها. بمعنى آخر، بعد هذا الحدث، يرى أحد الأولاد خطأً مرسوماً على المسطرة، بينما لا يرى الآخر مثل هذا الخط على المسطرة نفسها!

تقتضي فرضية أينشتاين الأولى أن تتنبأ قوانين الفيزياء (على سبيل المثال، المطبقة على خط الدهان) بأن  $S$  و  $S'$ ، الذين يقعان في إطارين قصوريين، لهما المشاهدات نفسها؛ أي أنه يجب على كل من  $S$  و  $S'$  رؤية الخط المرسوم على العصا  $M$  أو أن كليهما لا يرى ذلك الخط. لذلك نحن مجبرون على نقض افتراضنا الأصلي بأن  $S$  رأى أن خطاً مرسوماً أسفل قمة مسطرته. بدلاً من ذلك، فإن  $S$  يرى الخط مرسوماً عند علامة 100 cm في  $M$  تماماً. عندها سيتفق الولدان على أن الخط مرسوماً على  $M$ ، وأنهما سيتفقان أيضاً على أن كلتا المسطرتين يبلغ طولهما 1m بالضبط. نستنتج بعد ذلك أن قياسات الطول المستعرض يجب أن تكون هي نفسها في مختلف الأطر القصورية.

## مثال 5.5

### حساب تقلص الطول

لنفترض أن أحد رواد الفضاء، مثل التوأم في مناقشة مفارقة التوأمين، يسافر بسرعة، بحيث إن  $\gamma = 30.00$ .  
 (a) ينتقل رائد الفضاء من الأرض إلى أقرب نظام للنجوم، وهو ألفا سنتوري Alpha Centauri، على بعد 4.300 (ly) كما تم قياسها من قبل مراقب أرضي. ما المسافة بين الأرض وألفا سنتوري التي يقيسها رائد الفضاء؟ (b) كنسبة من  $c$ ، ما هي سرعة رائد الفضاء بالنسبة إلى الأرض؟ يمكن إهمال حركة الأرض بالنسبة إلى الشمس (الشكل 11.5).



**الشكل 11.5 (a)** يقيس المراقب الأرضي المسافة الصحيحة بين الأرض وألفا سنتوري. (b) يلاحظ رائد الفضاء تقلصاً في الطول لأن الأرض وألفا سنتوري يتحركان بالنسبة إلى سفينته. أو يمكنه أن يقطع هذه المسافة الأقصر في وقت أصغر (وقته الصحيح) دون تجاوز سرعة الضوء.

### خطة الحل:

أولاً، لاحظ أن السنة الضوئية (ly) هي وحدة ملائمة لقياس المسافات على مقياس فلكي - إنها المسافة التي يقطعها الضوء خلال عام بالنسبة للطلب (a)، المسافة 4.300 سنة ضوئية بين ألفا سنتوري والأرض هي المسافة المناسبة  $L_0$ ، لأنه يتم قياسها بواسطة

مراقب أرضي يكون كلاهما ثابتاً (تقريباً). بالنسبة إلى رائد الفضاء، فإن الأرض وألفا سنتوري يتحركان بالسرعة نفسها، وبالتالي فإن المسافة بينهما هي الطول المعتمد  $L$ . في الجزء (b)،  $\gamma$  معطاة، وبالتالي يمكننا إيجاد  $v$  بإعادة ترتيب علاقة  $\gamma$  للتعبير عن  $v$  بدلالة  $c$ .

### حل الطلب (a)

(a) الطلب

a. تحديد المعطيات:  $L_0 = 4.300 \text{ ly}$ ،  $\gamma = 30.00$ .

b. تحديد المجهول:  $L$ .

c. التعبير عن الإجابة كمعادلة:

$$L = \frac{L_0}{\gamma}$$

d. قم بإجراء الحساب:

$$\begin{aligned} L &= \frac{L_0}{\gamma} \\ &= \frac{4.300 \text{ ly}}{30.00} \\ &= 0.1433 \text{ ly} \end{aligned}$$

### حل الطلب (b)

(b) الطلب

a. تحديد المعطيات:  $\gamma = 30.00$ .

b. تحديد المجهول:  $v$  بدلالة  $c$ .

c. التعبير عن الإجابة كمعادلة:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

يتم حل المعادلة بدلالة  $v/c$  بتربيع الطرفين أولاً ثم إعادة ترتيبهما:

$$\gamma^2 = \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$\frac{v^2}{c^2} = 1 - \frac{1}{\gamma^2}$$

$$\frac{v}{c} = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}}$$

d. قم بإجراء الحساب:

$$\begin{aligned} \frac{v}{c} &= \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} \\ &= \sqrt{1 - \frac{1}{(30.00)^2}} \\ &= 0.99944 \end{aligned}$$

أو:

$$v = 0.9994 c.$$

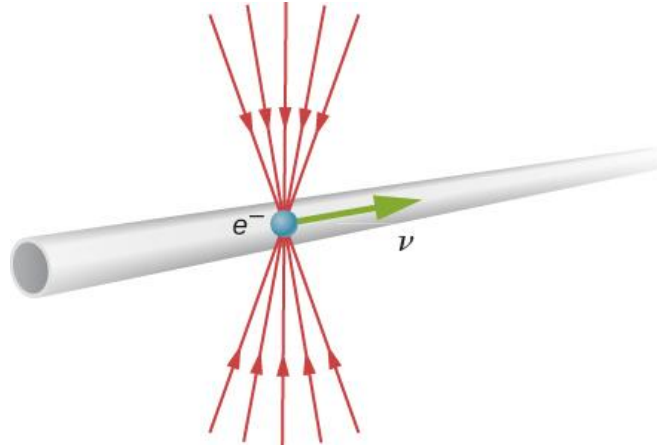


## ملاحظة:


تذكر عدم تقريب أرقام الحساب حتى الإجابة النهائية، وإلا ستحصل على نتائج خاطئة. ينطبق هذا بشكل خاص على حسابات النسبية الخاصة، إذ قد لا يتم الكشف عن الاختلافات إلا بعد عدة منازل عشرية. التأثير النسبي كبير هنا، حيث  $\gamma = 30.00$ ، ونلاحظ أن  $v$  تقترب من (لا تساوي) سرعة الضوء. ولأن المسافة، التي يقيسها رائد الفضاء أصغر بكثير، فإنه يمكن لرائد الفضاء أن يسافر في وقت أقل بكثير في إطارها.

يمكن للأشخاص الذين يسافرون بسرعات عالية جداً قطع مسافات كبيرة جداً (آلاف أو حتى ملايين السنين الضوئية) والتقدم في العمر ببضع سنوات فقط. وعلى أية حال، فهم كالمهاجرين في القرون الماضية الذين تركوا منازلهم، سيتركون الأرض التي يعرفونها إلى الأبد. حتى لو عادوا، فحينها سيكون قد مر آلاف إلى ملايين السنين على الأرض، وقد انطمست معظم المعالم الموجودة. هناك أيضاً عقبة عملية أكثر خطورة أمام السفر بهذه السرعات؛ ستكون هناك حاجة إلى طاقات أكبر بكثير لتحقيق مثل هذه السرعات العالية مما يمكن الحصول عليه في الفيزياء الكلاسيكية. سيتم مناقشة هذا الأمر لاحقاً في الفصل.

لماذا لا نلاحظ ظاهرة تقلص الطول في الحياة اليومية؟ لا يبدو أن المسافة إلى متجر البقالة تعتمد على ما إذا كنا نتحرك أم لا. عند النظر إلى المعادلة  $L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ ، نرى أنه عند السرعات المنخفضة ( $v \ll c$ )، تكون الأطوال متساوية تقريباً، وهذا هو التوقع الكلاسيكي. ولكن تقلص الطول حقيقي، إن لم يكن شائعاً. على سبيل المثال، جسيم مشحون، كالإلكترون مثلاً، يتحرك بسرعة نسبية، فإن خطوط حقله الكهربائي تكون مضغوطة على طول اتجاه الحركة كما يراها مراقب ثابت (**الشكل 12.5**). عندما يمر الإلكترون أمام كاشف، كوشية مثلاً، فإن حقله يتفاعل بشكل أقصر بكثير، ويلاحظ هذا التأثير في مسرعات الجسيمات، مثل مسرع ستانفورد الخطي (SLAC) بطول 3 km. في الواقع، بالنسبة للإلكترون الذي يسير أسفل أنبوب الحزمة في SLAC، فإن كلاً من المسرع والأرض يمران بمحاذاته، ولهما أطوال متعمده. التأثير النسبي كبير لدرجة أن المسرع يبلغ طوله 0.5 m فقط للإلكترون. في الواقع من الأسهل وضع شعاع الإلكترون في أسفل الأنبوب، لأنه ليس بالضرورة أن يكون موجهاً بالدقة نفسها ليكون في نهاية أنبوب قصير مما هو عليه في أنبوب بطول 3 km. وهذا أيضاً، تحقق تجريبي لنظرية النسبية الخاصة.



**الشكل 12.5** يتم ضغط خطوط الحقل الكهربائي لجسيم مشحون عالي السرعة على طول اتجاه حركته من خلال تقلص الطول، مما ينتج إشارة مختلفة بشكل ملحوظ أثناء مرور الجسيم عبر وشية.

**4.5 تحقق من فهمك:** ينتقل جسيم عبر الغلاف الجوي للأرض بسرعة  $0.750c$ . بالنسبة لمراقب أرضي، تبلغ المسافة التي يقطعها 2.50 km. إلى أي مدى ينتقل الجسيم كما يلاحظ من الإطار المرجعي للجسيم؟ 

### الأهداف التعليمية

- في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:
  - وصف تحول غاليليو للميكانيك الكلاسيكي، والعلاقة بين الموضع والزمن والسرعات والتسارع التي جرى قياسها في أطر قصورية مختلفة
  - استنباط معادلات تحويل لورنتز الموافقة لذلك، والتي على عكس تحول غاليليو، تتوافق مع النسبية الخاصة.
  - شرح تحويل لورنتز والعديد من ميزات النسبية بدلالة الزمان الفراغي رباعي الأبعاد.

لقد استخدمنا مسلمات النسبية لدراسة بعض الأمثلة، وكيف يقيس المراقبون في الأطر المرجعية المختلفة قيماً مختلفة للأطوال والفواصل الزمنية. يمكننا إلقاء نظرة عن كثب لمعرفة كيف أن مسلمات النسبية تغير النظرة النيوتونية للزمان والمكان من خلال دراسة معادلات التحول، والتي تعطي إحداثيات المكان والزمان للأحداث في إطار مرجعي قصوري بدلالة هذه الاحداثيات في إطار آخر. ندرس أولاً كيف تتحول إحداثيات المكان والزمان بين الإطارات القصورية من منظور الفيزياء النيوتونية، ثم ندرس كيف يجب تغيير ذلك ليتفق مع مسلمات النسبية. وأخيراً، ندرس معادلات تحويل لورنتز الناتجة وبعض نتائجها من حيث مخططات الزمن-مكان رباعية الأبعاد، وذلك لدعم الرأي القائل بأن نتائج النسبية الخاصة تنتج عن خصائص الزمان والمكان نفسه، بدلا من الكهروستاتيكية.

### معادلات تحول غاليليو

يتم تعيين الحدث من خلال المكان والزمان  $(x, y, z, t)$  بالنسبة لإطار مرجعي قصوري معين  $S$ . وعلى سبيل المثال فإن  $(x, y, z, t)$  يمكن أن تشير إلى موضع الجسم في الزمن  $t$ ، ويمكننا أن ننظر إلى هذه المواضع خلال أزمنة مختلفة عديدة لمتابعة حركة الجسم. لنفترض أن هناك إطاراً مرجعياً آخر  $S'$  يتحرك بسرعة  $v$  بالنسبة للأول. للسهولة، نفترض أن هذه السرعة النسبية باتجاه محور السينات. عندئذ تكون العلاقة بين الزمن والإحداثيات في الإطارين المرجعيين هي:

$$x = x' + vt', \quad y = y', \quad z = z'.$$

افترض ضمناً في هذه المعادلات أن قياسات الزمن التي أجراها المراقبون في كل من  $S$  و  $S'$  هي نفسها. أي أن:

$$t = t'.$$

تُعرف هذه المعادلات الأربع مجتمعة باسم تحويل غاليليو.

يمكننا الحصول على معادلات تحويل غاليليو للسرعة والتسارع باشتقاق هذه المعادلات بالنسبة للزمن. نستخدم  $u$  لسرعة الجسم في هذا الفصل لتمييزها عن  $v$ ، السرعة النسبية لإطارين مرجعيين. لاحظ أنه بالنسبة لتحويل غاليليو، تكون الزيادة في الزمن المستخدم في الاشتقاق لحساب سرعة الجسم هي نفسها في كلا الإطارين  $dt = dt'$ . وبلاشتقاق نجد:

$$u_x = u'_x + v, \quad u_y = u'_y, \quad u_z = u'_z$$

و

$$a_x = a'_x, \quad a_y = a'_y, \quad a_z = a'_z.$$

نشير إلى سرعة الجسم بالرمز  $u$  بدلاً من  $v$  لتجنب خلطها مع السرعة  $v$  لإطار مرجعي واحد بالنسبة للآخر. تختلف السرعات في كل إطار بالسرعة التي يراها إطار واحد من الأطار الآخر. يقوم المراقبون في كلا الإطارين المرجعيين بقياس قيمة التسارع نفسها.

ولأن الكتلة لا تتغير عند التحويل، وكذلك المسافات بين النقاط، كما يرى المراقبون في كلا الإطارين القوى نفسها  $F = ma$  بين الأجسام والصيغة نفسها من قوانين نيوتن الثانية والثالثة في جميع الأطر القصورية. تتوافق قوانين الميكانيك مع المسلمة الأولى للنسبية.

### معادلات تحويل لورنتز

يناقض تحويل غاليليو مسلمات أينشتاين، لأن معادلات السرعة تنص على أن نبض الضوء الذي يتحرك بسرعة  $c$  باتجاه محور السينات ينتقل بسرعة  $c - v$  في إطار قصوري آخر. وبالتحديد، فإن النبضة الكروية الشكل يكون نصف قطرها  $r = ct$  في الزمن  $t$  في الإطار غير المنزاح unprimed، لتصبح قيمته  $r' = ct'$  في الزمن  $t'$  في الإطار المنزاح primed يعطي التعبير عن هذه العلاقات في الإحداثيات الديكارتية:

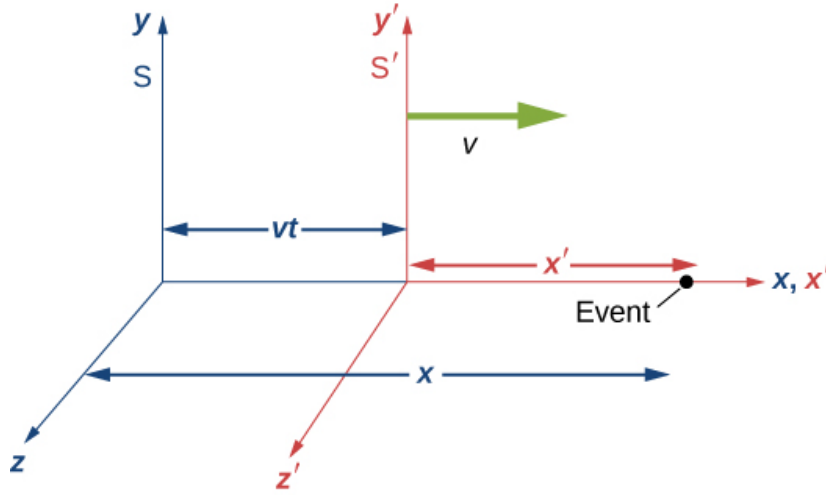
$$\begin{aligned}x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 &= 0 \\x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2 &= 0.\end{aligned}$$

يمكن القول بأن الجانبين الأيسرين من هذه المعادلات متساويان لأن كليهما يساوي الصفر. ولأن  $y = y'$  و  $z = z'$ ، نجد أن:

$$x^2 - c^2 t^2 = x'^2 - c^2 t'^2. \quad (5.5)$$

هذا لا يمكن أن يكون محققاً عند السرعات النسبية اللاصفيرية لكلا الإطارين لو افترضنا أن تحويل غاليليو يعطينا  $x = x' + vt'$  و  $t = t'$ .

لإيجاد المجموعة الصحيحة من معادلات التحويل، افترض وجود نظامي الإحداثيات  $S$  و  $S'$  كما في الشكل 13.5 لنفترض أولاً أن حدثاً ما يجري عند  $(x', 0, 0, t')$  في  $S'$  و عند  $(x, 0, 0, t)$  في  $S$  كما هو موضح في الشكل.



**الشكل 13.5** يحدث الحدث عند  $(x, 0, 0, t)$  في  $S$  وعند  $(x', 0, 0, t')$  في  $S'$ . تقوم معادلات تحويل لورنتز بربط الأحداث في هذين النظامين.

لنفترض أنه في لحظة تقاطع نقطتي المبدأ لنظامي الإحداثيات في  $S$  و  $S'$ ، يصدر مصباح نبضة ضوئية تنتشر بشكل كروي من نقطة المبدأ. في اللحظة  $t$ ، يرى مراقب في  $S$  نقطة المبدأ  $S'$  عند النقطة  $x = vt$ . بمساعدة صديق في  $S$ ، يقوم المراقب في  $S'$  بقياس المسافة من الحدث إلى نقطة المبدأ في  $S'$ ، ويجد أنها تساوي  $x' \sqrt{1 - v^2/c^2}$ . ويتبع ذلك لأننا بيّنا أن مسلمات النسبية تقضي بتقلص الطول. وبالتالي فإن موقع الحدث في  $S$  هو:

$$x = vt + x' \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

و

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

تفترض مسلمات النسبية بأن العلاقة التي تربط مسافة وزمن جبهة الموجة الكروية:

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 = 0$$

يجب أن تطبق على حدٍ سواء في الإحداثيات المنزاح وغير المنزاح، والتي تم عرضها أعلاه لاستنتاج العلاقة 5.5:

$$x^2 - c^2 t^2 = x'^2 - c^2 t'^2.$$

نجمع هذا مع العلاقة التي تربط  $x$  بـ  $x'$  للحصول على العلاقة بين  $t$  و  $t'$ :

$$t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

المعادلات التي تربط الزمن بموضع الأحداث كما تُرى في  $S$  عندئذ تكون:

$$t = \frac{t' + vx'/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$y = y'$$

$$z = z'.$$

تُعرف هذه المجموعة من المعادلات، والتي تربط المكان والزمان في إطارين قصوريين، باسم تحويل لورنتز. تم تسميتهما تكريماً للعالم HA Lorentz (1853-1928)، الذي كان أول من اقترحها. ومن المثير للاهتمام، أنه بنى التحويل على ما تم اكتشافه في نهاية المطاف على أنه فرضية خاطئة. الأساس النظري الصحيح هو نظرية النسبية الخاصة لأينشتاين.

يعبر التحويل العكسي عن المتغيرات في  $S$  بدلالة المتغيرات في  $S'$ . باستبدال المتغيرات المنزاحة وغير المنزاحة ببساطة وتعويضها نجد:

$$t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$y' = y$$

$$z' = z.$$

## مثال 6.5

### استخدام تحويل لورنتز للزمن

مركبة فضائية  $S'$  تكون في طريقها إلى ألفا سنتوري عندما تمر بجانبها مركبة فضائية  $S$  بسرعة نسبية  $c/2$ . يرسل قائد المركبة  $S$  إشارات راديوية تستمر لفترة  $1.2$  s وفقاً لساعة المركبة. استخدم تحويلات لورنتز لإيجاد الفاصل الزمني للإشارة كما يقيسها ضابط الاتصالات في المركبة  $S$ .

**الحل:**

a. تحديد المعطيات:

$$\Delta t' = t_2' - t_1' = 1.2 \text{ s}; \quad \Delta x' = x_2' - x_1' = 0.$$

b. تحديد المجهول:  $\Delta t = t_2 - t_1$ .

c. اكتب الإجابة على شكل معادلة. يبدأ زمن الإشارة عند  $(x', t_1')$  وينتهي عند  $(x', t_2')$ . لاحظ أن الإحداثية  $x'$  لكلا الحدثين هي نفسها لأن الساعة في حالة سكون في المركبة  $S'$ . اكتب معادلة تحويل لورنتز الأولى بدلالة  $\Delta t = t_2 - t_1$  و  $\Delta x = x_2 - x_1$  وكذلك من أجل الإحداثيات المنزاحة، كالتالي:

$$\Delta t = \frac{\Delta t' + v\Delta x'/c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

ولأن موضع الساعة في  $S'$  ثابت، فإن  $\Delta x' = 0$ ، والفاصل الزمني  $\Delta t$  يصبح:

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

d. قم بإجراء الحساب:

عند  $\Delta t' = 1.2 \text{ s}$ ، هذا يعطي:

$$\Delta t = \frac{1.2 \text{ s}}{\sqrt{1 - \left(\frac{1}{2}\right)^2}} = 1.6 \text{ s.}$$

لاحظ أن تحويل لورنتز يستنسخ معادلة تمدد الزمن.

## مثال 7.5

### استخدام تحويل لورنتز للطول

يقيس مسّاح شارعاً بطول  $L = 100 \text{ m}$  في إطار الأرض  $S$ . استخدم تحويل لورنتز للحصول على علاقة تصف طوله المقاس من سفينة الفضاء  $S'$ ، التي تتحرك بسرعة  $0.20c$ ، مع افتراض أن إحداثيات  $x$  للإطارين يتقاطعان في اللحظة  $t = 0$ .

**الحل:**

a. تحديد المعطيات:  $\Delta \tau = 0$ ;  $v = 0.20c$ ;  $L = 100 \text{ m}$ .

b. تحديد المجهول  $L'$ .

c. اكتب الإجابة على شكل معادلة. قام المسّاح الموجود في الإطار  $S$  بقياس طريقي المسطرة في وقت واحد، ووجد أنهما في حالة السكون يقعان عند النقطتين  $x_1$  و  $x_2$  وتفصل بينهما مسافة  $L = x_2 - x_1 = 100 \text{ m}$ . يقيس طاقم سفينة الفضاء الموقع المتزامن لنهائي المسطرة في إطاره. لربط الأطوال التي سجلها المراقبون في  $S'$  و  $S$ ، على التوالي، اكتب المعادلة الثانية من معادلات تحويل لورنتز الأربع كمايلي:

$$\begin{aligned} x'_2 - x'_1 &= \frac{x_2 - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - \frac{x_1 - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ &= \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{L}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \end{aligned}$$

d. قم بإجراء الحساب: بما أن  $x'_2 - x'_1 = 100 \text{ m}$  فإن طول العصا المتحركة يساوي:

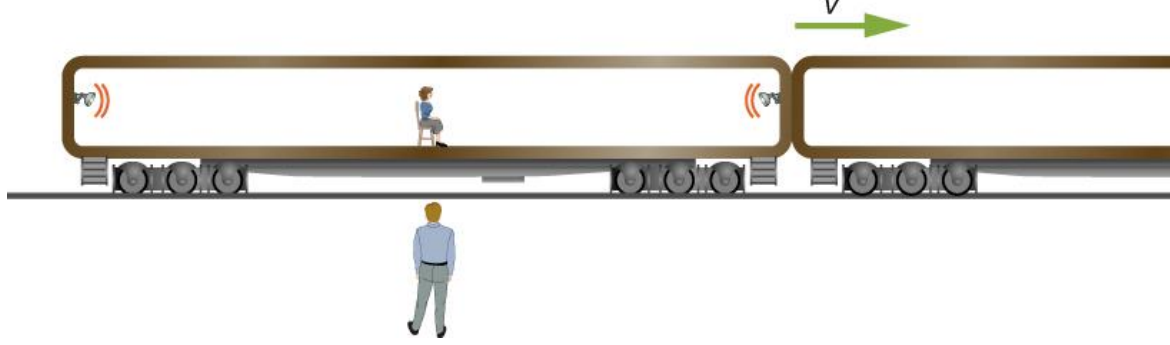
$$\begin{aligned} L' &= (100 \text{ m})\sqrt{1 - v^2/c^2} \\ &= (100 \text{ m})\sqrt{1 - (0.20)^2} \\ &= 98.0 \text{ m.} \end{aligned}$$

لاحظ أن تحول لورنتز أعطى معادلة تقلص الطول للشارع.

## مثال 8.5

### تحويل لورنتز والتزامن

يرى المراقب الظاهر في الشكل 14.5 والذي يقف على مسار السكك الحديدية أن المصباحين يومضان في وقتٍ واحد في طرفي عربة الركاب، التي يبلغ طولها 26 m، عندما يمر بهذا المراقب منتصف العربة بسرعة  $c/2$ . حدد الفاصل الزمني بين الزمن الذي تومض فيه المصباحين كما يراها راكب القطار الذي يجلس في منتصف العربة.



**الشكل 14.5** شخص يشاهد قطاراً عابراً، فيلاحظ أن المصباحين المثبتين على الطرفين المتقابلين لعربة الركاب يومضان في وقتٍ واحد. يوجد راكب آخر داخل العربة يشاهد الضوء نفسه ولكن من منظور مختلف.

**الحل:**

a. تحديد المعطيات:  $\Delta t = 0$ .

لاحظ أن الفاصل المكاني بين الحدثين يقع بين المصباحين، وليس بُعد المصباح عن الراكب.

b. تحديد المجهول:  $\Delta t' = t'_2 - t'_1$ .

مرة أخرى، لاحظ أن الفاصل الزمني هو بين وميض المصباحين، وليس بين أوقات الوصول إلى الراكب.

c. اكتب الإجابة على شكل معادلة.

$$\Delta t = \frac{\Delta t' + v\Delta x'/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

d. قم بإجراء الحساب:

$$0 = \frac{\Delta t' + \frac{c}{2}(26 \text{ m})/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$\Delta t' = -\frac{26 \text{ m}}{2c} = -\frac{26 \text{ m}}{2(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})}$$

$$\Delta t' = -4.33 \times 10^{-8} \text{ s.}$$

**ملاحظة:**

تشير الإشارة إلى أن الحدث الذي له  $x_2'$  أكبر، وهو تحديداً وميض الضوء المنبعث من الناحية اليمنى يُرى بأنه يحدث أولاً في الإطار  $S'$ ، كما وجد سابقاً لهذا المثال، بحيث  $t_2 < t_1$ .

## الزمن - المكان (الزمكان)

يمكن تحليل الظواهر النسبية من حيث الأحداث في الزمكان رباعي الأبعاد. فعندما يتم عرض هذه الظواهر كمفارقة التوأم وتمدد الزمن وتقلص الطول واعتماد التزامن على الحركة النسبية على هذا النحو، فإنها تُعدُّ سمة مميزة لطبيعة المكان والزمان، أكثر منها جوانب معينة من الكهروستاتيكية.

يتم في الفضاء ثلاثي الأبعاد تحديد المواضع بواسطة ثلاث إحداثيات  $(x, y, z)$  ضمن جملة المحاور الديكارتية، وتُعطى إزاحة نقطة عن أخرى بالعلاقة:

$$(\Delta x, \Delta y, \Delta z) = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1).$$

ومسافة الإزاحة  $\Delta r$  بين النقاط هي:

$$\Delta r^2 = (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2.$$

وتبقى المسافة  $\Delta r$  ثابتة عند دوران المحاور. وبفرض جملة جديدة من المحاور الديكارتية تدور حول نقطة المبدأ بالنسبة للمحاور الديكارتية الأصلية، فإن كل نقطة في الفراغ سيكون لها إحداثيات جديدة بدلالة المحاور الجديدة، وتعطى المسافة  $\Delta r$  بالعلاقة:

$$\Delta r'^2 = (\Delta x')^2 + (\Delta y')^2 + (\Delta z')^2.$$

والتي يكون لها قيمة  $\Delta r^2$  نفسها. يحدث شيء مشابه مع تحويل لورنتز في الزمكان.

تحديد المسافة الفاصلة بين حدثين، يُعطى كل منهما بمجموعة من الإحداثيات  $x, y, z, ct$  على جملة ديكارتية رباعية الأبعاد للمحاور في الزمكان:

$$(\Delta x, \Delta y, \Delta z, c\Delta t) = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1, c(t_2 - t_1)).$$

كما يحدد الفاصل الزمكاني  $\Delta s$  بين الحدثين بالعلاقة:

$$\Delta s^2 = (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2 - (c\Delta t)^2.$$

إذا كان للحدثين قيمة  $ct$  نفسها في الإطار المرجعي المعبر، فإن  $\Delta s$  تتوافق مع مسافة الإزاحة بين النقاط في الفراغ  $\Delta r$ . يتكون مسار الجسم عبر الزمكان من الأحداث  $(x, y, z, ct)$  التي تحدد موقعه في كل لحظة من حركته. يُطلق على المسار عبر الزمكان بالخط العالمي للجسيم. الخط العالمي للجسيم، الذي يبقى في حالة سكون في الموقع نفسه، هو خط مستقيم مواز للمحور الزمني. إذا تحرك الجسيم بسرعة ثابتة بالتوازي مع المحور السيني، فسيكون خطه العالمي خطاً مائلاً  $x = vt$ ، يتوافق مع إزاحة بسيطة مقابل الخط البياني للزمن. إذا تسارع الجسيم، فإن خطه العالمي يكون منحنياً. وتعطى الزيادة  $s$  على طول الخط العالمي للجسيم بصيغة تفاضلية كما يلي:

$$ds^2 = (dx)^2 + (dy)^2 + (dz)^2 - c^2(dt)^2.$$

كما هو الحال في المسافة  $\Delta r$ ، حيث تكون ثابتة عند دوران المحاور، وكذلك الفاصل الزمكاني الذي يعطى بالعلاقة:

$$\Delta s^2 = (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2 - (c\Delta t)^2.$$

هو أيضاً ثابت عند تحويل لورنتز. يأتي هذا من مسلمة النسبية، ويمكن رؤيته أيضاً بتعويض معادلات تحويل لورنتز السابقة في علاقة الفاصل الزمكاني:

$$\begin{aligned}
\Delta s^2 &= (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2 - (c\Delta t)^2 \\
&= \left( \frac{\Delta x' + v\Delta t'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right)^2 + (\Delta y')^2 + (\Delta z')^2 - \left( c \frac{\Delta t' + \frac{v\Delta x'}{c^2}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right)^2 \\
&= (\Delta x')^2 + (\Delta y')^2 + (\Delta z')^2 - (c\Delta t')^2 \\
&= \Delta s'^2.
\end{aligned}$$

وبالإضافة إلى ذلك، فإن تحويل لورنتز يغير إحداثيات الحدث في الزمان والمكان بالطريقة نفسها، التي يغير فيها الدوران ثلاثي الأبعاد الإحداثيات القديمة إلى إحداثيات جديدة:

#### Lorentz transformation Axis – rotation around z-axis

(x, t coordinates):

$$x' = (\gamma)x + (-\beta\gamma)ct$$

$$ct' = (-\beta\gamma)x + (\gamma)ct$$

(x, y coordinates):

$$x' = (\cos \theta)x + (\sin \theta)y$$

$$y' = (-\sin \theta)x + (\cos \theta)y$$

حيث:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}; \quad \beta = v/c.$$

يمكن عد تحويلات لورنتز بمنزلة تعميمات للدوران المكاني للزمكان. ومع ذلك، هناك بعض الاختلافات، بين دوران المحور ثلاثي الأبعاد وتحويل لورنتز، والتي تضم محور الزمن، بسبب الاختلافات في كيفية قياس، أو قاعدة قياس الإزاحات  $\Delta r$  و  $\Delta s$ . على الرغم من أن  $\Delta r$  ثابتة في الدوران المكاني و  $\Delta s$  ثابتة أيضاً عند تحويل لورنتز، فإن تحويل لورنتز الذي يتضمن المحور الزمني لا يحافظ على بعض الميزات، كالمحاور التي تبقى عمودية أو مقياس الطول على امتداد كل محور يبقى كما هو. لاحظ أن قيمة  $\Delta s$  يمكن أن تأخذ كلتا الإشارتين، وذلك بالاعتماد على إحداثيات الزمكان للأحداث المعتبرة. من أجل أزواج الأحداث التي تعطى إشارة سالبة، فمن الأفضل أن يتم استبدال  $\Delta \tau_2$  بالقيمة  $-\Delta s_2$ . أهمية  $\Delta \tau$  كما تم تحديدها للتو تتبع من ملاحظة أنه في إطار مرجعي، حيث يأخذ حدثان مكانهما في الموقع نفسه، يكون لدينا  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0$ ، وبالتالي (وانطلاقاً من العلاقة  $\Delta s_2 = -\Delta \tau_2$ ) نجد:

$$\Delta \tau^2 = -\Delta s^2 = (\Delta t)^2.$$

لذلك  $\Delta \tau$  هو الفاصل الزمني  $\Delta t$  في الإطار المرجعي، حيث يأخذ كلا الحدثين مكانهما في الموقع نفسه. إنه الفاصل الزمني المناسب نفسه، الذي تمت مناقشته مسبقاً. وتنبع كذلك من العلاقة بين  $\Delta s$  وأن  $\Delta \tau$  تُعدُّ من ثوابت لورنتز لأن  $\Delta s$  هي أيضاً من ثوابت لورنتز. يتفق جميع المراقبين في جميع الأطر القصورية على الفواصل الزمنية المناسبة بين الحدثين نفسيهما.

**5.5 تحقق من فهمك:** بين أنه إذا انقضت زيادة زمنية  $dt$  للمراقب، الذي يرى الجسم المتحرك بسرعة  $v$ ، فإنها توافق زيادة الزمن المناسب للجسيم  $d\tau = \gamma dt$ .

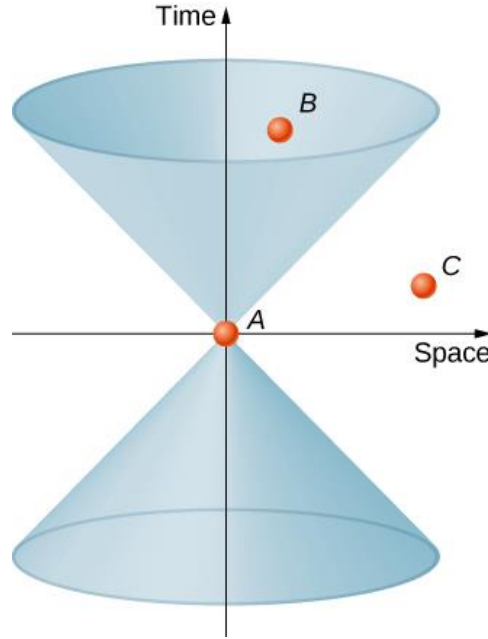
#### مخروط الضوء

يمكننا التعامل مع صعوبة التصوير والرسومات البيانية رباعية الأبعاد باعتبار الإحداثيات المكانية الثلاثية على أنها ممثلة بشكل جماعي بالمحور الأفقي، وأن المحور العمودي هو المحور  $ct$ . بدءاً من حدث معين في الزمكان كنقطة المبدأ للرسم البياني الزمكاني المبين، فإن الخط العالمي للجسيم، الذي يبقى في حالة السكون في الموقع المبدئي للحدث عند نقطة المبدأ، هو محور الزمن. أي



مستوي يمر عبر المحور الزمني موازياً للمحاور المكانية، فإنه يحتوي على جميع الأحداث المتزامنة فيما بينها ومع تقاطع المستوي مع المحور الزمني، وذلك كما هو موضح في إطار السكون للحدث في نقطة المبدأ.

من المفيد تصوير مخروطي ضوئي على الرسم البياني يتكون من خطوط العالم لجميع الحزم الضوئية التي تمر عبر الحدث الأصلي A كما هو مبين في الشكل 15.5. مخروط الضوء، ووفقاً لمسلمات النسبية، له جوانب بزاوية 45 درجة إذا جرى قياس محور الزمن بوحدات ct، ووفقاً للمسلمات المفترضة للنسبية، يظل مخروط الضوء كما هو في جميع الإطارات القصورية. ونظراً لأن الحدث A عشوائي، فإن كل نقطة في مخطط الزمكان لها مخروط ضوئي مرتبط بها.



**الشكل 15.5** يتكون مخروط الضوء من جميع الخطوط العالمية يليها الضوء المنبعث من الحدث A في قمة المخروط.

بالنظر إلى الخط العالمي لجسيم عبر الزمكان. يحتوي أي خط عالمي خارج المخروط، كالخط المار من A إلى C، على سرعات أكبر من c، وبالتالي لن يكون ممكناً. أحداث مثل C والتي تقع خارج المخروط الضوئي يقال بأن لها بُعداً شبه مكاني عن الحدث A. ويتم وصفها كما يلي:

$$\Delta s_{AC}^2 = (x_A - x_B)^2 + (x_A - x_B)^2 + (x_A - x_B)^2 - (c\Delta t)^2 > 0.$$

حدث مثل B، والذي يقع في المخروط العلوي، هو حدث ممكن تحقيقه دون تجاوز سرعة الضوء في الفراغ، ويوصف بالعلاقة:

$$\Delta s_{AB}^2 = (x_A - x_B)^2 + (x_A - x_B)^2 + (x_A - x_B)^2 - (c\Delta t)^2 < 0.$$

ويقال إن الحدث A ذو بعد شبه زماني. تتم الأحداث شبه الزمنية، التي تقع في النصف العلوي من المخروط الضوئي، تحدث عند قيم أكبر من الزمن t للحدث A في قمة المخروط، ومرتبطة بالحدث A في المستقبل. تكون الأحداث، التي لها بُعد شبه زماني عن A وتقع في النصف السفلي من المخروط الضوئي، في الماضي، ويمكن أن تؤثر على الحدث في نقطة المبدأ. لا تُصنف المنطقة التي تقع خارج المخروط الضوئي على أنها ماضي أو مستقبل، بل هي "مكان آخر".

بالنسبة لأي حدث له بُعد شبه مكاني عن الحدث في نقطة المبدأ، فإنه من الممكن اختيار محور زمني يجعل الحدثين بأحضان مكائهما في الزمن نفسه، بحيث يكون الحدثان متزامنين في إطار مرجعي ما. لذلك، أي من الأحداث ذات البعد شبه المكاني، يأتي قبل الآخر في الزمن، يعتمد أيضاً على الإطار المرجعي للمراقب. ونظراً لأن الأبعاد شبه المكانية لا يمكن اجتيازها إلا من خلال تجاوز

سرعة الضوء؛ هذا الانتهاك لأي حدث يمكن أن يسبب الآخر يعطي حجة أخرى حول سبب عدم قدرة الجسيمات على الانتقال بشكل أسرع من سرعة الضوء، وكذلك الادعاءات المحتملة للخيال العلمي حول السفر عبر الزمن. وبالمثل بالنسبة لأي حدث ذي بعد شبه زماني عن الحدث في نقطة المبدأ، يمكن إيجاد إطار مرجعي سيجعل الأحداث تحدث في الموقع نفسه. لأن العلاقات:

$$\Delta s_{AC}^2 = (x_A - x_B)^2 + (x_A - x_B)^2 + (x_A - x_B)^2 - (c\Delta t)^2 > 0$$

و

$$\Delta s_{AB}^2 = (x_A - x_B)^2 + (x_A - x_B)^2 + (x_A - x_B)^2 - (c\Delta t)^2 < 0.$$

هي ثابت لورنتز، سواء كان الحدثان شبه زمنيين، ويمكن إجراؤهما في المكان نفسه أو شبه مكانيين. ويمكن إجراؤهما في الزمن نفسه بالنسبة لجميع المراقبين. يتفق جميع المراقبين في الأطر المرجعية القصورية المختلفة على ما إذا كان للحدثين بعد شبه زماني أو شبه مكاني.

### مفارقة التوأم التي شوهدت في الزمكان

مفارقة التوأم التي نوقشت في وقت سابق تحوي رائد فضاء توأم يسافر بسرعة قريبة من سرعة الضوء إلى نظام نجمي بعيد ويعود إلى الأرض. بسبب تمدد الزمن، من المتوقع أن يكون عمر التوأم في الفضاء أقل بكثير من عمر أخيه التوأم، الذي بقي على الأرض. يبدو هذا متناقضاً لأننا ربما توقعنا للوهلة الأولى أن تكون الحركة النسبية متناظرة، واعتقدنا بسذاجة أنه من الممكن القول أيضاً إن التوأم، الذي بقي على الأرض، يجب أن يتقدم في السن بقيمة أقل.

لتحليل ذلك من خلال مخطط الزمكان، افترض أن نقاط المبدأ للمحاور المستخدمة ثابت في الأرض. عندئذ يكون الخط العالمي للتوأم الأرضي على طول المحور الزمني.

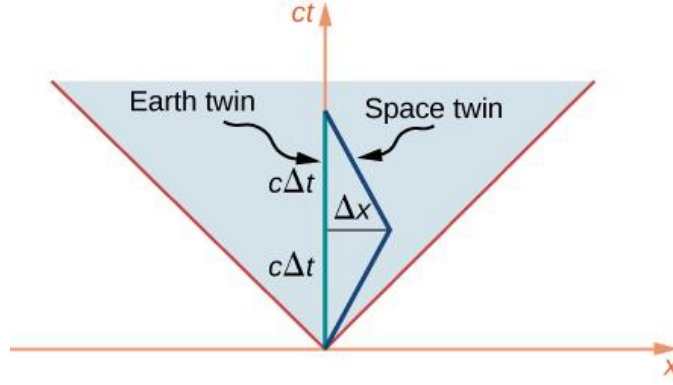
الخط العالمي لرائد الفضاء التوأم، الذي يسافر إلى النجم البعيد ثم يعود، يجب أن يجيد عن مسار الخط المستقيم للسماح برحلة العودة. كما هو موضح في الشكل 16.5، فإن ظروف التوأم ليست متماثلة على الإطلاق. مساراتهم في الزمكان ذات أطوال مختلفة بشكل واضح. وتحديداً، الخط العالمي للتوأم الأرضي طوله  $2c\Delta t$ ، مما ينتج عنه أن الزمن المناسب المنقضي للتوأم الأرضي هو  $2\Delta t$ . المسافة المقطوعة إلى النظام النجمي البعيد هي  $\Delta x = v\Delta t$ . الزمن المناسب المنقضي لرائد الفضاء التوأم هو  $2\Delta\tau$  حيث:

$$c^2 \Delta\tau^2 = -\Delta s^2 = (c\Delta t)^2 - (\Delta x)^2.$$

وهذا أقصر بكثير من الزمن المناسب للتوأم الأرضي بنسبة:

$$\begin{aligned} \frac{c\Delta\tau}{c\Delta t} &= \sqrt{\frac{(c\Delta t)^2 - (\Delta x)^2}{(c\Delta t)^2}} = \sqrt{\frac{(c\Delta t)^2 - (v\Delta t)^2}{(c\Delta t)^2}} \\ &= \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{1}{\gamma}. \end{aligned}$$

بما يتفق مع صيغة تمدد الزمن. لذلك، لا تُعد مفارقة التوأم تناقضاً على الإطلاق. ليست حالة التوأمين متماثلة في مخطط الزمكان. ولربما تكون المفاجأة الوحيدة هي أن المسار الذي يبدو أطول على مخطط الزمكان يتوافق مع فاصل زمني مناسب أصغر، وذلك لأن  $\Delta\tau$  و  $\Delta s$  يعتمدان على  $\Delta x$  و  $\Delta t$ .



**الشكل 16.5** رائد الفضاء التوأم والتوأم الأرضي في مثال مفارقة التوأم، يتبعون خطوطاً عالمية مختلفة الأطوال عبر الزمكان.

### تحويلات لورنتز في الزمكان

لقد لاحظنا بالفعل كيف أن تحويل لورنتز يترك:

$$\Delta s^2 = (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2 - (c\Delta t)^2$$

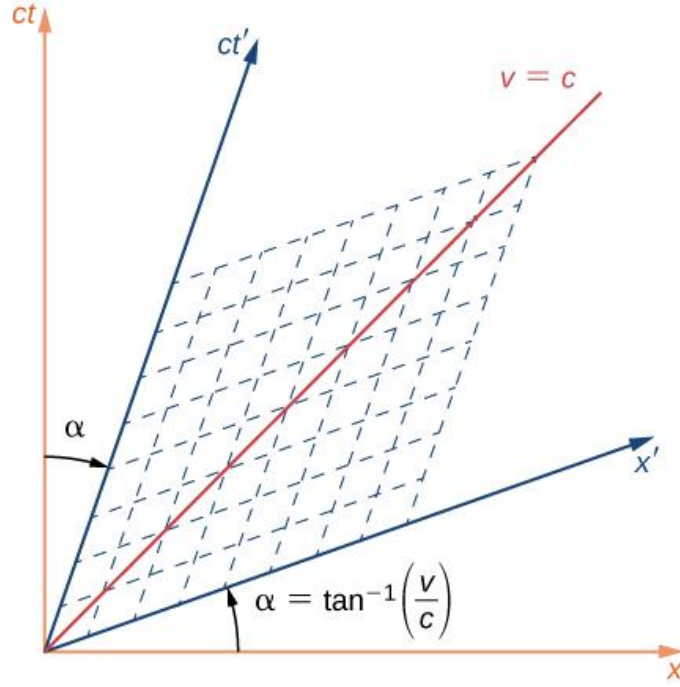
بلا تغيير ويتوافق مع دوران المحاور في الزمكان رباعي الأبعاد. إذا كان الإطاران  $S$  و  $S'$  في حالة حركة نسبية على طول اتجاه محور السينات المشترك، يتم تدوير محوري المكان والزمان  $S'$  بزاوية  $\alpha$  كما يظهر من  $S$  بالطريقة الموضحة في **الشكل 17.5**، حيث:

$$\tan\alpha = \frac{v}{c} = \beta.$$

يختلف هذا عن الدوران بالمعنى المعتاد ثلاثي الأبعاد، بقدر ما يدور محاور الزمكان نحو بعضهما بشكل متناظر بطريقة تشبه المقص كما هو موضح في **الشكل 17.5**. يتم تدوير محاور الزمان والمكان بالزاوية نفسها. تُظهر شبكة الخطوط المتقطعة الموازية للمحورين كيفية قراءة إحداثيات الحدث على طول المحاور المتزاوجة. يمكن القيام بذلك عن طريق وضع خط موازٍ  $x'$  وآخر موازٍ  $t$ -axis كما يتضح من الخطوط المتقطعة. يتغير نطاق طول كلا المحورين بمقدار:

$$ct' = ct \sqrt{\frac{1+\beta^2}{1-\beta^2}}, \quad x' = x \sqrt{\frac{1+\beta^2}{1-\beta^2}}.$$

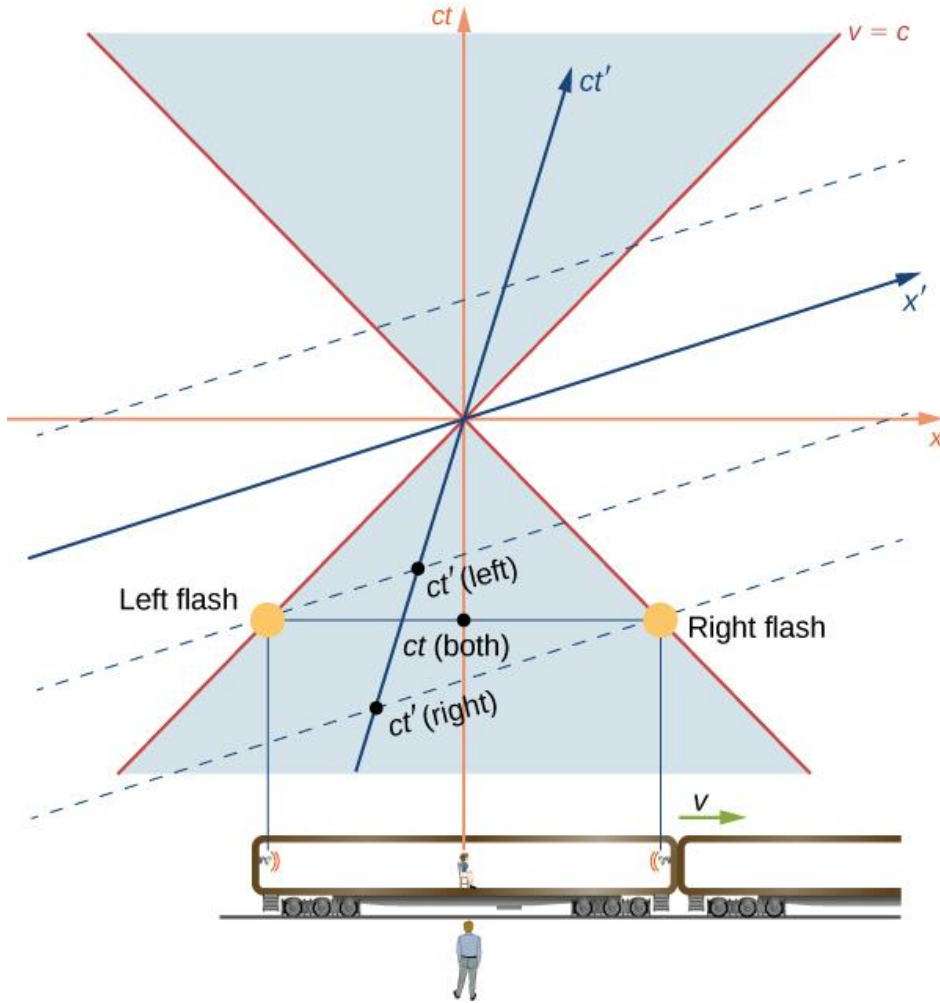
الخط المسمى " $v=c$ " والذي يصنع زاوية بمقدار 45 درجة مع المحور  $x$  يقابل حافة المخروط الضوئي، ولا يتأثر بتحويل لورنتز، وذلك وفقاً للمسلمة الثانية للنسبية. الخط " $v=c$ "، والمخروط الضوئي الذي يمثله، هما نفسهما للإطار المرجعي  $S$  و  $S'$ .



**الشكل 17.5** ينتج عن تحويل لورينتز محورا مكان وزمان جديان يدوران بطريقة تشبه المقص بالنسبة للمحاور الأصلية.

### التزامن

يعتمد تزامن الأحداث في المواقع المنفصلة على الإطار المرجعي المستخدم لوصفها، وذلك كما ورد في "الدوران" الشبيه بالمقص إلى إحداثيات زمانية ومكانية جديدة كما شُرح سابقاً. إذا كان هناك حدثان لهما قيم  $t$  نفسها في الإطار المرجعي غير المنزاح، فلن يكونا بحاجة إلى أن يكون لهما القيم المقاسة نفسها على طول محور  $ct$ ، وعندئذ لن يكونا متزامنين في الإطار المنزاح. وكمثال محدد، في القطار الذي يسير بسرعة قريبة من سرعة الضوء، والذي تومض فيه مصابيح إنارة عند طرفي العربة في وقت واحد في إطار مرجعي مراقب على الأرض. لاحظ مخطط الزمكان على **الشكل 18.5** وتمثل ومضات المصابيح على الشكل بنقاط تُسمى "المصباح اليساري" و "المصباح اليميني" التي تقع في المخروط الضوئي في الماضي. يسير الخط العالمي لكلا النبضتين على طول حافة المخروط الضوئي ليصل إلى المراقب على الأرض في وقت واحد. ويُعدُّ وصولهم هو الحدث في نقطة المبدأ. لذلك كان لا بد من إرسالها في وقت واحد في الإطار غير المنزاح كما هو موضح بالنقطة المسماة  $t(\text{both})$ . ولكن يقاس الزمن على طول المحور  $ct'$  في الإطار المرجعي للمراقب الذي يجلس في منتصف عربة القطار. ولذلك في إطاره المرجعي، فإن حدثي انبعاث الضوء من المصابيح، المسميان  $t'(\text{left})$  و  $t'(\text{right})$ ، لم يكونا متزامنين.



**الشكل 18.5** إعادة النظر في مثال القطار. تحدث ومضات في الزمن  $t(\text{both})$  نفسه على طول محور الزمن للمراقب الأرضي، ولكن في أوقات مختلفة على طول محور الزمن  $t'$  للركاب.

فيما يتعلق بمخطط الزمكان، يستخدم المراقبان مجرد محاور زمنية مختلفة للأحداث نفسها، ذلك لأنهما يقعان في أطر قصورية مختلفة، واستنتاجات كلا المراقبين صحيحة على حدٍ سواء. كما يوحي التحليل فيما يتعلق بمخططات الزمكان، تنتج خاصية اعتماد تزامن الأحداث على الإطار المرجعي عن خصائص المكان والزمان نفسها أكثر من أي شيء يتعلق بالكهرطيسية تحديداً.

## 6.5 | تحويل السرعة النسبية Relativistic Velocity Transformation

### الأهداف التعليمية

- في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:
- استنباط المعادلات المتسقة مع النسبية الخاصة لتحويل السرعات في إطار مرجعي قصوري إلى آخر.
- تطبيق معادلات تحويل السرعة على الأجسام المتحركة بسرعات نسبية.
- بيان كيف يتم التنبؤ بالسرعات المركبة من خلال مقارنة معادلات التحويل النسبية مع تلك المتوقعة بشكل كلاسيكي.

بيان كيف يتم التنبؤ بالسرعات للركبة من خلال مقارنة معادلات التحويل النسبية مع تلك المتوقعة بشكل كلاسيكي. يتطلب البقاء في المكان، بالنسبة لقوارب الكاياك (kayak) في نهر سريع الحركة، جهداً كبيراً، حيث يسحب تيار النهر القوارب. يمكن محاولة التجديف ضد التيار أن تحرك الكاياك في اتجاه المنبع بالنسبة للماء، ولكن هذا لا يمثل سوى جزء من سرعته بالنسبة للشاطئ. تمثل حركة قوارب الكاياك مثلاً على كيفية الجمع بين السرعات في الميكانيك النيوتوني عن طريق جمع الأشعة. وسرعة قوارب الكاياك هي مجموع شعاع سرعته بالنسبة إلى الماء وسرعة الماء بالنسبة لضفة النهر. ومع ذلك، فإن الإضافة النسبية للسرعات مختلفة تماماً.

## تحويلات السرعة

تخيل سيارة تسير في الليل وفق طريق مستقيم كما في الشكل 19.5. يرى السائق الضوء وهو ينبعث من المصابيح الأمامية بسرعة  $c$  ضمن إطار السيارة المرجعي. فإذا تم تطبيق تحويل غاليليو على الضوء، فإن الضوء المنبعث من المصابيح الأمامية للسيارة سيصل إلى المشاة بسرعة  $u = v + c$ ، على عكس مسلمات أينشتاين.



**الشكل 19.5** وفقاً للنتائج التجريبية والمسلمة الثانية للنسبية، يتحرك الضوء من المصابيح الأمامية للسيارة مبتعداً عن السيارة بسرعة  $c$  وفي اتجاه المراقب الواقف على الرصيف بسرعة  $c$ .

تختلف المسافة المقطوعة وزمن الانتقال في الإطارين المرجعيين، ويجب أن تختلف بطريقة تجعل سرعة الضوء متساوية في جميع الأطارات القصورية. يمكن الحصول على القواعد الصحيحة لتحويل السرعات من إطار إلى آخر من معادلات تحويل لورنتز.

## التحويل النسبي للسرعة

افترض جسيم  $P$  يتحرك بسرعة ثابتة  $u = (u'_x, u'_y, u'_z)$  كما تم قياسه في الإطار  $S''$ . يتحرك الإطار  $S'$  محور السينات بسرعة  $v$ . عند مرور زمن  $dt'$ ، ينزاح الجسيم بمقدار  $dx'$  باتجاه محور  $x$ . يعطي تطبيق معادلات تحويل لورنتز الزيادات الموافقة في الزمن والازاحة في المحاور غير المنزاحة:

$$\begin{aligned} dt &= \gamma(dt' + vdx'/c^2) \\ dx &= \gamma(dx' + vdt') \\ dy &= dy' \\ dz &= dz'. \end{aligned}$$

عندئذ يمكن مشاهدة مركبات سرعة الجسيم في نظام الإحداثيات غير المنزاحة:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\gamma(dx' + vdt')}{\gamma(dt' + vdx'/c^2)} = \frac{\frac{dx'}{dt'} + v}{1 + \frac{v}{c^2} \frac{dx'}{dt'}}$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{dy'}{\gamma(dt' + vdx'/c^2)} = \frac{\frac{dy'}{dt'}}{\gamma\left(1 + \frac{v}{c^2} \frac{dx'}{dt'}\right)}$$

$$\frac{dz}{dt} = \frac{dz'}{\gamma(dt' + vdx'/c^2)} = \frac{\frac{dz'}{dt'}}{\gamma\left(1 + \frac{v}{c^2} \frac{dx'}{dt'}\right)}$$

وبالتالي نحصل على معادلات مركبات سرعة الجسم كما ترى في الإطار S:

$$u_x = \left( \frac{u'_x + v}{1 + vu'_x/c^2} \right), \quad u_y = \left( \frac{u'_y/\gamma}{1 + vu'_x/c^2} \right), \quad u_z = \left( \frac{u'_z/\gamma}{1 + vu'_x/c^2} \right)$$

قارن هذا بالكيفية التي يقول بها تحويل غاليليو للميكانيك الكلاسيكي أن السرعات يمكن تحويلها، وذلك ببساطة بجمع الأشعة:

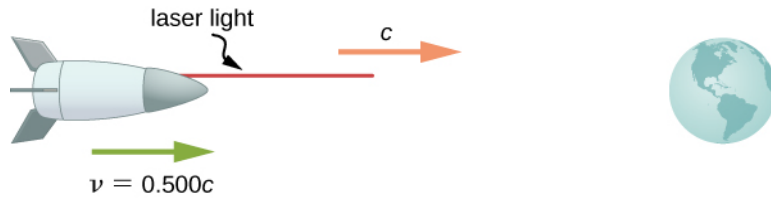
$$u_x = u'_x + v, \quad u_y = u'_y, \quad u_z = u'_z$$

عندما تكون السرعة النسبية للإطارات أصغر بكثير من سرعة الضوء، أي عندما  $v \ll c$ ، فإن قانون جمع السرعات النسبية الخاصة ينتقل إلى قانون سرعة غاليليو. عندما تكون السرعة  $v$  والسرعة  $S'$  بالنسبة إلى  $S$  قريبة من سرعة الضوء، فإن قانون جمع السرعة النسبية يعطي نتيجة أصغر بكثير من قانون غاليليو لجمع السرعات الكلاسيكي.

## مثال 9.5

### معادلات تحويل السرعة للضوء

لنفترض أن هناك سفينة فضاء تتجه مباشرة نحو الأرض بسرعة تبلغ نصف سرعة الضوء وترسل لنا إشارة باستخدام شعاع ليزر (الشكل 20.5). بالنظر إلى أن الضوء يترك السفينة بسرعة  $c$  كما لوحظ من السفينة، احسب السرعة التي يقترب بها الشعاع الليزري من الأرض.



**الشكل 20.5.** ما هي السرعة التي تقترب بها إشارة ضوئية إلى الأرض إذا تم إرسالها من مركبة فضائية تسير بسرعة

$0.500c$ ؟

### خطة الحل:

نظرًا لأن الضوء وسفينة الفضاء يتحركان بسرعات نسبية، لا يمكننا استخدام الجمع البسيط للسرعات. بدلاً من ذلك، نحدد السرعة، التي تقترب بها الضوء من الأرض باستخدام جمع السرعات النسبية.

### الحل:

a. تحديد المعطيات:  $v = 0.500c$ ;  $u' = c$ .

b. تحديد المجهول:  $u$ .

c. اكتب الإجابة على شكل معادلة.

$$u = \frac{v + u'}{1 + \frac{vu'}{c^2}}$$

d. قم بإجراء الحساب:

$$\begin{aligned} u &= \frac{v + u'}{1 + \frac{vu'}{c^2}} \\ &= \frac{0.500c + c}{1 + \frac{(0.500c)(c)}{c^2}} \\ &= \frac{(0.500 + 1)c}{\left(\frac{c^2 + 0.500c^2}{c^2}\right)} \\ &= c. \end{aligned}$$

### ملاحظة:

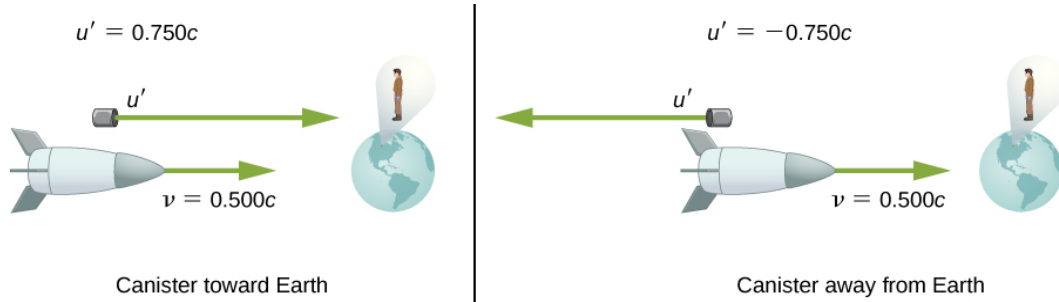
يعطي جمع السرعات النسبية النتيجة الصحيحة. يغادر الضوء السفينة بسرعة  $c$  ويقترب من الأرض بسرعة  $c$ . سرعة الضوء مستقلة عن الحركة النسبية للمصدر والمراقب، سواء كان المراقب على السفينة أو على الأرض. لا يمكن جمع السرعات لقيمة أكبر من سرعة الضوء، بشرط أن تكون  $v$  أصغر من  $c$  وإلا تزيد قيم  $u'$  على قيمة  $c$ . ويوضح المثال التالي أن جمع السرعات النسبية ليس متماثلاً كجمع السرعات الكلاسيكية.

## مثال 10.5

### تسليم الطرود النسبية

لنفترض أن سفينة الفضاء في المثال السابق تقترب من الأرض بسرعة تبلغ نصف سرعة الضوء وتطلق علبة بسرعة  $0.750c$  (الشكل 21.5). (a) ما هي السرعة التي يرى فيها مراقب على الأرض العلبة إذا تم إطلاقها باتجاه الأرض مباشرة؟

(b) إذا تم إطلاقها بعكس اتجاه حركة السفينة المتجهة إلى الأرض؟



الشكل 21.5 يتم إطلاق علبة بسرعة تبلغ  $0.750c$  باتجاه الأرض أو بعيداً عن الأرض.

### خطة الحل:

نظراً لأن العلبة وسفينة الفضاء تتحركان بسرعات نسبية، يجب علينا تحديد سرعة العلبة كما يقيسها مراقب أرضي باستخدام جمع السرعات النسبية بدلاً من جمع السرعات البسيطة.

### حل الطلب (a)

a. تحديد المعطيات:  $v = 0.500c$ ;  $u' = 0.750c$ .



b. تحديد المجهول: u.

c. اكتب الإجابة على شكل معادلة.

$$u = \frac{v + u'}{1 + \frac{vu'}{c^2}}$$

d. قم بإجراء الحساب:

$$\begin{aligned} u &= \frac{v + u'}{1 + \frac{vu'}{c^2}} \\ &= \frac{0.500c + 0.750c}{1 + \frac{(0.500c)(0.750c)}{c^2}} \\ &= 0.909c. \end{aligned}$$

### حل الطلب (b)

a. تحديد المعطيات:  $v = 0.500c$ ;  $u' = -0.750c$ .

b. تحديد المجهول: u.

c. اكتب الإجابة على شكل معادلة.


$$u = \frac{v + u'}{1 + \frac{vu'}{c^2}}$$

d. قم بإجراء الحساب:

$$\begin{aligned} u &= \frac{v + u'}{1 + \frac{vu'}{c^2}} \\ &= \frac{0.500c + (-0.750c)}{1 + \frac{(0.500c)(-0.750c)}{c^2}} \\ &= -0.400c. \end{aligned}$$

### ملاحظة:

تشير الإشارة السالبة إلى أن السرعة بعكس اتجاه  $v$ ، مما يعني أن العلبة تتجه نحو الأرض في الجزء (a) وتبتعد عنها في الجزء (b) كما هو متوقع. لكن السرعات النسبية لا يتم جمعها ببساطة كالسرعات الكلاسيكية. في الجزء (a)، تقترب العلبة من الأرض بشكل أسرع، ولكن بسرعة أقل من المجموع الشعاعي للسرعات، الذي يبلغ القيمة  $1.250c$ . في الجزء (b)، تبتعد العلبة عن الأرض بسرعة تبلغ  $-0.400c$ ، وهو أسرع من  $-0.250c$  المتوقعة بالحساب الكلاسيكي. فروق السرعات ليست متساوية: في الجزء (a)، يرى المراقب على الأرض أن العلبة والسفينة تتحركان بسرعة  $0.409c$ ، وبسرعة  $0.900c$  في الجزء (b).

 **6.5 تحقق من فهمك:** المسافات العمودية على الحركة النسبية لإطارين هي نفسها في كلا الإطارين. لماذا إذاً السرعات

العمودية على الاتجاه  $x$  تكون مختلفة في الإطارين؟

## 7.5 | تأثير دوبلر للضوء Doppler Effect for Light

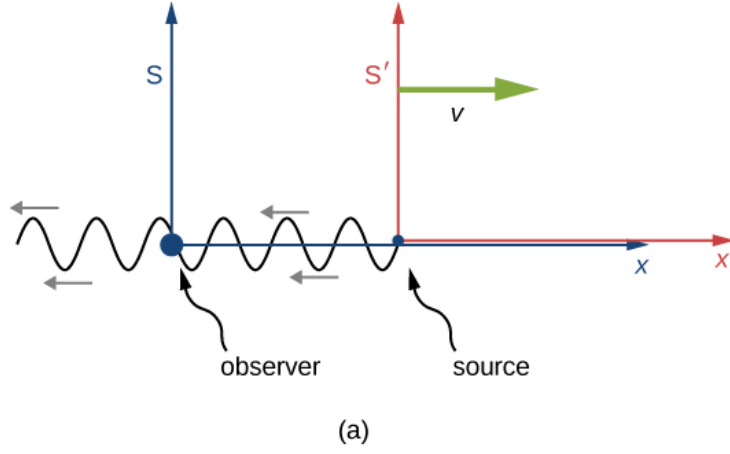
### الأهداف التعليمية

- في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:
  - شرح أصل الإزاحة في تردد الموجة المرصودة وطولها من قبل مراقب، وذلك عندما يتحرك كلٌّ من المراقب والمصدر باتجاه بعضهما أو بعيداً عن بعضهما.
  - استنتاج علاقة تحول دوبلر النسبي.
  - تطبيق معادلات تحول دوبلر على أمثلة في العالم الحقيقي

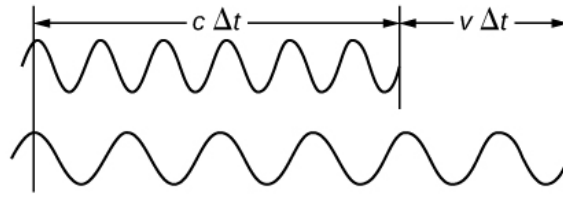
كما تمت مناقشته في الفصل المتعلق بالصوت، فإنه إذا كان مصدر الصوت والمستمع يتحركان بعيداً عن بعضهما البعض، فإن المستمع يستقبل عدد أقل من دورات الموجة في كل ثانية، وبالتالي يكون التردد أقل مما هو عليه لو أن المسافة الفاصلة بينهما بقيت ثابتة. وللأسف نفسه، فإن المستمع يصله تردد أعلى إذا كان المصدر والمستمع يقتربان من بعضهما البعض. يحدث تحول دوبلر الناتج في التردد لأي شكل من أشكال الموجة. بالنسبة للموجات الصوتية، تختلف معادلات تحول دوبلر بشكل ملحوظ بناءً على ما إذا كان المصدر أو المراقب أو الهواء هو الذي يتحرك. لا يتطلب الضوء أي وسيط للانتقال، كما أن تحول دوبلر للضوء الذي يسير في الفراغ يعتمد فقط على السرعة النسبية للمراقب والمصدر.

### تأثير دوبلر النسبي

افترض أن مراقباً في  $S$  يرى ضوءاً منبعثاً من مصدر  $S'$  ويتحرك بسرعة  $v$  (الشكل 22.5). يمكن قياس الطول الموجي للضوء داخل  $S'$  على سبيل المثال، وذلك باستخدام مرآة لإعداد أمواج دائمة وقياس المسافة بين العقد. هذه المسافات هي أطوال مناسبة مع  $S'$  في إطار السكون لهم، وتتغير بمعامل  $\sqrt{1 - v^2/c^2}$  عندما يتم قياسها في إطار المراقب  $S$ ، حيث أن مسطرة قياس الطول الموجي في  $S'$  تُعد متحركة.



(a)



(b)

**الشكل 22.5 (a)** عندما تتبع موجة ضوئية من مصدر ثابت في الإطار القصوري المتحرك  $S'$ ، يرى المراقب في  $S$  الطول الموجي المقاس في  $S'$  على أنه أقصر بمعامل  $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ . (b) لأن المراقب يرى أن المصدر يتحرك مبتعداً داخل  $S$ ، فإن نمط الموجة الواصل إلى المراقب في  $S$  يتمدد أيضاً بمعامل  $(c\Delta t + v\Delta t)/(c\Delta t) = 1 + v/c$ .

لو كان المصدر ثابتاً في  $S$ ، لرأى المراقب طول نمط الموجة  $c\Delta t$  في الزمن  $\Delta t$ . ولكن بسبب حركة  $S'$  بالنسبة لـ  $S$ ، والتي تؤخذ بالحسبان فقط داخل  $S$ ، فإن المراقب يرى نمط الموجة، وبالتالي فإن الطول الموجي يتمدد بمعامل:

$$\frac{c\Delta t_{\text{period}} + v\Delta t_{\text{period}}}{c\Delta t_{\text{period}}} = 1 + \frac{v}{c}$$

كما هو موضح في (b) من الشكل 22.5 وتعطى الزيادة الكلية من كلا الأثرين بالعلاقة:

$$\lambda_{\text{obs}} = \lambda_{\text{src}} \left(1 + \frac{v}{c}\right) \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \lambda_{\text{src}} \left(1 + \frac{v}{c}\right) \sqrt{\frac{1}{\left(1 + \frac{v}{c}\right)\left(1 - \frac{v}{c}\right)}} = \lambda_{\text{src}} \sqrt{\frac{\left(1 + \frac{v}{c}\right)}{\left(1 - \frac{v}{c}\right)}}$$

حيث:  $\lambda_{\text{src}}$  هو طول موجة الضوء، الذي يُرى من المصدر في  $S'$  و  $\lambda_{\text{obs}}$  هو الطول الموجي الذي يراه مراقب داخل  $S$ .

### الانزياح الأحمر والانزياح الأزرق

يكون طول الموجة المرصودة  $\lambda_{\text{obs}}$  للإشعاع الكهرومغناطيسي (وتُسمى "الانزياح الأحمر") أطول من تلك المنبعثة من المصدر عندما يتحرك المصدر بعيداً عن المراقب. وبالمثل، يكون طول الموجة أقصر (ويُطلق عليه "الانزياح الأزرق") عندما يتحرك المصدر نحو المراقب. ويتم تحديد مقدار هذا التغير بالعلاقة:

$$\lambda_{\text{obs}} = \lambda_s \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}}$$

حيث  $\lambda_s$ : هو الطول الموجي في الإطار المرجعي للمصدر، و  $v$  هي السرعة النسبية للإطارين  $S$  و  $S'$ . تُعدُّ السرعة  $v$  موجبة إذا كانت الحركة بعيدة عن المراقب، وسالبة إذا كانت الحركة باتجاه المراقب. وبالنسبة لتردد المصدر والتردد المرصود، تربط بينهما العلاقة التالية:

$$f_{\text{obs}} = f_s \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}}$$

لاحظ أن الإشارات مختلفة كما هي عليه في علاقة الطول الموجي.

## مثال 11.5

### حساب تحول دوبلر

بفرض وجود مجرة تتحرك بعيداً عن الأرض بسرعة  $0.825c$ ، وتنبعث منها أمواج راديوية بطول موجي  $0.525\text{m}$ . ما الطول الموجي الذي سيتم رصده على الأرض؟

### خطة الحل:

نظرًا لأن المجرة تتحرك بسرعة نسبية، يجب علينا حساب تحول دوبلر لأمواج الراديو باستخدام تحول دوبلر النسبي بدلاً من تحول دوبلر الكلاسيكي.

### الحل:

a. تحديد المعطيات:  $u = 0.825c$  ;  $\lambda_s = 0.525\text{m}$ .

b. تحديد المجهول:  $\lambda_{\text{obs}}$ .

c. اكتب الإجابة على شكل معادلة.


$$\lambda_{\text{obs}} = \lambda_s \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}}$$

d. قم بإجراء الحساب:

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{obs}} &= \lambda_s \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}} \\ &= (0.525 \text{ m}) \sqrt{\frac{1 + \frac{0.825c}{c}}{1 - \frac{0.825c}{c}}} \\ &= 1.70 \text{ m}. \end{aligned}$$

### ملاحظة:

نظرًا لأن المجرة تتحرك بعيداً عن الأرض، نتوقع أن تكون أمواج الإشعاع، التي تنبعث منها حمراء. يبلغ الطول الموجي الذي قمنا بحسابه  $1.70 \text{ m}$  ، والذي يتم تحويله إلى اللون الأحمر من الطول الموجي الأصلي البالغ  $0.525 \text{ m}$ . سوف نرى في فيزياء الجسيمات وعلم الكونيات أن الكشف عن الإشعاع الأحمر وصل بنا إلى المفهوم الحالي لأصل الكون وتطوره.

 **5.7 تحقق من فهمك:** لنفترض أن مسباراً فضائياً يتحرك بعيداً عن الأرض بسرعة  $0.350c$ . ويرسل رسالة على شكل أمواج راديوية إلى الأرض على تردد  $1.50 \text{ GHz}$ . عند أي تردد يتم استلام الرسالة على الأرض؟

إن تأثير دوبلر النسبي له تطبيقات عملية بداية من رادار دوبلر لمراقبة العواصف وصولاً إلى توفير معلومات عن حركة النجوم وعن بعدها. وقد وصف بعض هذه التطبيقات في التمارين.

### الأهداف التعليمية

- في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:
- حساب العزم النسبي بدلالة الكتلة والسرعة.
  - إظهار مدى ارتباط العزم النسبي بالعزم الكلاسيكي.
  - إظهار كيف أن مصونية العزم النسبي تحد من سرعة الأجسام ذات الكتلة إلى سرعات أقل من  $c$ .

العزم هو مفهوم مركزي في الفيزياء. ترد أوسع صيغة لقانون نيوتن الثاني بدلالة العزم. يتم الحفاظ على العزم ما دامت القوة الخارجية الصافية على النظام صفراً. هذا يجعل من مصونية العزم أداة أساسية لتحليل الاصطدام (الشكل 23.5). يأتي الكثير مما نعرفه عن التركيب دون الذري من تحليل اصطدامات الجسيمات النسبية الناتجة عن المسرع، وتؤدي مصونية العزم دوراً مهماً في هذا التحليل.



**الشكل 23.5** العزم هو مفهوم مهم لهؤلاء اللاعبين من جامعة كاليفورنيا في بيركلي وجامعة كاليفورنيا في ديفيس. لاعب بالسرعة نفسها للاعب آخر، ولكن كتلته أكبر، يصطدم بتأثير أكبر لأن عزمه أكبر. يكون هذا التأثير أكبر بالنسبة للأجسام التي تتحرك بسرعات نسبية.

تنص المسلمة الأولى للنسبية على أن قوانين الفيزياء هي نفسها في جميع الأطر القصورية. هل يحافظ قانون مصونية العزم على هذه الخاصة عند السرعات العالية؟ يمكن إثبات أن العزم المحسوب على أنه مجرد  $\vec{P} = m \frac{d\vec{x}}{dt}$ ، حتى لو تم حفظه في إطار مرجعي واحد، قد لا يتم حفظه في إطار آخر بعد تطبيق تحويل لورنتز على السرعات. بدلاً من ذلك، يمكن إظهار المعادلة الصحيحة للعزم على أنها التعبير الكلاسيكي للزيادة في الزمن المناسب للجسيم  $dt$  المرصود في إطار السكون للجسيم:

$$\begin{aligned}\vec{p} &= m \frac{d\vec{x}}{d\tau} = m \frac{d\vec{x}}{dt} \frac{dt}{d\tau} \\ &= m \frac{d\vec{x}}{dt} \frac{1}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} \\ &= \frac{m \vec{u}}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} = \gamma m \vec{u} .\end{aligned}$$

## العزم النسبي

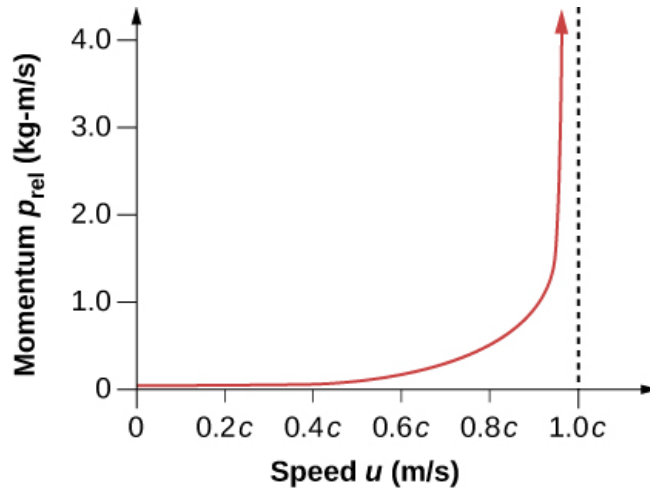
العزم النسبي  $\vec{P}$  هو العزم الكلاسيكي مضروباً في المعامل النسبي  $\gamma$ :

$$\vec{p} = \gamma m \vec{u} \quad (5.6)$$

حيث:  $m$  هي الكتلة السكونية للجسيم،  $u$  هي سرعته بالنسبة للمراقب، و  $\gamma$  هو المعامل النسبي:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \quad (5.7)$$

لاحظ أننا نستخدم الرمز  $u$  للسرعة هنا لتمييزها عن السرعة النسبية  $v$  بين المراقبين. يكون للمعامل  $\gamma$  الذي يحدث هنا نفس شكل المعامل النسبي السابق  $\gamma$  باستثناء أنه الآن معطى من حيث سرعة الجسيم  $u$  بدلاً من السرعة النسبية  $v$  للإطارين المرجعيين. بالتعبير عن  $p$  بهذه الطريقة، يتم الحفاظ على العزم الكلي  $p_{tot}$  كلما كانت القوة الخارجية الصافية صفرية، تمامًا كما في الفيزياء الكلاسيكية. مرة أخرى، نرى أن الكمية النسبية تصبح فعليًا نفس الكمية الكلاسيكية عند السرعات المنخفضة، حيث تكون  $u/c$  صغيرة و  $\gamma$  يساوي تقريباً 1. للعزم النسبي دور حدسي مثل العزم الكلاسيكي. يأخذ قيمة أكبر عندما تكون الكتل كبيرة وتتحرك بسرعات عالية، ولكن بسبب المعامل  $\gamma$ ، يقترب العزم النسبي من اللانهاية مع اقتراب  $u$  من  $c$  (الشكل 24.5). هذا مؤشر آخر على أن الجسيم ذا الكتلة لا يمكنه الوصول إلى سرعة الضوء. وإذا حدث ذلك، فإن عزمه سيصبح بلا حدود - وهي قيمة غير منطقية.



الشكل 24.5 يقترب العزم النسبي من اللانهاية عندما تقترب سرعة الجسيم من سرعة الضوء.

التعريف الصحيح للعزم  $p = \gamma mu$  بمفهومه النسبي يؤخذ أحياناً على أنه يعني أن الكتلة تتغير بتغير السرعة:  $m_{var} = \gamma m$ ، لا سيما في الكتب القديمة. ومع ذلك، لاحظ أن  $m$  هي كتلة الجسيم كما يقيسها شخص في حالة سكون بالنسبة للجسيم. وهكذا، يتم تعريف  $m$  على أنها الكتلة الساكنة، والتي يمكن قياسها في حالة السكون، ربما باستخدام الجاذبية. عندما تتحرك كتلة بالنسبة لمراقب، فإن الطريقة الوحيدة لتحديد كتلتها هي من خلال التصادم أو غيرها من الوسائل التي تستخدم العزم. نظراً لأنه لا يمكن تحديد كتلة الجسيم المتحرك بشكل مستقل عن العزم، فإن الكتلة الوحيدة التي لها معنى هي كتلة السكون. لذلك، عندما نستخدم مصطلح "الكتلة"، نفترض أنها مطابقة "لكتلة السكون".

يتم تعريف العزم النسبي بطريقة تحافظ على مصونية العزم في جميع الأطر القصورية. كلما كانت القوة الخارجية الصافية على النظام صفرًا، يتم الحفاظ على العزم النسبي، كما هو الحال بالنسبة للعزم الكلاسيكي. وقد تم التحقق من هذا في العديد من التجارب.

8.5 تحقق من فهمك: احسب عزم إلكترون يسير بسرعة  $0.985c$ ؟ الكتلة السكونية للإلكترون هي  $9.11 \times 10^{-31} \text{kg}$ .

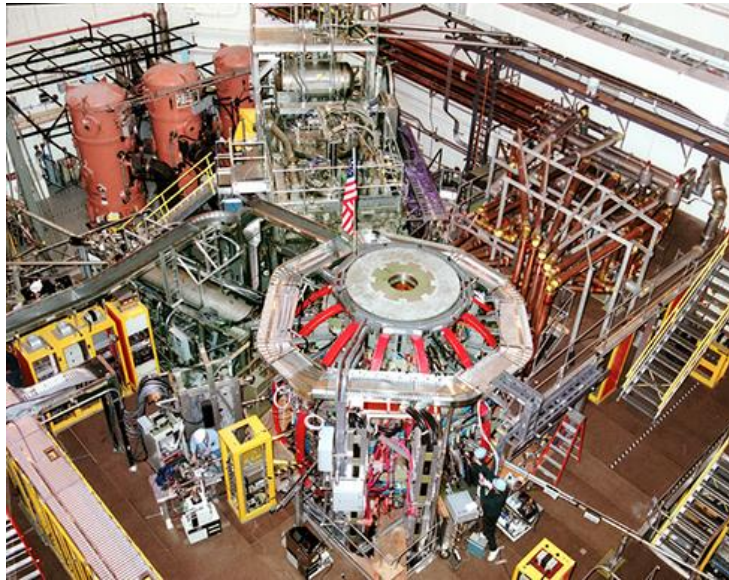
### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- توضيح كيف تؤدي نظرية الطاقة - العمل إلى علاقة للطاقة الحركية النسبية لجسيم ما.
- إظهار كيف ترتبط الطاقة النسبية بالطاقة الحركية الكلاسيكية، وتضع حداً لسرعة أي جسيم ذي كتلة.
- وصف كيف ترتبط الطاقة الكلية للجسيم بكتلته وسرعته.
- توضيح كيف ترتبط النسبية بتكافؤ الكتلة - الطاقة، وبعض الآثار العملية لتكافؤ الكتلة - الطاقة.

يُعدُّ التوكاماك المبين في الشكل 25.5 أحد أشكال مفاعلات الاندماج التجريبية، والذي يمكنه أن يحول الكتلة إلى طاقة. المفاعلات النووية هي دليل على العلاقة بين الطاقة والمادة.

قانون مصونية الطاقة هو أحد أهم القوانين في الفيزياء. للطاقة العديد من الأشكال المهمة، ويمكن تحويل كل شكل منها إلى أي شكل آخر. نحن نعلم أنه من الناحية الكلاسيكية، الكمية الكلية للطاقة في النظام تبقى ثابتة. من الناحية النسبية، لا تزال الطاقة مصانة، ولكن هنا يجب مراعاة معادلة كتلة الطاقة، في التفاعلات التي تحدث داخل المفاعل النووي مثلاً. تكون الطاقة النسبية مصونة في جميع الإطارات القصورية، كما هو الحال بالنسبة للعزم النسبي. ونتيجةً لذلك، ترتبط العديد من الكميات الأساسية بطرائق غير معروفة في الفيزياء الكلاسيكية. تم التحقق من جميع هذه العلاقات من خلال النتائج التجريبية ولها نتائج أساسية. يحتوي التعريف المتغير للطاقة على بعض الأفكار الجديدة الأساسية والمذهلة حول الطبيعة في التاريخ الحديث.



**الشكل 25.5:** تجربة Torus الكروية الوطنية (NSTX) وهي مفاعل اندماج تخضع فيه نظائر الهيدروجين للانصهار لإنتاج الهليوم. في هذه العملية، يتم تحويل كتلة صغيرة نسبياً من الوقود إلى كمية كبيرة من الطاقة.

### الطاقة الحركية والحد الأقصى للسرعة

تنص المسلمة الأولى للنسبية على أن قوانين الفيزياء هي نفسها في جميع أطر القصور الذاتي. أوضح أينشتاين أن قانون الحفاظ على طاقة جسيم ما هو صالح نسبياً، ولكن بالنسبة للطاقة المعبر عنها بدلالة السرعة والكتلة بطريقة تتوافق مع النسبية.

تأمل أولاً التعبير النسبي عن الطاقة الحركية. نستخدم مرة أخرى  $u$  للسرعة لتمييزها عن السرعة النسبية  $v$  بين المراقبين. تقليدياً، ترتبط الطاقة الحركية بالكتلة والسرعة بالتعبير المألوف  $K = \frac{1}{2}mu^2$ . يمكن الحصول على التعبير النسبي الموافق للطاقة الحركية من نظرية الطاقة - العمل. تنص هذه النظرية على تحول العمل الصافي المنجز على نظام إلى طاقة حركية. وتحديدًا، إذا كانت القوة، المعبر عنها بالعلاقة  $\vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt} = m \frac{d(\gamma\vec{u})}{dt}$ ، تُسرّع الجسم من السكون إلى سرعته النهائية، فيجب أن يكون العمل المنجز على هذا الجسم مساوياً لطاقته الحركية النهائية. رياضياً وحركة أحادية البعد نكتب:

$$\begin{aligned} K &= \int F dx = \int m \frac{d}{dt}(\gamma u) dx \\ &= m \int \frac{d(\gamma u)}{dt} \frac{dx}{dt} dt = m \int u \frac{d}{dt} \left( \frac{u}{\sqrt{1 - (u/c)^2}} \right) dt. \end{aligned}$$

بالتكامل نحصل على:

$$\begin{aligned} K &= \frac{mu^2}{\sqrt{1 - (u/c)^2}} \Big|_{0u} - m \int \frac{u}{\sqrt{1 - (u/c)^2}} \frac{du}{dt} dt \\ &= \frac{mu^2}{\sqrt{1 - (u/c)^2}} - m \int \frac{u}{\sqrt{1 - (u/c)^2}} du \\ &= \frac{mu^2}{\sqrt{1 - (u/c)^2}} - mc^2 \left( \sqrt{1 - (u/c)^2} \right) \Big|_0^u \\ &= \frac{mu^2}{\sqrt{1 - (u/c)^2}} + \frac{mc^2}{\sqrt{1 - (u/c)^2}} - mc^2 \\ &= mc^2 \left[ \frac{(u^2/c^2) + 1 - (u^2/c^2)}{\sqrt{1 - (u/c)^2}} \right] - mc^2 \\ K &= \frac{mc^2}{\sqrt{1 - (u/c)^2}} - mc^2. \end{aligned}$$

### الطاقة الحركية النسبية

الطاقة الحركية النسبية لأي جسم كتلته  $m$  هي:

$$K_{\text{rel}} = (\gamma - 1)mc^2. \quad (5.8)$$

عندما يكون الجسم ساكناً، تكون سرعته  $u = 0$  و:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} = 1$$

حيث:  $K_{\text{rel}} = 0$  في حالة السكون كما هو متوقع. لكن التعبير عن الطاقة الحركية النسبية (مثل إجمالي الطاقة والطاقة الساكنة) لا يشبه كثيراً التعبير الكلاسيكي  $\frac{1}{2}mu^2$ . لإظهار أن علاقة  $K_{\text{rel}}$  تُختزل إلى العلاقة الكلاسيكية للطاقة الحركية عند سرعات منخفضة، نستخدم التمدد ذا الحدين للحصول على التقريب  $(1 + \epsilon)^n$ ، الذي يصلح للقيمة الصغيرة  $\epsilon$ :

$$(1 + \epsilon)^n = 1 + n\epsilon + \frac{n(n-1)}{2!}\epsilon^2 + \frac{n(n-1)(n-2)}{3!}\epsilon^3 + \dots \approx 1 + n\epsilon$$

بإهمال الحدود الصغيرة جداً في  $\epsilon^2$  وقيم  $\epsilon$  المرفوعة لقوى عليا، يؤدي اختيار  $\epsilon = -u^2/c^2$  و  $n = -1/2$  إلى استنتاج أن  $\gamma$  عند سرعات لا نسبية، حيث  $\epsilon = u/c$  قيمتها صغيرة، تحقق العلاقة:



$$\gamma = (1 - u^2/c^2)^{-1/2} \approx 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{u^2}{c^2} \right).$$

التوسع ذو الحدين هو طريقة للتعبير عن كمية جبرية كمجموع لسلسلة لانتهائية من الحدود. في بعض الحالات، كما هو الحال في الحد الأقصى للسرعة الصغيرة هنا، تكون معظم الحدود صغيرة جداً. وبالتالي، فإن عبارة المشتق هنا للمتحول  $\gamma$  ليست دقيقة، لكنها تقرب دقيق جداً. لذلك، عند السرعة المنخفضة نجد:

$$\gamma - 1 = \frac{1}{2} \left( \frac{u^2}{c^2} \right).$$

بإدخال هذا في علاقة الطاقة الحركية النسبية يعطينا:

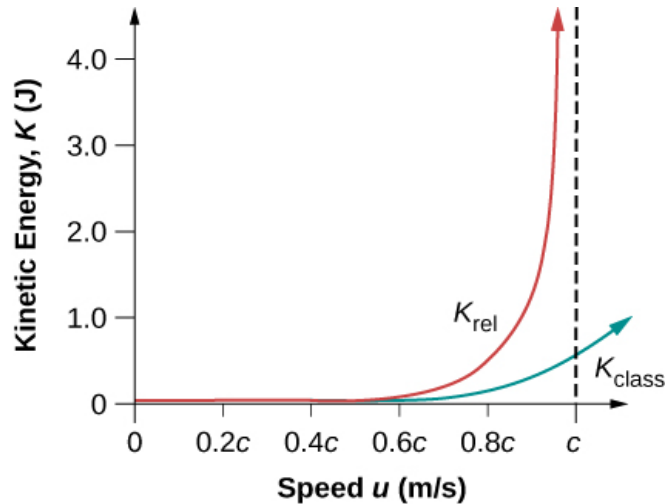
$$K_{\text{rel}} = \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{u^2}{c^2} \right) \right] mc^2 = \frac{1}{2} mu^2 = K_{\text{class}}.$$

وتصبح الطاقة الحركية النسبية هي نفسها الطاقة الحركية الكلاسيكية عندما يكون  $u \ll c$ . وما يثير الاهتمام أكثر هو استكشاف ما يحدث للطاقة الحركية عندما تقترب سرعة الجسم من سرعة الضوء. نعلم أن  $\gamma$  تصبح غير نهائية مع اقتراب  $u$  من  $c$ ، بحيث تصبح  $K_{\text{rel}}$  أيضاً غير نهائية، حيث تقترب السرعة من سرعة الضوء (الشكل 26.5). الزيادة في  $K_{\text{rel}}$  أكبر بكثير مما هي عليه في  $K_{\text{class}}$  مع اقتراب  $v$  من  $c$ . يتطلب تسريع كتلة إلى سرعة الضوء كمية لانتهائية من العمل (وبالتالي، كمية لا حصر لها من مدخلات الطاقة).

## سرعة الضوء

لا يمكن لأي جسم ذي كتلة تحقيق سرعة الضوء.

سرعة الضوء هي الحد الأقصى للسرعة القصوى لأي جسم له كتلة. كل هذا يتسق مع حقيقة أن السرعات الأقل من  $c$  تضاف دائماً إلى قيم أقل من  $c$ . في العديد من التجارب تم التأكد بالتفصيل من كل من الصيغة النسبية لحساب الطاقة الحركية والحد الأقصى للسرعة القصوى على أنه يبلغ  $c$ . ومهما كان مقدار الطاقة التي يتم تقديمها لتسريع الكتلة، فإن سرعتها تقترب من سرعة الضوء فقط، ولكن لا تصل إليها.



**الشكل 26.5** يوضح هذا الرسم البياني تابعة  $K_{\text{rel}}$  للسرعة، وكيف تزيد الطاقة الحركية دون ربط عندما تقترب السرعة من سرعة الضوء. كما يظهر أيضاً الطاقة الحركية الكلاسيكية  $K_{\text{class}}$ .

مقارنة الطاقة الحركية

إلكترون سرعته  $v=0.990c$  (a) احسب الطاقة الحركية لهذا الإلكترون مقدره بوحدة MeV (b) قارن ذلك بالقيمة الكلاسيكية للطاقة الحركية لهذا الإلكترون عند هذه السرعة. (كتلة الإلكترون هي  $9.11 \times 10^{-31} \text{kg}$ ).

خطة الحل:

علاقة الطاقة الحركية النسبية دائماً صحيحة، ولكن بالنسبة للطلب (a)، يجب استخدامها لأن سرعة الإلكترون نسبية للغاية (قريبة من c). أولاً، نحسب المعامل النسبي  $\gamma$ ، ثم نستخدمه لحساب الطاقة الحركية النسبية. بالنسبة للطلب (b)، نحسب الطاقة الحركية الكلاسيكية (والتي ستكون قريبة من القيمة النسبية لو أن  $v$  كانت أقل من بضع المائة من c)، ونرى أنها ليست هي نفسها.

حل الطلب (a)

بالنسبة للطلب (a)

a. تحديد المعطيات:  $m=9.11 \times 10^{-31} \text{kg}$ ;  $v=0.990c$ .

b. تحديد المجهول:  $K_{\text{rel}}$ .

c. اكتب الإجابة على شكل معادلة.

$$K_{\text{rel}} = (\gamma - 1)mc^2 \text{ with } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}$$

d. قم بإجراء الحساب: أولاً حساب  $\gamma$ . احتفظ بأرقام دقة إضافية لأن هذه العملية الحسابية متوسطة:

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(0.990c)^2}{c^2}}} \\ &= 7.0888. \end{aligned}$$

الآن استخدم هذه القيمة لحساب الطاقة الحركية:

$$\begin{aligned} K_{\text{rel}} &= (\gamma - 1)mc^2 \\ &= (7.0888 - 1)(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(3.00 \times 10^8 \text{ m/s}^2) \\ &= 4.9922 \times 10^{-13} \text{ J}. \end{aligned}$$

e. تحويل الوحدات:

$$\begin{aligned} K_{\text{rel}} &= (4.9922 \times 10^{-13} \text{ J}) \left( \frac{1 \text{ MeV}}{1.60 \times 10^{-13} \text{ J}} \right) \\ &= 3.12 \text{ MeV}. \end{aligned}$$

حل الطلب (b)

بالنسبة للطلب (b)

a. تحديد المعطيات:  $m=9.11 \times 10^{-31} \text{kg}$ ;  $v=0.990c$ .

b. تحديد المجهول:  $K_{\text{rel}}$ .

c. اكتب الإجابة على شكل معادلة.

$$K_{\text{class}} = \frac{1}{2} mu^2.$$

d . قم بإجراء الحساب:

$$\begin{aligned} K_{\text{class}} &= \frac{1}{2} mu^2 \\ &= \frac{1}{2}(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(0.990)^2 (3.00 \times 10^8 \text{ m/s})^2 \\ &= 4.0179 \times 10^{-14} \text{ J}. \end{aligned}$$

e . تحويل الواحدات:

$$\begin{aligned} K_{\text{class}} &= 4.0179 \times 10^{-14} \text{ J} \left( \frac{1 \text{ MeV}}{1.60 \times 10^{-13} \text{ J}} \right) \\ &= 0.251 \text{ MeV} \end{aligned}$$

### ملاحظة:

كما هو متوقع، ولأن السرعة تبلغ 99.0٪ من سرعة الضوء، فإن الطاقة الحركية الكلاسيكية تختلف اختلافاً كبيراً عن القيمة النسبية الصحيحة. لاحظ أيضاً أن القيمة الكلاسيكية أصغر بكثير من القيمة النسبية. في الواقع،  $K_{\text{rel}}/K_{\text{class}}=12.4$  في هذه الحالة. هذا يوضح مدى صعوبة تحريك كتلة بسرعة قريبة من سرعة الضوء. هذا الأمر بحاجة إلى طاقة أكبر بكثير مما كان متوقعاً كلاسيكياً. وهناك حاجة إلى كميات متزايدة من الطاقة للحصول على سرعة للكتلة أقرب قليلاً إلى سرعة الضوء. يعد مقدار الطاقة 3MeV صغيراً جداً للإلكترون، ويمكن تحقيقه باستخدام مُسرعات الجسيمات الحالية. يمكن باستخدام المسرع SLAC على سبيل المثال، تسريع الإلكترونات إلى أكثر من  $50 \times 10^9 \text{ eV} = 50000 \text{ MeV}$ .

هل هناك أي مغزى من الاقتراب أكثر من سرعة الضوء لقيم أكبر من 99.0٪ أو 99.9٪؟ الجواب نعم. فإننا نتعلم الكثير عند القيام بذلك. يمكن تحويل الطاقة التي تدخل في كتلة عالية السرعة إلى أي شكل آخر، بما في ذلك إلى جزيئات جديدة تماماً. في مصادم هادرون الكبير، كما في الشكل 27.5، يتم تسريع الجسيمات المشحونة قبل دخولها إلى الحلقة. هناك، يتم تسريع شعاعين من الجسيمات إلى سرعاتهم النهائية التي تبلغ نحو 99.7٪ من سرعة الضوء في اتجاهين متعاكسين، حيث يحدث الاصطدام، وتتشكل أنواع جديدة تماماً من الجزيئات. معظم ما نعرفه عن البنية الدقيقة للمادة والجزيئات الغريبة قصيرة العمر في الطبيعة قد اكتشفت بهذه الطريقة. تشير الأنماط في خصائص هذه الجزيئات غير المعروفة سابقاً إلى بنية دقيقة لجميع المواد. ستتم مناقشة هذه الجزيئات وبعض خصائصها في فصل لاحق حول فيزياء الجسيمات.



**الشكل 27.5** تعمل المنظمة الأوروبية للبحوث النووية (وتسمى CERN كما تكتب بالفرنسية) على تشغيل أكبر مسرع للجسيمات في العالم، ويمتد عبر الحدود بين فرنسا وسويسرا.

### الطاقة النسبية الكلية

يمكن إعادة ترتيب علاقة الطاقة الحركية لتصبح:

$$E = \frac{mu^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} = K + mc^2.$$

قال أينشتاين في مقالة منفصلة، تم نشرها في وقت لاحق في عام 1905، إنه إذا تغيرت طاقة الجسيمات بمقدار  $\Delta E$ ، فإن كتلتها تتغير بمقدار  $\Delta m = \Delta E/c^2$ . الكثير من الأدلة التجريبية منذ ذلك الحين تؤكد أن  $mc^2$  توافق قيمة الطاقة التي يمتلكها جسيم كتلته  $m$  في حالة السكون. على سبيل المثال، عندما يتحلل بيون (pion) محايد كتلته  $m$  في حالة السكون إلى فوتونين، يكون للفوتونين كتلة صفرية، ولكن يلاحظ بأن لهما طاقة كلية توافق القيمة  $mc^2$  للبيون. وبالمثل، عندما يتحلل جسيم كتلته  $m$  إلى جسيمين أو أكثر بكتلة كلية أصغر، فإن الطاقة الحركية المرصودة المنقولة إلى منتجات التحلل تتوافق مع انخفاض الكتلة. وبالتالي، فإن  $E$  هي الطاقة النسبية الكلية للجسيم، و  $mc^2$  هو الطاقة الساكنة.

### الطاقة الكلية

الطاقة الكلية  $E$  لجسيم هي:

$$E = \gamma mc^2 \quad (5.9)$$

حيث:  $m$  هي الكتلة،  $c$  هي سرعة الضوء،  $\gamma = 1$ ، و  $u$  هي سرعة الكتلة بالنسبة للمراقب.

### طاقة السكون

طاقة السكون للمادة هي:

$$E_0 = mc^2. \quad (5.10)$$

هذا هو الشكل الصحيح لمعادلة أينشتاين الأكثر شهرة، والتي أظهرت لأول مرة أن الطاقة مرتبطة بكتلة الجسيم في حالة السكون. على سبيل المثال، إذا تم تخزين الطاقة في المادة، تزداد كتلة السكون. هذا يعني أيضاً أنه يمكن تدمير الكتلة لإطلاق الطاقة. إن الآثار المترتبة على هاتين المعادلتين الأوليين فيما يتعلق بالطاقة النسبية واسعة للغاية لدرجة أنه لم يتم الاعتراف بها تماماً لعدة سنوات بعد

أن نشرهم أينشتاين في عام 1905، ولم يكن الدليل التجريبي على صحتها قد انتشر على نطاق واسع في البداية. تجدر الإشارة هنا إلى أن أينشتاين وصف المعاني والآثار المترتبة على نظريته على الرغم من عدم فهمه التام لها.

### مثال 13.5

#### حساب طاقة السكون

حساب طاقة السكون لكتلة 1.00 g

#### خطة الحل:

غرام واحد هو كتلة صغيرة - أقل من نصف كتلة بنس واحد، يمكننا مضاعفة هذه الكتلة، في وحدات SI، بسرعة الضوء المربعة لإيجاد طاقة السكون المكافئة لها.

#### الحل:

a. تحديد المعطيات:  $c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ ;  $m = 1.00 \times 10^{-3} \text{ kg}$ .

b. تحديد المجهول:  $E_0$ .

c. اكتب الإجابة على شكل معادلة.

$$E_0 = mc^2.$$

d. قم بإجراء الحساب:

$$\begin{aligned} E_0 &= mc^2 = (1.00 \times 10^{-3} \text{ kg})(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})^2 \\ &= 9.00 \times 10^{13} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2. \end{aligned}$$

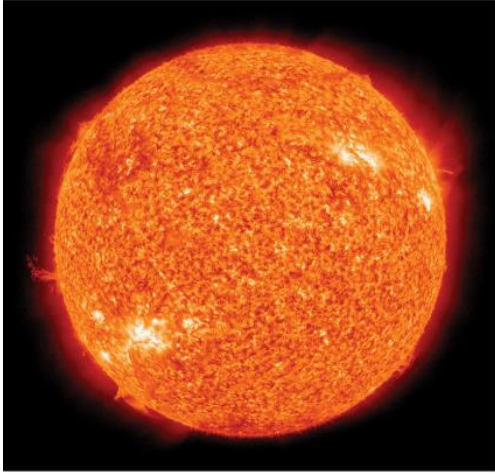
e. تحويل الوحدات. مع ملاحظة أن  $1 \text{ J} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$ ، نجد أن طاقة السكون هي:

$$E_0 = 9.00 \times 10^{13} \text{ J}.$$

#### ملاحظة:

هذه كمية هائلة من الطاقة لكتلة 1.00g. تُعد طاقة السكون كبيرة لأن سرعة الضوء  $c$  هي عدد كبير و $c^2$  هو رقم كبير جداً، ولذلك فإن القيمة  $mc^2$  هي ضخمة لأي كتلة جهرية. تبلغ طاقة السكون  $9.00 \times 10^{13} \text{ J}$  لكتلة 1.00g ضعف الطاقة المنبعثة من قنبلة هيدروجين الذرية ونحو 10.000 مرة من الطاقة الحركية لحاملة طائرات كبيرة.

اليوم، أصبحت التطبيقات العملية لتحويل الكتلة إلى شكل آخر من أشكال الطاقة، كما هو الحال في الأسلحة النووية ومحطات الطاقة النووية، معروفة جيداً. ولكن كان هناك أمثلة أيضاً عندما اقترح أينشتاين أولاً الشكل الصحيح للطاقة النسبية، وقد وصف بعضها. تم اكتشاف الإشعاع النووي في العقد السابق، وقد كان مصدر طاقته يعد لغزاً. كان التفسير هو أنه في بعض العمليات النووية، يتم تدمير كمية صغيرة من الكتلة، فتتحرر على شكل طاقة تحمل بواسطة الإشعاع النووي. لكن كمية الكتلة التي تم تدميرها صغيرة للغاية، بحيث يصعب اكتشاف وجود ضياعات. على الرغم من أن أينشتاين اقترح هذا كمصدر للطاقة في الأملاح المشعة والتي كانت قيد الدراسة في تلك الفترة الزمنية، فقد مرت عدة سنوات قبل أن يكون هناك اعتراف واسع بأن الكتلة يمكن أن تكون موجودة، وفي الواقع، يتم تحويلها إلى طاقة (الشكل 28.5).



(a)



(b)

**الشكل 28.5** تقوم (a) الشمس و (b) محطة سوسكهانا البخارية الكهربائية بتحويل الكتلة إلى طاقة - الشمس عبر الانصهار النووي، والمحطة الكهربائية عن طريق الانشطار النووي.

بسبب علاقة طاقة السكون بالكتلة، نعتبر أن الكتلة الآن هي شكل من أشكال الطاقة وليس شيئاً منفصلاً. لم يكن هناك تلميح حول هذا قبل عمل أينشتاين. يُعرف الآن أن تكافؤ كتلة الطاقة هو مصدر طاقة الشمس، وطاقة التحلل النووي، حتى أحد مصادر الطاقة التي تحافظ على حرارة الأرض الداخلية.

### الطاقة المخزنة والطاقة الكامنة

ماذا يحدث للطاقة المخزنة في جسيم ما في حالة السكون، مثل الطاقة المخزنة في بطارية عن طريق شحنها أو الطاقة المخزنة في نابض مضغوط لمسدس لعبة؟ تصبح الطاقة الداخلة جزءاً من الطاقة الكلية للجسيم، وبالتالي هذا يزيد من كتلة السكون. كل الطاقة المخزنة والكامنة تصبح كتلة في النظام. في التناقض الظاهر، كان مبدأ مصونية الكتلة (بمعنى أن الكتلة الكلية ثابتة) هو أحد القوانين الكبرى التي تم التحقق منها في القرن التاسع عشر. لماذا لم يلاحظ أنه غير صحيح؟ يساعد المثال التالي في الإجابة عن هذا السؤال.

## مثال 14.5

### حساب الكتلة الساكنة

تم تصنيف بطارية سيارة على أنها قادرة على نقل  $600 \text{ A}\cdot\text{h}$  من الشحنات عند  $12.0\text{V}$ . (a) احسب الزيادة في الكتلة الساكنة لهذه البطارية عند شحنها بالكامل بعد أن كانت مفرغة تماماً، مع افتراض عدم إدخال أو إخراج أي من المواد المتفاعلة الكيميائية من البطارية. (b) ما هي الزيادة المئوية، باعتبار أن كتلة البطارية  $20.0 \text{ kg}$ ؟

### خطة الحل:

في الجزء (a)، علينا أولاً أن نجد الطاقة المخزنة على شكل طاقة كيميائية  $E_{\text{batt}}$  في البطارية، والتي تساوي الطاقة الكهربائية التي يمكن أن تقدمها البطارية. ولأن  $E_{\text{batt}} = qV$ ، يتعين علينا حساب الشحنة  $q$  في  $600 \text{ A}\cdot\text{h}$ ، وهو جداء التيار  $I$  في الزمن  $t$ . ثم نقوم بضرب النتيجة بالكمون  $12.0\text{V}$ . يمكننا بعد ذلك حساب زيادة كتلة البطارية باستخدام العلاقة  $E_{\text{batt}} = (\Delta m) c^2$ . الجزء (b) عبارة عن تحويل نسبة بسيطة إلى نسبة مئوية.

### حل الطلب (a)

a. تحديد المعطيات:  $c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ ;  $m = 1.00 \times 10^{-3} \text{ kg}$ .

b. تحديد المجهول:  $\Delta m$ .

c. اكتب الإجابة على شكل معادلة.

$$\begin{aligned} E_{\text{batt}} &= (\Delta m)c^2 \\ \Delta m &= \frac{E_{\text{batt}}}{c^2} \\ &= \frac{qV}{c^2} \\ &= \frac{(It)V}{c^2}. \end{aligned}$$

d. قم بإجراء الحساب:

$$\Delta m = \frac{(600 \text{ A} \cdot \text{h})(12.0 \text{ V})}{(3.00 \times 10^8)^2}.$$

اكتب الأمبر على شكل كولوم في الثانية (C/s) ، وقم بتحويل الساعات إلى ثوان:

$$\begin{aligned} \Delta m &= \frac{(600 \text{ C/s} \cdot \text{h})\left(\frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}}\right)(12.0 \text{ J/C})}{(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})^2} \\ &= 2.88 \times 10^{-10} \text{ kg}. \end{aligned}$$

حيث استخدمنا التحويل:

$$1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2 = 1 \text{ J}.$$

### حل الطلب (b)

a. تحديد المعطيات:  $\Delta m = 2.88 \times 10^{-10} \text{ kg}$ ;  $m = 20.0 \text{ kg}$ .

b. تحديد المجهول: % change أي التغير النسبي.

c. اكتب الإجابة على شكل معادلة.

$$\% \text{ increase} = \frac{\Delta m}{m} \times 100\%.$$

d. قم بإجراء الحساب:

$$\begin{aligned} \% \text{ increase} &= \frac{\Delta m}{m} \times 100\% \\ &= \frac{2.88 \times 10^{-10} \text{ kg}}{20.0 \text{ kg}} \times 100\% \\ &= 1.44 \times 10^{-9} \%. \end{aligned}$$

### ملاحظة:

كل من الزيادة الفعلية في الكتلة والزيادة النسبية صغيرة جداً، لأن الطاقة مقسومة على  $c^2$ ، وهو رقم كبير جداً. يجب أن نكون قادرين على قياس كتلة البطارية بدقة تصل إلى مليار بالمئة، أو جزء واحد من  $10^{11}$ ، لملاحظة هذه الزيادة. لا عجب في أن تغير الكتلة لا يلاحظ بسهولة. في الواقع، هذا التغيير في الكتلة صغير جداً لدرجة أننا قد نتساءل كيف يمكن لأي شخص التحقق من أنه حقيقي. وقد تم إيجاد الجواب في العمليات النووية التي تكون فيها نسبة الدمار الشامل كبيرة بما يكفي للقياس بدقة. كتلة وقود المفاعل النووي، مثلاً، تكون أقل بشكل ملموس عند استخدام طاقتها. في هذه الحالة، تم تحرير الطاقة المخزنة (تحول معظمها إلى طاقة حرارية لمولدات الطاقة الكهربائية) وانخفضت كتلة السكون. يحدث انخفاض الكتلة أيضاً عند استخدام الطاقة المخزنة في

البطارية، باستثناء أن الطاقة المخزنة أكبر بكثير في العمليات النووية، مما يجعل التغيير في الكتلة قابلاً للقياس من الناحية العملية، وكذلك من الناحية النظرية.

## الطاقة النسبية والعزم النسبي

نحن نعرف كلاسيكياً أن الطاقة الحركية والعزم مرتبطان ببعضهما، وذلك بسبب:


$$K_{\text{class}} = \frac{p^2}{2m} = \frac{(mu)^2}{2m} = \frac{1}{2} mu^2.$$

نسبياً، يمكننا الحصول على علاقة بين الطاقة والعزم بتعديل معادلاتها جبرياً، فنجد:

$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2, \quad (5.11)$$

حيث:  $E$  هي الطاقة الكلية النسبية،  $E = mc^2/\sqrt{1 - u^2/c^2}$ ، و  $p$  هو العزم النسبي. هذه العلاقة بين الطاقة النسبية والعزم النسبي أكثر تعقيداً مما هي عليه في الإصدار الكلاسيكي، لكن يمكننا الحصول على بعض الأفكار الجديدة المثيرة للاهتمام عند دراستها. أولاً، ترتبط الطاقة الكلية بالعزم وكتلة السكون. في حالة السكون، العزم يساوي الصفر، وتعطي هذه المعادلة إجمالي الطاقة على أنها طاقة السكون  $mc^2$  (لذلك توافق هذه المعادلة ما تم مناقشته حول طاقة السكون الواردة أعلاه). ولكن، عند تسارع الكتلة، فإن عزمها يزداد، مما يزيد من الطاقة الكلية. عند السرعات العالية بما فيه الكفاية، يصبح جزء طاقة السكون  $(mc^2)^2$  ضئيلاً مقارنةً بجزء العزم  $(pc)^2$ ؛ وبالتالي،  $E = PC$  عندما تكون السرعات نسبية للغاية.

إذا اعتبرنا أن العزم  $p$  منفصل عن الكتلة، فيمكننا تحديد تداعيات المعادلة  $E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$  على جسيم ليس له كتلة. وإذا اعتبرنا قيمة  $m$  تساوي الصفر في هذه المعادلة، عندئذ يكون  $E = PC$  أو  $P = E/C$ . الجزئيات عديمة الكتلة لها هذا العزم. هناك العديد من الجزئيات عديمة الكتلة الموجودة في الطبيعة، بما في ذلك الفوتونات (والتي هي حزم من الإشعاع الكهرومغناطيسي). التداعي الآخر هو أن الجسيمات عديمة الكتلة يجب أن تنتقل بسرعة  $c$ ، و فقط عند هذه السرعة. تُعدُّ الدراسة التفصيلية للمعادلة  $E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$  خارج نطاق هذا النص، ولكن يمكنك ملاحظة أن لهذه المعادلة آثاراً مهمة في النسبية الخاصة.

**9.5 تحقق من فهمك:** ما هي الطاقة الحركية للإلكترون إذا كانت سرعته  $0.992c$ ؟ 



## مراجعة الفصل الخامس

### الكلمات المفتاحية

**جمع السرعات الكلاسيكية (غاليليو):** تُجمع السرعات عندما تكون  $v \ll c$ ؛ كما تجمع الأرقام العادية في حركة أحادية البعد:  $u = v + u'$ ، حيث  $v$  هي السرعة بين اثنين من المراقبين، و  $u$  هي سرعة جسيم بالنسبة لأحد المراقبين، و  $u'$  هي السرعة بالنسبة للمراقب الآخر.

**الحدث:** هو واقعة في مكان وزمان محددتين بإحداثيات موضعية وزمنية  $(x, y, z, t)$  مقاسة بالنسبة لإطار مرجعي.

**المسلمة الأولى للنسبية الخاصة:** قوانين الفيزياء هي نفسها في جميع الأطر المرجعية القصورية.

**نسبية غاليليو:** إذا قام مراقب بقياس سرعة في إطار مرجعي ما، وكان هذا الإطار المرجعي يتحرك بسرعة تتجاوز سرعة إطار مرجعي ثانٍ، فإن المراقب في الإطار الثاني يقيس السرعة الأصلية كمجموع شعاعي لهذه السرعات.

**تحويل غاليليو:** هو العلاقة بين إحداثيات المكان والزمن للأحداث نفسها كما تظهر في أطر مرجعية مختلفة، وذلك وفقاً للميكانيك الكلاسيكي.

**الإطار المرجعي القصوري:** هو الإطار المرجعي الذي يظل فيه الجسيم الساكن في حالة سكون ويتحرك فيه الجسيم المتحرك بسرعة ثابتة وفق خط مستقيم، ما لم يتم التأثير عليه بقوة خارجية.

**تقلص الطول:** هو انخفاض في الطول الملحوظ للجسيم عن طوله الصحيح  $L_0$  إلى الطول  $L$  عندما يتم رصد طوله في إطار مرجعي، حيث يتحرك بسرعة  $v$ .

**تحويل لورنتز:** هو العلاقة بين إحداثيات المكان والزمن للأحداث نفسها كما يظهر في الأطر المرجعية المختلفة، وذلك وفقاً لنظرية النسبية الخاصة.

**تجربة Michelson-Morley:** التحقيق الذي أجري في عام 1887، والذي أظهر أن سرعة الضوء في الفراغ هي نفسها في جميع الأطر المرجعية.

**الطول الصحيح  $L_0$ :** المسافة بين نقطتين، والتي يقيسها مراقب في حالة سكون بالنسبة لكلتا النقطتين؛ على سبيل المثال، يقوم المراقبون الأرضيون بقياس الطول الصحيح عند قياس المسافة بين نقطتين ثابتتين بالنسبة للأرض.

**الزمن الصحيح  $\Delta\tau$ :** هو الفاصل الزمني الذي يقيسه مراقب يرى بداية العملية ونهايتها، والتي يتم فيها قياس الفاصل الزمني في الموقع نفسه.

**الطاقة الحركية النسبية:** الطاقة الحركية لجسيم يتحرك بسرعات نسبية.

**العزم النسبي  $\vec{P}$ :** عزم جسيم يتحرك بسرعة نسبية؛  $\vec{P} = \gamma m \vec{u}$

**جمع السرعات النسبية:** هي طريقة لجمع سرعات جسيم يتحرك بسرعة نسبية.

**طاقة السكون:** الطاقة المخزنة في جسيم ما عندما يكون في حالة السكون:  $E_0 = mc^2$

**إطار السكون:** الإطار المرجعي الذي يكون فيه المراقب في حالة سكون.

**كتلة السكون:** كتلة جسيم كما يقيسها مراقب في حالة السكون بالنسبة للجسيم.

**المسلمة الثانية للنسبية الخاصة:** ينتقل الضوء في الفراغ بالسرعة نفسها  $c$  في أي اتجاه في جميع الإطارات القصورية.

**نظرية النسبية الخاصة** : النظرية التي اقترحها ألبرت أينشتاين في عام 1905، والتي تفترض أن جميع قوانين الفيزياء لها الشكل نفسه في جميع الإطارات المرجعية القصورية، وأن سرعة الضوء هي نفسها داخل جميع الأطر القصورية.

**سرعة الضوء** : الحد الأقصى للسرعة القصوى لأي جسيم له كتلة.

**تمدد الزمن** : إطالة الفاصل الزمني بين حدثين عند رؤيته في إطار قصوري متحرك بدلاً من الإطار الساكن للأحداث (التي تحدث فيها الأحداث في الموقع نفسه).

**الطاقة الكلية** : مجموع جميع الطاقات الجسيم، بما في ذلك طاقة السكون، ويعبر عن طاقته الحركية (كتلته m وسرعته u بالعلاقة:

$$E = \gamma mc^2 \text{ حيث: } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

**خط العالم** : مسار عبر الزمكان

### المعادلات الرئيسية

$\Delta t = \frac{\Delta \tau}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \tau$	تمدد الزمن
$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$	عامل لورنتز
$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{L_0}{\gamma}$	تقلص الطول
$x = x' + vt', \quad y = y', \quad z = z', \quad t = t'$	تحويل غاليليو
$t = \frac{t' + vx'/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$ $x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$ $y = y'$ $z = z'$	تحويل لورنتز
$t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$ $x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$ $y' = y$ $z' = z$	تحويل لورنتز العكسي
$(\Delta s)^2 = (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2 - c^2(\Delta t)^2$ $(\Delta \tau)^2 = -(\Delta s)^2/c^2 = (\Delta t)^2 - \frac{[(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2]}{c^2}$	ثوابت الزمكان
$u_x = \left( \frac{u'_x + v}{1 + vu'_x/c^2} \right), \quad u_y = \left( \frac{u'_y/\gamma}{1 + vu'_x/c^2} \right), \quad u_z = \left( \frac{u'_z/\gamma}{1 + vu'_x/c^2} \right)$	جمع السرعات النسبية

$\lambda_{\text{obs}} = \lambda_s \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}}$	تأثير دوبلر النسبي لطول الموجة
$f_{\text{obs}} = f_s \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}}$	تأثير دوبلر النسبي للتردد
$\vec{p} = \gamma m \vec{u} = \frac{m \vec{u}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$	العزم النسبي
$E = \gamma mc^2, \text{ where } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$	الطاقة الكلية النسبية
$K_{\text{rel}} = (\gamma - 1)mc^2, \text{ where } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$	الطاقة الحركية النسبية

## ملخص

### 1.5 ثبات القوانين الفيزيائية

- النسبية هي دراسة كيفية قياس مراقبين للحدث نفسه في الأطر المرجعية المختلفة.
- تنقسم النسبية الحديثة إلى قسمين . النسبية الخاصة والتي تتعامل مع المراقبين ذوي الحركة الموحدة (غير المتسارعة)، في حين تشمل النسبية العامة الحركة النسبية المتسارعة والجاذبية. تتوافق النسبية الحديثة مع جميع الأدلة التجريبية حتى الآن، وعند حدود السرعة المنخفضة وضعف الجاذبية، تعطي اتفاقاً وثيقاً مع تنبؤات النسبية الكلاسيكية (غاليليو).
- الإطار المرجعي القصوري هو إطار مرجعي يبقى فيه الجسم الساكن في حالة سكون، ويتحرك الجسم المتحرك بسرعة ثابتة وفق خط مستقيم، ما لم يتم التأثير عليه بقوة خارجية.
- تستند النسبية الحديثة إلى مسلمات أينشتاين. المسلمة الأولى للنسبية الخاصة هي أن قوانين الفيزياء هي نفسها في جميع الأطر المرجعية القصوري. المسلمة الثانية للنسبية الخاصة هي أن سرعة الضوء c هي نفسها في جميع الأطر المرجعية القصورية، بغض النظر عن الحركة النسبية للمراقب ومصدر الضوء.
- أثبتت تجربة ميكلسون ومورلي أن سرعة الضوء في الفراغ مستقلة عن حركة الأرض حول الشمس.

### 2.5 نسبية التزامن

- يتم تعريف حدثين على أنهما متزامنان إذا قام أحد المراقبين بقياسهما على أنهما يحدثان في الزمن نفسه (مثل تلقي الضوء من الأحداث).
- إذا كان هناك حدثان تفصل بينهما مسافة، ومتزامنان بالنسبة لمراقب ساكن في إطار مرجعي ما، فليس بالضرورة أن يكونا متزامنين لمراقب ساكن في إطار مرجعي آخر.

### 3.5 تمدد الزمن

- يتم تعريف حدثين على أنهما متزامنان إذا قاس أحد المراقبين حدوثهما في الوقت نفسه. ليس بالضرورة أن يكونا متزامنين بالنسبة لجميع المراقبين - التزامن ليس مطلقاً.
- تمدد الزمن هو إطالة الفاصل الزمني بين حدثين عند رؤيتهما في إطار قصوري متحرك بدلاً من الإطار الساكن للأحداث (أي الذي تأخذ فيه الأحداث مكانها في الموقع نفسه).

- المراقبون الذين يتحركون بسرعة  $v$  لا يقيسون الزمن المنقضي نفسه بين حدثين. الزمن الصحيح  $\Delta\tau$  هو الزمن المقاس في الإطار المرجعي، حيث تحدث بداية الفاصل الزمني ونهايته في الموقع نفسه. الفاصل الزمني  $\Delta t$ ، الذي يقيسه مراقب يرى إطار الأحداث الذي يتحرك بسرعة  $v$ ، يرتبط بالفاصل الزمني الصحيح  $\Delta\tau$  للأحداث بالعلاقة:

$$\Delta t = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma\Delta\tau,$$

حيث:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

- فرضية مفارقة التوأم خاطئة لأن التوأم المسافر يتسارع، والرحلة ليست متناظرة لكلا التوأمين.
- يهمل تمدد الزمن عادةً في السرعات النسبية المنخفضة، لكنه يحدث، وتم التحقق من ذلك من خلال التجربة.
- الزمن الصحيح هو أقصر قياس لأي فترة زمنية. يقيس أي مراقب (يتحرك بالنسبة لنظام تجري مراقبته) فترة زمنية أطول من الزمن الصحيح.

#### 4.5 تقلص الطول

- يتفق جميع المراقبين على السرعة النسبية.
- تعتمد المسافة على حركة المراقب. الطول الصحيح  $L_0$  هو المسافة بين نقطتين يقيسها مراقب في حالة سكون بالنسبة لكلتا النقطتين.
- تقلص الطول هو النقص في الطول الملحوظ للجسيم عن طوله الصحيح  $L_0$  إلى الطول  $L$  عندما يتم ملاحظة طوله في إطار مرجعي، حيث يسير بسرعة  $v$ .
- الطول الصحيح هو أطول قياس لأي فاصل طولي. أي مراقب يتحرك بالنسبة لنظام يتم رصده يقيس طولاً أقصر من الطول الصحيح.

#### 5.5 تحويل لورنتز

- تصف معادلات تحويل غاليليو كيف يظهر الموضع والسرعة والتسارع المقاس في إطار ما في الميكانيك الكلاسيكي اللانسي في إطار آخر. تبقى الأطوال دون تغيير، ويفترض أن يتم تطبيق مقياس زمني عالمي واحد على جميع الإطارات القصورية
- تحقق قوانين نيوتن للميكانيك مبدأ وجود الشكل نفسه في جميع الأطر القصورية في ظل تحويل غاليليو، والتي تُعطى بالعلاقة:

$$x = x' + vt', \quad y = y', \quad z = z', \quad t = t'.$$

غير أن المفهوم القائل بأن الأوقات والمسافات متشابهة في جميع الأطر القصورية في تحويل غاليليو لا يتفق مع مسلمات النسبية الخاصة.

- معادلات تحويل لورنتز الصحيحة نسبياً هي:

Lorentz transformation	Inverse Lorentz transformation
$t = \frac{t' + vx'/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$	$t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$
$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$	$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$
$y = y'$	$y' = y$
$z = z'$	$z' = z$

يمكننا الحصول على هذه المعادلات من خلال افتراض إشارة ضوئية كروية موسعة لها الشكل نفسه وسرعة النمو  $c$  في جميع الأطر المرجعية.

- يمكن شرح الظواهر النسبية من حيث الخصائص الهندسية للزمكان رباعي الأبعاد، حيث توافق تحويلات لورنتز دوران المحاور.
- يوافق تحويل لورنتز دوران محاور الزمكان، والذي يشبه بطريقة ما دوران محاور الفراغ، والتي يكون فيها الفاصل المكاني الثابت يعطى  $\Delta s$  بدلاً من المسافات  $\Delta r$ ، وتحويل لورنتز، الذي يستخدم محور الزمن، لا يحافظ على عمودية المحاور أو على المقاييس على طول المحاور.
- يدعم تحليل الظواهر النسبية، بدلالة مخططات الزمكان، الاستنتاج القائل بأن هذه الظواهر ناتجة عن خواص المكان والزمن نفسها، وليس عن قوانين الكهربية.

### 6.5 التحويل في السرعة النسبية

- عند جمع السرعات الكلاسيكية، فإن السرعات تُجمع مثل جمع الأرقام العادية في حركة أحادية البعد:  $u = v + u'$ ، حيث  $v$  هي السرعة بين اثنين من المراقبين،  $u$  هي سرعة الجسم بالنسبة لمراقب ما، و  $u'$  هي السرعة بالنسبة للمراقب الآخر.
- لا يمكن جمع السرعات لتكون أكبر من سرعة الضوء.
- يصف جمع السرعات النسبية سرعات الأجسام التي تتحرك بسرعة نسبية.

### 7.5 تأثير دوبلر للضوء

- يرى مراقب الإشعاع الكهرومغناطيسي تأثيرات دوبلر النسبية إذا كان مصدر هذا الإشعاع يتحرك بالنسبة للمراقب. الطول الموجي للإشعاع أطول (يُسمى الانزياح الأحمر) من الطول المنبعث من المصدر عندما يتحرك المصدر مبتعداً عن المراقب، وأقصر (يُسمى الانزياح الأزرق) عندما يتحرك المصدر نحو المراقب. يتم وصف الطول الموجي المتغير بالمعادلة:

$$\lambda_{\text{obs}} = \lambda_s \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}}$$

حيث  $\lambda_{\text{obs}}$  هو طول الموجة الملحوظ،  $\lambda_s$  هو طول موجة المصدر، و  $v$  هي السرعة النسبية للمصدر بالنسبة للمراقب.

### 8.5 العزم النسبي

- قانون الحفاظ على العزم صالح للعزم النسبي عندما تكون القوة الخارجية الصافية صفراً.
- العزم النسبي هو  $p = \gamma mu$ ، حيث  $m$  هي الكتلة الساكنة للجسيم،  $u$  هي سرعته بالنسبة للمراقب، والمعامل النسبي هو:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

- في السرعات المنخفضة، فإن العزم النسبي يعادل العزم الكلاسيكي.

- تصل قيمة العزم النسبي إلى اللانهاية عندما تصل  $u$  إلى  $c$ . وهذا يعني أن الجسم لا يمكنه الوصول إلى سرعة الضوء.

### 9.5 الطاقة النسبية

- نظرية طاقة العمل النسبية هي:

$$W_{\text{net}} = E - E_0 = \gamma mc^2 - mc^2 = (\gamma - 1)mc^2.$$

- نسبياً:  $W_{\text{net}} = K_{\text{rel}}$ ، حيث:  $K_{\text{rel}}$  هي الطاقة الحركية النسبية.
- جسم كتلته  $m$  وسرعته  $u$  له طاقة حركية:

$$K_{\text{rel}} = (\gamma - 1)mc^2,$$

حيث:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}.$$

- عند السرعات المنخفضة، تنخفض الطاقة الحركية النسبية إلى الطاقة الحركية الكلاسيكية.
- لا يمكن لأي جسم ذي كتلة أن يصل إلى سرعة الضوء، لأن ذلك يتطلب عملاً لانهايةً وكمية لا حصر لها من مدخلات الطاقة لتسريع الكتلة إلى سرعة الضوء.
- الطاقة النسبية مصانة مادام حسابها يتم لتشمل إمكانية تغيير الكتلة إلى الطاقة.
- تحسب الطاقة الكلية لجسيم كتلته  $m$  ويتحرك بسرعة  $u$  من العلاقة:  $E = \gamma mc^2$ ، حيث:  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$  و  $u$  هي سرعة الجسم.
- طاقة السكون لجسيم كتلته  $m$  هي  $E_0 = mc^2$ ، مما يعني أن الكتلة هي شكل من أشكال الطاقة. إذا تم تخزين الطاقة في جسم ما، تزداد كتلته. يمكن تدمير الكتلة لتحرير الطاقة.
- لا نلاحظ عادةً زيادة أو نقصاناً في كتلة الجسم لأن التغيير في الكتلة صغير جداً بالنسبة للزيادة الكبيرة في الطاقة. تربط المعادلة  $E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$  الطاقة الكلية النسبية  $E$  والعزم النسبي  $p$ . عند السرعات العالية جداً، تصبح طاقة السكون  $mc^2$  ضئيلة، وتصبح هذه المعادلة كما يلي:  $E = pc$ .

### أسئلة نظرية

#### 1.5 ثبات القوانين الفيزيائية

1. أي من مسلمات أينشتاين للنسبية الخاصة يتضمن مفهوماً لا يتلاءم مع أفكار الفيزياء الكلاسيكية؟ فسّر ذلك.
2. هل الأرض إطار مرجعي قصوري؟ هل الشمس كذلك؟ علل إجابتك.
3. عندما تطير في طائرة تجارية، قد يبدو لك أن الطائرة ثابتة وأن الأرض تتحرك أسفلك. هل وجهة النظر هذه صالحة؟ ناقش بإيجاز.

#### 3.5 تمدد الزمن

4. (a) هل تؤثر الحركة على معدل الساعة عندما يقيسه مراقب يتحرك مع الساعة؟ (b) هل تؤثر حركة مراقب يتحرك بالنسبة لساعة على كيفية قياسه لمعدلها؟
5. أي المراقبين يرى أن الزمن المنقضي لعملية أطول، مراقب يتحرك بالنسبة للعملية أم مراقب يتحرك مع العملية؟ أي المراقبين يقيس الفاصل الزمني الصحيح؟

6. (a) كيف يمكنك السفر بعيداً في مستقبل الأرض دون أن تشيخ بشكل كبير؟ (b) هل تسمح لك هذه الطريقة أيضاً بالسفر إلى الماضي؟

### 4.5 تقلص الطول

7. أي المراقبين يرى الجسم أطول، المراقب الذي يتحرك مع الجسم أم المراقب الذي يتحرك بالنسبة للجسم؟ أي مراقب يقيس الطول الصحيح للجسم؟

8. الآثار النسبية مثل تمدد الزمن وتقلص الطول موجودة في السيارات والطائرات. لماذا تبدو هذه الآثار غريبة بالنسبة لنا؟

9. لنفترض أن رائد فضاء يتحرك بالنسبة للأرض بسرعة تقارن بسرعة الضوء. (a) هل يلاحظ رائد الفضاء معدل تباطؤ ساعته؟

(b) ما هو التغير في معدل الساعات الأرضية التي يراها؟ (c) هل يبدو له أن سفينته تقصر؟ (d) كيف يرى المسافة بين نجمتين

تقعان في اتجاه حركته؟ (e) هل يتفق مع المراقب الأرضي على سرعته بالنسبة للأرض؟

### 7.5 تأثير دوبلر للضوء

10. اشرح معنى مصطلحي "الانزياح الأحمر" و "الانزياح الأزرق" من حيث علاقته بتأثير دوبلر النسبي.

11. ماذا يحدث لتأثير دوبلر النسبي عندما تكون السرعة النسبية صفراً؟ هل هذه هي النتيجة المتوقعة؟

12. هل يتناسب تأثير دوبلر النسبي مع تأثير دوبلر الكلاسيكي فيما يتعلق بأن  $\lambda_{obs}$  أكبر للحركة باتجاه معاكس؟

13. جميع المجرات التي تبعد مسافة أكبر من نحو  $50 \times 10^6$  ly تظهر انزياحاً أحمرًا في ضوءها المنبعث، بحيث يتناسب مع المسافة،

ويزداد هذا الانزياح تدريجياً بازدياد المسافة. ماذا يعني هذا، على افتراض أن المصدر الوحيد للانزياح الأحمر هو الحركة النسبية.

### 8.5 العزم النسبي

14. كيف تعدل النسبية الحديثة قانون مصونية العزم؟

15. هل من الممكن أن تؤثر قوة خارجية على نظام ومصونية العزم النسبي فيه؟ اشرح إجابتك.

### 9.5 الطاقة النسبية

16. كيف يتم تعديل القوانين الكلاسيكية لمصونية الطاقة ومصونية الكتلة بالنسبية الحديثة؟

17. ماذا يحدث لكتلة ماء في وعاء عندما تبرد، بفرض عدم وجود إزالة أو إضافة للجزيئات؟ هل يكون ذلك ملحوظاً عملياً؟ اشرح

إجابتك.

18. بالنظر إلى تجربة التفكير نضع بالوناً موسعاً من الهواء على ميزان خارجي في الصباح الباكر. يبقى البالون على الميزان

ويمكننا قياس التغييرات في كتلته. هل تتغير كتلة البالون مع مرور اليوم؟ ناقش الصعوبات في تنفيذ هذه التجربة.

19. تتناقص كتلة الوقود في مفاعل نووي بكمية يمكن ملاحظتها لأنها تتحول إلى طاقة. هل ينطبق الشيء نفسه على الفحم

والأكسجين المجتمعين في محطة توليد الطاقة التقليدية؟ إذا كان الأمر كذلك، هل يمكن ملاحظة ذلك عملياً بالنسبة

للفحم والأكسجين؟ اشرح إجابتك.

20. نعلم أن سرعة الجسم ذي الكتلة لها حد أقصى قدره c. هل هناك حد أعلى لعزمه؟ وطاقته؟ فسّر إجابتك.

21. بالنظر إلى حقيقة أن الضوء ينتقل بسرعة c، هل يمكن أن تكون له كتلة؟ فسّر إجابتك.

22. إذا كنت تستخدم تلسكوباً أرضياً لتوجيه شعاع ليزر إلى القمر، ويمكنك تحريك البقعة عبر سطح القمر بسرعة أكبر من سرعة

الضوء. هل هذا يناقض النسبية الحديثة؟ (لاحظ أنه يتم إرسال الضوء من الأرض إلى القمر، وليس عبر سطح القمر).

## مسائل:

### 3.5 تمدد الزمن

23. (a) احسب  $\gamma$  إذا كانت  $v = 0.250 c$  ؟ (b) إذا كانت  $v = 0.500 c$  ؟
24. (a) احسب  $\gamma$  إذا كانت  $v = 0.100 c$  ؟ (b) إذا كانت  $v = 0.900 c$  ؟
25. يتم إنتاج الجسيمات التي تُسمى  $\pi$ -mesons بواسطة مسرع الحزم. إذا كانت هذه الجسيمات تسير بسرعة  $2.70 \times 10^8 \text{ m/s}$  وتعيش  $2.60 \times 10^{-8} \text{ s}$  عندما تكون في حالة سكون بالنسبة للمراقب، فكم من الزمن ستعيش عندما تُشاهد في المختبر؟
26. لنفترض أن الجسيم المسمى kaon ، والذي ينشأ عند اصطدام الإشعاع الكوني بالغللاف الجوي للأرض، يمر بمحاذاة عند سرعة تبلغ  $0.980c$ ، ويعيش  $1.24 \times 10^{-8} \text{ s}$  في حالة السكون بالنسبة للمراقب. كم من الزمن سيعيش كما نلاحظه نحن؟
27. سيم  $\pi$ -meson محايد يتم إنشاؤه بواسطة مسرعات الحزم. إذا كان أحد هذه الجسيمات يعيش لمدة تبلغ  $1.40 \times 10^{-16} \text{ s}$  ثانية كما تظهر القياسات المخبرية، و  $0.840 \times 10^{-16} \text{ s}$  عندما يكون في حالة سكون بالنسبة للمراقب، فما هي سرعته بالنسبة للمختبر؟
28. يعيش النترون لفترة زمنية تبلغ  $900 \text{ s}$  عندما يكون في حالة سكون بالنسبة للمراقب. ما هي سرعة جوكا النترون بالنسبة للمراقب الذي يقيس عمره الافتراضي على أنه  $2065 \text{ s}$ ؟
29. إذا كانت الآثار النسبية أقل من 1٪، يجب أن تكون  $\gamma$  أقل من 1.01. ما هي السرعة النسبية التي يكون عندها  $\gamma = 1.01$  ؟
30. إذا كانت الآثار النسبية أقل من 3٪، يجب أن تكون  $\gamma$  أقل من 1.03. ما هي السرعة النسبية التي يكون عندها  $\gamma = 1.03$  ؟

### 4.5 تقلص الطول

31. يبلغ طول سفينة فضاء، كما تُشاهد من على متنها  $200 \text{ m}$ ، وتتحرك بمحاذاة الأرض بسرعة  $0.970c$ . ما هو طولها الذي يقيسه مراقب أرضي؟
32. عند أي سرعة يجب على سيارة رياضية طولها  $6.0 \text{ m}$  أن تمر بمحاذاةك حتى يظهر لك طولها أنه يساوي  $5.5 \text{ m}$  فقط؟
33. (a) ما هي المسافة التي يقطعها الميون في المثال 3.5 وفقاً للمراقب الأرضي؟ (b) ما هي المسافة التي يقطعها كما يراها مراقب يتحرك معه؟ ابن حسابك على سرعته بالنسبة للأرض والزمن الذي يعيشه (الزمن الصحيح). (c) تحقق من أن هذه المسافات ترتبط فيما بينها من خلال تقلص الطول  $\gamma = 3.20$ .
34. (a) كم كان سيعيش الميون في المثال 3.5 كما يبدو لمراقب أرضي إذا كانت سرعته  $0.0500c$ ؟ (b) ما هي المسافة التي كان سيقطعها كما تبدو لمراقب أرضي؟ (c) كم تبلغ هذه المسافة في إطار الميون نفسه؟
35. نتائج غير معقولة، تتجه سفينة فضاء مباشرة نحو الأرض بسرعة  $0.800c$ . يدعي رائد الفضاء على متن السفينة بأنه يمكنه إرسال علبة باتجاه الأرض بسرعة تبلغ  $1.20c$  بالنسبة للأرض (a) احسب السرعة التي يجب أن تتحرك بها العلبة بالنسبة لسفينة الفضاء. (b) ما هو الشيء غير المعقول في هذه النتيجة؟ (c) ما هي الافتراضات غير المعقولة أو المتضاربة فيما بينها؟

### 5.5 تحويل لورنتز

36. اكتب الوقائع المادية التالية على شكل أحداث مستخدماً الصيغة التالية:  $(x, y, z, t)$ . (a) يرن ساعي البريد جرس الباب لمنزل عند الظهر تماماً. (b) في الزمن نفسه، الذي يقرع فيه جرس الباب، تخرج شريحة من الخبز من آلة تحميص الخبز موجودة على بعد  $10 \text{ أمتار}$  في الاتجاه الشرقي من الباب. (c) بعد عشر ثوان، تصل طائرة إلى المطار، الذي يقع على بعد  $10 \text{ km}$  من الباب في الاتجاه الشرقي و  $2 \text{ km}$  جنوباً.



37. صف ما يحدث للزاوية  $\alpha = \tan(v/c)$  ، وبالتالي للمحاور المحولة في الشكل 17.5 ، عندما تقترب السرعة النسبية  $v$  للإطارين المرجعيين  $S$  و  $S'$  من سرعة الضوء  $c$ .

38. صف شكل الخط العالمي في مخطط الزمكان لكل من (a) جسيم يبقى في حالة سكون في موضع محدد على محور السينات؛ (b) جسيم يتحرك بسرعة ثابتة  $u$  في الاتجاه  $x$ ؛ (c) جسيم ينطلق من السكون ويتسارع بمعدل ثابت في الاتجاه الموجب لمحور السينات.

39. رجل يقف ساكناً في محطة قطار، يشاهد صبيين يلقيان كرة بيسبول في قطار متحرك. بفرض أن القطار يتحرك شرقاً بسرعة ثابتة تبلغ  $20 \text{ m/s}$ ، وأن أحد الأولاد يلقي الكرة بسرعة  $5 \text{ m/s}$  بالنسبة له نحو الصبي الآخر، الذي يبعد عنه  $5 \text{ m}$  غرباً. ما هي سرعة الكرة التي يراها الرجل في المحطة؟

40. إذا نظرنا من الشمس في لحظة معينة، يبدو أن الأرض والمريخ يتحركان في اتجاهين متعاكسين بسرعة  $108,000 \text{ km/h}$  و  $86,871 \text{ km/h}$  على التوالي. ما هي سرعة المريخ في هذه اللحظة التي تُرى من الأرض؟

41. يركض رجل على طريق مستقيم عمودي على سكة قطار ومبتعداً عنها بسرعة  $12 \text{ m/s}$ . يتحرك القطار بسرعة  $30 \text{ m/s}$  بالنسبة للسكة. ما هي سرعة الرجل بالنسبة لراكب يجلس في القطار في حالة سكون؟

42. يركض رجل على طريق مستقيم يصنع زاوية  $30$  درجة مع سكة القطار. يركض هذا الرجل على الطريق مبتعداً عن السكة بسرعة  $12 \text{ m/s}$ . يتحرك القطار بسرعة  $30 \text{ m/s}$  بالنسبة للسكة. ما هي سرعة هذا الرجل بالنسبة لراكب يجلس في القطار في حالة سكون؟

43. وفي إطار السكون بالنسبة لطاولة بلياردو، تتحرك كرة بلياردو كتلتها  $m$  بسرعة  $v$  فتضرب كرة أخرى كتلتها  $m$  في حالة سكون. تصبح الكرة الأولى في حالة سكون بعد الاصطدام بينما تنطلق الكرة الثانية بسرعة  $v$  في الاتجاه الأصلي لحركة الكرة الأولى، مما يدل على أن العزم مصان في هذا الإطار. (a) صف هذا التصادم من منظور إطار يتحرك بسرعة  $v$  في اتجاه حوكة الكرة الأولى. (b) هل العزم مصان في هذا الإطار؟

44. في إطار السكون بالنسبة لطاولة بلياردو، تتحرك كرتا بلياردو لهما الكتلة نفسها  $m$  الواحدة باتجاه الأخرى بالسرعة نفسها  $v$ . تصبح الكرتان بعد الاصطدام في حالة سكون. (a) بين أن العزم مصان في هذا الإطار. (b) صف التصادم نفسه من منظور إطار يتحرك بسرعة  $v$  في اتجاه حركة الكرة الأولى (c) هل العزم مصان في هذا الإطار؟

45. في الإطار  $S$ ، لوحظ حدثان: الحدث 1: يتم إنشاء pion في حالة سكون عند نقطة المبدأ والحدث 2: pion يتحلل البيون بعد فترة زمنية  $\tau$ . يتحرك مراقب آخر في إطار  $S'$  في الاتجاه الموجب للقسم الموجب لمحور السينات بسرعة ثابتة  $v$  ويراقب الحدثين نفسها في إطاره. تتقاطع نقاط المبدأ للإطارين في  $t=t'=0$ . (a) أوجد موقع وأزمنة هذين الحدثين في الإطار  $S'$ : (a) وفقاً لتحويل غاليليو (b) وفقاً لتحويل لورنتز.

## 6.5 التحويل في السرعة النسبية

46. إذا كانت هناك سفينتان فضائيتان تتقدمان الواحدة باتجاه الأخرى بسرعة  $0.800c$ ، فبأي سرعة يجب أن تُطلق العلبة من السفينة الأولى حتى تقترب من الأخرى بسرعة  $0.999c$  كما تُرى من السفينة الثانية؟

47. كوكبان على مسار تصادم، يتجهان مباشرة نحو بعضهما بسرعة  $0.250c$ . تقترب سفينة الفضاء المرسله من أحد الكوكبين من الآخر بسرعة  $0.750c$  كما تُرى من الكوكب الثاني. ما هي سرعة السفينة بالنسبة للكوكب الأول؟

48. عندما يتم إطلاق صاروخ من سفينة فضائية باتجاه أخرى، فإنه يغادر الأولى بسرعة  $0.950c$  ويقترب من الأخرى بسرعة  $0.750c$ . ما هي السرعة النسبية للسفينتين؟

49. ما هي السرعة النسبية لسفینتین فضائیتین إذا أطلقت إحدهما صاروخاً على الأخرى بسرعة  $0.750c$ ، بينما لاحظت الأخرى أنه يقترب منها بسرعة  $0.950c$ ؟

50. أثبت أنه من أجل أي سرعة نسبية  $v$  بين مراقبين، فإن حزمة الضوء المرسله من أحدهما إلى الآخر ستقترب بسرعة  $c$ . (بشرط أن تكون  $v$  أقل من  $c$  طبعاً).

51. بَيِّنْ أنه من أجل أي سرعة نسبية  $v$  بين مراقبين، فإن الشعاع الضوئي الموجه من أحدهما مبتعداً عن الآخر سيسير بسرعة الضوء. (بشرط أن تكون  $v$  أقل من  $c$  طبعاً).

### 7.5 تأثير دوبلر للضوء

52. يستخدم ضابط دوريات الطرق السريعة جهازاً يقيس سرعة المركبات عن طريق تسليط جهاز الرادار نحوهم وقياس تحول دوبلر. يصدر الرادار تردد  $100 \text{ GHz}$ ، ويكون تردد الصدى العائد  $15.0 \text{ kHz}$ . ما هي سرعة السيارة؟ لاحظ أن هناك تحوي دوبلر في الأصداء. (تأكد من عدم التقريب حتى نهاية المسألة، لأن التأثير صغير).

### 8.5 العزم النسبي

53. أوجد عزم نواة الهليوم كتلتها  $6.68 \times 10^{-27} \text{ kg}$  تتحرك بسرعة  $0.200c$ .

54. احسب عزم إلكترون يتحرك بسرعة  $0.980c$ .

55. (a) أوجد عزم كويكب كتلته  $1.00 \times 10^9 \text{ kg}$  يتجه نحو الأرض بسرعة  $30.0 \text{ km/s}$ . (b) أوجد نسبة هذا العزم إلى العزم الكلاسيكي. (تلميح: استخدم التقريب التالي عند السرعات المنخفضة:  $\gamma = 1 + (1/2)v^2/c^2$ )

56. (a) احسب عزم قمر صناعي يبلغ وزنه  $2000 \text{ kg}$  ويدور حول مساره بسرعة  $4.00 \text{ km/s}$ ؟ (b) أوجد نسبة هذا العزم إلى العزم الكلاسيكي. (تلميح: استخدم التقريب التالي عند السرعات المنخفضة:  $\gamma = 1 + (1/2)v^2/c^2$ ).

57. ما هي سرعة الإلكترون الذي يبلغ عزمه  $3.04 \times 10^{-21} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ ؟ لاحظ أنه يجب عليك حساب السرعة بدقة لأربعة أرقام على الأقل لمعرفة الفرق مع  $c$ .

58. ما هي سرعة البروتون الذي يبلغ عزمه  $4.48 \times 10^{-19} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ ؟

### 9.5 الطاقة النسبية

59. ما هي طاقة السكون لإلكترون، كتلته  $9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ؟ اكتب الاجابة بالجول وبوحدة  $\text{MeV}$ .

60. أوجد طاقة السكون بالجول وبوحدة  $\text{MeV}$  لبروتون، كتلته  $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ .

61. إذا كانت طاقة السكون لبروتون ونيوترون (مكوني النواة) هي  $938.3 \text{ MeV}$  و  $939.3 \text{ MeV}$  على التوالي، فما هو الفرق بين كتلتيهما بوحدة  $\text{kg}$ ؟

62. تشير التقديرات إلى أن الانفجار الكبير الذي بدأ الكون قد أطلق  $10^{68} \text{ J}$  من الطاقة. كم من النجوم يمكن أن تخلق نصف هذه الطاقة، بافتراض أن متوسط كتلة النجم هي  $4.00 \times 10^{30} \text{ kg}$ ؟

63. ينتج انفجار سوبر نوفي لنجم كتلته  $2.00 \times 10^{31} \text{ kg}$  طاقة بمقدار  $1.00 \times 10^{44} \text{ J}$  (a) كم كيلوغراماً من الكتلة يتم تحويلها إلى طاقة في الانفجار؟ (b) ما هي النسبة  $\Delta m/m$  للكتلة التي دمرت إلى الكتلة الأصلية للنجم؟

64. (a) احسب الكتلة المحولة إلى طاقة عن طريق الانشطار لنحو  $1.00 \text{ kg}$  من اليورانيوم. (b) ما هي نسبة الكتلة المدمرة إلى الكتلة الأصلية،  $\Delta m/m$ ؟ باستخدام البيانات من الرابط التالي:

<http://cnx.org/content/m58312/latest/#fsid1165036086155>

65. (a) احسب مقدار الكتلة التي تم تحويلها إلى طاقة عن طريق دمج 1.00 kg من الهيدروجين. (b) ما هي نسبة الكتلة المدمرة إلى الكتلة الأصلية،  $\Delta m/m$ ؟ (c) كيف يمكن مقارنة ذلك بـ  $\Delta m/m$  من أجل انشطار 1.00 kg من اليورانيوم؟ باستخدام البيانات من الرابط التالي: (<http://cnx.org/content/m58312/latest/#fsid1165036086155>)
66. هناك نحو  $10^{34}$  J من الطاقة المتاحة من اندماج الهيدروجين في محيطات العالم (a) إذا تم استخدام  $10^{33}$  J من هذه الطاقة، فما هو الانخفاض في كتلة المحيطات؟ (b) ما هو حجم الماء الذي يوافق هذا الانخفاض؟ (c) ناقش ما إذا كان هذا جزء مهم من الكتلة الكلية للمحيطات.
67. يمتلك الميون طاقة كتلة سكون تبلغ 105.7 MeV، ويتحلل إلى إلكترون وجسيم دون كتلة (a) إذا تم تحويل كامل الكتلة المفقودة إلى طاقة حركية للإلكترون، أوجد  $\gamma$  للإلكترون. (b) احسب سرعة الإلكترون؟
68.  $\pi$ -meson هو جسيم يتحلل إلى ميون وجسيمات عديمة الكتلة.  $\pi$ -meson له طاقة كتلة سكون تساوي 139.6 MeV، والميون له طاقة كتلة سكون تساوي 105.7 MeV. لنفترض أن  $\pi$ -meson هو في حالة سكون وأن الكتلة المفقودة تتحول إلى طاقة حركية للميون. فما هي سرعة حركة الميون؟
69. (a) احسب الطاقة الحركية النسبية لسيارة كتلتها 1000 kg تتحرك بسرعة 30.0 m/s إذا كانت سرعة الضوء 45.0 m/s فقط. أوجد نسبة الطاقة الحركية النسبية إلى الطاقة الحركية الكلاسيكية.
70. تحلل ألفا هو التحلل النووي الذي تنبعث منه نواة الهليوم. إذا كانت كتلة نواة الهليوم  $6.80 \times 10^{-27}$  kg وتم إعطاؤها 5.00 MeV من الطاقة الحركية، فما هي سرعتها؟
71. (a) تحلل بيتا هو التحلل النووي الذي ينبعث منه إلكترون. إذا أعطي هذا الإلكترون 0.750 MeV من الطاقة الحركية، فما هي سرعته؟ (b) ناقش كيف أن سرعته العالية وطاقته الحركية تقارن مع طاقة الكتلة السكونية للإلكترون.

## مسائل إضافية

72. (a) ما هي السرعة النسبية عندما يكون:  $\gamma = 1.50$ ؟ (b) عند أي سرعة نسبية يصبح:  $\gamma = 100$ ؟
73. (a) ما هي السرعة النسبية عندما يكون:  $\gamma = 2.00$ ؟ (b) عند أي سرعة نسبية يصبح:  $\gamma = 10$ ؟
74. نتائج غير معقولة. (a) أوجد قيمة  $\gamma$  المطلوبة للحالة التالية: يقيس مراقب أرضي مرور 23.9 h في حين أن الإشارات الصادرة عن مسبار الفضاء عالي السرعة تشير إلى أن 24.0 h مرت على متنها. (b) ما هو غير المعقول في هذه النتيجة؟ (c) ما هي الافتراضات غير المعقولة أو غير المتسقة؟
75. (a) كم من الزمن يستغرق رائد الفضاء في المثال 5.5 ليقطع مسافة 4.30 ly بسرعة 0.99944c (مقاسة من قبل مراقب أرضي)؟ (b) كم من الزمن تستغرق هذه الرحلة وفقاً لرائد الفضاء؟ (c) تحقق من أن هذين الزمناً مرتبطين من خلال تمدد الزمن بالمعامل  $\gamma = 30.00$  على النحو الوارد.
76. (a) ما السرعة التي يجب أن يركض بها رياضي في سباق 100 m، ليصبح طول هذه المسافة 100 ياردة؟ (b) هل يتوافق الجواب مع حقيقة أن الآثار النسبية يصعب رصدها في الظروف العادية؟ فسّر إجابتك.
77. (a) أوجد قيمة  $\gamma$  للحالة التالية: يقيس رائد فضاء طول مركبته الفضائية فيجده 100 m، في حين يُظهر قياس مراقب أرضي أن طولها 25.0 m. (b) ما هي سرعة سفينة الفضاء بالنسبة إلى الأرض؟
78. تعمل ساعة في مركبة فضائية بعشر معدل عمل ساعة مماثلة على الأرض. ما هي سرعة المركبة الفضائية؟

**79.** يبلغ معدل ضربات القلب لدى رائد الفضاء 66 نبضة في الدقيقة كما تم قياسه أثناء اختباره البدني على الأرض. ويتم قياس معدل ضربات القلب لهذا الرائد عندما يكون في مركبة فضائية تسير بسرعة  $0.5c$  بالنسبة للأرض من قبل مراقب (A) في السفينة ومراقب (B) على الأرض. (a) صف طريقة تجريبية يمكن من خلالها للمراقب B على الأرض تحديد معدل نبضات القلب لرائد الفضاء عندما يكون في سفينة الفضاء. (b) كم سيكون معدل ضربات القلب (s) لرائد الفضاء كما يسجلها المراقبان A و B؟

**80.** سفينة فضاء (A) تتحرك بسرعة  $c/2$  بالنسبة لسفينة فضائية أخرى (B). قام المراقبان في A و B بضبط ساعاتهما، بحيث يكون الحدث الممثل بالاحداثيات  $(x, y, z, t)$  وهو تشغيل ليزر في سفينة الفضاء (B) له إحداثيات  $(0, 0, 0, 0)$  في A وكذلك  $(0, 0, 0, 0)$  في B. يقوم المراقب في نقطة المبدأ في B بتشغيل الليزر عند  $t = 0$  وإيقاف تشغيله عند  $t = \tau$  في زمنه. ما هي المدة الزمنية بين التشغيل والإيقاف كما يراها أحد المراقبين في A؟

**81.** بفرض وجود نفس المراقبين من التمرين السابق، ولكن هذه المرة يراقبان حدثين وقعا في السفينة الفضائية A. حيث يصل فوتون إلى نقطة المبدأ في A عند اللحظة  $t = 0$  في زمنها، وفوتون آخر يصل إلى النقطة  $(x = 1.00 \text{ m}, 0, 0)$  عند اللحظة  $t = 0$  في إطار السفينة A. (a) أوجد إحداثيات وأوقات الحدثين كما يراها أحد المراقبين في إطار السفينة B. (b) في أي إطار يكون الحدثان متزامنين وفي أي إطار يكونان غير متزامنين؟

**82.** بفرض وجود نفس المراقبين من التمارين السابقة. تم وضع قضيب طوله  $1 \text{ m}$  على المحور x في إطار السفينة B يمتد من نقطة المبدأ إلى النقطة  $(x = 1.00 \text{ m}, 0, 0)$ . ما هو طول القضيب كما يراه مراقب في إطار السفينة A؟

**83.** يرى مراقب في نقطة المبدأ للإطار القصوري S انطفاء مصباح عند  $x = 150 \text{ km}$ ،  $y = 15.0 \text{ km}$ ، و  $z = 1.00 \text{ km}$  في اللحظة  $t = 4.5 \times 10^{-4} \text{ s}$ . حدد موقع وتوقيت حدوث الوميض في النظام "S"، إذا كان "S" يتحرك على طول محور السينات بالاتجاه المشترك مع S بسرعة  $v = 0.6c$ ؟

**84.** يرى أحد المراقبين حدثين يفصل بينهما زمناً قدره  $1.5 \times 10^{-8} \text{ s}$  ومسافة  $800 \text{ m}$ . ما هي السرعة التي يجب أن يتحرك بها مراقب ثانٍ بالنسبة للأول حتى يرى الحدثين يحدثان في وقت واحد؟

**85.** يرى مراقب يقف على السكة الحديدية صاعدين من البرق يضرب طرفي القطار الذي يبلغ طوله  $500 \text{ m}$  في وقت واحد في اللحظة التي يمر فيها منتصف القطار بمحاذاته بسرعة  $50 \text{ m/s}$ . استخدم تحول لورنتز لإيجاد الزمن الفاصل بين ضربات البرق كما يقيسها راكب جالس في منتصف القطار.

**86.** يتم رصد حدثين فلكيين من الأرض، فيلاحظ أنه يفصل بينهما زمن قدره  $1 \text{ s}$  ومسافة قدرها  $1.5 \times 10^9 \text{ m}$  (a) حدد فيما إذا كان الفاصل بين الحدثين هو شبه زماني أم شبه مكاني. (b) هل هذا يتفق مع النسبية الخاصة من حيث إن أحد الحدثين تسبب بحدوث الآخر؟

**87.** يتم رصد حدثين فلكيين من الأرض فيلاحظ أنه يفصل بينهما زمن قدره  $0.30 \text{ s}$  ومسافة قدرها  $2.0 \times 10^9 \text{ m}$ . ما هي السرعة التي يجب أن تتحرك بها مركبة فضائية من موقع أحد الحدثين نحو الآخر لجعل الأحداث تحدث في الزمن نفسه عند قياسها من الإطار المرجعي للمركبة الفضائية؟

**88.** مركبة فضائية تقع في نقطة المبدأ في حالة سكون تبدأ بالحركة وتتسارع بمعدل ثابت  $g$ ، كما ترى من الأرض، والتي تُعدُّ إطاراً قصورياً، حتى تصل إلى سرعة  $c/2$ . بين أن الزيادة في الزمن الصحيح ترتبط بالزمن المنقضي في إطار الأرض بالعلاقة:

$$d\tau = \sqrt{1 - v^2/c^2} dt.$$

(b) أوجد علاقة لحساب الزمن المنقضي حتى الوصول إلى السرعة  $c/2$  كما يظهر في إطار الأرض. (c) استخدم العلاقة الواردة في الطلب (a) للحصول على علاقة مشابهة لحساب الزمن الصحيح المنقضي حتى الوصول إلى السرعة  $c/2$  كما يُرى في المركبة الفضائية، وحدد نسبة الزمن المرئي من الأرض إلى الزمن المرئي من المركبة الفضائية للوصول إلى السرعة النهائية.

89. (a) جميع المجرات باستثناء القريبة منا تبعد عن مجرتنا (درب التبانة). إذا كان هناك مجرة تبعد عنا مسافة  $12.0 \times 10^9$  ly، وتبعد عنا بسرعة  $0.900c$ ، فما هي السرعة التي يجب أن نرسل بها مسباراً استكشافياً حتى يصل إلى تلك المجرة بسرعة  $0.900c$  كما يُقاس على تلك المجرة؟ (b) ما هو الزمن اللازم لذلك المسبار حتى يصل إلى المجرة الأخرى مقاساً من الأرض؟ يمكنك افتراض أن سرعة المجرة الأخرى تبقى ثابتة. (c) ما هو الزمن اللازم لإشارة لاسلكية حتى تعود إلى الأرض من هناك؟ (كل هذا ممكن من حيث المبدأ، لكنه غير عملي).

92. بفرض وجود سفينة فضاء تتجه مباشرة نحو الأرض بسرعة  $0.750c$  ويمكنها إطلاق علبة بسرعة  $0.500c$  بالنسبة للسفينة. (a) ما هي سرعة العلبة بالنسبة للأرض، إذا تم إطلاقها نحو الأرض مباشرة؟ (b) احسب سرعة العلبة إذا تم إطلاقها بعكس اتجاه الأرض؟

91. كرر المسألة السابقة معتبراً أن السفينة تتحرك مبتعدة عن الأرض.

92. إذا كانت سفينة فضاء تقترب من الأرض بسرعة  $0.100c$ ، وتم إرسال رسالة في كبسولة باتجاهها بسرعة  $0.100c$  بالنسبة للأرض، فما هي سرعة الكبسولة بالنسبة للسفينة؟

93. (a) بفرض أن سرعة الضوء  $3000$  m/s فقط. تتحرك طائرة مقاتلة نفاثة نحو هدف على الأرض بسرعة  $800$  m/s وتطلق رصاصات، تبلغ السرعة الابتدائية لكلٍ من هذه الرصاصات  $1000$  m/s. فما هي سرعة الرصاصات بالنسبة للهدف؟ (b) إذا كانت سرعة الضوء صغيرة، فهل ستلاحظ الآثار النسبية في الحياة اليومية؟ ناقش الإجابة.

94. إذا كان هناك مجرة تتحرك مبتعدة عن الأرض بسرعة  $1000$  km/s وينبعث منها ضوء بطول موجي  $656$  nm من خصائص الهيدروجين (العنصر الأكثر شيوعاً في الكون). (a) ما هو طول الموجة الذي نلاحظه على الأرض؟ (b) ما نوع هذا الإشعاع الكهرومغناطيسي؟ (c) لماذا تحمل سرعة الأرض في مدارها هنا؟

95. مسبار فضائي يسير نحو أقرب نجم بسرعة  $0.250c$  ويرسل معلومات محملة راديوياً على تردد إذاعي قدره  $1.00$  GHz. ما هو التردد الواصل إلى الأرض؟

96. بالقرب من مركز مجرتنا، يتحرك غاز الهيدروجين بعيداً عنا مباشرةً في مداره حول ثقب أسود. فنلتقي إشعاعاً كهرومغناطيسياً بطول موجي  $1900$  nm، فإذا علمت أن طول الموجة الانبعاث كان  $1875$  nm، احسب سرعة الغاز؟

97. (a) احسب سرعة جسيم من الغبار كتلته  $1.00$   $\mu$ g وله العزم نفسه لبروتون يتحرك بسرعة  $0.999c$ . (b) ماذا تخبرنا السرعة الصغيرة عن كتلة البروتون مقارنةً حتى بكمية ضئيلة من المادة العيانية؟

98. احسب  $\gamma$  لبروتون عزمه  $1.00$  kg·m/s. (b) ما هي سرعته؟ يُعدُّ هذا الشكل من البروتونات مكوناً نادراً لإشعاع كوني غير مؤكد الأصول.

99. بين أن الشكل النسبي لقانون نيوتن الثاني هو: (a)  $F = m \frac{du}{dt} \frac{1}{(1-u^2/c^2)^{3/2}}$  (b) احسب القوة اللازمة لتسريع كتلة  $1$  kg بمقدار  $1$  m/s<sup>2</sup> عندما تسير بسرعة  $c/2$ .

100. البوزيترون هو مادة مضادة للإلكترون، وله الكتلة نفسها بالضبط. عندما يلتقي بوزيترون بإلكترون، فإنهما يفني الواحد الآخر، وتتحول كل كتلتهم إلى طاقة. (a) احسب الطاقة المنبعثة، بفرض أن الطاقة الحركية قبل الفناء مهملة. (b) إذا تم إعطاء هذه الطاقة

لبروتون على شكل طاقة حركية، فما هي سرعته؟ (c) إذا أعطيت هذه الطاقة لإلكترون آخر على شكل طاقة حركية، فما هي سرعته؟

101. ما هي الطاقة الحركية مقدرة بوحدة MeV للميزون  $\pi$ -meson الذي يعيش  $1.40 \times 10^{-16}$  s كما يُقاس في مختبر، و 0.840  $\times 10^{-16}$  s عندما يكون في حالة سكون بالنسبة للمراقب، باعتبار أن طاقته السكونية تساوي 135 MeV؟

102. أوجد الطاقة الحركية مقدرة بوحدة MeV لنترون عمره الافتراضي المقاس يبلغ 2065 s، باعتبار أن طاقته السكونية MeV 939.6، وعمره السكوني الافتراضي هو 900 s.

103. بين أنه انطلاقاً من العلاقة:  $\gamma^2 - 1 = (pc)^2 / (mc^2)^2$ ، فإنه عند السرعات الكبيرة يكون:  $pc \gg mc^2$ . (b) هل  $E \approx pc$  عندما يكون  $\gamma = 30.0$  كما هو الحال عند رائد الفضاء في مفارقة التوأم؟

104. تبلغ سرعة نوترون واحد للأشعة الكونية  $0.250c$  بالنسبة للأرض (a) ما هي الطاقة الكلية للنترون مقدرة بوحدة MeV؟ (b) أوجد عزمه. (c) هل  $E \approx pc$  في هذه الحالة؟ ناقش بدلالة المعادلة الواردة في الطلب (a) من المسألة السابقة.

105. احسب قيمة المعامل  $\gamma$  لبروتون طاقته تساوي 938.3 MeV يتم تسريعه باستخدام كمون فعال تبلغ قيمته TV (teravolt)  $1.0$ ؟

106. ما هو كمون التسريع الفعالة للإلكترونات في مسرع ستانفورد الخطي، إذا كان  $\gamma = 1.00 \times 10^5$  لهم؟ (b) ما هي طاقتهم الكلية (تقريباً الطاقة الحركية نفسها في هذه الحالة) مقدرة بوحدة GeV؟

107. احسب الكتلة المدمرة عند تحرير الطاقة الموجودة في برميل من النفط الخام. (b) إذا علمت أن هذا البرميل يحتوي على 200 لتر، وبفرض أن كثافة النفط الخام هي  $750 \text{ kg/m}^3$ ، ما هي نسبة الكتلة المدمرة إلى الكتلة الأصلية،  $\Delta m/m$ ؟ باستخدام البيانات الواردة في الرابط التالي: (<http://cnx.org/content/m58312/latest/#fsid1165036086155>)

108. (a) احسب الطاقة الناتجة عن تدمير 1.00 kg من الكتلة. (b) كم كيلوغراماً يمكن رفعها إلى ارتفاع 10.0 كم بهذه الكمية من الطاقة؟

109. يستخدم مسرع Van de Graaff فرق كمون بقيمة 50.0 MV لتسريع الجزيئات المشحونة كالبروتونات. (a) ما هي سرعة البروتون المسرع عند هذه القيمة من الكمون؟ ما هي سرعة الإلكترون المسرع عند القيمة نفسها؟

110. بفرض أنك تستهلك طاقة كهربائية في منزلك بمعدل 500 kW·h شهرياً. (a) كم من الزمن يمكن أن تكفيك كتلة 1.00 g يتم تحويلها إلى طاقة كهربائية بكفاءة تبلغ 38.0%؟ (b) كم عدد المنازل التي يمكن تزويدها بالطاقة بمعدل 500 kwh شهرياً ولمدة عام واحد من الطاقة الناتجة عن تحويل الكتلة المعطاة؟

111. تقوم محطة طاقة نووية بتحويل طاقة الانشطار النووي إلى كهرباء بكفاءة تبلغ 35.0%. ما هي الكتلة التي يتم تدميرها في سنة واحدة لإنتاج الطاقة الكهربائية باستطاعة مستمرة تبلغ 1000MW. (b) هل تعتقد أنه سيكون من الممكن ملاحظة هذه الخسارة في الكتلة إذا كانت الكتلة الكلية للوقود 104 kg؟

112. أجريت أبحاث على الصواريخ التي تعمل بالطاقة النووية لعدة سنوات قبل أن تصبح شروط التشغيل الآمنة في غاية الأهمية (a) ما هو الجزء من كتلة الصاروخ الواجب تدميره لإدخاله في مدار أرضي منخفض، مع إهمال انخفاض الجاذبية؟ (افتراض أن ارتفاع المدار 250 km، واحسب كل من الطاقة الحركية (الكلاسيكية) والطاقة الكامنة الجاذبية اللازمة). (b) إذا كانت كتلة السفينة 1.00  $\times 10^5$  kg (100 tons)، فما هو إجمالي الانفجار النووي الناتج عن طن واحد من مادة TNT؟

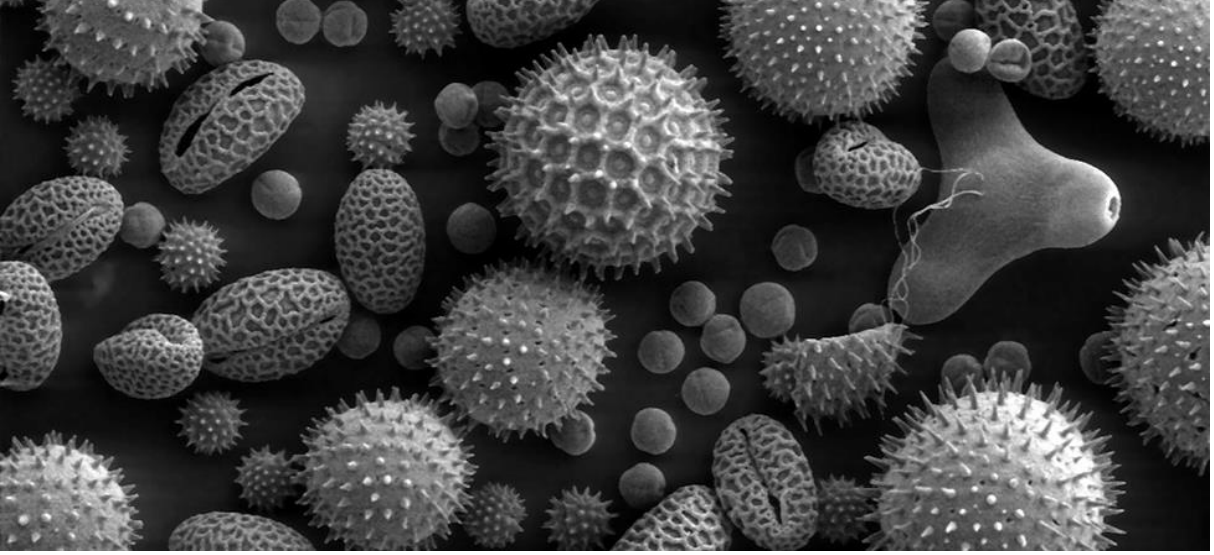
113. تنتج الشمس طاقة بمعدل  $3.85 \times 10^{26}$  W من اندماج الهيدروجين. يتحول نحو 0.7% من كل كيلوغرام من الهيدروجين إلى الطاقة المولدة من الشمس (a) كم كيلوغراماً من الهيدروجين يخضع للاندماج في كل ثانية؟ (b) إذا كانت الشمس عبارة عن هيدروجين بنسبة

90.0% ويمكن أن يتعرض نصف هذا الهيدروجين للاندماج قبل أن يتغير سلوك الشمس، فكم من الزمن يمكنها أن تنتج طاقة بمعدلها الحالي؟ (c) كم كيلوغراماً تخسره الشمس من كتلتها في الثانية؟ (d) ما هي النسبة المئوية من كتلة الشمس التي ستخسرها عند انقضاء الزمن المحسوب في الطلب (b)؟

**114.** أثبت أن  $E^2 - p^2 c^2$  للحسيم هو ثابت باستخدام تحويل لورنتز.

## الفصل السادس | الفوتونات والأمواج المادية

### PHOTONS AND MATTER WAVES



**الشكل 1.6** صورة حبوب اللقاح المأخوذة بواسطة المجهر الإلكتروني، يبلغ طول الحبيبات التي لها شكل حبة الفاصولياء نحو  $50\mu\text{m}$ . تتمتع المجاهر الإلكترونية بمقدرة فصل أعلى بكثير من المجهر الضوئي التقليدي، وذلك لأن أطوال أمواج الإلكترونات المستخدمة أقصر بنحو 100.000 مرة من أطوال أمواج فوتونات الضوء المرئي. (الإئتمان: تم تعديل العمل من قبل جامعة دارتماوث - قسم المجهر الإلكتروني).

### مخطط الفصل

1.6 إشعاع الجسم الأسود

2.6 المفعول الكهروضوئي

3.6 مفعول كومبتون

4.6 نموذج بور لذرة الهيدروجين

5.6 الأمواج المادية لدي برولي

6.6 الازدواجية "موجة - جسيم"

### المقدمة

اثنان من أكثر المفاهيم الثورية التي ظهرت في القرن العشرين هما اعتبار الضوء على أنه مجموعة من الجسيمات، والتعامل مع هذه الجسيمات كأموال. أدت هذه الخصائص الموجية للمادة إلى اكتشاف تقنيات جديدة كالفحص المجهر الإلكتروني، والذي يسمح لنا بفحص البنية الدقيقة للأجسام كحبوب اللقاح، كما هو مبين في الشكل 6.1. سندرس في هذا الفصل، الكم الطاقى، وهو مفهوم قدمه الفيزيائي الألماني ماكس بلانك في عام 1900 لتفسير إشعاع الجسم الأسود. وسناقش أيضاً كيف ساهم ألبرت أينشتاين في توسيع مفهوم بلانك إلى كم الضوء ("الفوتون") لتفسير المفعول الكهروضوئي.



ونستعرض أيضاً كيف استخدم الفيزيائي الأمريكي آرثر كومبتون مفهوم الفوتون في عام 1923 لشرح انزياحات الطول الموجي الملاحظة في الأشعة السينية. بعد مناقشة نموذج بور للهدروجين، سندرس كيف تم افتراض الأمواج المادية في عام 1924 من قبل لويس فيكتور دي برولي لإثبات صحة نموذج بور وندرس التجارب التي أجريت في 1923-1927 من قبل كلينتون دافيسون وليستر جيرمر والتي أكدت وجود أمواج دي برولي المادية.

## 1.6 | إشعاع الجسم الأسود Blackbody Radiation

### الأهداف التعليمية

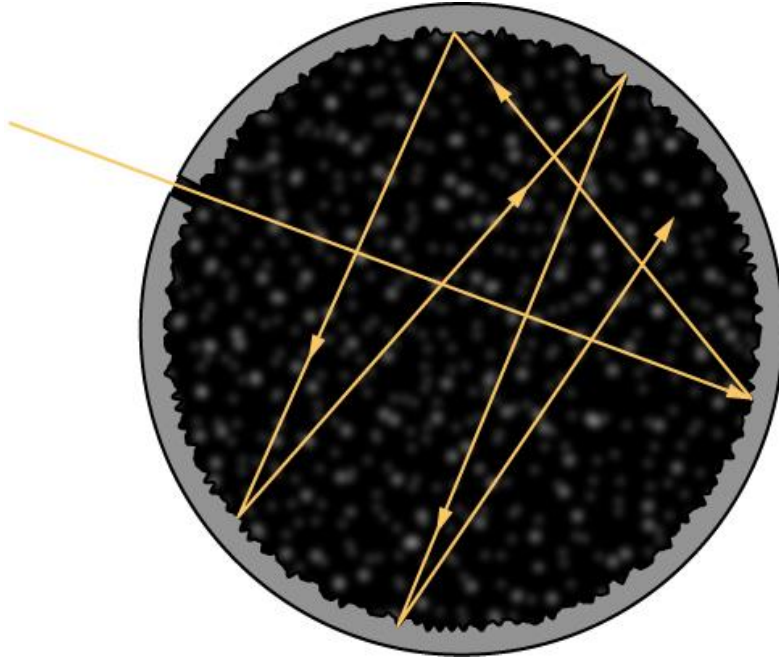
في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- تطبيق قوانين فين وستيفان لتحليل الإشعاعات الصادرة من الجسم الأسود.
- شرح فرضية بلانك للكَمّ الطاقِي.

تصدر جميع الأجسام إشعاعاً كهرومغناطيسياً على امتداد نطاق الأطوال الموجية. تعلمنا في فصل سابق أن الجسم الأكثر برودة يشع طاقة أقل من الجسم الأكثر دفئاً. نعلم أيضاً من خلال الملاحظة أنه عندما يتم تسخين الجسم وترتفع درجة حرارته، فإنه يتغير الطول الموجي للإشعاعات الصادرة من تحت الحمراء إلى الأحمر، ثم من الأحمر إلى البرتقالي، وهكذا دواليك. مع ارتفاع درجة حرارة الجسم، فإنه يضيء بألوان تقابل أطوالاً موجية أصغر من الطيف الكهرومغناطيسي. هذا هو المبدأ الأساس للمصباح المتوهج: حيث يضيء سلك معدني ساخن باللون الأحمر، وعندما يستمر تسخينه، فإن توهجه في النهاية يغطي كل الجزء المرئي من الطيف الكهرومغناطيسي. يحدد درجة حرارة الجسم ( $T$ ) الباعث للإشعاع، أو الباعث (اختصاراً)، طول الموجة التي تكون عندها الطاقة المشعة عند حدها الأقصى. على سبيل المثال، تشع الشمس، التي تتراوح درجة حرارة سطحها بين 5000k و 6000k، طيف من الأطوال الموجية نحو 560nm في المجال المرئي من الطيف الكهرومغناطيسي. كما يشع جسم الإنسان، عندما تكون درجة حرارته نحو 300k، أشعة في المجال تحت الأحمر.

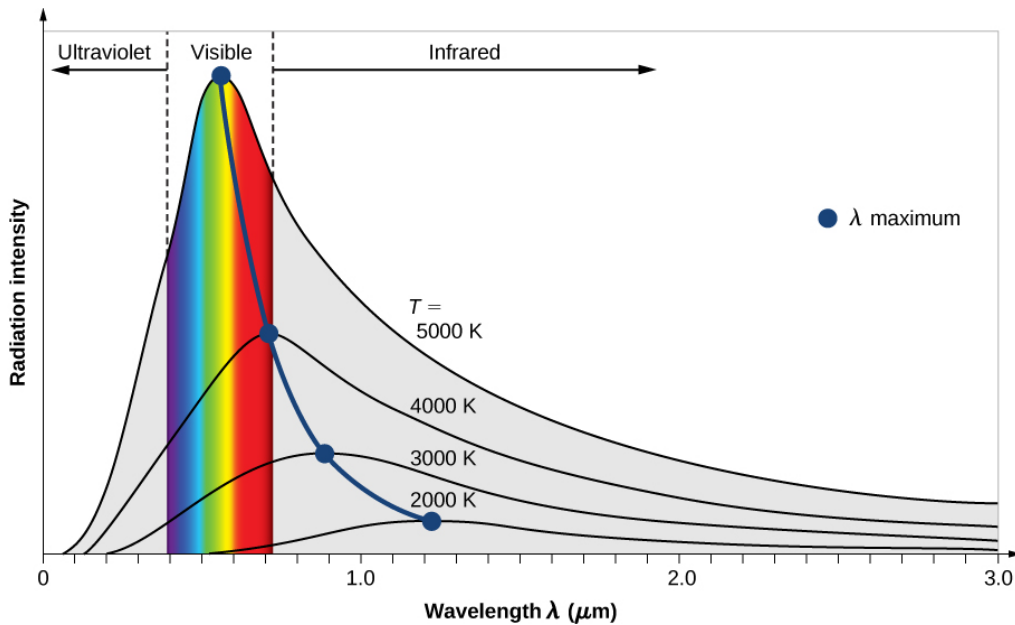
يعاني الإشعاع الوارد على جسم ما جزئياً من الامتصاص وجزئياً من الانعكاس. تتحقق حالة التوازن الديناميكي الحراري، عند تساوي معدل امتصاص الجسم للإشعاع مع معدل إصداره. لذلك، فإن الماص الجيد للإشعاع (أي الجسم الذي يمتص الإشعاع) يعد مصدراً جيداً للإشعاع أيضاً. يقوم الماص المثالي بامتصاص كل الإشعاع الكهرومغناطيسي الوارد عليه؛ ويسمى هذا الجسم **بالجسم الأسود**.

على الرغم من أن الجسم الأسود يعد مثالياً، لأنه لا يوجد جسم مادي يمتص 100% من الإشعاع الوارد، يمكننا بناء تصور قريب للجسم الأسود على شكل ثقب صغير في جدار تجويف مغلق تُعرف باسم المشع التجويفي، كما هو موضح في **الشكل 2.6**. تكون الجدران الداخلية للمشع التجويفي خشنة ومظلمة، بحيث أن أي إشعاع يدخل عبر ثقب صغير في جدار التجويف يصبح محاصراً داخل هذا التجويف. في حالة التوازن الديناميكي الحراري (عند درجة الحرارة  $T$ )، تمتص جدران التجويف كمية الإشعاع نفسها، الذي تصدر منها بالضبط. بالإضافة إلى أنه داخل التجويف، يتم موازنة الإشعاع الذي يدخل الثقب بالإشعاع الذي يخرج منه. يمكن الحصول على طيف إصدار الجسم الأسود من خلال تحليل الضوء المشع من الثقب. تُسمى الأمواج الكهرومغناطيسية الصادرة عن الجسم الأسود **بإشعاع الجسم الأسود**.

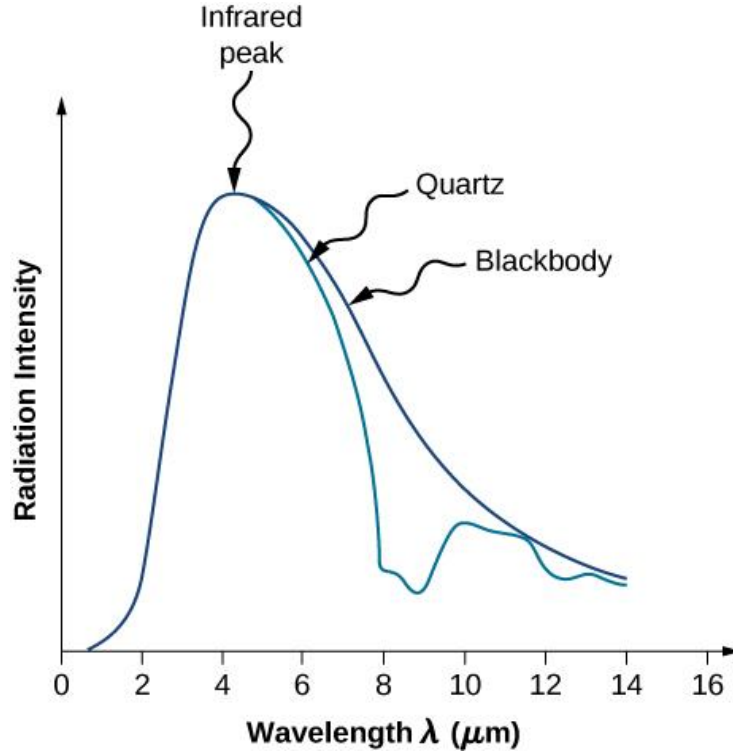


**الشكل 2.6:** يمكن تحقيق الجسم الأسود فيزيائياً من خلال ثقب صغير في جدار مشع تجويفي.

تعتمد شدة إشعاع الجسم الأسود  $I(\lambda, T)$  على كلٍ من الطول الموجي  $\lambda$  للإشعاع الصادر ودرجة حرارة  $T$  الجسم الأسود (**الشكل 3.6**). التابع  $I(\lambda, T)$  شدة الاستطاعة الإشعاعية بوحدة الطول الموجي؛ وبعبارة أخرى، هو استطاعة الإشعاع بوحدة المساحة لثقب المشع التجويفي بوحدة الطول الموجي. وفقاً لهذا التعريف، فإن  $I(\lambda, T)d\lambda$  هي الاستطاعة في وحدة المساحة التي تصدر في مجال الأطوال الموجية من  $\lambda$  إلى  $\lambda + d\lambda$ . تمت دراسة توزيع الشدات بين الأطوال الموجية للإشعاعات الصادرة من التجاويف في نهاية القرن التاسع عشر. وعموماً يتبع الإشعاع الصادر من المواد منحنى إشعاع الجسم الأسود (**الشكل 4.6**)؛ كما تتبع أطيف النجوم بشكل تقريبي منحنى إشعاع الجسم الأسود.



**الشكل 3.6:** تابعة شدة إشعاع الجسم الأسود للطول الموجي للإشعاع الصادر. يوافق كل منحنى درجة حرارة مختلفة للجسم الأسود، بدءاً من درجة حرارة منخفضة (المنحني السفلي) إلى درجة حرارة عالية (المنحني العلوي).



**الشكل 4.6:** طيف الإشعاع الصادر من سطح الكوارتز (المنحني الأزرق) ومنحني إشعاع الجسم الأسود (المنحني الأسود) عند درجة حرارة 600k.

قانونان مهمان يلخصان النتائج التجريبية لإشعاع الجسم الأسود: قانون فين للإزاحة وقانون ستيفان. يوضح **الشكل 3.6** قانون فين للإزاحة بالمنحني الذي يربط قمم المنحنيات الشدة. نلاحظ في هذه المنحنيات، أنه كلما ارتفعت درجة حرارة الجسم، كان طول الموجة المقابل لذروة الإصدار في منحني الإشعاع أقصر. كميًا، يُعبّر عن قانون فين بالعلاقة التالية:

$$\lambda_{\max} T = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K} \quad (6.1)$$

حيث:  $\lambda_{\max}$  هي موضع القمة في منحني الإشعاع. وبعبارة أخرى،  $\lambda_{\max}$  هو الطول الموجي الذي يشع عنده الجسم الأسود أشد ما يكون عند درجة حرارة معينة  $T$ . لاحظ أنه **في المعادلة 1.6**، درجة الحرارة مقدرة بوحدة الكلفن. يسمح لنا قانون فين للإزاحة بتقدير درجات حرارة النجوم البعيدة عن طريق قياس الطول الموجي للإشعاع الصادر منها.

## مثال 1.6

### درجات حرارة النجوم البعيدة

في أمسية صافية خلال أشهر الشتاء، إذا كنت في نصف الكرة الشمالي وتنظر إلى السماء، فسوف يمكنك رؤية النجم في مجموعة الصياد أوريون، والذي يسمى رايجل والذي يومض بلون أزرق، ويمكنك رؤية نجم آخر، يسمى بيتيليجوز Betelgeuse وله لون أحمر كما هو موضح في **الشكل 5.6**. فأَي من هذين النجمين هو أكثر برودة، رايجل أم بيتيليجوز؟

## خطة الحل:

نتعامل مع كل نجم على أنه جسم أسود. ووفقاً لقانون فين، تتناسب درجة حرارته عكساً مع الطول الموجي لشدة ذروة إصداره. طول موجة الضوء الأزرق  $\lambda_{\max}^{(\text{blue})}$  أقصر من طول موجة الضوء الأحمر  $\lambda_{\max}^{(\text{red})}$ . حتى لو كنا لا نعرف الأطوال الموجية الدقيقة، فإنه لا يزال بإمكاننا إجراء التناسب.

## الحل:

بكتابة قانون فين للنجم الأزرق ومثيله الأحمر، يكون لدينا

$$\lambda_{\max}^{(\text{red})} T_{(\text{red})} = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K} = \lambda_{\max}^{(\text{blue})} T_{(\text{blue})} \quad (6.2)$$


بتبسيط المعادلة 6.2 نجد:

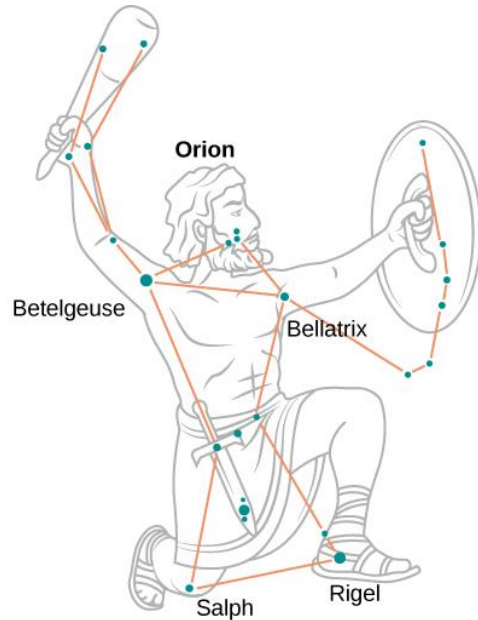
$$T_{(\text{red})} = \frac{\lambda_{\max}^{(\text{blue})}}{\lambda_{\max}^{(\text{red})}} T_{(\text{blue})} < T_{(\text{blue})} \quad (6.3)$$

لذلك، فإن بيتيليجوز أكثر برودة من رايجل.

## ملاحظة:

لاحظ أن قانون فين للإزاحة يخبرنا أنه كلما ارتفعت درجة حرارة الجسم الصادر، كان الطول الموجي للإشعاع الذي يصدر منه أقصر. يُعدُّ التحليل النوعي المقدم في هذا المثال صالحاً بشكل عام لأي جسم مصدر للإشعاع، سواءً كان جسماً كبيراً كالنجوم أو جسماً صغيراً كالفتيلة المتوهجة في المصباح الكهربائي.

 **1.6 تحقق من فهمك:** لمب الشمعة المعطرة بالخوخ ذو لون مصفر، أما اللهب الصادر عن موقد بنسن في مختبر الكيمياء فلونه مزرق. أي هذين اللهبين له درجة حرارة أعلى؟



**الشكل 5.6** تظهر في مجموعة الصياد النجمة الحمراء "بيتيليجوز"، والتي عادةً ما تأخذ لوناً مصفراً، عند الكتف الأيمن للشكل (في القسم العلوي الأيسر). أما النجمة الزرقاء العملاقة في أسفل اليمين، فهي رايجل، والتي تظهر عند القدم اليسرى للصياد.

العلاقة التجريبية الثانية هي قانون ستيفان، الذي يتعلق بالاستطاعة الكلية لإشعاع الجسم الأسود المصدر لطيف من الأطوال الموجية عند درجة حرارة معينة. جرى في الشكل 3.6 تمثيل هذه الاستطاعة الكلية بالمنطقة الواقعة أسفل منحني إشعاع الجسم الأسود عند درجة حرارة معينة  $T$ . تزداد مع ارتفاع درجة حرارة الجسم الأسود الاستطاعة الكلية الصادرة. يعبر كميًا عن قانون ستيفان بالعلاقة التالية:

$$P(T) = \sigma AT^4 \quad (6.4)$$

حيث:  $A$  هي مساحة سطح الجسم الأسود و  $T$  هي درجة حرارته (بالكلفن) و  $\sigma$  هو ثابت ستيفان - بولتزمان،  $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ . يمكننا من خلال قانون ستيفان تقدير مقدار الطاقة التي يشعها النجم عن طريق قياس درجة حرارته عن بُعد.

## مثال 2.6

### استطاعة إشعاع النجوم

نجم كشمسنا سيتطور ليصبح في نهاية الأمر نجماً "عملاقاً أحمر"، ثم إلى نجم "قزم أبيض". يقارب حجم القزم الأبيض النموذجي حجم الأرض، ودرجة حرارة سطحه نحو  $2.5 \times 10^4 \text{ K}$ . في حين تبلغ درجة حرارة سطح العملاق الأحمر النموذجي  $3.0 \times 10^3 \text{ K}$  ونصف قطره نحو 100000 مرة نصف قطر القزم الأبيض. ما هو متوسط الاستطاعة الصادرة بوحدة المساحة وماهي الطاقة الكلية المنبعثة لكل من هذه النجوم؟ قارن بينهم؟

### خطة الحل:

إذا تعاملنا مع النجم على أنه جسم أسود، واستناداً إلى قانون ستيفان، تتناسب الاستطاعة الكلية التي يشعها هذا النجم مع القوة الرابعة لدرجة حرارته. لإيجاد الاستطاعة الصادرة بوحدة السطح، لا نحتاج إلى تقديم أي افتراضات حول شكل النجم لأن  $P/A$  يعتمد فقط على درجة الحرارة. ومع ذلك، فإنه لحساب الاستطاعة الكلية، نحتاج إلى افتراض أن الاستطاعة تشع عبر سطح كروي يحيط بالنجم، بحيث تكون مساحة هذا السطح  $A = 4\pi R^2$ ، حيث  $R$  هو نصف قطره.

### الحل:

بإجراء تناسب بسيط بالاعتماد على قانون ستيفان نحصل على:

$$\frac{P_{\text{dwarf}} / A_{\text{dwarf}}}{P_{\text{giant}} / A_{\text{giant}}} = \frac{\sigma T_{\text{dwarf}}^4}{\sigma T_{\text{giant}}^4} = \left( \frac{T_{\text{dwarf}}}{T_{\text{giant}}} \right)^4 = \left( \frac{2.5 \times 10^4}{3.0 \times 10^3} \right)^4 = 4820 \quad (6.5)$$

تبلغ الاستطاعة الصادرة بوحدة المساحة من القزم الأبيض نحو 5000 ضعف الاستطاعة الصادرة من العملاق الأحمر. وتمثل هذه النسبة بـ  $a = 4.8 \times 10^3$ ، وبتعويضها في المعادلة 6.5 نجد:

$$\frac{P_{\text{dwarf}}}{P_{\text{giant}}} = a \frac{A_{\text{dwarf}}}{A_{\text{giant}}} = a \frac{4\pi R_{\text{dwarf}}^2}{4\pi R_{\text{giant}}^2} = a \left( \frac{R_{\text{dwarf}}}{R_{\text{giant}}} \right)^2 = 4.8 \times 10^3 \left( \frac{R_{\text{dwarf}}}{10^5 R_{\text{dwarf}}} \right)^2 = 4.8 \times 10^{-7} \quad (6.6)$$

نرى أن إجمالي الاستطاعة المنبعثة من قزم أبيض هي جزء صغير من إجمالي الاستطاعة الصادرة من العملاق الأحمر. على الرغم من انخفاض درجة الحرارة نسبياً، فإن الاستطاعة الكلية التي يشعها العملاق الأحمر تفوق بكثير مثلتها التي يشعها القزم الأبيض لأن مساحة سطح العملاق الأحمر أكبر بكثير. لتقدير القيمة المطلقة للاستطاعة الصادرة بوحدة المساحة، نستخدم قانون ستيفان مرة أخرى. من أجل قيم القزم الأبيض، نحصل على:


$$\frac{P_{\text{dwarf}}}{A_{\text{dwarf}}} = \sigma T_{\text{dwarf}}^4 = 5.670 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} (2.5 \times 10^4 \text{K})^4 = 2.2 \times 10^{10} \text{W/m}^2 \quad (6.7)$$


ويمكن الحصول على نتيجة مماثلة للعملاق الأحمر عن طريق نسب نتيجة القزم الأبيض:

$$\frac{P_{\text{giant}}}{A_{\text{giant}}} = \frac{2.2 \times 10^{10} \text{W}}{4.82 \times 10^3 \text{m}^2} = 4.56 \times 10^6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cong 4.6 \times 10^6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (6.8)$$

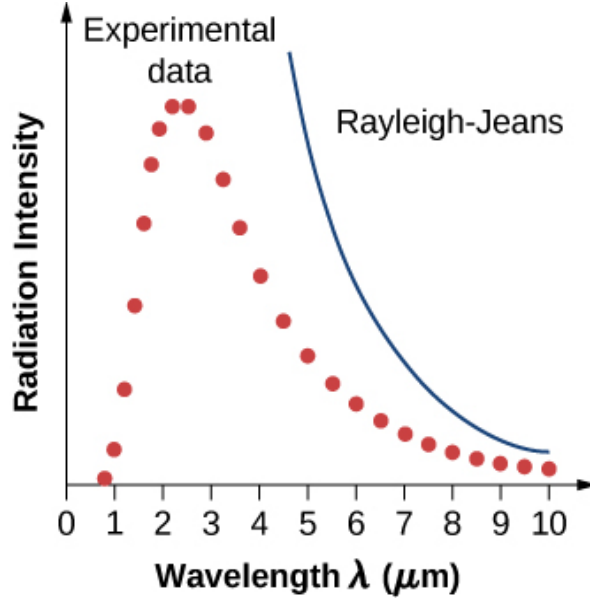
### ملاحظة:

لتقدير إجمالي الاستطاعة الصادرة من القزم الأبيض، من حيث المبدأ، يمكننا استخدام **المعادلة 7.6**. ومع ذلك، لإيجاد مساحة سطحه، فإننا نحتاج إلى معرفة متوسط نصف قطره، والذي لم يتم ذكره في هذا المثال. لذلك، فإن الحل يتوقف هنا. وينطبق الشيء نفسه على النجم العملاق الأحمر.

 **2.6 تحقق من فهمك:** تجري عملية تسخين قضيب حديدي. ومع ارتفاع درجة حرارته، يبدأ هذا القضيب بالتوهج — يكون في البداية أحمر باهتاً، ثم أحمر فاتحاً، ثم برتقالياً، ثم أصفر. استخدم إما منحني إشعاع الجسم الأسود أو قانون فين لشرح هذه التغييرات في لون التوهج.

 **3.6 تحقق من فهمك:** بفرض وجود نجمين  $\alpha$  و  $\beta$ ، يشعان بالاستطاعة الكلية نفسها تماماً. فإذا كان نصف قطر النجم  $\alpha$  يساوي ثلاثة أضعاف نصف قطر النجم  $\beta$ ، فما هي نسبة درجات حرارة سطوح هذين النجمين؟ أيهما أكثر سخونة؟ قام العالم غوستاف آر كيرشوف بصياغة مصطلح الجسم الأسود في عام 1862. وقد كان منحني إشعاع الجسم الأسود معروفاً تجريبياً، لكن شكله لم يجد تفسيراً فيزيائياً حتى العام 1900. النموذج الفيزيائي (المادي) للجسم الأسود عند درجة الحرارة  $T$  هو نموذج الأمواج الكهرطيسية المحصورة في التجويف (انظر **الشكل 2.6**)، في حالة توازن ديناميكي حراري مع جدران هذا التجويف. يمكن لهذه الأمواج تبادل الطاقة مع جدران هذا التجويف. الهدف هنا هو إيجاد توزيع الطاقة بين أنماط الاهتزاز المختلفة عند مختلف الأطوال الموجية (أو الترددات). بعبارة أخرى، نريد أن نعرف مقدار الطاقة التي يحملها طول موجة واحد أو مجموعة من الأطوال الموجية. بمجرد أن نعرف توزيع الطاقة، يمكننا استخدام الأساليب الإحصائية القياسية (على غرار تلك التي تمت دراستها في فصل سابق) للحصول على كل من منحني إشعاع الجسم الأسود وقانون ستيفان وقانون فين للانزياح. عندما يكون النموذج الفيزيائي صحيحاً، تتطابق التنبؤات النظرية مع المنحنيات التجريبية.

في مقارنة كلاسيكية لمسألة إشعاع الجسم الأسود، حيث يتم التعامل مع الإشعاع على أنه موجة، تكون الأمواج الكهرطيسية المحصورة في التجويف في حالة توازن، وتبادل طاقاتها باستمرار مع جدران هذا التجويف. لا يوجد أي سبب مادي لقيام الموجة بخلاف ذلك: يمكن تبادل أي كمية من الطاقة إما عن طريق النقل من الموجة إلى مادة الجدار أو عن طريق تلقيها من قبل الموجة من مادة الجدار. هذه الصورة الكلاسيكية هي أساس النموذج الذي طوره لورد رايلي وطوره السير جيمس جينز بشكل مستقل. تُعرف نتيجة هذا النموذج الكلاسيكي لمنحنيات إشعاع الجسم الأسود بقانون رايلي — جينز. ومع ذلك، كما هو مبين في **الشكل 6.6**، فإن قانون رايلي — جينز فشل في إعادة إنتاج النتائج التجريبية بشكل صحيح. في حدود الأطوال الموجية القصيرة، يتنبأ قانون رايلي — جينز بشدة لانهاية للإشعاع، وهو ما يتعارض مع النتائج التجريبية التي تكون فيها شدة الإشعاع ذات قيم محددة في المنطقة فوق البنفسجية من الطيف. هذا الاختلاف بين نتائج النظرية الكلاسيكية والتجارب، والتي أصبحت تُسمى "كارثة الأشعة فوق البنفسجية"، يوضح كيف فشلت الفيزياء الكلاسيكية في شرح آلية إشعاع الجسم الأسود.



**الشكل 6.6:** كارثة الأشعة فوق البنفسجية: لا يفسر قانون رايلي - جينز طيف إصدار الجسم الأسود الملاحظ.

تم حل مشكلة إشعاع الجسم الأسود في عام 1900 من قبل ماكس بلانك. حيث استخدم بلانك فكرة نموذج رايلي-جينز نفسها، بمعنى أنه تعامل مع أمواج كهرومغناطيسية بين الجدران داخل التجويف بشكل كلاسيكي، وافترض أن الإشعاع في حالة توازن مع جدران التجويف. الفكرة المبتكرة التي قدمها بلانك في نمودجه هي الافتراض بأن إشعاع التجويف ينبع من اهتزازات ذرية داخل جدران التجويف، ولا يمكن أن تحتوي هذه الاهتزازات إلا على قيم منفصلة للطاقة. لذلك، يمكن للإشعاع المحصور داخل جدران التجويف تبادل الطاقة مع الجدران فقط وبكميات منفصلة. فرضية بلانك لقيم الطاقة المنفصلة، والتي أطلق عليها اسم كوانتا، تفترض أن الاهتزازات داخل جدران التجويف لها طاقات كوانتية أو مكتمة **quantized energies**. وقد كانت هذه فكرة جديدة تجاوزت الفيزياء الكلاسيكية في القرن التاسع عشر، ذلك لأنه في الصورة الكلاسيكية، يمكن لطاقة المهتر أن تأخذ أي قيمة مستمرة، بينما افترض بلانك أن طاقة المهتر ( $E_n$ ) يمكن أن تملك فقط قيم منفصلة أو مكتمة:

$$E_n = nhf, \text{ where } n = 1, 2, 3, \dots \quad (6.9)$$

في **المعادلة 6.9**،  $f$  هو تردد مهتر بلانك. العدد الطبيعي  $n$  الذي يخصص هذه الطاقات المنفصلة يسمى **بالعدد الكمي** (أو عدد الكم). والثابت الفيزيائي  $h$  يسمى ثابت بلانك:

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 4.136 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s} \quad (6.10)$$

تقابل كل قيمة للطاقة المنفصلة حالة كمية لمهتر بلانك. يتم تعداد (إحصاء) الحالات الكمية بواسطة أعداد الكم. على سبيل المثال، عندما يكون مهتر بلانك في الحالة الكمية  $n = 1$ ، فإن طاقته هي  $E_1 = hf$ ، وعندما يكون في الحالة الكمية  $n = 2$ ، تكون طاقته  $E_2 = 2hf$ ؛ وعندما يكون في الحالة الكمية  $n = 3$ ، فإن  $E_3 = 3hf$ ؛ وهكذا...

تظهر **المعادلة 6.9** أن هناك عدداً لا نهائياً من حالات الكم، والتي يمكن تمثيلها كسلسلة:

$\{hf, 2hf, 3hf, \dots, (n-1)hf, nhf, (n+1)hf, \dots\}$ . يتم فصل كل حالتين كميتين متتاليتين في هذا التسلسل بفجوة طاقة،  $\Delta E = hf$ . يمكن للمهتر الموجود في الجدار أن يكتسب طاقة من الإشعاع في التجويف (الامتصاص)، أو أن يعطي طاقة للإشعاع الموجود في التجويف (الإصدار). تنقل عملية الامتصاص المهتر إلى حالة كمية أعلى، وتنقل عملية الإصدار المهتر إلى حالة كمية أخفض. أياً كانت طريقة تبادل الطاقة، فإن أصغر كمية من الطاقة يمكن تبادلها هي  $hf$ . لا يوجد حد أقصى لمقدار الطاقة الذي يمكن تبادلها،

ولكن كل ما يتم تبادله يجب أن يكون عدداً صحيحاً من مضاعفات الكم الطاقوي  $hf$ . إذا لم يكن لحزمة الطاقة هذه الكمية بالضبط، فلن يتم امتصاصها أو إصدارها من جدار الجسم الأسود.

### فرضية الكم لبلاانك

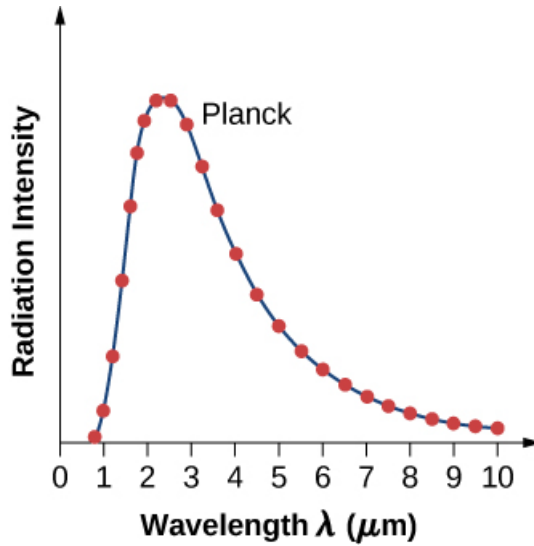
تنص فرضية بلاانك حول الكم الطاقوي على أن كمية الطاقة الصادرة من المهتز يحملها كم الإشعاع  $\Delta E$ :

$$\Delta E = hf$$

يرتبط تردد الإشعاع الكهروضويسي يرتبط بطول الموجة وسرعة الضوء بالعلاقة الأساسية التالية  $f\lambda = c$ . هذا يعني أنه يمكننا التعبير عن **المعادلة 6.10** بشكل مكافئ بدلالة الطول الموجي  $\lambda$ . عند تضمينها في حساب شدة الطاقة في الجسم الأسود، فإن فرضية بلاانك تعطي العلاقة النظرية التالية لشدة الاستطاعة للإشعاع الصادر بوحدة الطول الموجي:

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda k_B T} - 1} \quad (6.11)$$

حيث:  $c$  هي سرعة الضوء في الفراغ و  $k_B$  هو ثابت بولتزمان،  $k_B = 1.380 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ . تُسمى الصيغة النظرية المعبر عنها في **المعادلة 6.11** بقانون بلاانك لإشعاع الجسم الأسود. يتوافق هذا القانون مع منحنى إشعاع الجسم الأسود التجريبي (انظر **الشكل 7.6**). بالإضافة إلى ذلك، يمكن اشتقاق قانون فين للانزياح وقانون ستيفان من **المعادلة 6.11**. لاشتقاق قانون فين للانزياح، نستخدم الحساب التفاضلي لإيجاد الحد الأقصى لمنحنى شدة الإشعاع  $I(\lambda, T)$ . أما الاشتقاق قانون ستيفان وإيجاد قيمة ثابت ستيفان - بولتزمان، فنستخدم الحساب التكاملية ونكامل  $I(\lambda, T)$  لإيجاد القدرة الكلية التي يشعها الجسم الأسود عند درجة حرارة معينة في كامل طيف الأطوال الموجية من  $\lambda = 0$  إلى  $\lambda = \infty$ . يُترك هذا الاشتقاق كتدريب لاحق في هذا الفصل.



**الشكل 7.6:** النتيجة النظرية لبلاانك (المنحنى الممثل بالخط المتصل) ومنحنى إشعاع الجسم الأسود التجريبي (الممثل بالنقاط).

### مثال 3.6

#### مهتز بلاانك الكوانتي (الكمي)

يبلغ تردد المهتز الكوانتي في جدار التجويف المبين في **الشكل 2.6** نحو  $5.0 \times 10^{14} \text{ Hz}$ . احسب الفرق الطاقوي بين سويات الطاقة.



### خطة الحل:

تُعطى حالات الطاقة لمهتز كوانتي **بالمعادلة 6.9**، ونحصل على الفرق الطاقى  $\Delta E$  من خلال إيجاد فرق الطاقة بين حالتين كميتين متجاورتين  $n$  و  $n + 1$ .


### الحل:

يمكننا تعويض التردد المعطى وثابت بلانك مباشرة في المعادلة:

$$\Delta E = E_{n+1} - E_n = (n+1)hf - nhf = hf = (6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})(5.0 \times 10^{14} \text{ Hz}) = 3.3 \times 10^{-19} \text{ J}$$

### ملاحظة:

لاحظ أننا لا نحدد نوع المواد المستخدمة في بناء التجويف، ذلك أن المهتز الكوانتي هو نموذج نظري لذرة ما أو جزيء من مادة الجدار.

 **4.6 تحقق من فهمك:** يهتز جزيء بتردد  $5.0 \times 10^{14} \text{ Hz}$ . ما هو أصغر فرق طاقي بين السويات الطاقية الاهتزازية؟

### مثال 4.6

#### تطبيق نظرية الكم على مهتز كلاسيكي

تهتز كتلة مقدارها  $1.0 \text{ kg}$  في نهاية نابض، ثابتته  $1000 \text{ N/m}$ . ومطال هذه الاهتزازات هو  $0.10 \text{ m}$ . استخدم مفهوم التكميم لإيجاد الفرق الطاقى لهذا المهتز الكلاسيكي. هل تكميم الطاقة مهم للأنظمة الماكروسكوبية (الجهرية)، كما في هذا المهتز؟

### خطة الحل:

نستخدم **المعادلة 6.10** كما لو كان النابض مهتزاً كمومياً، ولكن مع تردد  $f$  في نهاية هذا النابض. لتقويم فيما إذا كان التكميم له تأثير كبير أم لا، نقارن الفرق الطاقى الكوانتي (الكمومي) مع الطاقة الكلية الماكروسكوبية لهذا المهتز الكلاسيكي.

### الحل:

من أجل قيمة ثابت النابض،  $k = 1.0 \times 10^3 \text{ N/m}$ ، فإن التردد  $f$  للكتلة،  $m = 1.0 \text{ kg}$ ، هو:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1.0 \times 10^3 \text{ N/m}}{1.0 \text{ kg}}} \approx 5.0 \text{ Hz}$$

إن الطاقة الكمية (الكمومية) التي توافق هذا التردد هي:

$$\Delta E = hf = (6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})(5.0 \text{ Hz}) = 3.3 \times 10^{-33} \text{ J}$$

عندما يكون مطال الاهتزاز  $A = 0.10 \text{ m}$ ، تكون طاقة الاهتزاز:

$$E = \frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2}(1000 \text{ N/m})(0.1 \text{ m})^2 = 5.0 \text{ J}$$

### ملاحظة:

وبالتالي، بالنسبة للمهتز الكلاسيكي، لدينا  $\Delta E/E \approx 10^{-34}$ . نلاحظ أن الفرق الطاقى بين السويات الطاقية صغير جداً. لذلك، لجميع الأغراض العملية، تأخذ طاقة المهتز الكلاسيكي قيماً مستمرة. هذا هو السبب في أنه يمكن تطبيق المبادئ الكلاسيكية على الأنظمة الماكروسكوبية التي تصادفنا في الحياة اليومية دون فقدان الدقة.

 **5.6 تحقق من فهمك:** هل ستكون النتيجة في **المثال 4.6** مختلفة إذا لم تكن الكتلة  $1.0 \text{ kg}$ ، وإنما كتلة صغيرة قدرها  $1.0 \mu\text{g}$ ، وكان مطال الاهتزاز  $0.10 \mu\text{m}$ ؟

عندما نشر بلانك نتيجته لأول مرة، لم يأخذ مجتمع الفيزياء فرضية تكميم الطاقة على محمل الجد كونه لم يتبع أي نظرية فيزيائية راسخة في ذلك الوقت. كان ينظر إليها، حتى من قبل بلانك نفسه، على أنها خدعة رياضية مفيدة أدت إلى "ملاءمة" نظرية للمنحنى التجريبي. تم تغيير هذا التصور في عام 1905 عندما نشر أينشتاين شرحه للمفعول الكهروضوئي، الذي أعطى فيه تكميم الطاقة لبلانك معنى جديداً: أي جسيم من الضوء.

## 2.6 | المفعول الكهروضوئي Photoelectric Effect

### الأهداف التعليمية

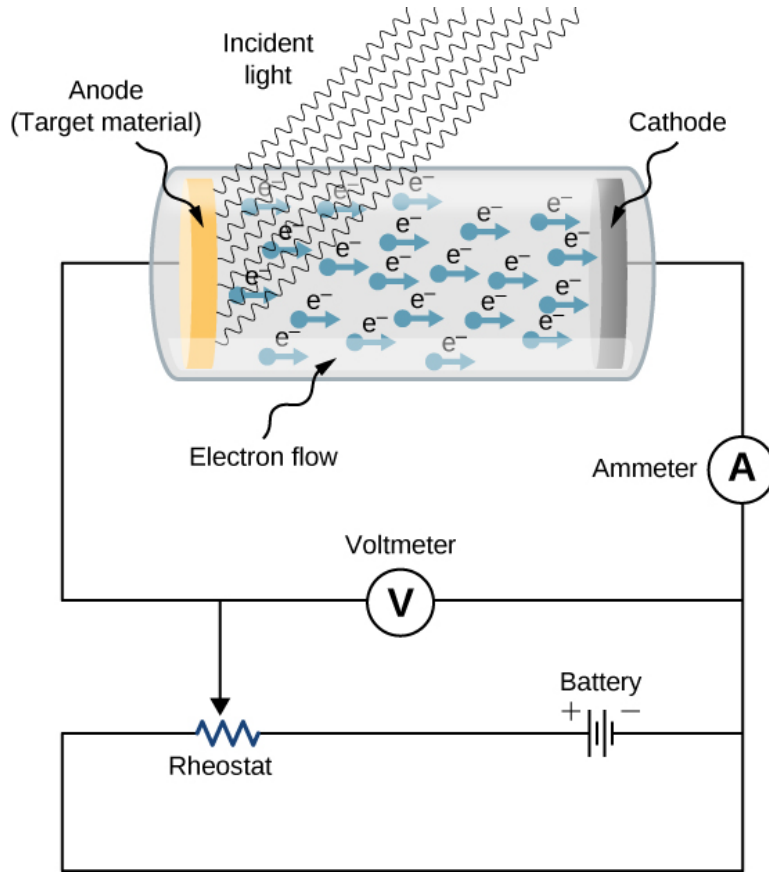
في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- وصف الخصائص الفيزيائية للمفعول الكهروضوئي.
- شرح لماذا لا يمكن تفسير المفعول الكهروضوئي بواسطة الفيزياء الكلاسيكية.
- وصف كيف أن فكرة أينشتاين عن جسيم الإشعاع تفسر المفعول الكهروضوئي.

عندما يتعرض سطح معدن لموجة كهرومغناطيسية أحادية اللون ذات طول موجي قصير بما فيه الكفاية، يتم امتصاص موجة الإشعاع الوارد وتنبعث إلكترونات من سطح المعدن المعرض للإشعاع. تُعرف هذه الظاهرة باسم **المفعول الكهروضوئي**. تُسمى الإلكترونات المنبعثة في هذه العملية **بالإلكترونات الضوئية**.

يبين **الشكل 8.6** مخطط دراسة المفعول الكهروضوئي. تُستخدم مادة الهدف كأنود (مصعد)، والتي تصبح مصدراً للإلكترونات الضوئية عندما تتم إضاءته بواسطة إشعاع أحادي اللون. ونسُمي هذا القطب (المادة) **بالقطب الكهروضوئي**. يتم جمع الإلكترونات الضوئية في كاثود (مهبط)، والذي يكون عند كمون أقل مقارنةً بالمصعد. يمكن زيادة أو تقليل فرق الكمون بين هذين القطبين، أو يمكن عكس قطبيته. يتم وضع هذه الأقطاب في أنبوب زجاجي مفرغ من الهواء بحيث لا تفقد الإلكترونات الضوئية طاقتها الحركية عند اصطدامها بجزيئات الهواء في المنطقة بين هذين القطبين.

عندما لا تتعرض مادة الهدف للإشعاع، لا يتم تسجيل أي تيار في هذه الدائرة كونها مفتوحة (لاحظ أن هناك فجوة بين القطبين). ولكن عندما يتم توصيل مادة الهدف بالقطب السالب للبطارية وتعرضها للإشعاع، يتم تسجيل تيار في هذه الدائرة؛ ويسمى **التيار الضوئي**. بفرض أننا الآن قمنا بعكس فرق الكمون بين هذين القطبين، بحيث يتم توصيل مادة الهدف الآن في القطب الموجب للبطارية، ثم نزيد الكمون ببطء. يتخافت التيار الضوئي تدريجياً ويتوقف في النهاية عن المرور تماماً عند قيمة لهذا الكمون العكسي. ويطلق على فرق الكمون، الذي يتوقف عنده التيار الضوئي عن المرور، **بكمون التوقف** (stopping potential).



**الشكل 8.6:** مخطط تجربة دراسة المفعول الكهرضوئي. يتم وضع المصعد والمهبط في أنبوب زجاجي مفرغ من الهواء. يقيس فولتمتر فرق الكمون الكهريائي بين القطبين، ويقاس تيار كهريائي التيار الكهرضوئي. الإشعاع الوارد أحادي اللون.

### خصائص المفعول الكهرضوئي

يحتوي المفعول الكهرضوئي على ثلاث خصائص مهمة لا يمكن تفسيرها وفق مفاهيم الفيزياء الكلاسيكية: (1) غياب التأخر الزمني، (2) استقلالية الطاقة الحركية للإلكترونات الضوئية عن شدة الإشعاع الوارد و (3) وجود تردد القطع (cut-off). دعونا ندرس كل هذه الخصائص.

### غياب التأخر الزمني

عندما يضرب الإشعاع مادة الهدف، تنبعث الإلكترونات منه على الفور، حتى عند شدة منخفضة جداً للإشعاع الوارد. يتناقض غياب التأخر الزمني مع فهمنا المبني على أساس الفيزياء الكلاسيكية، حيث تتوقع الفيزياء الكلاسيكية أنه من أجل إشعاع منخفض الطاقة، سيمضي وقت طويل قبل أن تتمكن الإلكترونات من الحصول على طاقة كافية لمغادرة سطح القطب، ومع ذلك، لم يلاحظ هذا التراكم الطاقوي.

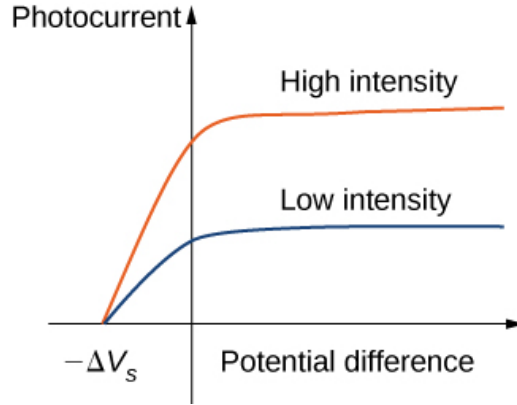
### شدة الإشعاع الوارد والطاقة الحركية للإلكترونات الضوئية

يبين **الشكل 9.6** المنحنيات التحريية النموذجية، لتابعة التيار الكهرضوئي لفرق الكمون المطبق بين القطبين. عندما يكون فرق الكمون موجباً، يتزايد التيار بشكل مطرد حتى يصل إلى قيمة ثابتة (تيار الإشعاع). عند زيادة الكمون فوق هذه القيمة لا يتزايد التيار الضوئي إطلاقاً. تعطي القيم الأعلى لشدة الإشعاع قيماً أعلى للتيار الكهرضوئي. عندما يكون فرق الكمون سالباً، فكلما

زادت القيمة المطلقة لفرق الكمون، انخفضت قيمة التيار الضوئي لتصبح صفرية عند كمون التوقف. من أجل أي شدة للإشعاع الوارد، سواءً كانت الشدة عالية أو منخفضة، فإن قيمة كمون التوقف تبقى دائماً عند القيمة نفسها. لفهم سبب كون هذه النتيجة غير عادية من وجهة نظر الفيزياء الكلاسيكية، يتعين علينا أولاً تحليل طاقة الإلكترونات الضوئية. يملك الإلكترون الضوئي الذي يغادر سطح مادة الهدف طاقة حركية  $K$ . اكتسب هذا الإلكترون طاقته الحركية من الموجة الكهرومغناطيسية الواردة. يتحرك الإلكترون الضوئي بتأثير الكمون الكهربائي ضمن القطبين، وتتغير طاقته بالمقدار  $q\Delta V$ ، حيث  $\Delta V$  فرق الكمون و  $q = -e$ . بسبب عدم وجود أي قوى سوى القوة الكهربائية، فإنه بتطبيق نظرية طاقة العمل، نحصل على توازن الطاقة للإلكترون الضوئي  $\Delta K - e\Delta V = 0$ ، حيث  $\Delta K$  هو التغيير في الطاقة الحركية للإلكترون الضوئي. عندما يتم تطبيق كمون التوقف  $-\Delta V_s$ ، يفقد الإلكترون الضوئي طاقته الحركية الأولية  $K_i$  ويصبح في حالة سكون. وهكذا، يصبح توازن الطاقة  $(0 - K_i) - e(-\Delta V_s) = 0$ ، بحيث أن  $K_i = e\Delta V_s$ . في ظل وجود كمون التوقف، فإن أكبر طاقة حركية  $K_{\max}$  يمكن أن تكون للإلكترون الضوئي هي طاقته الحركية الأولية، والتي يمتلكها على سطح القطب. لذلك، يمكن قياس أكبر طاقة حركية للإلكترونات الضوئية مباشرة عن طريق قياس كمون التوقف:

$$K_{\max} = e\Delta V_s \quad (6.12)$$

يمكننا في هذه المرحلة أن نرى أين تتعارض النظرية الكلاسيكية مع النتائج التجريبية. في النظرية الكلاسيكية، يمتص الإلكترون الضوئي الطاقة الكهرومغناطيسية بشكل مستمر؛ وهذا يعني أنه عندما يكون للإشعاع الساقط شدة عالية، فمن المتوقع أن تكون الطاقة الحركية في **المعادلة 6.12** عالية. وبالمثل، عندما يكون للإشعاع شدة منخفضة، فإنه من المتوقع أن تكون الطاقة الحركية منخفضة. لكن التجربة توضح أن الطاقة الحركية القصوى للإلكترونات الضوئية مستقلة عن شدة الضوء.

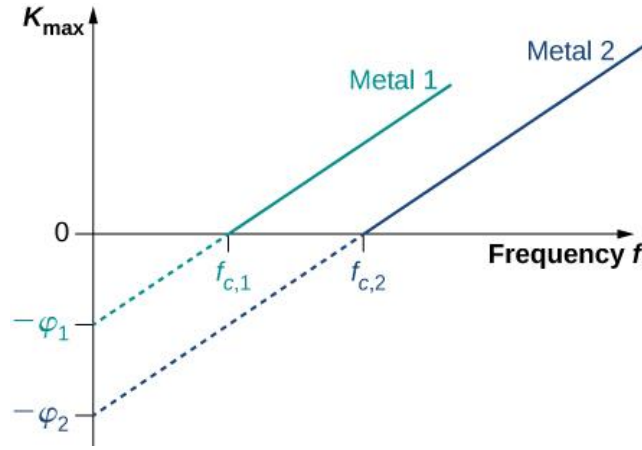


**الشكل 9.6:** تابعة التيار الضوئي لفرق الكمون المطبق. يُلاحظ من هذه التابعية أنه من أجل أي شدة للإشعاع الوارد، سواءً كانت عالية (المنحني العلوي) أو منخفضة (المنحني السفلي)، فإن قيمة كمون التوقف هي نفسها دائماً.

### وجود تردد قطع

بالنسبة لأي سطح معدني، يوجد حد أدنى لتردد الإشعاع الوارد حيث لا يظهر دوّما التيار الضوئي. قيمة هذا التردد (تردد القطع) للمفعول الكهروضوئي هي خاصية فيزيائية للمعدن: حيث تختلف قيمة تردد القطع باختلاف المعدن. تُظهر البيانات التجريبية ميلاً خطياً نموذجياً (انظر **الشكل 10.6**). تنمو الطاقة الحركية للإلكترونات الضوئية على السطح خطياً مع زيادة تردد الإشعاع الوارد. تعطي قياسات جميع الأسطح المعدنية منحنيات خطية بميل واحد. لا تتفق أي من هذه الظواهر الملحوظة مع المفاهيم الكلاسيكية. وفقاً للوصف الكلاسيكي، لا يجب أن تعتمد الطاقة الحركية للإلكترونات الضوئية على تردد الإشعاع الوارد على الإطلاق، ويجب

ألا يكون هناك تردد قطع. بدلاً من ذلك، في الصورة الكلاسيكية، تكتسب الإلكترونات طاقة من الموجة الكهرومغناطيسية بشكل مستمر، وتعتمد كمية الطاقة التي تكتسبها فقط على شدة الضوء الوارد ولا شيء آخر. لذلك، مادام أن الضوء ساطعاً، فإنه من المتوقع أن يستمر المفعول الكهروضوئي.



**الشكل 10.6** تابعة الطاقة الحركية للإلكترونات الضوئية لتردد الإشعاع الوارد. يمكن أن يحدث المفعول الكهروضوئي فقط فوق تردد القطع  $f_c$ . تعطي قياسات جميع الأسطح المعدنية منحنيات خطية لها الميل نفسه. يتميز كل سطح معدني بتردد قطع خاص به.

### تابع العمل

تم شرح المفعول الكهروضوئي في عام 1905 من قبل أينشتاين. فقد استنتج أينشتاين أنه إذا كانت فرضية بلانك حول الكم الطاقوي صحيحة لوصف التبادل الطاقوي بين الإشعاع الكهرومغناطيسي وجدران التجويف، فيجب أن تصلح أيضاً لوصف امتصاص الطاقة من الإشعاع الكهرومغناطيسي بواسطة سطح القطب. وقد افترض أن الموجة الكهرومغناطيسية تحمل طاقتها في حزم منفصلة. تتجاوز افتراضات أينشتاين فرضية بلانك لأنها تنص على أن الضوء نفسه يتكون من كم طاقوي. وبعبارة أخرى، فإنه ينص على أن الأمواج الكهرومغناطيسية مكممة (كوانتية).

في مقارنة أينشتاين، تتكون حزمة الضوء أحادي اللون ذي التردد  $f$  من الفوتونات. الفوتون هو جسيم الضوء. يتحرك كل فوتون بسرعة الضوء ويحمل كم طاقوي مقداره  $E_f$ . تعتمد طاقة الفوتون على تردده  $f$  فقط. ويعبر بشكل صريح عن طاقة الفوتون كمايلي:

$$E_f = hf \quad (6.13)$$

حيث  $h$  هو ثابت بلانك. في المفعول الكهروضوئي، عندما تصل الفوتونات إلى سطح المعدن، فإن كل فوتون يمنح كامل طاقته لإلكترون واحد فقط على سطح المعدن. هذا النقل للطاقة من الفوتون إلى الإلكترون هو من نوع "كل شيء أو لا شيء"، ولا توجد عمليات نقل "كسرية" يفقد فيها الفوتون جزءاً فقط من طاقته ويبقى على قيد الحياة. إن جوهر ظاهرة الكم هو إما أن يعطي الفوتون طاقته بالكامل ويتوقف عن الوجود أو أنه لا يعطي أي شيء على الإطلاق. وهذا يتناقض مع الصورة الكلاسيكية، حيث يُسمح بنقل الطاقة الكسرية. بوجود هذا الفهم الكمي، فإن توازن الطاقة للإلكترون موجود على السطح يستقبل طاقة مقدارها  $E_f$  من فوتون هو:

$$E_f = K_{\max} + \phi$$

حيث  $K_{\max}$  هي الطاقة الحركية، المعطاة في المعادلة 6.12، والتي يمتلكها الإلكترون في اللحظة التي يفصل فيها عن السطح،  $\phi$  هي الطاقة اللازمة لفصل إلكترون ضوئي عن السطح. تُسمى هذه الطاقة  $\phi$  تابع العمل للمعدن. كل معدن له تابع عمل مميز، كما

هو موضح في **الجدول 1.6**. وللحصول على الطاقة الحركية للإلكترونات الضوئية على السطح، نقوم ببساطة بعكس معادلة توازن الطاقة واستخدام **المعادلة 6.13** للتعبير عن طاقة الفوتون الممتص. هذا يعطينا علاقة الطاقة الحركية للإلكترونات الضوئية، والتي تعتمد صراحة على تردد الإشعاع الوارد:

$$K_{\max} = hf - \phi. \quad (6.14)$$

هذه المعادلة لها شكل رياضي بسيط ولكنها عميقة فيزيائياً. ويمكننا الآن توضيح المعنى الفيزيائي **للمعادلة 6.14**.

الجدول 1.6 القيم النموذجية لتابع العمل لبعض المعادن	
$\phi$ (eV)	المعدن
2.46	Na
4.08	Al
4.14	Pb
4.31	Zn
4.50	Fe
4.70	Cu
4.73	Ag
6.35	Pt

في تفسير أينشتاين، تحدث التفاعلات بين إلكترون وفوتون. يعني عدم وجود تأخر زمني أن هذه التفاعلات تحدث بشكل فوري. لا يمكن زيادة زمن هذا التفاعل عن طريق خفض شدة الضوء. توافق شدة الضوء عدد الفوتونات الواردة إلى السطح المعدني خلال واحدة الزمن. حتى عند شدة الإضاءة المنخفضة جداً، يظل المفعول الكهروضوئي يحدث لأن التفاعل يجري بين إلكترون واحد وفوتون واحد. مادام يوجد فوتون واحد على الأقل فيه طاقة كافية لإعطائها إلى إلكترون مرتبط، فإن الإلكترون الضوئي سيظهر على سطح القطب.

تدل **المعادلة 6.14** على وجود تردد القطع  $f_c$  للمفعول الكهروضوئي نظراً لأن الطاقة الحركية  $K_{\max}$  للإلكترون الضوئي يمكن أن تأخذ قيمة إيجابية فقط. وهذا يعني أنه يجب أن يكون هناك تردد عتبة تكون عنده الطاقة الحركية مساوية للصفر،  $0 = hf_c - \phi$  نحصل بهذه الطريقة على علاقة لتردد القطع:

$$f_c = \frac{\phi}{h}. \quad (6.15)$$

يعتمد تردد القطع على تابع عمل المعدن فقط ويتناسب طردياً معه. عندما يكون تابع العمل كبيراً (عندما تكون الإلكترونات مرتبطة بسطح المعدن)، يجب أن تكون عتبة threshold طاقة الفوتون كبيرة لإنتاج الإلكترون الضوئي، وهذا يوافق تردد عتبة كبيرة. تنتج الفوتونات ذات الترددات الأكبر من تردد العتبة  $f_c$  دائماً إلكترونات ضوئية، لأن لديها  $K_{\max} > 0$ . في حين لا تملك الفوتونات ذات الترددات الأصغر من  $f_c$  طاقة كافية لإنتاج الإلكترونات الضوئية. لذلك، عندما يكون تردد الإشعاع الوارد أقل من تردد القطع، لا يلاحظ المفعول الكهروضوئي. ونظراً لأن التردد  $f$  والطول الموجي  $\lambda$  للأمواج الكهرومغناطيسية مرتبطان بالعلاقة الأساسية  $\lambda f = c$  (حيث  $c$  هي سرعة الضوء في الفراغ)، فإن تردد القطع يوافق طول موجة القطع  $\lambda_c$ :

$$\lambda_c = \frac{c}{f_c} = \frac{c}{\phi/h} = \frac{hc}{\phi}. \quad (6.16)$$

في هذه المعادلة،  $hc = 1240 \text{ eV}\cdot\text{nm}$ . يمكن إعادة صياغة ملاحظتنا بالطريقة المكافئة التالية: عندما يكون طول موجة الإشعاع الوارد أكبر من طول موجة القطع، فإن المفعول الكهروضوئي لا يحدث.

## مثال 5.6

### المفعول الكهروضوئي للفضة

يرد إشعاع بطول موجي  $300 \text{ nm}$  على سطح فضي. هل ستتم ملاحظة الإلكترونات الضوئية؟

#### خطة الحل:

لا يمكن إخراج الإلكترونات الضوئية من سطح المعدن إلا عندما يكون طول موجة الإشعاع الوارد أقصر من طول موجة القطع.

تابع عمل الفضة هو  $\phi = 4.73 \text{ eV}$  (الجدول 1.6). ولتقدير ذلك، نستخدم المعادلة 6.16

#### الحل:

طول موجة القطع للمفعول الكهروضوئي في الفضة هو:

$$\lambda_c = \frac{hc}{\phi} = \frac{1240 \text{ eV}\cdot\text{nm}}{4.73 \text{ eV}} = 262 \text{ nm}.$$

طول موجة الإشعاع الوارد هو  $300 \text{ nm}$ ، وهو أطول من طول موجة القطع؛ لذلك، لا يتم ملاحظة الإلكترونات الضوئية.

#### ملاحظة:

إذا تم تصنيع القطب من الصوديوم بدلاً من الفضة، فإن طول موجة القطع سيكون  $504 \text{ nm}$ ، وسيتم ملاحظة الإلكترونات الضوئية. تخبرنا المعادلة 6.14 في نموذج أينشتاين أن الطاقة الحركية القصوى للإلكترونات الضوئية هي تابع خطي لتردد الإشعاع الوارد، وهو موضح في الشكل 6.10. بالنسبة لأي معدن، فإن ميل هذا المنحني له قيمة ثابتة بلانك. ويعطينا التقاطع مع محور  $K_{\max}$  قيمة تابع العمل التي تميز المعدن.

من ناحية أخرى، يمكن قياس  $K_{\max}$  مباشرة في التجربة عن طريق قياس قيمة كمون التوقف  $\Delta V_s$  التي يتوقف عنده التيار الضوئي (انظر المعادلة 6.12). تسمح لنا هذه القياسات المباشرة بتحديد قيمة ثابت بلانك، بالإضافة إلى تعيين تابع العمل للمادة.

يقدم نموذج أينشتاين أيضاً شرحاً مباشراً لقيم التيار الكهروضوئي المبينة في الشكل 9.6. على سبيل المثال، تؤدي مضاعفة شدة الإشعاع إلى مضاعفة عدد الفوتونات التي تسقط على السطح خلال واحدة الزمن. كلما كان عدد الفوتونات أكبر، يكون عدد الإلكترونات الضوئية أكبر، الأمر الذي يؤدي إلى مرور تيار كهروضوئي أكبر في الدائرة. هذه هي الطريقة التي تؤثر بها شدة الإشعاع على التيار الضوئي. يجب أن يصل التيار الكهروضوئي إلى تيار الإشعاع عند قيمة معينة لفرق الكمون المطبق، حيث تتساوى عندها عدد الإلكترونات الضوئية في واحدة الزمن مع عدد الفوتونات الواردة، ولا يعتمد عدد الفوتونات الواردة على فرق الكمون المطبق، ولكن يعتمد على شدة الإشعاع الوارد. ولا يتغير كمون التوقف مع شدة الإشعاع لأن الطاقة الحركية للإلكترونات الضوئية لا تعتمد على شدة الإشعاع (انظر المعادلة 6.14).

## مثال 6.6

### تابع العمل وتردد القطع

عند استخدام ضوء طول موجته  $180 \text{ nm}$  في تجربة على معدن غير معروف، ينخفض التيار الكهروضوئي المقاس إلى الصفر عند فرق كمون  $0.80 \text{ v}$ . حدد تابع عمل المعدن للمفعول الكهروضوئي وتردد القطع.

### خطة الحل:

لإيجاد تردد القطع  $f_c$ ، نستخدم **المعادلة 6.15**، ولكن أولاً يجب أن نحدد قيمة تابع العمل  $\phi$ . لإيجاد  $\phi$ ، نستخدم **المعادلة 6.12** و **المعادلة 6.14**. ينخفض التيار الضوئي إلى الصفر عند كمون التوقف، لذلك نكتب  $\Delta V_s = 0.8V$ .

### الحل:

نستخدم **المعادلة 6.12** لإيجاد الطاقة الحركية للإلكترونات الضوئية:

$$K_{\max} = e \Delta V_s = e (0.80V) = 0.80 \text{ eV}.$$

الآن نحل **المعادلة 6.14** من أجل قيمة  $\phi$ :

$$\phi = hf - K_{\max} = \frac{hc}{\lambda} - K_{\max} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{180 \text{ nm}} - 0.80 \text{ eV} = 6.09 \text{ eV}.$$

أخيراً، نستخدم **المعادلة 6.15** لإيجاد تردد القطع:

$$f_c = \frac{\phi}{h} = \frac{6.09 \text{ eV}}{4.136 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}} = 1.47 \times 10^{15} \text{ Hz}.$$

### ملاحظة:

في العمليات الحسابية كتلك الموضحة في هذا المثال، من الأسهل استخدام ثابت بلانك مقدراًً بوحدة eV·s والتعبير عن جميع الطاقات بوحدة eV بدلاً من الجول.

## مثال 7.6

### طاقة الفوتون والطاقة الحركية للإلكترونات الضوئية

يرد ضوء بنفسجي طول موجته 430 nm على قطب مصنوع من الكالسيوم ذي تابع العمل 2.71 eV. أوجد طاقة الفوتونات الواردة والحد الأقصى للطاقة الحركية للإلكترونات المقتلعة.

### خطة الحل:


طاقة الفوتون الوارد هي  $E_f = hf = hc/\lambda$ ، حيث نستخدم  $f\lambda = c$ . وللحصول على الطاقة القصوى للإلكترونات المقتلعة، نستخدم **المعادلة 6.16**.


### الحل:

$$E_f = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{430 \text{ nm}} = 2.88 \text{ eV}, \quad K_{\max} = E_f - \phi = 2.88 \text{ eV} - 2.71 \text{ eV} = 0.17 \text{ eV}$$

### ملاحظة:

في هذه التجربة، تتوقف الإلكترونات الضوئية عن المرور عند قيمة كمون التوقف البالغ 0.17 V.

 **6.6 تحقق من فهمك:** يرد ضوء أصفر، طول موجته 589nm على سطح ذي تابع عمل 1.20 eV. ما هو كمون التوقف؟ وما هو طول موجة القطع؟

 **7.6 تحقق من فهمك:** تردد القطع للمفعول الكهروضوئي في بعض المواد هو  $8.0 \times 10^{13} \text{ Hz}$ . عندما يكون تردد الضوء الوارد هو  $1.2 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ، ويبلغ كمون التوقف 0.16 V. قم بتقدير قيمة ثابت بلانك من هذه البيانات (مقدراًً بوحدة J·s و eV·s)، وحدد النسبة المئوية للخطأ في تقديرك.



### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- وصف تجربة كومبتون.
- شرح إزاحة طول موجة كومبتون.
- وصف كيف تؤكد تجارب الأشعة السينية الطبيعة الجسيمية للإشعاع.

اثنان من الأفكار المؤثرة لأينشتاين التي قدمت في عام 1905 هما نظرية النسبية الخاصة ومفهوم الكم الضوئي، والذي نسميه الآن بالفوتون. ذهب أينشتاين بعد عام 1905، إلى أبعد من ذلك ليشير إلى أن الموجات الكهرومغناطيسية التي تنتشر بحرية تتألف من فوتونات والتي تمثل جسيمات الضوء بالمعنى نفسه الذي تمثل فيه الإلكترونات الجسيمات الضخمة الأخرى جسيمات المادة. يمكن أن يُنظر إلى شعاع الضوء أحادي اللون ذي الطول الموجي  $\lambda$  (أو التردد المكافئ  $f$ ) إما كموجة كلاسيكية أو كمجموعة من الفوتونات التي تنتقل في الفراغ بسرعة الضوء  $c$ ، ويحمل كل منها الطاقة نفسها  $E_f = hf$ . أثبتت هذه الفكرة أنها مفيدة لتفسير تفاعلات الضوء مع جسيمات المادة.

### عزم الفوتون

على عكس جسيم المادة الذي يتميز بكتلة ساكنة  $m_0$ ، فإن الفوتون عديم الكتلة. وكذلك بخلاف جسيم المادة الذي قد يغير سرعته في الفراغ، ولكن لا يمكن أن يصل إلى سرعة الضوء، فإن الفوتون ينتقل بسرعة واحدة فقط، وهي بالضبط سرعة الضوء. من وجهة نظر الميكانيك الكلاسيكي النيوتوني، تعني هاتان الخاصتان أن الفوتون لا ينبغي أن يوجد على الإطلاق. على سبيل المثال، كيف يمكننا إيجاد العزم الخطي أو الطاقة الحركية لجسم كتلته مساوية للصفر؟ تختفي هذه المفارقة الواضحة إذا وصفنا الفوتون بأنه جسيم نسبي. وفقاً لنظرية النسبية الخاصة، يتبع أي جسيم في الطبيعة لمعادلة الطاقة النسبية التالية:

$$E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4. \quad (6.17)$$

يمكن أيضاً تطبيق هذه العلاقة على الفوتون. في **المعادلة 6.17**، هي الطاقة الكلية للجسيم و  $p$  هو عزمها الخطي، و  $m_0$  هي الكتلة الساكنة. بالنسبة للفوتون، قمنا ببساطة بتعويض القيمة  $m_0 = 0$  في هذه المعادلة. وهذا يؤدي إلى علاقة عزم الفوتون  $P_f$ :

$$p_f = \frac{E_f}{c}. \quad (6.18)$$

هنا طاقة الفوتون  $E_f$  هي طاقة الكم الضوئي نفسه ذي التردد  $f$ ، الذي قدمناه لشرح المفعول الكهروضوئي:

$$E_f = hf = \frac{hc}{\lambda}. \quad (6.19)$$

يمكن أن تطبق العلاقة الموجية، التي تربط التردد  $f$  بطول الموجة  $\lambda$  والسرعة  $c$  أيضاً، على الفوتونات:

$$\lambda f = c \quad (6.20)$$

لذلك، يمكن تمييز الفوتون إما بطاقته وبطول موجته، أو بتردده بعزمه. يمكن دمج **المعادلة 6.19** و **المعادلة 6.20** في علاقة صريحة تربط بين عزم الفوتون وطول موجته:

$$p_f = \frac{h}{\lambda} \quad (6.21)$$

تعطي هذه المعادلة قيمة عزم الفوتون فقط، ولا تحتوي على أي معلومات عن الاتجاه الذي يتحرك فيه الفوتون. ولذلك، لتضمين الاتجاه فإن عزم الفوتون يُكتب كقيمة شعاعية:

$$\vec{p}_f = \hbar \vec{k} \quad (6.22)$$

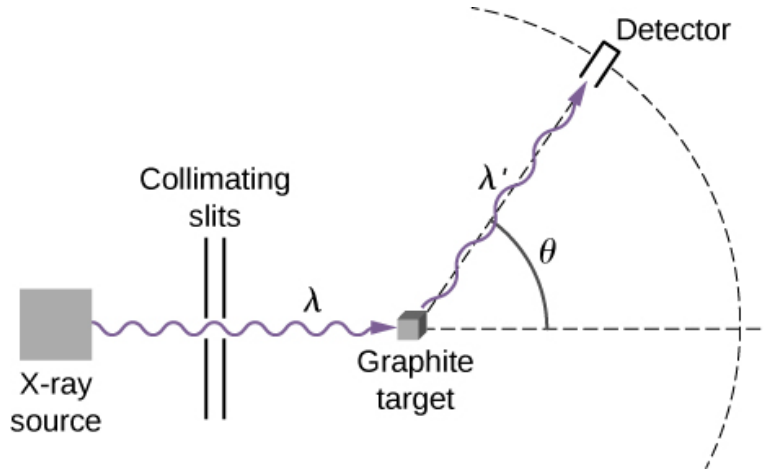
في **المعادلة 6.22**،  $\hbar = h/2\pi$  هو ثابت بلانك المختزل (تلفظ "h-bar")، والذي هو مجرد ثابت بلانك مقسوماً على العامل  $2\pi$ . يسمى الشعاع  $\vec{k}$  "بالشعاع الموجي" أو شعاع الانتشار (الاتجاه الذي يتحرك فيه الفوتون). تُظهر أشعة الانتشار اتجاه شعاع العزم الخطي للفوتون. مطال الشعاع الموجي هو  $k = |\vec{k}| = 2\pi/\lambda$  ويُسمى بالرقم الموجي. لاحظ أن هذه المعادلة لا تقدم أي فيزياء جديدة.

يمكننا التحقق من أن مطال الشعاع في **المعادلة 6.22** هو نفسه الموجود في **المعادلة 6.18**

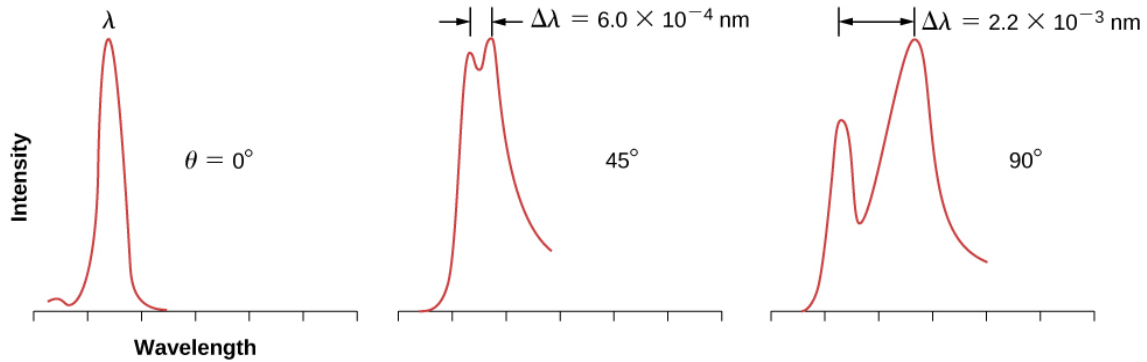
### مفعول كومبتون

مفعول كومبتون هو مصطلح يستخدم لنتيجة غير عادية لوحظت عند تبعثر أشعة X على بعض المواد. من خلال النظرية الكلاسيكية، عندما تبعثر موجة كهرومغناطيسية عن الذرات، فإنه من المتوقع أن يكون الطول الموجي للإشعاع المتبعثر هو نفس الطول الموجي للإشعاع الوارد. وعلى عكس مفاهيم الفيزياء الكلاسيكية، تُظهر الملاحظات أنه عندما تبعثر الأشعة السينية عن بعض المواد، كالغرافيت مثلاً، فإن الأشعة السينية المنتشرة لها أطوال موجية مختلفة عن الطول الموجي للأشعة السينية الواردة. تمت دراسة هذه الظاهرة الكلاسيكية غير القابلة للتفسير بشكل تجريبي من قبل آرثر كومبتون ومعاونيه، وقدم كومبتون شرحه في عام 1923. استخدم كومبتون لشرح الإزاحة في الأطوال الموجية المقاسة في التجربة فكرة أينشتاين الضوء كجسيم. لمفعول كومبتون مكانة مهمة جداً في تاريخ الفيزياء لأنه يدل على أن الإشعاع الكهرومغناطيسي لا يمكن تفسيره باعتباره ظاهرة موجية محضة. أعطى تفسير مفعول كومبتون حجة مقنعة للمجتمع الفيزيائي بأن الموجات الكهرومغناطيسية يمكن أن تتصرف كتيار من الفوتونات، وهو ما وضع مفهوم الفوتون على أرض صلبة.

يظهر مخطط تجربة كومبتون المبينة في **الشكل 6.11** أن فكرة التجربة واضحة ومباشرة: أشعة سينية أحادية اللون طولها الموجي  $\lambda$  ترد على عينة من الغرافيت ("الهدف")، حيث تتفاعل مع الذرات داخل هذه العينة، تظهر فيما بعد كأشعة سينية متبعثرة ذات طول موجي  $\lambda'$ . يمكن للكاشف الموضوع خلف الهدف قياس شدة الإشعاع المتبعثر في أي اتجاه  $\theta$  بالنسبة لاتجاه حزمة الأشعة السينية. زاوية التبعثر  $\theta$  هي الزاوية الكائنة بين اتجاه الحزمة المتبعثرة واتجاه الحزمة الواردة. في هذه التجربة، نعرف الشدة والطول الموجي  $\lambda$  للحزمة (الساقطة) الواردة؛ ومن أجل قيمة معينة لزاوية التبعثر  $\theta$ ، فإننا نقيس شدة موجة الحزمة الصادرة (المتبعثرة) وطولها. يبين **الشكل 12.6** النتائج النموذجية لهذه القياسات، حيث يكون المحور السيني هو الطول الموجي للأشعة السينية المتبعثرة، ويكون محور العينات هو شدة الأشعة السينية المتبعثرة المقاسة عند زوايا تبعثر مختلفة (مشار إليها في الرسوم البيانية). من أجل جميع قيم زوايا التبعثر (باستثناء القيمة  $\theta = 0^\circ$ )، فإننا نقيس ذروتي شدة. توجد قمة واحدة عند الطول الموجي  $\lambda$ ، وهو الطول الموجي للحزمة الواردة. توجد الذروة الأخرى عند طول موجي آخر  $\lambda'$ . البعد بين القمتين هو  $\Delta\lambda$ ، والذي يعتمد على زاوية التبعثر  $\theta$  للحزمة الصادرة (في اتجاه الملاحظة). البعد  $\Delta\lambda$  يُسمى **إزاحة كومبتون**.



**الشكل 11.6** مخطط التجربة لدراسة تبعثر كومبتون (نشئت كومبتون).



**الشكل 12.6** تُظهر البيانات التجريبية تأثير كومبتون للأشعة السينية التي تتبعثر عن الغرافيت عند زوايا مختلفة:

لشدة الحزمة المتبعثرة ذروتان. تظهر إحدى الذروتين عند الطول الموجي للإشعاع الوارد، وتظهر الذروة الثانية عند

الطول الموجي  $\lambda'$ . تعتمد الإزاحة بين القمم  $\Delta\lambda$  على زاوية التبعثر  $\theta$ ، والتي هي الموضع الزاوي للكاشف

في **الشكل 11.6**. يتم رسم البيانات التجريبية في هذا الشكل في وحدات عشوائية، بحيث يعكس ارتفاع المظهر الجانبي شدة الحزمة المتبعثرة فوق الضجيج الخلفي.

### إزاحة كومبتون

كما أوضح كومبتون، فإن تفسير إزاحة كومبتون هو أنه في المادة الهدف (الغرافيت) تكون إلكترونات التكافؤ مرتبطة بشكل غير موثوق في الذرات وتتصرف كإلكترونات حرة. افترض كومبتون أن الأشعة السينية الواردة هي تيار من الفوتونات.

يصطدم الفوتون الوارد من هذا التيار بإلكترون التكافؤ في الغرافيت المستهدف. يعطي الفوتون الوارد أثناء هذا التصادم جزءاً من طاقته وعزمه إلى إلكترون الغرافيت، ويغادر كفوتون متبعثر. يفسر هذا النموذج من الناحية النوعية لماذا يكون للإشعاع المتبعثر طول موجي أكثر من الإشعاع الوارد. وببساطة، يظهر الفوتون الذي فقد بعضاً من طاقته كفوتون بتردد أقل، أي بطول موجة أكبر.

لإظهار أن نموده كان صحيحاً، استخدمه كومبتون لاشتقاق علاقة إزاحة كومبتون. وافترض أن كلاً من الفوتون والإلكترون جسيمان نسبتيان، وأن الاصطدام يتبع مبادئين منطقيين هما: (1) مصونية العزم الخطي و (2) مصونية الطاقة النسبية الكلية.

في الاشتقاق التالي لإزاحة كومبتون، تشير  $E_f$  و  $\vec{p}_f$  إلى طاقة وعزم فوتون وارد بتردد  $f$ ، على التوالي. يصطدم هذا الفوتون بإلكترون نسبي في حالة سكون، مما يعني أنه قبل الاصطدام مباشرة كانت طاقة الإلكترون هي طاقة الكتلة الساكنة  $m_0c^2$ ، ومباشرة بعد الاصطدام، يكون للإلكترون طاقة  $E$  وعزم  $\vec{p}$  وكلاهما يوافق **المعادلة 6.19**. مباشرة بعد الاصطدام، يكون لدى الفوتون الصادر

طاقة  $\vec{E}_f$  وعزم  $\vec{P}_f$  وتردد  $f'$ . اتجاه الفوتون الساقط أفقي من اليسار إلى اليمين، واتجاه الفوتون الخارج عند الزاوية  $\theta$ ، كما هو موضح في الشكل 11.6. زاوية التبعثر  $\theta$  هي الزاوية بين شعاعي العزم  $\vec{p}_f$  و  $\vec{P}_f$ ، ويمكننا كتابة الجداء الشعاعي كمايلي:

$$\vec{p}_f \cdot \vec{P}_f = p_f \vec{p}_f \cos\theta. \quad (6.23)$$

باتباع حجة كومبتون، نفترض أن الفوتون والإلكترون المتصادمين يشكلان جملةً معزولةً. هذا الافتراض صالح للإلكترونات ذات الارتباط الضعيف، والتي يمكن التعامل معها كجسيمات حرة تقريباً. المعادلة الأولى لدينا هي مصونية الطاقة للجملة المكونة من فوتون وإلكترون:

$$E_f + m_0 c^2 = \vec{E}_f + E. \quad (6.24)$$

يعبر الجانب الأيسر من هذه المعادلة عن طاقة الجملة في اللحظة التي تسبق التصادم مباشرة، والجانب الأيمن من المعادلة هو طاقة الجملة في اللحظة التي تلي التصادم مباشرة. المعادلة الثانية هي مصونية العزم الخطي لجملة الفوتون والإلكترون، حيث يكون الإلكترون في حالة سكون في اللحظة التي تسبق التصادم مباشرة:

$$\vec{p}_f = \vec{p}_f + \vec{p}. \quad (6.25)$$

الجانب الأيسر من هذه المعادلة هو عزم الجملة قبل التصادم مباشرة، والجانب الأيمن من المعادلة هو عزم الجملة بعد التصادم مباشرة. الفيزياء الكاملة لتبعثر كومبتون محتواة في هذه المعادلات الثلاثة السابقة - الجزء المتبقي هو الجزء الجبري. في هذه المرحلة، يمكننا الانتقال إلى الصيغة النهائية لإزاحة كومبتون، ولكن من المفيد تسليط الضوء على الخطوات الجبرية الرئيسية التي تؤدي إلى علاقة كومبتون، والتي نقدمها هنا على النحو التالي:

نبدأ بإعادة ترتيب الحدود في المعادلة 6.24 وتربيعها:

$$[(E_f - \vec{E}_f) + m_0 c^2]^2 = E^2.$$

في الخطوة التالية، نقوم بتعويض المعادلة 6.19 من أجل قيم  $E^2$ ، ثم تبسيطها وتقسيم كلا الجانبين على  $c^2$  فنحصل على:

$$(E_f/c - \vec{E}_f/c)^2 + 2m_0 c(E_f/c - \vec{E}_f/c) = p^2.$$

الآن يمكننا استخدام المعادلة 6.21 للتعبير عن هذا الشكل من معادلة الطاقة بدلالة العزم. فنجد:

$$(p_f - \vec{p}_f)^2 + 2m_0 c(p_f - \vec{p}_f) = p^2. \quad (6.26)$$

للتخلص من  $p^2$ ، ننتقل إلى معادلة العزم، المعادلة 6.25، فنعيد ترتيب حدودها ونقوم بتربيعها فنحصل على:

$$\left(\vec{p}_f - \vec{p}_f\right)^2 = p^2 \text{ and } \left(\vec{p}_f - \vec{p}_f\right)^2 = p_f^2 + \vec{p}_f^2 - 2\vec{p}_f \cdot \vec{p}_f.$$

جداء أشعة العزم يعطى بالمعادلة 6.23. عندما نعوض  $p^2$  في المعادلة 6.26، نحصل على معادلة الطاقة التي تحتوي على زاوية التبعثر  $\theta$ :

$$(p_f - \vec{p}_f)^2 + 2m_0 c(p_f - \vec{p}_f) = p_f^2 + \vec{p}_f^2 - 2p_f \vec{p}_f \cos\theta.$$

بتطبيق المزيد من القوانين الجبرية، يمكن تبسيط هذه النتيجة إلى

$$\frac{1}{p_f} - \frac{1}{p_f} = \frac{1}{m_0 c}(1 - \cos\theta). \quad (6.27)$$

تذكر الآن **المعادلة 6.21** واكتب:  $1/\bar{p}_f = \lambda'/h$  و  $1/p_f = \lambda/h$ . عندما يتم تعويض هذه العلاقات في **المعادلة 6.27**، نحصل على علاقة إزاحة كومبتون:

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c}(1 - \cos\theta). \quad (6.28)$$

المعامل  $h/m_0 c$  يسمى **طول موجة كومبتون للإلكترون**:

$$\lambda_c = \frac{h}{m_0 c} = 0.00243 \text{ nm} = 2.43 \text{ pm}. \quad (6.29)$$

بالتعبير عن الإزاحة في طول الموجة كما يلي  $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ ، فإنه يمكن إعادة كتابة النتيجة النهائية على الشكل التالي:

$$\Delta\lambda = \lambda_c(1 - \cos\theta). \quad (6.30)$$

تصف هذه الصيغة لإزاحة كومبتون النتائج التجريبية الموضحة في **الشكل 12.6** بشكل جيد. تتوافق هذه النتيجة النظرية مع بيانات التبعثر المقاسة للموليبدينوم والغرافيت والكالسيت والعديد من المواد الأخرى. يعود وجود الذروة غير المزاحة الموضحة في **الشكل 12.6** إلى تصادم الفوتونات مع الإلكترونات الداخلية المترابطة بإحكام في مادة الهدف. إن الفوتونات التي تصادم مع الإلكترونات الداخلية لذرات الهدف تتصادم في الواقع مع كامل الذرة. في هذه الحالة القصوى، يجب تغيير الكتلة الساكنة في **المعادلة 6.29** إلى الكتلة الساكنة للذرة. هذا النوع من التحول هو أصغر بمقدار القوة الرابعة للمطال من الإزاحة الناجمة عن التصادمات مع الإلكترونات وهو صغير جداً بحيث يمكن إهماله.

تبعثر كومبتون هو مثال على **التبعثر غير المرن**، حيث يكون للإشعاع المتبعثر طول موجة أكبر من الطول الموجي للإشعاع الوارد. يستخدم حالياً مصطلح "تبعثر كومبتون" للتبعثر غير المرن للفوتونات بواسطة الجسيمات المشحونة. في تبعثر كومبتون، يتم التعامل مع الفوتونات على أنها جسيمات ذات عزم يمكن نقله إلى الجسيمات المشحونة والذي يوفر الخلفية النظرية لتفسير الإزاحة في الطول الموجي المقاس في التجارب؛ وهذا هو الدليل على أن الإشعاع يتكون من فوتونات.

## مثال 8.6

### تبعثر كومبتون

ترد أشعة السينية طول موجتها 71 pm على هدف من الكالسيت. أوجد الطول الموجي للأشعة السينية المتبعثرة عند زاوية 30 درجة. ما هي أكبر إزاحة يمكن توقعها في هذه التجربة؟

### خطة الحل:

لإيجاد الطول الموجي للأشعة السينية المتبعثرة، يجب أولاً إيجاد إزاحة كومبتون لزاوية التبعثر المعطاة  $\theta = 30^\circ$ . نستخدم **المعادلة 6.30**. ثم نضيف هذه الإزاحة إلى الطول الموجي الوارد للحصول على الطول الموجي المتبعثر. تحدث إزاحة كومبتون الكبرى عند الزاوية  $\theta$  حيث يكون  $1 - \cos\theta$  أكبر ما يمكن، وهو ما تحققه الزاوية  $\theta = 180$  درجة.

### الحل:

الإزاحة عند  $\theta = 30^\circ$  هو:

$$\Delta\lambda = \lambda_c(1 - \cos 30^\circ) = 0.134 \lambda_c = (0.134)(2.43) \text{ pm} = 0.325 \text{ pm}.$$

هذا يعطي الطول الموجي المتبعثر:

$$\lambda' = \lambda + \Delta\lambda = (71 + 0.325) \text{ pm} = 71.325 \text{ pm}.$$

وأكبر إزاحة هي:

$$(\Delta\lambda)_{\max} = \lambda_c(1 - \cos 180^\circ) = 2(2.43 \text{ pm}) = 4.86 \text{ pm}.$$

**ملاحظة:**

تم الكشف عن أكبر إزاحة في الطول الموجي للإشعاع المتبعثر، ومع ذلك، فإن معظم فوتونات الحزمة الواردة تمر عبر الهدف ولا يتبعثر سوى جزء صغير من الفوتونات (عادة، أقل من 5٪). لذلك، تتطلب هذه القياسات أجهزة كشف عالية الحساسية .

**8.6 تحقق من فهمك:** ترد أشعة سينية طول موجتها 71 pm على هدف من الكالسيت. أوجد الطول الموجي لهذه الأشعة السينية المتبعثرة عند زاوية 60 درجة. ما هي أصغر إزاحة يمكن توقعها في هذه التجربة؟

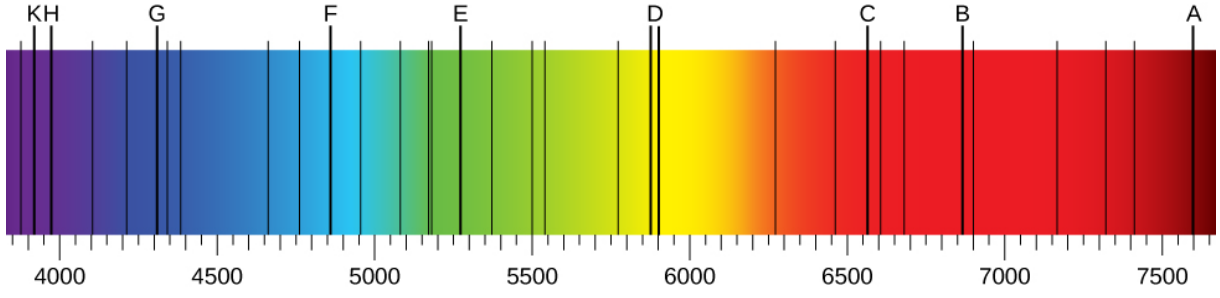
## 4.6 | نموذج بور لذرة الهيدروجين Bohr's Model of the Hydrogen Atom

### الأهداف التعليمية

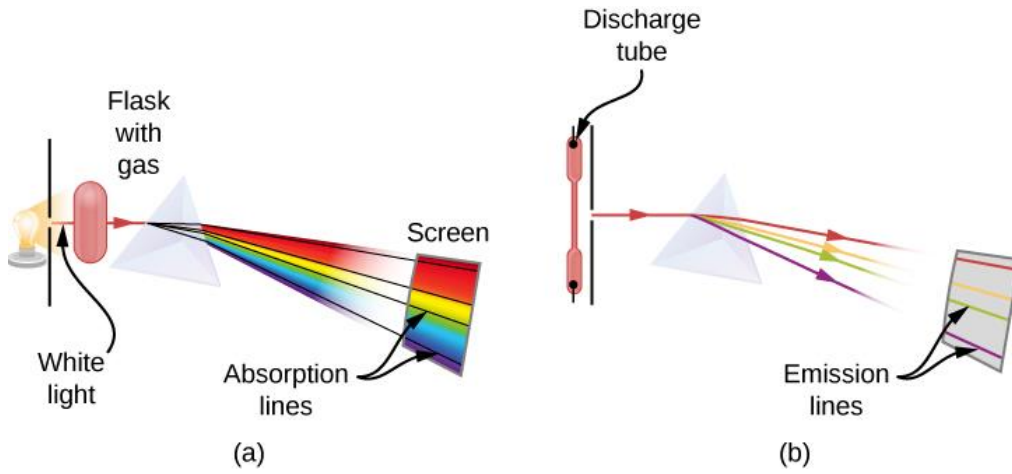
في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- توضيح الفرق بين طيف امتصاص وطيف إصدار الإشعاعات المنبعثة من الذرات.
- وصف تجربة الرقاقة الذهبية لردفورد واكتشاف النواة الذرية.
- شرح البنية الذرية للهيدروجين.
- وصف مسلمات نظرية الكم الأولى لذرة الهيدروجين.
- تلخيص كيف يفسر النموذج الكمي لذرة الهيدروجين الطيف الإشعاعي للهيدروجين الذري.

تاريخياً، نموذج بور لذرة الهيدروجين هو أول نموذج للبنية الذرية يشرح بشكل صحيح أطيف الإشعاع للهيدروجين الذري. يحتل هذا النموذج مكانة خاصة في تاريخ الفيزياء لأنه أدخل نظرية الكم، التي أحدثت تطورات جديدة في الفكر العلمي وتوجت في وقت لاحق بتطوير ميكانيك الكم. لفهم تفاصيل نموذج بور، يجب أن نراجع أولاً اكتشافات القرن التاسع عشر التي أدت إلى صياغته. نلاحظ عندما نستخدم موشور لتحليل الضوء الأبيض القادم من الشمس، ظهور عدة خطوط امتصاص سوداء في الطيف الشمسي (**الشكل 13.6**). تُسمى هذه الخطوط بخطوط **فراونهوفر** تيمناً بجوزيف فون فراونهوفر، الذي قام بقياس أطوال أمواجها بدقة. خلال الفترة 1854-1861، اكتشف كلٌّ من غوستاف كيرشوف وروبرت بونس أنه بالنسبة للعناصر الكيميائية المختلفة، فإن طيف الإصدار الخطي لعنصر ما يطابق طيف امتصاصه الخطي تماماً. يوضح **الشكل 14.6** الفرق بين طيف الامتصاص وطيف الإصدار. يلاحظ طيف الامتصاص عندما يمر ضوء عبر غاز. يظهر هذا الطيف على شكل خطوط سوداء تحدث فقط عند بعض الأطوال الموجية على خلفية الطيف المستمر للضوء الأبيض (**الشكل 13.6**). تجربنا الأطوال الموجية المفقودة عن أطوال الأمواج الإشعاعية التي امتصها الغاز. يلاحظ طيف الإصدار عندما ينبعث الضوء من الغاز. ويظهر هذا الطيف على شكل خطوط ملونة على خلفية سوداء (انظر **الشكل 15.6** و **الشكل 16.6**). تجربنا مواضع خطوط الإصدار عن أطوال أمواج الإشعاع الصادرة من الغاز. لكل عنصر كيميائي طيف إصدار مميز خاص به. بالنسبة لكل عنصر، تكون مواضع خطوط إصداره مطابقة تماماً لمواقع خطوط امتصاصه. هذا يعني أن ذرات عنصر معين تمتص الإشعاع فقط عند أطوال موجية محددة وأن الإشعاع الذي لا يحتوي على هذه الأطوال الموجية لا يمتصه العنصر على الإطلاق. وهذا يعني أيضاً أن الإشعاع المنبعث من ذرات العنصر له نفس أطوال أمواج الإشعاع الذي يمتصه هذا العنصر.



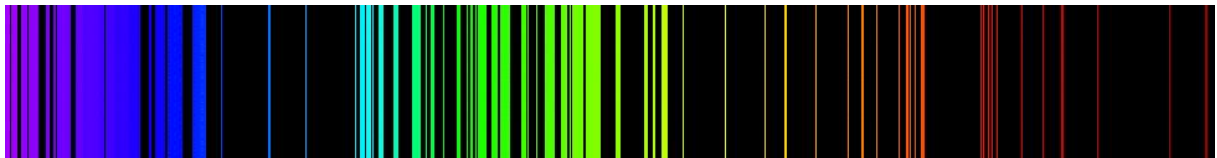
**الشكل 13.6** في طيف الإصدار الشمسي في المجال المرئي من 380 nm إلى 710 nm ، تلاحظ خطوط فراونهوفر كخطوط سوداء عمودية في مواضع طيفية محددة في الطيف المستمر. تلاحظ الأدوات الحديثة عالية الحساسية الآلاف من مثل هذه الخطوط.



**الشكل 14.6** مراقبة الأطياف الخطية: (a) مخطط تجربة مراقبة خطوط الامتصاص؛ (b) مخطط تجربة مراقبة خطوط الإصدار. (a) يمر الضوء الأبيض عبر غاز بارد موجود في قارورة زجاجية. يستخدم مشور لفصل الأطوال الموجية لهذا الضوء. يلاحظ في طيف هذا الضوء بعض الأطوال الموجية المفقودة، والتي تعد خطوط امتصاص سوداء في الطيف المستمر للضوء. (b) أنبوب انفرغ زجاجي له قطبان كهربائيان في نهايته ومملوء بغاز. يضيء هذا الغاز عند تطبيق فرق كمون كبير بين القطبين. ويمرر الضوء الصادر من هذا الغاز عبر المشور الذي يفصل أطواله الموجية. توجد في طيف الضوء الصادر أطوال موجية محددة فقط، والتي تُرى كخطوط إصدار ملونة على شاشة العرض.



**الشكل 15.6** طيف الإصدار للهيدروجين الذري: تعد المواضع الطيفية لخطوط الإصدار مميزة لذرات الهيدروجين.



**الشكل 16.6** طيف الإصدار للحديد الذري: تعد المواضع الطيفية لخطوط الإصدار مميزة لذرات الحديد.

تعد أطياف الإصدار للعناصر معقدة؛ وتصبح أكثر تعقيداً في حالة العناصر ذات الأعداد الذرية الكبيرة. أبسط طيف، كما هو موضح في **الشكل 15.6**، ينتمي إلى ذرة الهيدروجين. يحتوي على أربعة خطوط فقط مرئية للعين البشرية. كما تقرأ من اليمين إلى

اليسار في الشكل 15.6، هذه الخطوط هي: الأحمر (656 nm)، ويُسمى خط H- $\alpha$ ؛ أكوا (المائي) (486 nm)، الأزرق (434 nm) والبنفسجي (410 nm). تظهر الخطوط ذات الأطوال الموجية التي تقل عن 400 nm في الجزء فوق البنفسجي من الطيف (الشكل 15.6، أقصى اليسار) وهي غير مرئية للعين البشرية. وهناك عدد لا حصر له من الخطوط الطيفية غير المرئية في سلسلة الهدروجين.

اكتشف يوهان بالمر في عام 1885 صيغة تجريبية لوصف الأطوال الموجية  $\lambda$  لخطوط إصدار الهدروجين في هذه السلسلة، التي تعرف باسم معادلة بالمر:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (6.31)$$

يُطلق على الثابت  $R_H = 1.09737 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$  اسم ثابت ريديبرغ للهدروجين. يأخذ العدد الصحيح الموجب  $n$  في المعادلة 6.31 القيم 3, 4, 5, 6  $n$  للخطوط الأربعة المرئية في هذه السلسلة. تُسمى سلسلة خطوط الإصدار المعطاة في معادلة بالمر بسلسلة بالمر للهدروجين. توصف خطوط انبعاث الهدروجين الأخرى التي تم اكتشافها في القرن العشرين بمعادلة ريديبرغ، والتي تلخص جميع البيانات التجريبية:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right), \text{ where } n_i = n_f + 1, n_f + 2, n_f + 3, \dots \quad (6.32)$$

عندما يكون  $n_f = 1$ ، تُسمى سلسلة الخطوط الطيفية بسلسلة ليمان. تُسمى السلسلة بسلسلة بالمر عندما يكون  $n_f = 2$ ، وتتقاطع في هذه الحالة معادلة ريديبرغ مع معادلة بالمر. وعندما يكون  $n_f = 3$ ، تُسمى السلسلة بسلسلة باشن. عندما يكون  $n_f = 4$ ، تُسمى السلسلة بسلسلة براكيت. عندما يكون  $n_f = 5$ ، تُسمى السلسلة بسلسلة بيغند. وعند القيمة  $n_f = 6$ ، يكون لدينا سلسلة همفريز. كما قد تظن، فإن هناك عدداً لانهاياً من هذه الحزم الطيفية في طيف الهدروجين لأن  $n_f$  يمكن أن يكون أي عدد صحيح موجباً.

تعطي معادلة ريديبرغ للهدروجين المواضيع الدقيقة للخطوط الطيفية كما تمت ملاحظتها في المختبر؛ ومع ذلك، في بداية القرن العشرين، لم يستطع أحد تفسير سبب نجاحها بشكل جيد. وظلت معادلة ريديبرغ بلا تفسير حتى تم تقديم أول نموذج ناجح لذرة الهدروجين في عام 1913.

## مثال 9.6

### حدود سلسلة بالمر

احسب أكبر وأقصر طول موجي في سلسلة بالمر.

### خطة الحل:

يمكننا استخدام إما معادلة بالمر أو معادلة ريديبرغ. يتم الحصول على أكبر طول موجي عندما يكون  $1/n_i$  أكبر ما يكون، وهو عندما يكون  $n_i = n_f + 1 = 3$ ، لأن  $n_f = 2$  لسلسلة بالمر. يتم الحصول على أقصر طول موجي عندما يكون  $1/n_i$  أصغر ما يكون، أي  $1/n_i \rightarrow 0$  عندما يكون  $n_i \rightarrow \infty$ .

### الحل:

حد الموجة الطويلة:




$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right) = (1.09737 \times 10^7) \frac{1}{\text{m}} \left( \frac{1}{4} - \frac{1}{9} \right) \Rightarrow \lambda = 656.3 \text{ nm}$$

حد الموجة القصيرة:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{2^2} - 0 \right) = (1.09737 \times 10^7) \frac{1}{\text{m}} \left( \frac{1}{4} \right) \Rightarrow \lambda = 364.6 \text{ nm}$$

### ملاحظة:

لاحظ أن هناك العديد من الخطوط الطيفية التي لا حصر لها بين هذين الحديد.

**9.6 تحقق من فهمك:** ما هي حدود سلسلة ليمان؟ هل تستطيع رؤية هذه الخطوط الطيفية؟ 

إن فهم البنية الذرية هو مفتاح فك لغز الأطياف الذرية. لقد عرف العلماء منذ زمن طويل أن المادة مكونة من ذرات. وفقاً لعلم القرن التاسع عشر، فإن هذه الذرات هي أصغر كميات مادية غير قابلة للتجزئة. لقد تحطم هذا الاعتقاد العلمي من خلال سلسلة من التجارب الرائدة التي أثبتت وجود جسيمات دون الذرية، كالإلكترونات والبروتونات والنيوترونات.

تم اكتشاف الإلكترون وعُرف بأنه أصغر كمية للشحنة الكهربائية من قبل طومسون في عام 1897 في تجاربه حول الأشعة المهبطية، والمعروفة أيضاً باسم تجارب أشعة  $\beta$ : إن شعاع  $\beta$  هو شعاع من الإلكترونات. قدّم طومسون في عام 1904، النموذج الأول للبنية الذرية، والمعروف باسم نموذج "بودينغ الخوخ" plum pudding، حيث تتكون الذرة من مادة مبهولة موجبة الشحنة مع إلكترونات سالبة متضمنة فيها كما هو حال الخوخ في البودينغ. نحو عام 1900، قام كلٌّ من رذرفورد وبول فيلارد، كل على حدة، بتصنيف جميع الأشعة المعروفة في ذلك الوقت كأشعة  $\alpha$ ، وأشعة  $\beta$ ، وأشعة  $\gamma$  (أشعة  $\gamma$  هي حزمة من الفوتونات عالية الطاقة). في عام 1907، استخدم رذرفورد وتوماس رويدز طرائق التحليل الطيفي لإظهار أن الجسيمات المشحونة إيجابياً من أشعة  $\alpha$  (والتي تُسمى جسيمات  $\alpha$ ) هي في الواقع ذرات هليوم ثنائية التأين. في عام 1909، استخدم كل من رذرفورد وإرنست مارسدن وهانس جيجر جسيمات ألفا في تجربتهم حول التبعثر الشهيرة التي دحضت نموذج طومسون (شاهد **العزم الخطي والتصادمات في الرابط**

**التالي:** <http://cnx.org/content/m58317/latest/>

في تجربة رذرفورد للرقاقة الذهبية (المعروفة أيضاً باسم تجربة جيجر - مارسدن)، تم إسقاط جسيمات ألفا على رقاقة ذهبية وتبعثرت الجسيمات بواسطة ذرات الذهب الموجودة داخل هذه الرقاقة (شاهد أنواع **التصادمات في الرابط التالي:** <http://cnx.org/content/m58317/latest/>). تم الكشف عن الجسيمات الصادرة بواسطة شاشة وميضية محيطة بالهدف الذهبي بزوايا 360 درجة (للحصول على وصف تفصيلي لهذه التجربة، أنظر **العزم الخطي والتصادمات في الرابط التالي** <http://cnx.org/content/m58317/latest/>). يلاحظ عند اصطدام الجسيم المتبعثر بالشاشة حدوث وميض صغير من الضوء في الموقع. من تعداد هذه الومضات الملاحظ عند زوايا مختلفة بالنسبة لاتجاه الشعاع الوارد، يمكن للعلماء تحديد الجزء المتبعثر من الجسيمات الواردة والجزء الذي لم ينحرف على الإطلاق. لو كان نموذج طومسون للذرة صحيحاً، لما كان هناك أي جسيمات ألفا متبعثرة. ومع ذلك، فقد أظهرت نتائج تجربة رذرفورد أنه على الرغم من أن جزءاً كبيراً من جسيمات ألفا المنطلقة من الرقائق لم تتبعثر على الإطلاق كما لو أن الرقاقة لم تكن في طريقها، إلا أن جزءاً كبيراً من جسيمات ألفا كان قد تبعثر عائداً باتجاه المصدر. كان هذا النوع من النتائج ممكناً فقط في حال كون معظم الكتلة وكامل الشحنة الإيجابية لذرة الذهب مركزة في مساحة صغيرة داخل هذه الذرة.

اقترح رذرفورد في عام 1911 نموذجاً نووياً للذرة. في هذا النموذج احتوت الذرة على نواة موجبة الشحنة ذات حجم صغير، تقريباً أشبه بنقطة، ولكنها تضمنت كامل كتلة الذرة تقريباً. وتحتوي هذه الذرة أيضاً على إلكترونات سالبة كانت موجودة داخلها ولكنها

بعيدة نسبياً عن نواتها. بعد عشر سنوات، قام رذرفورد باقتراح اسم البروتون لنواة الهيدروجين واسم النوترون لجسيم افتراضي محايد كهربائياً يعدل ربط البروتونات الإيجابية في النواة (اكتشف النوترون في عام 1932 من قبل جيمس شادويك). يُعزى لرذرفورد الفضل في اكتشاف النواة الذرية، ومع ذلك، فإن نموذج رذرفورد للبنية الذرية لا يفسر معادلة ريديبيرغ لخطوط انبعاث الهيدروجين.

**نموذج بور لذرة الهيدروجين**، الذي اقترحه نيلز بور في عام 1913، كان أول نموذج كمي يفسر بشكل صحيح طيف انبعاث الهيدروجين. يجمع نموذج بور بين الميكانيك الكلاسيكي لحركة الكواكب مع المفهوم الكمي للفوتونات. بمجرد أن قام رذرفورد بإثبات وجود نواة الذرة، أصبح حدس بور بأن الإلكترون السالب في ذرة الهيدروجين يجب أن يدور حول هذه النواة الموجبة نتيجة منطقية لمقلوب مربع المسافة لقانون الجذب الكهربائي. تذكر أن قانون كولوم الذي يصف الجاذبية بين شحنتين متعاكستين له شكل مشابه لقانون الجاذبية العام لنيوتن بمعنى أن قوة الجاذبية والقوة الكهروستاتيكية تتناقضان بمقدار  $1/r^2$ ، حيث  $r$  هي المسافة الفاصلة بين الأجسام. بنفس الطريقة التي تدور بها الأرض حول الشمس، يمكن أن يدور الإلكترون السالب في ذرة الهيدروجين حول نواتها الموجبة. ومع ذلك، فإن الشحنة المتسارعة تشع طاقتها. كلاسيكياً، إذا تحرك الإلكترون حول النواة بطريقة كوكبية، فسيخضع لتسارع مركزي، وبالتالي سيصدر طاقة. لن تكون ذرة الهيدروجين الكوكبية هذه مستقرة، وهو ما يتعارض مع ما نعرفه عن ذرات الهيدروجين العادية التي لا تتحلل. وبالإضافة إلى ذلك، فإن الحركة الكلاسيكية للإلكترون غير قادرة على تفسير طيف الإصدار المنفصل للهيدروجين.

للتغلب على هاتين الصعوبتين، اقترح بور الافتراضات الثلاث التالية لنموذجه:

1. يتحرك الإلكترون السالب حول النواة الموجبة (البروتون) في مدار دائري. تتركز جميع مدارات الإلكترونات في النواة. ليست جميع المدارات الممكنة من الناحية الكلاسيكية متاحة للإلكترون المرتبط بالنواة.
2. تحقق مدارات الإلكترونات المتاحة شرط التكميم الأول: في مدار  $n$ ، فإن العزم الزاوي للإلكترون  $L_n$  يمكن أن يأخذ قيمة منفصلة فقط:

$$L_n = n\hbar, \text{ where } n = 1, 2, 3, \dots \quad (6.33)$$

ينص هذا الافتراض على أن العزم الزاوي للإلكترون مكتمل. يُرمز لنصف قطر المدار  $n$  بالرمز  $r_n$  و سرعة الإلكترون فيه بالرمز  $v_n$ ، ويمكن التعبير عن شرط التكميم الأول بشكل صريح كما يلي:

$$m_e v_n r_n = n\hbar. \quad (6.34)$$

3. يُسمح للإلكترون بالانتقال من أي مدار حيث تكون طاقته  $E_n$  إلى مدار آخر حيث طاقته هي  $E_m$ . عندما تمتص الذرة فوتوناً، ينتقل الإلكترون إلى مدار ذي طاقة أعلى. عندما تصدر الذرة فوتوناً، ينتقل الإلكترون إلى مدار ذي طاقة أقل. تحدث انتقالات الإلكترون عند امتصاص أو إصدار الفوتون بشكل فوري. تحقق انتقالات الإلكترون المسموح بها شرط التكميم الثاني:

$$hf = |E_n - E_m| \quad (6.35)$$

حيث  $hf$  هي طاقة الفوتون الصادر (أو الممتص) بتردد  $f$ . ينص شرط التكميم الثاني على أن تغير طاقة الإلكترون في ذرة الهيدروجين مكتمل.

تُمكن هذه الافتراضات الثلاثة لنظرية الكم لذرة الهيدروجين ليس فقط باستنتاج معادلة ريديبيرغ، بل تحديد قيمة ثابت ريديبيرغ أيضاً وغيرها من الخصائص المهمة لذرة الهيدروجين كالسويات الطاقية، وطاقة التأين وأبعاد مدارات الإلكترونات. لاحظ أنه في نموذج بور، إلى جانب اثنين من افتراضات التكميم غير الكلاسيكية، لدينا أيضاً الوصف الكلاسيكي للإلكترون باعتباره جسيماً يخضع لقوة

كولون، ويجب أن تلتزم حركته بقوانين نيوتن للحركة. يجب أن تحقق ذرة الهدروجين، كنظام معزول، قوانين مصونية الطاقة والعزم بالطريقة التي نعرفها من الفيزياء الكلاسيكية. مع وضع هذا الإطار النظري في الحسبان، نحن على استعداد للمضي قدماً في تحليلنا.

## مدارات الإلكترون

للحصول على أبعاد  $r_n$  لمدار الإلكترون  $n$  وسرعته  $v_n$ ، تنتقل إلى الميكانيك النيوتوني. كما هو الحال في الجسيمات المشحونة، يتعرض الإلكترون لسحب كهروستاتيكي نحو النواة موجبة الشحنة في مركز مداره الدائري. هذا السحب الكهروستاتيكي هو القوة المركزية التي تؤدي إلى تحرك الإلكترون في دائرة حول النواة. لذلك، يتم تحديد قيمة القوة الجاذبية من قيمة القوة الكهروستاتيكية:

$$\frac{m_e v_n^2}{r_n} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_n^2} \quad (6.36)$$

هنا، تشير  $e$  إلى قيمة الشحنة الأولية. الإلكترون السالب والبروتون الموجب لهما نفس قيمة الشحنة،  $|q| = e$ . عندما يتم دمج **المعادلة 6.36** مع شرط التكميم الأول الوارد في **المعادلة 6.34**، يمكننا الحل لتقدير السرعة  $v_n$ ، ونصف القطر  $r_n$ :

$$v_n = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{\hbar} \frac{1}{n} \quad (6.37)$$

$$r_n = 4\pi\epsilon_0 \frac{\hbar^2}{m_e e^2} n^2. \quad (6.38)$$

تبين هذه النتائج أن سرعة الإلكترون، وكذلك نصف قطر مداره، تعتمد فقط على المعامل  $n$  الذي يرمز لرقم المدار حيث جميع الكميات الأخرى في المعادلات السابقة هي ثوابت أساسية. نلاحظ من **المعادلة 6.38** أن أبعاد المدار تنمو وفقاً لمربع العدد  $n$ . هذا يعني أن المدار الثاني أكبر بأربعة أضعاف من المدار الأول، والمدار الثالث تسع أضعاف المدار الأول، وهكذا. كما نرى من **المعادلة 6.37** أن سرعة الإلكترون في المدار تتناقص بازدياد أبعاد المدار. تكون سرعة الإلكترون أكبر ما يكون في مدار بور الأول، من أجل القيمة  $n = 1$ ، وهو المدار الأقرب إلى النواة. ويُسمى نصف قطر مدار بور أول **نصف قطر بور للهدروجين**، ويرمز له بالرمز  $a_0$ . يتم الحصول على قيمته من خلال تعويض القيمة  $n = 1$  في **المعادلة 6.38** كما يلي:

$$a_0 = 4\pi\epsilon_0 \frac{\hbar^2}{m_e e^2} = 5.29 \times 10^{-11} \text{ m} = 0.529 \text{ \AA}. \quad (6.39)$$

يمكن إدخال  $a_0$  في **المعادلة 6.38** للتعبير عن نصف قطر المدار  $n$  بدلالة  $a_0$ :

$$r_n = a_0 n^2. \quad (6.40)$$

تبين هذه النتيجة أن مدارات الإلكترون في ذرة الهدروجين مكممة لأن نصف قطرها المداري يأخذ قيم محددة فقط **بالمعادلة 6.40** كما يلي:  $a, 4a, 9a, 16a, \dots$ ، ولا يسمح بأي قيم أخرى.

## طاقات الإلكترون

الطاقة الكلية لإلكترون  $E_n$  يقع في المدار  $n$  هي مجموع طاقته الحركية  $K_n$  وطاقته الكامنة  $U_n$ . باستخدام **المعادلة 6.37**، نجد أن:

$$K_n = \frac{1}{2} m_e v_n^2 = \frac{1}{32\pi^2 \epsilon_0^2} \frac{m_e e^4}{\hbar^2} \frac{1}{n^2}. \quad (6.41)$$

تذكر أن الطاقة الكامنة للتفاعل بين شحنتين  $q_1$  و  $q_2$  تفصل بينهما مسافة  $r_{12}$  هي  $(1/4\pi\epsilon_0)q_1 q_2 / r_{12}$ . في حالتنا،  $q_1 = +e$  هي شحنة نواة ذرة الهيدروجين (شحنة البروتون)،  $q_2 = -e$  هي شحنة الإلكترون و  $r_{12} = r_n$  هو نصف قطر المدار  $n$ . نستخدم الآن **المعادلة 6.38** لإيجاد الطاقة الكامنة للإلكترون:

$$U_n = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_n} = -\frac{1}{16\pi^2 \epsilon_0^2} \frac{m_e e^4}{\hbar^2} \frac{1}{n^2}. \quad (6.42)$$

الطاقة الكلية للإلكترون هي مجموع **المعادلة 6.41** و **المعادلة 6.42**:

$$E_n = K_n + U_n = -\frac{1}{32\pi^2 \epsilon_0^2} \frac{m_e e^4}{\hbar^2} \frac{1}{n^2}. \quad (6.43)$$

لاحظ أن الطاقة تعتمد فقط على العدد  $n$  لأن الرموز المتبقية في **المعادلة 6.43** هي ثوابت فيزيائية. إن قيمة العامل الثابت  $E_0$  في **المعادلة 6.43** هي:

$$E_0 = \frac{1}{32\pi^2 \epsilon_0^2} \frac{m_e e^4}{\hbar^2} = \frac{1}{8\epsilon_0^2} \frac{m_e e^4}{\hbar^2} = 2.17 \times 10^{-18} \text{ J} = 13.6 \text{ eV}. \quad (6.44)$$

يعد مناسباً التعبير عن طاقة الإلكترون في المدار  $n$  بدلالة هذه الطاقة، كما يلي:

$$E_n = -E_0 \frac{1}{n^2}. \quad (6.45)$$

الآن يمكننا أن نرى أن طاقة الإلكترون في ذرة الهيدروجين مكممة لها قيم منفصلة فقط، وتعطى **بالمعادلة 6.45** كما يلي:  $(-E_0, -E_0/4, -E_0/9, -E_0/16, \dots)$  ولا يسمح بأي قيم أخرى لطاقته. تُسمى هذه المجموعة من طاقات الإلكترون المسموح بها **بالطيف الطاقى للهيدروجين (الشكل 17.6)**. يُطلق على العدد  $n$  الذي يرمز لرقم سويات الطاقة في نموذج بور **بالرقم الكمي الطاقى**. نُعرّف طاقة الإلكترون داخل ذرة الهيدروجين بطاقة ذرة الهيدروجين. لاحظ أنه يتم الحصول على أصغر قيمة للطاقة عند القيمة  $n = 1$ ، لذلك لا يمكن أن تحتوي ذرة الهيدروجين على طاقة أقل من ذلك. تُسمى هذه القيمة الأصغر لطاقة الإلكترون في ذرة الهيدروجين **بطاقة الحالة الأساسية لذرة الهيدروجين** وقيمتها هي:

$$E_1 = -E_0 = -13.6 \text{ eV}. \quad (6.46)$$

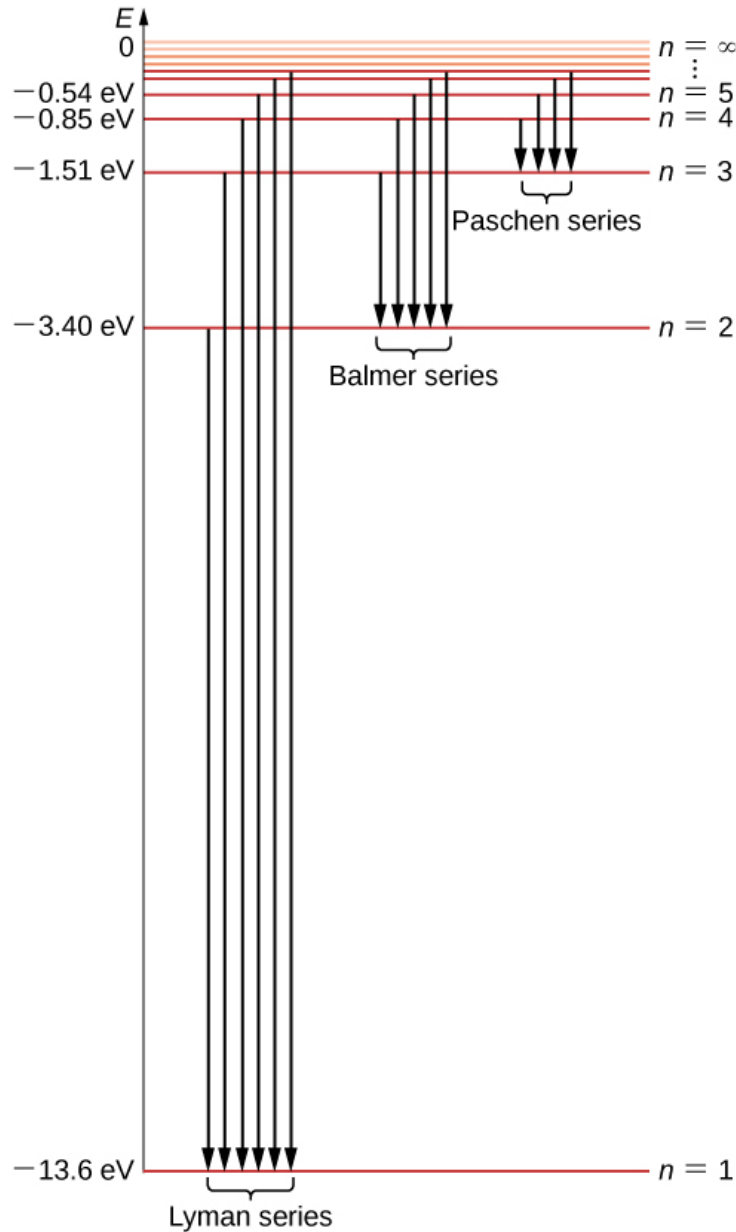
قد يكون لذرة الهيدروجين طاقات أخرى أعلى من الحالة الأساسية. تُعرف هذه الحالات ذات الطاقة الأعلى بحالات **الطاقة المثارة لذرة الهيدروجين**.

لا يوجد سوى حالة أساسية واحدة، ولكن هناك العديد من الحالات المثارة غير المحدودة، لأن هناك عدداً لا حصر له لقيم العدد  $n$  في **المعادلة 6.45**. نقول إن الإلكترون في "الحالة المثارة الأولى" عندما تكون طاقته  $E_2$  (أي عندما تكون  $n=2$ )، والحالة الثانية المثارة عندما تكون طاقته  $E_3$  (عندما يكون  $n=3$ )، وبشكل عام، في الحالة المثارة  $n$  عندما تكون طاقته  $E_{n+1}$ . لا توجد حالة مثارة أعلى من الجميع؛ ومع ذلك، هناك حد لتسلسل الحالات المثارة. إذا واصلنا زيادة  $n$  في **المعادلة 6.45**، فسنجد أن الحد هو  $\lim_{n \rightarrow \infty} E_0/n^2 = 0$ . في هذا الحد، لم يعد الإلكترون مرتبطاً بالنواة ولكنه أصبح إلكترونًا حرًا. يبقى الإلكترون مقيداً في ذرة الهيدروجين مادامت طاقته سالبة. الإلكترون الذي يدور حول النواة في مدار بور الأول، الأقرب إلى النواة، هو في الحالة الأساسية، حيث طاقته تأخذ أصغر قيمة لها. يكون الإلكترون في الحالة الأساسية، مرتبطاً بقوة بالنواة وتُعطى طاقته باستخدام **المعادلة 6.46**.

إذا كنا نريد إزالة هذا الإلكترون من الذرة، يجب علينا تزويده بما يكفي من الطاقة،  $E_\infty$ ، لتحقيق التوازن في طاقة حالته الأساسية  $E_1$ :

$$E_\infty + E_1 = 0 \Rightarrow E_\infty = -E_1 = -(-E_0) = E_0 = 13.6 \text{ eV}. \quad (6.47)$$

تُسمى الطاقة اللازمة لإزالة إلكترون من الذرة **بطاقة التأين**. كما تُسمى طاقة التأين  $E_\infty$  اللازمة لإزالة الإلكترون من مدار بور الأول **بحد التأين لذرة الهيدروجين**. يتوافق حد التأين في **المعادلة 6.47** والذي نحصل عليه في نموذج بور مع القيمة التجريبية.



**الشكل 17.6** مخطط الطيف الطاقى لذرة الهيدروجين. سويات الطاقة (الخطوط الأفقية) تمثل حالات ارتباط الإلكترون في الذرة. يوجد حالة أساسية واحدة فقط،  $n = 1$ ، ولكن هناك عدداً لا حصر له من الحالات المثارة. يتم تعداد الحالات بالرقم الكمي  $n = 1, 2, 3, 4, \dots$ . الخطوط العمودية توضح انتقالات الإلكترون المسموح بها بين الحالات. تشير الأسهم إلى الانتقالات مع إصدار فوتون طوله الموجي متناسب مع الفرق الطاقى بين السويات الطاقية.

## خطوط الانبعاث الطيفية للهروجين

للحصول على الأطوال الموجية للإشعاعات الصادرة عندما ينتقل الإلكترون من المدار  $n$  إلى المدار  $m$ ، نستخدم شرط التكميم الثاني لبور **والمعادلة 6.45**. لا يمكن أن يحدث إصدار للطاقة من الذرة إلا عندما ينتقل إلكترون من حالة مثارة إلى حالة ذات طاقة أقل. في سياق هذا الانتقال، يحمل الفوتون الصادر معه الفرق الطاقي بين الحالتين المشاركتين في الانتقال. ولا يمكن أن يحدث الانتقال في الاتجاه الآخر لأن طاقة الفوتون لا يمكن أن تكون سالبة، أي يجب لحدوث الإصدار أن يكون:  $E_n > E_m$  و  $n > m$ . لذلك، فإن الافتراض الثالث لبور يعطينا:

$$hf = |E_n - E_m| = E_n - E_m = -E_0 \frac{1}{n^2} + E_0 \frac{1}{m^2} = E_0 \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (6.48)$$

الآن نعبر عن طاقة الفوتون بدلالة طول موجته،  $hf = hc/\lambda$ ، ونقسّم طرفي **المعادلة 6.48** على  $hc$ . فتكون النتيجة هي:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{E_0}{hc} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (6.49)$$

قيمة الثابت في هذه المعادلة هي:

$$\frac{E_0}{hc} = \frac{13.6 \text{ eV}}{(4.136 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s})(2.997 \times 10^8 \text{ m/s})} = 1.097 \times 10^7 \frac{1}{\text{m}}. \quad (6.50)$$

هذه القيمة هي ثابت ريديبرغ بالضبط في معادلة ريديبرغ (**المعادلة 6.32**) في الحقيقة تتطابق **المعادلة 6.49** مع معادلة ريديبرغ، لأنه من أجل قيمة معطاة للعدد  $m$ ، يكون لدينا  $n = m + 1, m + 2, \dots$ . بهذه الطريقة، يسمح نموذج بور الكمي لذرة الهروجين باستنتاج ثابت ريديبرغ التجريبي من المبادئ الأولى والتعبير عنه بدلالة الثوابت الأساسية. يوضح **الشكل 6.17** انتقالات الإلكترون بين المدارات المسموح بها.

يمكننا تكرار الخطوات نفسها، التي أدت إلى **المعادلة 6.49** للحصول على الطول الموجي للإشعاع الممتص؛ مما يعطينا **المعادلة 6.49** أيضاً، ولكن هذه المرة لمواضع خطوط الامتصاص في طيف الامتصاص للهروجين. والفرق الوحيد هو أنه في حالة الامتصاص، يكون رقم الكم  $m$  هو رقم المدار المشغول من قبل الإلكترون قبل الانتقال (المدار ذو الطاقة الأقل) ورقم الكم  $n$  هو رقم المدار الذي ينتقل إليه الإلكترون (المدار ذو الطاقة الأعلى). يساوي الفرق بين طاقتي الإلكترون في هذين المدارين، طاقة الفوتون الممتص.

## مثال 10.6

### حجم وطاقة التآين لذرة الهروجين في حالة الإثارة

إذا كانت ذرة الهروجين في الحالة الأساسية تمتص فوتوناً طول موجته  $93.7 \text{ nm}$ ، وهو ما يتوافق مع خط الانتقال في سلسلة ليمان، كيف يؤثر ذلك على طاقة هذه الذرة وأبعادها؟ ما هو مقدار الطاقة اللازمة لتآين هذه الذرة عندما تكون في هذه الحالة المثارة؟ اكتب إجابتك بوحدات مطلقة، ومنسوبة إلى الحالة الأساسية.

### خطة الحل:

قبل الامتصاص، كانت الذرة في حالتها الأساسية. وهذا يعني أن انتقال الإلكترون سيحدث من مداره إلى مدار آخر أعلى  $n$ . أولاً، يجب علينا أن نحدد  $n$  لطول الموجة الممتصة.  $\lambda = 93.7 \text{ nm}$  بعد ذلك، يمكننا استخدام **المعادلة 6.45** لإيجاد طاقة الحالة المثارة  $E_n$  وطاقة التآين  $E_{\infty, n}$ ، واستخدام **المعادلة 6.40** لإيجاد نصف قطر الذرة  $r_n$  في الحالة المثارة. لتقدير  $n$ ، نستخدم **المعادلة 6.49**.

### الحل:

نعوض قيمة  $m = 1$  و  $\lambda = 93.7 \text{ nm}$  في **المعادلة 6.49** ونحل من أجل قيمة  $n$ . يجب ألا تتوقع الحصول على إجابة صحيحة كاملة بسبب أخطاء التقريب يمكنك تقدير  $n$  من خلال أخذ الجزء الصحيح من إجابتك:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right) \Rightarrow n = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{\lambda R_H}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{(93.7 \times 10^{-9} \text{ m})(1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1})}}} = 6.07 \Rightarrow n = 6.$$

نصف قطر المدار  $n = 6$  هو:

$$r_n = a_0 n^2 = a_0 6^2 = 36a_0 = 36(0.529 \times 10^{-10} \text{ m}) = 19.04 \times 10^{-10} \text{ m} \cong 19.0 \text{ \AA}.$$

وهكذا، فإنه بعد امتصاص الفوتون ذي الطول الموجي  $93.7 \text{ nm}$ ، تكون أبعاد ذرة الهيدروجين في الحالة المثارة، حيث  $n = 6$  أكبر بنحو 36 مرة مما كانت عليه قبل الامتصاص، أي عندما كانت الذرة في الحالة الأساسية. طاقة الحالة المثارة الخامسة ( $n = 6$ ) هي:


$$E_n = -\frac{E_0}{n^2} = -\frac{E_0}{6^2} = -\frac{E_0}{36} = -\frac{13.6 \text{ eV}}{36} \cong -0.378 \text{ eV}.$$

بعد امتصاص الفوتون ذي الطول الموجي  $93.7 \text{ nm}$ ، تكون طاقة ذرة الهيدروجين أكبر مما كانت عليه قبل الامتصاص. يتطلب تأين الذرة عندما تكون في الحالة الخامسة المثارة ( $n = 6$ ) طاقة أقل بنحو 36 مرة مما هو مطلوب عندما تكون الذرة في الحالة الأساسية:

$$E_{\infty, 6} = -E_6 = -(-0.378 \text{ eV}) = 0.378 \text{ eV}.$$

### ملاحظة:

يمكننا تحليل أي خط طيفي في طيف الهيدروجين بالطريقة نفسها. وبالتالي، فإن القياسات التجريبية للخطوط الطيفية تعطينا معلومات حول البنية الذرية للهيدروجين.

 **10.6 تحقق من فهمك:** عندما يكون الإلكترون الموجود في ذرة الهيدروجين في الحالة المثارة الأولى، فما هو التنبؤ الذي يقدمه نموذج بور بشأن سرعته المدارية وطاقته الحركية؟ ما هو مقدار العزم الزاوي المداري؟

يتنبأ نموذج بور لذرة الهيدروجين بأطياف بعض الأيونات الشبيهة بالهيدروجين بشكل صحيح. الأيونات الشبيهة بالهيدروجين هي ذرات العناصر ذات العدد الذري  $Z$  الأكبر من الواحد ( $Z = 1$  للهيدروجين) ولكن مع إزالة جميع الإلكترونات باستثناء واحد. على سبيل المثال، العدد الذري لذرة الهليوم المعتدلة كهربائياً  $Z = 2$ . هذا يعني أن لديها إلكترونين يدوران حول نواتها بشحنة  $+Ze$ . عندما تتم إزالة أحد هذين الإلكترونين من ذرة الهليوم (تأين ذرة الهليوم بشكل منفرد)، فإن ما يبقى هو بنية ذرية شبيهة بالهيدروجين حيث يدور الإلكترون المتبقي حول النواة بشحنة  $+Ze$ . يوصف هذا النوع من الحالات من خلال نموذج بور. على افتراض أن شحنة النواة ليست  $+e$  بل  $+Z$ ، عندئذ يمكننا تكرار جميع الخطوات، بدءاً من **المعادلة 6.36**، للحصول على نتائج أيون يشبه الهيدروجين:

$$r_n = \frac{a_0 n^2}{Z} \quad (6.51)$$

حيث  $a_0$  هو مدار بور للهيدروجين، و:

$$E_n = -Z^2 E_0 \frac{1}{n^2} \quad (6.52)$$

حيث  $E_0$  هو حد التأين لذرة الهيدروجين. تعد هذه المعادلات تقريباً جيداً مادام الرقم الذري  $Z$  ليس كبيراً جداً. نموذج بور مهم لأنه كان أول نموذج يفترض تكميم مدارات الإلكترون في الذرات. وبالتالي، فإنه يمثل نظرية الكم الأولى التي أعطت بداية لتطوير نظرية الكم الحديثة. وأدخلت مفهوم رقم الكم لوصف للحالات الذرية. إن محدودية نظرية الكم الأولى هي أنه لا يمكن وصف الذرات التي يكون فيها عدد الإلكترونات التي تدور حول النواة أكبر من واحد. نموذج بور للهيدروجين هو نموذج شبه كلاسيكي لأنه يجمع بين المفهوم الكلاسيكي لمدارات الإلكترون مع المفهوم الجديد للتكميم. دفع النجاح الملحوظ لهذا النموذج العديد من علماء الفيزياء إلى البحث عن تفسير لماذا يجب أن يعمل هذا النموذج بشكل مطلق، وإلى السعي لفهم الفيزياء الكامنة وراء افتراضات نظرية الكم الأولى. أدى هذا البحث إلى ظهور مفهوم جديد تماماً وهو "أمواج المادة".

## 5.6 | أمواج دي برولي De Broglie's Matter Waves

### الأهداف التعليمية

- في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:
- وصف فرضية دي برولي للأمواج المادة.
  - توضيح كيف تعطي فرضية دي برولي الأساس المنطقي لتقدير العزم الزاوي في نظرية الكم لبور لذرة الهيدروجين.
  - وصف تجربة ديفيسون - جيرمر.
  - تفسير فكرة دي برولي عن أمواج المادة وكيفية حسابها لظواهر حيود الإلكترون.

أثبتت صيغة كومبتون أن الموجة الكهرومغناطيسية يمكن أن تتصرف كجسيم من الضوء عند التفاعل مع المادة. في عام 1924، اقترح لويس دي برولي فرضية تكهنات جديدة مفادها أن الإلكترونات وجسيمات المادة الأخرى يمكن أن تتصرف كأمواج. تُعرف هذه الفكرة اليوم بفرضية أمواج المادة لدي برولي. في عام 1926، أدت فرضية دي برولي مع نظرية الكم الأولى لبور إلى تطوير نظرية جديدة هي ميكانيك الكم الموجي لوصف فيزياء الذرات والجسيمات دون الذرية. وقد مهدت ميكانيك الكم الطريق للاختراعات والتقنيات الهندسية الجديدة، مثل الليزر والتصوير بالرنين المغناطيسي (MRI). أدت هذه التقنيات الجديدة إلى العديد من الاكتشافات في العلوم الأخرى مثل البيولوجيا والكيمياء.

وفقاً لفرضية دي برولي، يجب أن تحقق الفوتونات عديمة الكتلة، وكذلك الجزيئات الضخمة، مجموعة مشتركة من العلاقات التي تربط الطاقة  $E$  بالتردد  $f$ ، والعزم الخطي  $p$  بطول الموجة  $\lambda$ . لقد ناقشنا هذه العلاقات بالنسبة للفوتونات في سياق تأثير كومبتون. وسنذكرهم الآن في سياق أعم. أي جسيم له طاقة وعزم هو موجة دي برولي بتردد  $f$  وطول موجي  $\lambda$ :

$$E = hf \quad (6.53)$$

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (6.54)$$

حيث،  $E$  هي الطاقة النسبية و  $p$  هو عزم الجسيم. يُعبر عن علاقات دي برولي عادةً بدلالة الشعاع  $\vec{k}$ ،  $k = 2\pi/\lambda$  وتردد الموجة  $\omega = 2\pi f$ ، كما نفعل عادة مع الأمواج:

$$E = \hbar\omega \quad (6.55)$$

$$\vec{p} = \hbar \vec{k} \quad (6.56)$$



تخبرنا نظرية الموجة أن الموجة تحمل طاقتها بسرعة المجموعة. بالنسبة لموجات المادة، سرعة المجموعة هذه هي سرعة الجسيم  $u$ . فإذا أخذ بالحسبان أن طاقة الجسيم  $E$  وعزمه  $p$  وطاقته النسبية  $mc^2$  وعزمه النسبي  $mu$ ، وانطلاقاً من علاقات دي بروي فإن أمواج المادة تحقق العلاقة التالية:

$$\lambda f = \frac{\omega}{k} = \frac{E/\hbar}{p/\hbar} = \frac{E}{p} = \frac{mc^2}{mu} = \frac{c^2}{u} = \frac{c}{\beta} \quad (6.57)$$

حيث:  $\beta = u/c$ . وعندما يكون الجسيم عدتم الكتلة فإن  $u = c$  و **المعادلة 6.57** تصبح  $\lambda f = c$ .

## مثال 11.6

### ما هو طول أمواج المادة لدي بروي؟

احسب طول موجة دي بروي في الحالات التالية: (a) كرة سلة وزنها 0.65 kg ويتم إلقاؤها بسرعة 10 m/s، (b) إلكترون غير نسبي طاقته الحركية تبلغ 1.0 eV، (c) إلكترون نسبي طاقته الحركية تبلغ 108 keV.

### خطة الحل:

نستخدم **المعادلة 6.57** لإيجاد طول موجة دي بروي. عندما تتضمن المسألة جسماً غير نسبياً يتحرك بسرعة غير نسبية  $u$ ، كما هو الحال في الطلب (a) عندما يكون  $\beta = u/c \ll 1$ ، فإننا نستخدم العزم غير النسبي  $p$ .

عندما يتعذر استخدام التقريب غير النسبي، كما هو الحال في الطلب (c)، يجب علينا استخدام العزم النسبي حيث تكون طاقة الكتلة الساكنة للجسيم هي  $E_0 = m_0c^2$  و  $\gamma$  هو عامل لورنتز الذي يعطى بالعلاقة  $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$ . تعطى الطاقة الكلية للجسيم  $E$  **بالمعادلة 6.53**، وتقدر الطاقة الحركية من العلاقة:

$K = E - E_0 = (\gamma - 1)E_0$ . عندما تكون الطاقة الحركية معلومة، يمكننا قلب **المعادلة 6.18** لإيجاد العزم  $p = \sqrt{(E^2 - E_0^2)/c^2} = \sqrt{K(K + 2E_0)}/c$  وتعويضه في **المعادلة 6.57** فنحصل على:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{hc}{\sqrt{K(K + 2E_0)}} \quad (6.58)$$

اعتماداً على المسألة المطروحة، فإنه يمكننا في هذه المعادلة استخدام القيم التالية  $hc$ :

$$hc = (6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}) (2.998 \times 10^8 \text{ m/s}) = 1.986 \times 10^{-25} \text{ J} \cdot \text{m} = 1.241 \text{ eV} \cdot \mu\text{m}$$

### الحل:

(a) بالنسبة لكرة السلة، الطاقة الحركية هي:  $K = m_0u^2/2 = (0.65\text{kg})(10\text{m/s})^2/2 = 32.5 \text{ J}$

وطاقة الكتلة الساكنة هي:  $E_0 = m_0c^2 = (0.65\text{kg})(2.998 \times 10^8 \text{ m/s})^2 = 5.84 \times 10^{16} \text{ J}$ .

نلاحظ أن  $K/(K + E_0) \ll 1$  ونستخدم  $p = m_0u = (0.65\text{kg})(10\text{m/s}) = 6.5 \text{ J} \cdot \text{s/m}$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{6.5 \text{ J} \cdot \text{s/m}} = 1.02 \times 10^{-34} \text{ m.}$$

(b) بالنسبة للإلكترون غير النسبي:

$$E_0 = m_0c^2 = (9.109 \times 10^{-31} \text{ kg})(2.998 \times 10^8 \text{ m/s})^2 = 511 \text{ keV}$$

وعندما تكون  $K = 1.0 \text{ eV}$ ، فإن  $K/(K + E_0) = (1/512) \times 10^{-3} \ll 1$ ، ولذلك يمكننا استخدام العلاقة غير النسبية. ومع ذلك، فإنه

من الأسهل هنا استخدام **المعادلة 6.58**

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{hc}{\sqrt{K(K + 2E_0)}} = \frac{1.241 \text{ eV} \cdot \mu\text{m}}{\sqrt{(1.0 \text{ eV})(1.0 \text{ eV} + 2(511 \text{ keV}))}} = 1.23 \text{ nm.}$$


إذا استخدمنا العزم غير النسبي، فسنحصل على النتيجة نفسها لأن القيمة 1 eV أصغر بكثير من الكتلة الساكنة للإلكترون. (c) بالنسبة للإلكترون السريع الذي تبلغ طاقته الحركية  $K = 108 \text{ keV}$ ، لا يمكن إهمال التأثيرات النسبية لأن طاقته الكلية هي:

$$E = K + E_0 = 108 \text{ keV} + 511 \text{ keV} = 619 \text{ keV}$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{hc}{\sqrt{K(K + 2E_0)}} = \frac{1.241 \text{ eV} \cdot \mu\text{m}}{\sqrt{108 \text{ keV}[108 \text{ keV} + 2(511 \text{ keV})]}} = 3.55 \text{ pm.}$$

### ملاحظة:

نرى من هذه التقديرات أن أطوال أمواج دي بروي للأجسام الماكروسكوبية ككرة مثلاً هي صغيرة جداً. لذلك، حتى لو كانت موجودة، فهي غير قابلة للكشف ولا تؤثر على حركة الأجسام الماكروسكوبية.

**11.6 تحقق من فهمك:** ما هو طول موجة دي بروي لبروتون غير نسبي طاقته الحركية تبلغ 1.0 eV؟ 

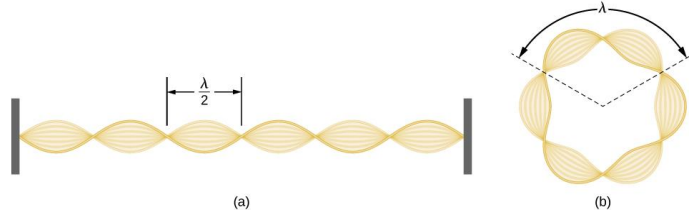
باستخدام مفهوم موجة الإلكترون، قدم دي بروي الأساس المنطقي لتقدير العزم الزاوي للإلكترون في ذرة الهيدروجين، والتي افترضت في نظرية الكم لبور. إن التفسير المادي لشرط التكميم الأول لبور يأتي بشكل طبيعي عندما نفترض أن الإلكترون الموجود في ذرة الهيدروجين لا يتصرف مثل الجسيمات، بل يشبه الموجة. ولرؤية ذلك بوضوح، تخيل وتر جيتار مشدود ومثبت من كلا الطرفين، ويهتز بأحد أوضاعه العادية. إذا كان طول الوتر  $l$  (الشكل 18.6)، فإن أمواج هذه الاهتزازات لا يمكن أن تكون اعتباطية، بل يجب أن تكون عدداً صحيحاً  $k$  من أنصاف الطول الموجي،  $\lambda/2$  تملأ المسافة الفاصلة بين نهايته. إن العلاقة  $l = k\lambda/2$  هي شرط الموجة الساكنة (الراكدة) على الوتر. لنفترض الآن أنه بدلاً من تثبيت الوتر على الجدران، فإننا نقوم بثني طوله على شكل دائرة ونربط نهايته ببعضهما البعض. ينتج عن ذلك وتر دائري يهتز في الأوضاع العادية، ويحقق شرط الموجة الساكنة نفسه، ولكن عدد أنصاف الطول الموجي  $k$  في هذه الحالة يجب أن يكون رقماً زوجياً،  $k = 2n$ ، ويرتبط الطول  $l$  بنصف قطر الدائرة  $r_n$ . وهذا يعني أن نصف القطر ليس عشوائياً، بل يجب أن يحقق شرط الموجة الساكنة التالي:

$$2\pi r_n = 2n\frac{\lambda}{2}. \quad (6.59)$$

إذا تحرك إلكترون في مدار بور  $n$  كموجة، فإنه وباستخدام المعادلة 6.59، يجب أن يكون طوله الموجي  $\lambda = 2\pi r_n/n$ . بفرض أن المعادلة 6.58 صحيحة، فإن موجة الإلكترون التي يكون لها هذا الطول الموجي توافق العزم الخطي للإلكترون، وبالتالي فإن الزخم الزاوي للإلكترون في المدار الدائري يجب أن يكون:

$$L_n = r_n p = r_n \frac{n\hbar}{r_n} = n\hbar. \quad (6.60)$$

هذه المعادلة هي شرط التكميم الأول لبور، والذي يعطى بالمعادلة 6.36. إن تقديم تفسير مادي لشرط التكميم الأول لبور هو حجة نظرية مقنعة لوجود أمواج المادة.



**الشكل 18.6** نمط الموجة الساكنة: (a) وتر مشدود مثبت على الجدر؛ (b) موجة إلكترونية محصورة في مدار بور الثالث في ذرة الهيدروجين.

## مثال 12.6

### موجة الإلكترون في الحالة الأساسية للهيدروجين

أوجد طول موجة دي بروي للإلكترون في الحالة الأساسية للهيدروجين.

#### خطة الحل:

نقوم بجمع شرط التكميم الأول في **المعادلة 6.60** مع **المعادلة 6.36** ونستخدم **المعادلة 6.38** لتقدير نصف قطر بور الأول حيث  $n = 1$ .

#### الحل:

عندما يكون  $n = 1$  و  $r_n = a_0 = 0.529 \text{ \AA}$ ، فإن شرط التكميم الأول لبور يعطي:  $p = \hbar / a_0$ . الطول الموجي للإلكترون هو:

$$\lambda = h / p = h \cdot \hbar / a_0 = 2\pi a_0 = 2\pi(0.529 \text{ \AA}) = 3.324 \text{ \AA}.$$

#### ملاحظة:

يمكن الحصول على نفس النتيجة باستخدام **المعادلة 6.58** مباشرة.

**12.6 تحقق من فهمك:** أوجد طول موجة دي بروي للإلكترون في الحالة المثارة الثالثة للهيدروجين.

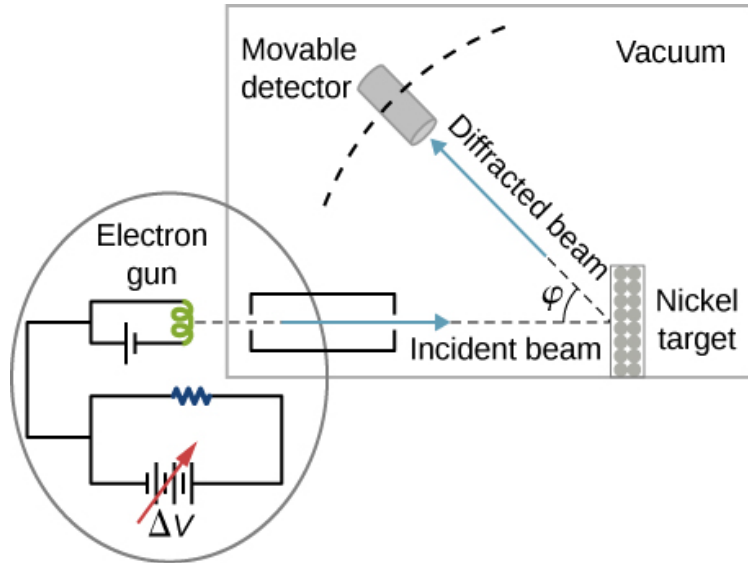
جاء التأكيد التجريبي لأمواد المادة في عام 1927 عندما قام كل من ديفيسون وجيرمر بإجراء سلسلة من تجارب تبعثر الإلكترونات، والتي أظهرت بوضوح أن الإلكترونات لا تتصرف كالأمواد. لم يقم ديفيسون وجيرمر بإعداد تجربتهما لتأكيد فرضية دي بروي: لقد جاء التأكيد كنتيجة ثانوية لدراساتهما التجريبية الروتينية للأسطح المعدنية تحت القذف الإلكتروني.

في تجربة دراسة سطح النيكل والتي قدمت أول دليل على أمواج الإلكترون (والتي تُعرف اليوم باسم **تجربة ديفيسون - جيرمر**). حُضرت عينة النيكل في فرن ذي درجة حرارة عالية لتغيير بنيتها من متعددة التبلور إلى أحادية التبلور لتشغل كامل حجم العينة. **الشكل 19.6** مخطط تجربة إطلاق إلكترونات حرارية من عنصر مُسخن (عادةً ما يكون مصنوعاً من التنغستن) من مدفع إلكتروني، ويتم تسريعها بتطبيق فرق كمون  $\Delta V$ ، لتصبح حزمة مجمعة بشكل جيد من هذه الإلكترونات. يتم ضبط الطاقة الحركية  $K$  لهذه الإلكترونات عن طريق اختيار قيمة فرق الكمون. ينتج عن ذلك حزمة من الإلكترونات ذات قيمة محددة من العزم الخطي، ووفقاً لقانون مصونية الطاقة:

$$e\Delta V = K = \frac{p^2}{2m} \Rightarrow p = \sqrt{2me\Delta V}. \quad (6.61)$$

ترد حزمة الإلكترونات على سطح عينة النيكل بشكل عمودي. تنتشر هذه الحزمة عند سطح العينة في مختلف الاتجاهات. تُقاس شدة الحزمة المتبعثرة في اتجاه محدد  $\theta$  باستخدام كاشف ذي حساسية عالية. يمكن أن يأخذ الموضع الزاوي للكاشف بالنسبة لاتجاه

الحزمة الواردة، القيم من  $\varphi = 0$  درجة إلى  $\varphi = 90$  درجة. يتم وضع كل أدوات التجربة في حجرة مفرغة من الهواء لمنع تصادم الإلكترونات مع جزيئات الهواء، لأن مثل هذه التصادمات الحرارية قد تغير الطاقة الحركية للإلكترونات، وهذا أمر غير مرغوب فيه.



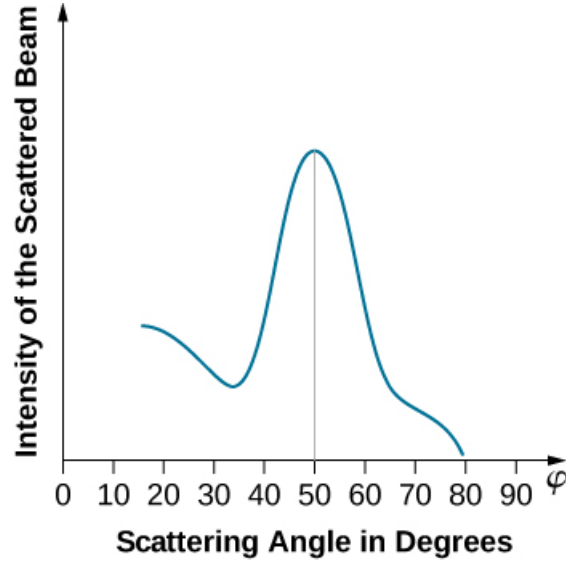
**الشكل 19.6** مخطط تجربة حيود ديفيسون - جيرمر. تتبعثر حزمة الإلكترونات المتوازية بشكل جيد عند عينة النيكل. يتم اختيار الطاقة الحركية للإلكترونات الواردة عن طريق ضبط قيمة فرق الكون المطبق  $\Delta V$ ، في المدفع الإلكتروني. يتم قياس شدة حزمة الإلكترونات المتبعثرة من أجل مجموعة من زوايا التبعثر، في حين أن المسافة بين الكاشف والهدف ثابتة.

عندما تكون بنية هدف النيكل متعددة التبلور، وتحتوي على العديد من البلورات الحبيبية المجهرية ذات التوجه العشوائي، تتبعثر الإلكترونات الواردة على سطحه وفق اتجاهات عشوائية مختلفة. ونتيجة لذلك، فإن شدة حزمة الإلكترونات المتبعثرة هي نفسها في أي اتجاه، وتشبه انعكاس الضوء عن سطح مسامي. ومع ذلك، عندما يكون هدف النيكل ذي البنية البلورية المنتظمة، تظهر شدة حزمة الإلكترونات المتبعثر قمة عظمى عند زاوية محددة، وتظهر النتائج نمط حيود واضح (انظر **الشكل 20.6**). درست أنماط حيود مماثلة بواسطة الأشعة السينية لعدة مواد صلبة بلورية في عام 1912 من قبل عالمي الفيزياء ويليام براغ والأبن. يعطي قانون براغ في التحليل الطوري بحيود الأشعة السينية رابطاً بين الطول الموجي  $\lambda$  للحزمة الواردة على الشبكة البلورية وثابت الشبكة وموضع القمة العظمى للتداخل (انظر فصل **الحيود**).

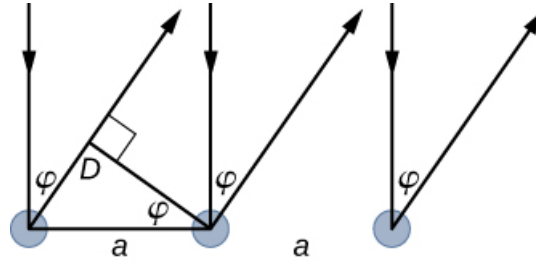
تبين أن ثابت الشبكة البلورية لمادة الهدف في تجربة ديفيسون - جيرمر، يبلغ نحو  $a = 2.15 \text{ \AA}$ . بخلاف التحليل الطوري بحيود الأشعة السينية التي تخترق فيها هذه الأشعة العينة، في تجربة ديفيسون - جيرمر، تتفاعل ذرات سطح النيكل فقط مع حزمة الإلكترونات الواردة. بالنسبة لحيود سطح العينة نلاحظ القيمة الأعظمى لشدة حزمة الإلكترونات المنعكسة عند زوايا التبعثر التي تحقق الشرط  $n\lambda = a \sin \varphi$  (انظر **الشكل 21.6**). تُقاس القيمة العظمى الأولى (عند القيمة  $n = 1$ ) عند زاوية التبعثر  $\varphi \approx 50^\circ$  عند  $\Delta V \approx 54 \text{ V}$ ، مما يعطي الطول الموجي للإشعاع الساقط  $\lambda = (2.15 \text{ \AA}) \sin 50^\circ = 1.64 \text{ \AA}$ . من ناحية أخرى، فإن الكون  $54 \text{ V}$  يُسرع الإلكترونات الواردة لتصل طاقتها الحركية إلى نحو  $K = 54 \text{ eV}$ . يبلغ عزمها المقدر باستخدام **المعادلة 6.61**، نحو  $p = 2.478 \times 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{s/m}$ . عندما نستبدل هذه النتيجة في **المعادلة 6.58**، فإننا نحصل على طول موجة دي بروي كمايلي:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{4.136 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}}{2.478 \times 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{s/m}} = 1.67 \text{ \AA}. \quad (6.62)$$

يتم الحصول على النتيجة نفسها عندما نستخدم  $K = 54 \text{ eV}$  في **المعادلة 6.61**. إن قرب هذه النتيجة النظرية من القيمة التجريبية لديفيسون - جريمير والتي تبلغ  $\lambda = 1.64 \text{ \AA}$  هي حجة مقنعة لوجود أمواج برولي للمادة.



**الشكل 20.6** النتائج التجريبية لحيود الإلكترونات عن سطح هدف من النيكل من أجل قيمة كمون التسريع في مدفع إلكتروني نحو  $\Delta V = 54 \text{ V}$ . تظهر قيمة حزمة التبعثر عند الزاوية  $\varphi = 50^\circ$ .



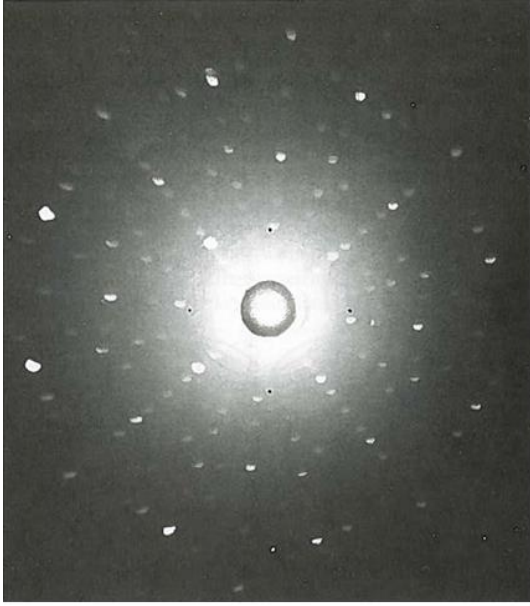
$$D = a \sin \varphi$$

$$D = n \lambda \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

$$n \lambda = a \sin \varphi$$

**الشكل 21.6** في الحبيد السطحي لأمواج كهرومغناطيسية أحادية اللون على بنية بلورية، تنعكس الأشعة الواردة المنقفة بالطور عن ذرات السطح. يقطع الشعاع المنعكس من الذرة اليسرى مسافة إضافية إلى الكاشف هي  $D = a \sin \varphi$  حيث:  $a$  هو ثابت الشبكة البلورية. تبقى الأشعة المنعكسة منقفة بالطور عندما يكون  $D$  عدداً صحيحاً من الطول الموجي  $\lambda$ . تكون شدة الموجة المنعكسة أعظمية عند الزوايا  $\varphi$  التي تحقق الشرط  $n \lambda = a \sin \varphi$ .

تعد خطوط الحبيد باستخدام إلكترونات منخفضة الطاقة، كتلك المستخدمة في تجربة ديفيسون - جريمير، عريضة جداً (انظر **الشكل 20.6**) بسبب تبعثر الإلكترونات الواردة فقط عن سطح الهدف. تتحسن دقة الحبيد بشكل كبير عند تمرير الحزمة الإلكترونية عالية الطاقة عبر رقائق معدنية رقيقة. ويحدث هذا لأن الحبيد يتشكل عن طريق التبعثر عن العديد من السويات البلورية داخل العينة، وتكون قمة الانعراج الناتجة حادة عند زوايا براغ (انظر **الشكل 22.6**).



(a)



(b)

**الشكل 22.6** أنماط الحيود التي تم الحصول عليها في التبعثر عن مادة صلبة بلورية: (a) بالأشعة السينية، و (b) بالإلكترونات. و يعكس نمط الحيود التناظر في البنية البلورية للعينة.

منذ عمل ديفيسون وجيرمر، تم اختبار فرضية دي بروي على نطاق واسع باستخدام العديد من التقنيات التجريبية، وتؤكد وجود موجات دي بروي للعديد من الجسيمات الأولية. استخدمت النترونات في تجارب التبعثر لتحديد البنى البلورية للمواد الصلبة من أنماط التداخل التي تشكلها أمواج المادة النيوترونية. النترون له شحنة صفرية وكتلته تقارن بكتلة البروتون. يمكن عد كل من النترونات والبروتونات أمواجاً مادية. لذلك، فإن خاصية كونها موجة مادية ليست خاصة بالجسيمات المشحونة كهربائياً، ولكنها صحيحة لجميع الجسيمات المتحركة. أمواج المادة لجزيئات كبيرة كالكربون C60 الذي جرى قياسها. جميع الكائنات المادية، صغيرة كانت أم كبيرة، لها موجة مادية مرتبطة بها مادامت تتحرك. جرى تأكيد الطابع العام لأمواج دي بروي للمادة.

### مثال 13.6

#### تبعثر النترون

بفرض استخدام حزمة من النترونات في تجربة الحيود على مادة صلبة بلورية نموذجية. قدر الطاقة الحركية للنترون (مقدرة بوحدة eV) في حزمة النترونات وقارنها مع الطاقة الحركية لغاز مثالي عند حالة التوازن عند درجة حرارة الغرفة.

#### خطة الحل:

نفترض أن ثابت الشبكة البلورية  $a$  يبلغ نحو  $1.0 \text{ \AA}$ . لمشاهدة نمط الحيود على هذه الشبكة، يجب أن يكون طول موجة النترون  $\lambda$  من نفس رتبة أبعاد ثابت الشبكة. نستخدم **المعادلة 6.61** لإيجاد العزم  $p$  والطاقة الحركية  $K$ . للمقارنة بين هذه الطاقة وطاقة الغاز المثالي  $E_T$  في حالة التوازن عند درجة حرارة الغرفة  $T = 300 \text{ K}$ ، نستخدم العلاقة  $K = \frac{3}{2} k_B T$ ، حيث:

$$k_B = 8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K} \text{ هو ثابت بولتزمان.}$$

#### الحل:

نحسب  $pc$  لمقارنتها مع طاقة الكتلة الساكنة للنترون  $E_0 = 940 \text{ MeV}$ :

$$p = \frac{h}{\lambda} \Rightarrow pc = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1.241 \times 10^{-6} \text{ eV} \cdot \text{m}}{10^{-10} \text{ m}} = 12.41 \text{ keV.}$$

نلاحظ أن  $E_0^2 \ll p^2 c^2$  لذلك  $K \ll E_0$  ويمكننا استخدام الطاقة الحركية غير النسبية:

$$K = \frac{p^2}{2m_n} = \frac{h^2}{2\lambda^2 m_n} = \frac{(6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})^2}{(2 \times 10^{-20} \text{ m}^2)(1.66 \times 10^{-27} \text{ kg})} = 1.32 \times 10^{-20} \text{ J} = 82.7 \text{ meV}.$$

الطاقة الحركية للغاز المثالي في حالة التوازن عند 300 K هي:

$$K_T = \frac{3}{2} k_B T = \frac{3}{2} (8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K})(300\text{K}) = 38.8 \text{ meV}$$

نلاحظ أن هذه الطاقات لها المرتبة نفسها من حيث القيمة.

### ملاحظة:

تُسمى النيوترونات ذات الطاقات ضمن هذا المجال، والتي تعد نموذجية للغاز المثالي عند درجة حرارة الغرفة، "بالنيوترونات الحرارية".

## مثال 14.6

### الطول الموجي للبروتون النسبي

يمكن تسريع البروتونات في المصادم الفائق الموجود في CERN، إلى سرعات تصل إلى  $0.75c$ . ما هي أطوال أمواج دي بروي لهذه البروتونات عند هذه السرعة؟ وما هي طاقتها الحركية؟

### خطة الحل:

تبلغ طاقة الكتلة الساكنة للبروتون: هي  $E_0 = m_0 c^2 = (1.672 \times 10^{-27} \text{ kg})(2.998 \times 10^8 \text{ m/s})^2 = 938 \text{ MeV}$ . عندما تكون سرعة البروتون معلومة، فإن  $\beta = 0.75$  و  $\beta\gamma = 0.75/\sqrt{1 - 0.75^2} = 1.714$ . نحصل على الطول الموجي  $\lambda$  والطاقة الحركية  $K$  من العلاقات النسبية.


### الحل:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{hc}{pc} = \frac{hc}{\beta\gamma E_0} = \frac{1.241 \text{ eV}\cdot\mu\text{m}}{1.714(938 \text{ MeV})} = 0.77 \text{ fm}$$

$$K = E_0(\gamma - 1) = 938 \text{ MeV}(1/\sqrt{1 - 0.75^2} - 1) = 480.1 \text{ MeV}$$

### ملاحظة:

لاحظ أنه نظراً لكون البروتون أكبر بنحو 1835 مرة من الإلكترون، فإذا أُجريت هذه التجربة باستخدام الإلكترونات، فإن تعديلاً بسيطاً لهذه النتائج سيمتدنا طولاً موجياً للإلكترون يساوي  $1.4 \text{ pm} = (1835)0.77 \text{ fm}$  وتبلغ طاقته الحركية نحو  $480.1 \text{ MeV}/1835 = 261.6 \text{ keV}$ .

13.6 تحقق من فهمك: أوجد الطول الموجي لدي بروي والطاقة الحركية للإلكترون الحر الذي يسير بسرعة  $0.75c$ . 

### الأهداف التعليمية

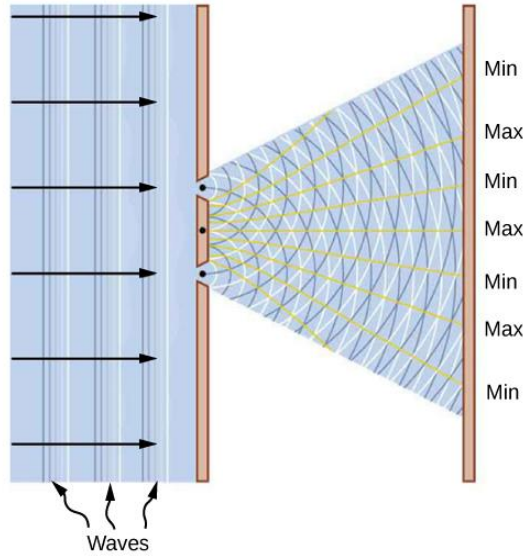
- في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:
- تحديد الظواهر، التي تتصرف فيها الأمواج الكهرطيسية كحزمة من الفوتونات، تتصرف الجسيمات كالأموال.
- وصف المبادئ الفيزيائية للمجهر الإلكتروني.
- تلخيص تطور الفكر العلمي الذي أدى إلى تطوير ميكانيك الكم.

تأتي طاقة الإشعاع الذي يتم التقاطه بواسطة هوائي استقبال الإشارات اللاسلكية كطاقة موجة كهرطيسية. وتأتي طاقة الإشعاع نفسها، الملاحظة من خلال التيار الكهرضوئي في المفعول الكهرضوئي، كطاقة الفوتونات. لذلك، يُطرح السؤال حول طبيعة الإشعاع الكهرطيسي: هل الفوتون موجة أم جسيم؟

قد تُطرح أسئلة مماثلة حول أشكال الطاقة الأخرى المعروفة. على سبيل المثال، يتصرف الإلكترون الذي يشكل جزءاً من التيار الكهرنائي المار في دائرة كجسيم يتحرك بانسجام مع الإلكترونات الأخرى الموجودة داخل هذه الذرة. يتصرف نفس الإلكترون كموجة عندما يمر عبر بنية بلورية صلبة ويشكل طيف الحيود. هل الإلكترون موجة أم جسيم؟ يمكن توسيع السؤال نفسه ليشمل جميع جسيمات المادة - الجسيمات الأولية، وكذلك الجسيمات المركبة - لتساءل عن طبيعتها الفيزيائية الحقيقية. في حالتنا الراهنة من المعرفة، فإن مثل هذه الأسئلة حول الطبيعة الحقيقية للأشياء لا نملك لها إجابات قاطعة. كل ما يمكننا قوله هو أن ازدواجية "موجة - جسيم" موجودة في الطبيعة: في ظل بعض الظروف التجريبية، يتصرف الجسيم كجسيم، وفي ظل ظروف تجريبية مختلفة، يتصرف الجسيم كموجة. وعلى العكس، فإنه في بعض الظروف المادية، يتصرف الإشعاع الكهرطيسي كموجة، وفي ظل ظروف مادية أخرى، يتصرف هنا الإشعاع كحزمة من الفوتونات.

هذا التفسير المثنوي (الازدواجي) ليس مفهوماً فيزيائياً جديداً نشأ عن اكتشافات محددة في القرن العشرين. فقد كان موجوداً بالفعل في مناظرة بين إسحاق نيوتن وكريستيان هيغنز حول طبيعة الضوء، بدءاً من عام 1670. وفقاً لنيوتن، فإن شعاع الضوء هو عبارة عن مجموعة من جسيمات الضوء. ووفقاً لهيغنز، فإن الضوء هو موجة. فشلت الفرضية الجسيمية في عام 1803، عندما أعلن توماس يونغ عن تجربة التداخل المزدوج الشق المزدوج مع الضوء (انظر الشكل 23.6)، التي رسخت مفهوم الضوء كموجة. في نظرية جيمس كليرك ماكسويل للكهرطيسية (والتي اكتملت في عام 1873)، الضوء هو موجة كهرطيسية. نظرة ماكسويل الكلاسيكية للإشعاع كموجة كهرطيسية لا تزال صالحة حتى يومنا هذا؛ ومع ذلك، فإنها غير قادرة على تفسير إشعاع الجسم الأسود والمفعول الكهرضوئي، حيث يعمل الضوء كحزمة من الفوتونات.





**الشكل 23.6** تفسر تجربة "شفا يونغ" تداخل الضوء من خلال مقارنته مع تداخل الأمواج المائية. تتشكل موجتان عند موضعي الشقين في شاشة معتمة. هذه الأمواج لها الطول الموجي نفسه. وتنتقل من الشق إلى شاشة العرض الموضوعة على يمين الشق. تلتقي الأمواج عند شاشة العرض. في المواضع التي تحمل علامة "Max" على الشاشة، تكون الأمواج المتقابلة متفقة بالطور، ويتم تقوية سعة الموجة المركبة. في المواضع التي تحمل علامة "Min"، تكون سعة الموجة المركبة صفراً. بالنسبة للضوء، فإنه يتشكل أهداب مظلمة ومضيئة على شاشة العرض.

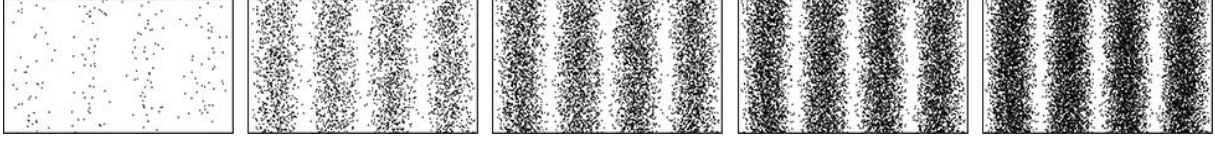
كان هناك انفصام مماثل في تفسير الكهرباء. فمذ ملاحظات بنيامين فرانكلين للكهرباء في عام 1751 حتى اكتشاف طومسون للإلكترون في عام 1897، كان يُنظر إلى التيار الكهربائي على أنه تدفق في وسط كهربائي مستمر. ضمن هذه النظرية الخاصة بالتدفق الكهربائي، تم تطوير النظرية الحالية للدوائر الكهربائية، وتم اكتشاف الكهرطيسية والتحريض الكهرطيسي. أظهرت تجربة طومسون أن وحدة الشحنة الكهربائية السالبة (الإلكترون) يمكنها الانتقال في الفراغ دون أي وسط لحمل الشحنة، كما في الدوائر الكهربائية. وقد غير هذا الاكتشاف الطريقة التي يتم بها فهم الكهرباء اليوم ومنح الإلكترون صفة الجسيم. في نظرية الكم الأولى لذرة الهدروجين لبور، كان كل من الإلكترون والبروتون جسيمات للمادة. وبالمثل، في تشتت كومبتون للأشعة السينية على الإلكترونات، فإن الإلكترون هو جسيم. ولكن من ناحية أخرى، يتصرف الإلكترون كموجة في تجارب التبعثر الإلكتروني على البنية البلورية.

قد يثير أحد المشككين سؤالاً مفاده أن الإلكترون ربما يكون دائماً جسيماً فحسب، وأن أنماط الحيود المتشكلة في تجارب التبعثر الإلكتروني قد يتم تفسيرها من خلال نموذج ميكروسكوبي للبلورة ونموذج ميكروسكوبي للإلكترونات القادمة إليها كسيل من كرات "البينج بونج". في الواقع، للإجابة عن هذا السؤال، لسنا بحاجة إلى نموذج معقد للبلورة، ولكننا نحتاج فقط لزوج من الشقوق البسيطة في شاشة معتمة للإلكترونات. وبعبارة أخرى، لجمع أدلة مقنعة حول طبيعة الإلكترون، نحن بحاجة لتكرار تجربة شقي يونغ مع الإلكترونات. إذا كان الإلكترون عبارة عن موجة، فيجب أن نلاحظ تشكيل أنماط تداخل نموذجية للأمواج، كذلك الموضحة في **الشكل 23.6**، حتى عندما ترد الإلكترونات عبر الشقوق واحداً تلو الآخر. ومع ذلك، إذا لم يكن الإلكترون موجة بل جسيم، فلن تشكل أهداب تداخل.

أثبتت تجربة الشق المزدوج الأولى مع حزمة الإلكترونات، التي أجراها كلاوس جونسون في ألمانيا في عام 1961، أن حزمة الإلكترونات تشكل بالفعل نمط تداخل، مما يعني أن الإلكترونات مجتمعةً تتصرف كموجة. أجريت أول تجارب للشق المزدوج مع إلكترونات منفردة تمر عبر الشقين واحداً تلو الآخر من قبل جوليو بوتزي في عام 1974 في إيطاليا وأكيرا تونومورا في عام 1989 في اليابان.

وقد أظهرنا أن أهداب التداخل تتشكل تدريجياً، حتى عندما تمر الإلكترونات عبر الشقوق بشكل فردي. إن هذا يبين وبشكل قاطع أن طيف حيود الإلكترون قد تشكل بسبب الطبيعة الموجية للإلكترونات. يتم توضيح النتائج التي شوهدت في تجارب الشق المزدوج

مع الإلكترونات من خلال طيوف التداخل المبينة في **الشكل 24.6**



**الشكل 24.6** محاكاة أهداب التداخل بواسطة الكمبيوتر والتي شوهدت في تجربة شقي يونغ مع الإلكترونات. يتم تشكيل نمط واحد تدريجياً على الشاشة، بغض النظر عما إذا كانت الإلكترونات ترد عبر الشقوق كحزمة أو بشكل فردي واحداً تلو الآخر.

## مثال 15.6

### تجربة الشق المزدوج مع الإلكترونات

في إحدى تجارب دراسة أنماط تداخل أمواج الإلكترون، جرى إنشاء اثنين من الشقوق في غشاء سليكوني مطلي بالذهب. بلغ عرض كل من الشقين 62 nm وطوله 4 μm ، وتفصل بين هذين الشقين مسافة قدرها 272 nm. جرى توليد حزمة إلكترونات من مدفع إلكتروني عن طريق تسخين سلك من التنغستن، وسُرعت هذه الحزمة بتطبيق فرق كمون نحو 600 v. جرى بعد ذلك تجميع هذه الحزمة باستخدام عدسات كهربائية، وأرسلت هذه الحزمة عبر الشقين. أوجد الموضع الزاوي للهدب المضيء من المرتبة الأولى على شاشة العرض.

### خطة الحل:

يرتبط الموضع الزاوي  $\theta$  للهدب المضيء من المرتبة  $n$  والذي يتشكل في نمط التداخل شقي يونغ (تمت مناقشته في فصل سابق) بالمسافة الفاصلة بين الشقين  $d$ ، والطول الموجي  $\lambda$ ، للضوء الوارد من خلال المعادلة التالية  $d \sin \theta = n \lambda$ ، حيث:

$n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ . إن المسافة الفاصلة بين الشقين معطاة في نص المسألة وهي  $d = 272 \text{ nm}$ . بالنسبة للهدب الأول، نأخذ  $n = 1$ . الشيء الوحيد الذي نحتاجه الآن هو الطول الموجي لموجة الإلكترون الواردة.

لما كان تسريع الإلكترون من حالة السكون عبر فرق كمون قدره  $\Delta V = 600 \text{ V}$ ، فإن طاقته الحركية هي  $K = e\Delta V = 600 \text{ eV}$ . وطاقة الكتلة الساكنة للإلكترون هي  $E_0 = 511 \text{ keV}$ .

نحسب طول موجة دي برولي له كما هو الحال في الإلكترون غير النسبي لأن طاقته الحركية  $K$  أصغر بكثير من طاقته الساكنة  $E_0$ ،  $K \ll E_0$ .

### الحل:

الطول الموجي للإلكترون هو:


$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m_e K}} = \frac{h}{\sqrt{2E_0/c^2 K}} = \frac{hc}{\sqrt{2E_0 K}} = \frac{1.241 \times 10^{-6} \text{ eV} \cdot \text{m}}{\sqrt{2(511 \text{ keV})(600 \text{ eV})}} = 0.050 \text{ nm}.$$

باستخدام قيمة  $\lambda$  نحصل على موضع الهدب المضيء الأول:

$$\sin \theta = \frac{1 \cdot \lambda}{d} = \frac{0.050 \text{ nm}}{272 \text{ nm}} = 0.000184 \Rightarrow \theta = 0.010^\circ.$$

## ملاحظة:

لاحظ أن هذه القيمة هي أيضا الدقة الزاوية بين هذين مضيئين متتاليين لقيمة تصل إلى نحو  $n = 1000$ . على سبيل المثال، بين الهدب من المرتبة صفر والهدب من المرتبة الأولى، وبين الهدب من المرتبة الأولى و الهدب من المرتبة الثانية، وهكذا.

 **14.6 تحقق من فهمك:** في الحالة الموضحة في **المثال 15.6**، أوجد الموضع الزاوي للهدب المضيء من المرتبة الخامسة على شاشة العرض.

إن الطبيعة الازدواجية "موجة - جسيم" للجسيمات والإشعاع هي تصريح عن عدم قدرتنا على وصف الواقع المادي ضمن نظرية كلاسيكية موحدة حيث لا يمكن للنظرية الجسيمية الكلاسيكية أو النظرية الموجية الكلاسيكية بشكل منفصل أن تفسر الظواهر الملاحظة بشكل كامل. وقد وضع هذا الحد للنظرية الكلاسيكية في عام 1928، وتم وضع الأساس لنظرية إحصائية جديدة، تُسمى ميكانيك الكم (الميكانيك الكوانتي)، من قبل بور وإدوين شرودنجر وفيرنر هايزنبرغ وبول ديراك. تأخذ ميكانيك الكم فكرة دي بروي عن أمواج المادة على أنها الخاصية الأساسية لجميع الجسيمات وتمنحها تفسيراً إحصائياً. ووفقاً لهذا التفسير، فإن الموجة المرتبطة بالجسيم تحمل معلومات حول المواضع المحتملة للجسيم وعن خصائصه الأخرى. يُنظر إلى الجسيم الواحد كحزمة موجية متحركة كتلك الموضحة في **الشكل 25.6**. يمكننا أن نستشعر بشكل حدسي من هذا المثال أنه إذا كانت الجسيمات عبارة عن حزمة موجية، فلن تتمكن من قياس موقعها الدقيق كما هو الحال حين لا يمكننا تحديد موقع حزمة الموجة في وتر الغيتار الذي يهتز. يرتبط عدم اليقين  $\Delta x$  عند قياس موضع الجسيم، بعدم اليقين  $\Delta p$  في القياس المتزامن لعزمها الخطي من خلال مبدأ عدم اليقين (الشكل لهايزنبرغ:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{1}{2} \hbar. \quad (6.63)$$

يعبر مبدأ هايزنبرغ على المستوى الكمي عن قانون الطبيعة بأن إدراكنا محدود. على سبيل المثال، إذا عرفنا الموضع الدقيق لجسيم (والذي يعني أن  $\Delta x = 0$  في **المعادلة 6.63**) فإننا لا نستطيع معرفة عزمه في الوقت نفسه، لأن عدم اليقين في عزمه عندئذ يصبح لانهائياً (لأن  $\Delta p \geq 0.5 \hbar / \Delta x$ ) في **المعادلة 6.63**). يضع مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ الحد على دقة القياسات المتزامنة لموضع الجسيمات وعزمها؛ ويبين أن أفضل دقة يمكن الحصول عليها هي عندما يكون لدينا علامة تساوي (=) في **المعادلة 6.63**، ولا يمكننا أن نفعل ما هو أفضل من ذلك، حتى مع وجود أفضل الأدوات المستقبلية. مبدأ هايزنبرغ هو نتيجة للطبيعة الموجية للجسيمات.

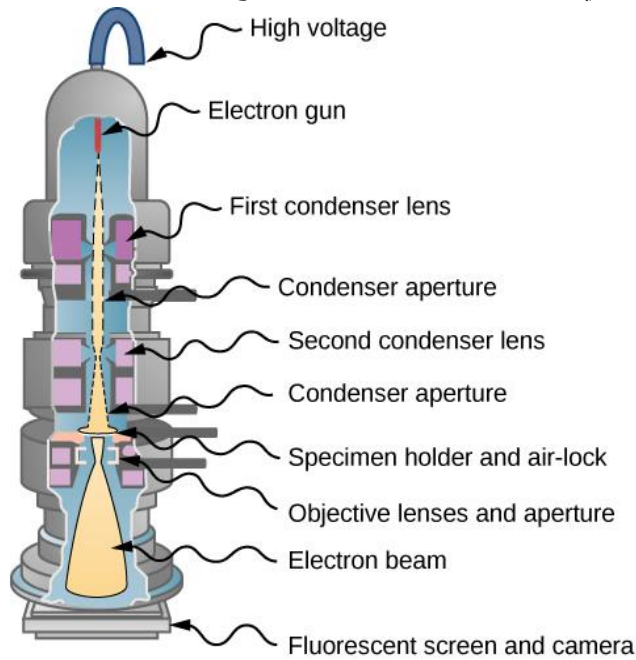


**الشكل 25.6** يبين هذا الرسم الجسيم كحزمة موجية وليس لموضعه قيمة دقيقة.

نستخدم بشكل روتيني العديد من الأجهزة الإلكترونية التي تستغل الازدواجية "موجة - جسيم" دون حتى أن ندرك التعقيدات الفيزيائية التي تقوم عليها آلية عمل هذه الأجهزة. أحد الأمثلة على تقنية تستند إلى الخصائص الجسيمية للفوتونات والإلكترونات

هو جهاز اقتران الشحنة CCD، والذي يستخدم في الكشف عن الضوء في أي أجهزة تتطلب بيانات رقمية عالية الجودة، كما هو الحال في الكاميرات الرقمية أو في أجهزة الاستشعار الطبية. وكمثال على جهاز تستغل فيه الخواص الموجية للإلكترونات هو المجهر الإلكتروني.

في عام 1931، قام الفيزيائي إرنست روسكا - استناداً إلى فكرة أن الحقول المغناطيسية يمكن أن توجه شعاعاً إلكترونياً تماماً كما توجه العدسات شعاع الضوء في المجهر الضوئي - بتطوير أول نموذج أولي للمجهر الإلكتروني. وقد أنشأ هذا التطور **المجهر الإلكتروني**. في المجهر الإلكتروني النافذ (TEM)، كما هو مبين في **الشكل 26.6**، يتم إنتاج الإلكترونات من سلك تنغستن ساخن ويتم تسريعها بتطبيق فرق كمون في "المدفع الإلكتروني"، والذي يمنحهم ما يقارب 400 keV من الطاقة الحركية. بعد مغادرة المدفع الإلكتروني، يتم تركيز هذه حزمة الإلكترونات بواسطة عدسات كهرومغناطيسية وتمرر هذه الحزمة الإلكترونية من خلال العينة المدروسة ليتم عرضها. يمكن عرض الصورة المكبرة إما بشكل مباشر أو على شاشة مفلورة أو بشكل غير مباشر عن طريق إرسالها، على سبيل المثال، إلى كاميرا رقمية أو شاشة كمبيوتر. يتم تثبيت كامل التجهيزات التي تتكون من المدفع الإلكتروني والعدسات والعينة والشاشة المفلورة في حجرة مفرغة من الهواء لمنع ضياع طاقة حزمة الإلكترونات. دقة المجهر الإلكتروني النافذ محدودة فقط بالزوبغ الكروي (تمت مناقشته في فصل سابق). يمكن أن تتمتع النماذج الحديثة عالية الدقة من المجهر الإلكتروني النافذ بقدرة تحليلية أكبر من 0.5A وتكبير أعلى من 50 ألف مرة. وللمقارنة، فإن أفضل مقدرة فصل تحليلية تم الحصول عليها باستخدام المجهر الضوئي هي نحو 200 nm. أحد قيود المجهر الإلكتروني النافذ هو أن ثخانة العينات يجب أن تكون نحو 100 nm وأن العينات البيولوجية تتطلب تحضيرات خاصة تشمل على "تثبيت" كيميائي لتثبيتها قبل قصها على شكل شرائح رقيقة.



**الشكل 26.6** المجهر الإلكتروني النافذ TEM: تُجمع حزمة الإلكترونات الناتجة عن المدفع الإلكتروني بواسطة عدسات كهرومغناطيسية وتمر عبر العينة. يتم عرض الحزمة الإلكترونية النافذة (الصورة) على شاشة أو ترسل إلى كاميرا.

لا تظهر هذه القيود في المجهر الإلكتروني الماسح (SEM)، الذي اخترعه مانفريد فون آردن في عام 1937. في المجهر SEM، تصل الحزمة الإلكترونية إلى 40 keV ولا تمر الحزمة عبر العينة بل إنها تتبعثر عند سطحها. تتم إعادة بناء التضاريس السطحية للعينة من خلال تحليل الإلكترونات المتبعثرة والإلكترونات النافذة والإشعاعات الصادرة عن تفاعل الحزمة الإلكترونية مع ذرات العينة. تبلغ مقدرة الفصل في المجهر الإلكتروني الماسح نحو 1nm، ويمكن أن يكون التكبير أكثر بنحو 250 مرة من التكبير الذي نحصل عليه

بواسطة المجهر الضوئي. يمكن أن تكون أبعاد العينات المدروسة بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح نحو عدة سنتيمترات، ولكن يجب تحضيرها بشكل خاص، وذلك بناءً على خواصها الكهربائية. تسمح قيم التكبير العالية لكل من المجهر الإلكتروني النافذ TEM والمجهر الإلكتروني الماسح SEM برؤية الجزيئات الفردية. كما تسمح مقدرة الفصل العالية لهذه المجاهر بمشاهدة التفاصيل الدقيقة، كذلك الموضحة في صورة المسح المجهرية لحبوب اللقاح في بداية هذا الفصل (الشكل 1.6).

## مثال 16.6

### مقدرة فصل المجهر الإلكتروني

تمر حزمة الكترونات بطول موجي  $1.0 \text{ pm}$  لمجهر إلكتروني النافذ TEM عبر فتحة دائرية قطرها  $2.0 \mu\text{m}$ ، ما هي الزاوية بين مصدرين نقطيين قابلين للتمييز في هذا المجهر؟


### الحل:

يمكننا استخدام علاقة مقدرة الفصل للمجهر  $\Delta\theta$  بشكل مباشر (التي نوقشت في الفصل السابق) عندما يكون الطول الموجي للإشعاع الوارد هو  $\lambda = 1.0 \text{ pm}$  وقطر الفتحة هو  $D = 2.0 \mu\text{m}$ :

$$\Delta\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D} = 1.22 \frac{1.0 \text{ pm}}{2.0 \mu\text{m}} = 6.10 \times 10^{-7} \text{ rad} = 3.50 \times 10^{-5} \text{ degree.}$$

### ملاحظة:

لاحظ أننا لو استخدمنا مجهرًا تقليدياً بضوء طول موجته  $400 \text{ nm}$ ، فإن مقدرة الفصل ستبلغ  $14$  درجة فقط، مما يعني أن جميع التفاصيل الدقيقة في الصورة ستكون غير واضحة.

 **15.6 تحقق من فهمك:** افترض أن قطر الفتحة في **المثال 16.6** قد انخفض إلى النصف. كيف يؤثر ذلك على مقدرة الفصل؟

## مراجعة الفصل السادس

### المصطلحات الأساسية

- الماص: هو الجسم الذي يمتص الإشعاع.
- طيف الامتصاص: أطوال أمواج الإشعاع الممتص من قبل الذرات والجزيئات.
- معادلة بلامر: تصف طيف الإصدار لذرة الهيدروجين في مجال الضوء المرئي.
- سلسلة بلامر: الخطوط الطيفية الموافقة لانتقالات الإلكترونات من/إلى الحالة  $n = 2$  لذرة الهيدروجين، الموصوفة في معادلة بلامر.
- الجسم الأسود: ماص/مصدر مثالي.
- إشعاع الجسم الأسود: الإشعاع الصادر عن الجسم الأسود.
- نصف قطر الهيدروجين لبور: نصف قطر مدار بور الأول.
- نموذج بوهر لذرة الهيدروجين: نموذج الكم الأول لشرح أطيايف إصدار الهيدروجين.
- سلسلة براكيت: الخطوط الطيفية الموافقة لانتقالات الإلكترونات من/إلى الحالة  $n = 4$ .
- مفعول كومبتون: التغير في الطول الموجي عندما تتبعثر الأشعة السينية عند تفاعلها مع بعض المواد.
- إزاحة كومبتون: الفرق بين طولي موجة الأشعة السينية الواردة والأشعة السينية المتبعثر.
- طول موجة كومبتون: ثابت فيزيائي قيمته:  $\lambda_c = 2.43 \text{ pm}$ .
- تردد القطع: تردد الضوء الوارد الذي لا يحدث المفعول الكهروضوئي عند قيمة أقل منه. (أقل قيمة لتردد الضوء الساقط التي يحدث عندها المفعول الكهروضوئي).
- طول موجة القطع: طول موجة الضوء الساقط الذي يتوافق مع تردد القطع.
- تجربة دافيسون - جيرمر: تاريخياً أول تجربة لحيود الإلكترونات والتي كشفت عن الأمواج الإلكترونية.
- موجة دي برولي: موجة المادة المرتبطة بأي جسم له كتلة وعزم.
- فرضية دي برولي عن موجات المادة: يمكن لجسيمات المادة أن تتصرف كأموال.
- تجربة تداخل الشقين: تجربة شقا يونغ، والتي تظهر تداخل الأمواج.
- المجهر الإلكتروني: المجهر الذي يستخدم الأمواج الإلكترونية "الرؤية" التفاصيل الدقيقة للأجسام.
- طيف الإصدار: أطوال أمواج الإشعاع الصادرة عن الذرات والجزيئات.
- الباعث: أي جسم يصدر منه الإشعاع.
- طاقة الفوتون: كمية الطاقة المشعة التي تعتمد فقط على تردد الفوتون.
- طيف الطاقة للهيدروجين: مجموعة من الطاقات المنفصلة المسموح بها للإلكترون في ذرة الهيدروجين.
- حالات الطاقة المثارة لذرة H: حالات الطاقة الأخرى غير الأساسية.
- خطوط فراونهوفر: خطوط امتصاص سوداء في طيف الإصدار الشمسي المتصل.
- طاقة الحالة الأساسية لذرة الهيدروجين: طاقة الإلكترون في مدار بور الأول لذرة الهيدروجين.
- سرعة المجموعة: سرعة الموجة، حيث تنتقل الطاقة مع سرعة المجموعة.
- مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ: يضع حدود الدقة في القياسات المتزامنة للعزم وموضع الجسيم.
- سلسلة همفرين: الخطوط الطيفية الموافقة لانتقالات الإلكترونات من/إلى الحالة  $n = 6$ .

ذرة شبيهة بالهدروجين: ذرة مؤينة بإلكترون واحد متبقي وشحنة نواتها  $+Ze$ .  
التبعثر غير المرين: هو مفعول التبعثر حيث لا تكون الطاقة الحركية مصانة، ولكن الطاقة الكلية تكون مصانة.  
طاقة التأين: الطاقة اللازمة لإنتزاع إلكترون من الذرة.  
حد التأين لذرة الهيدروجين: طاقة التأين اللازمة لإنتزاع إلكترون من مدار بور الأول.  
سلسلة ليمان: الخطوط الطيفية الموافقة لانتقالات الإلكترونات من/إلى الحالة الأساسية.  
النموذج النووي للذرة: نواة ثقيلة موجبة الشحنة في الوسط محاطة بالإلكترونات، وقد تم اقتراح هذا النموذج من قبل رذرفورد.  
سلسلة باشن: الخطوط الطيفية الموافقة لانتقالات الإلكترونات من/إلى الحالة  $n = 3$ .  
سلسلة بيفند: الخطوط الطيفية الموافقة لانتقالات الإلكترونات من/إلى الحالة  $n = 5$ .  
التيار الكهروضوئي: التيار الذي يتدفق في الدائرة عندما يتم إضاءة القطب الضوئي.  
المفعول الكهروضوئي: إصدار الإلكترونات من سطح معدني يتعرض لإشعاع كهرومغناطيسي ذي تردد المناسب.  
القطب الضوئي: قطب كهربائي في دائرة تصدر منها إلكترونات ضوئية.  
الإلكترونات الضوئية: الإلكترونات الصادرة من سطح معدني بوجود إشعاع وارد على هذا السطح.  
الفوتون: جسيم الضوء.  
فرضية بلانك حول الكم الطاقى: يتم تبادل الطاقة بين الإشعاع والجدران فقط على شكل كم طاقي منفصل.  
مسلمات نموذج بور: ثلاث افتراضات تضع إطاراً لنموذج بور.  
شدة الطاقة: الطاقة التي تمر عبر واحدة السطح خلال واحدة الزمن.  
شعاع الانتشار: شعاع مطاله  $2\pi/\lambda$  وله اتجاه عزم خطي للفوتون.  
الطاقات الكمية: الطاقات المتقطعة، أي غير المستمرة.  
رقم الكم (الرقم الكمي): المؤشر الذي يدل على رقم السوية الطاقية.  
ظاهرة الكم: في التفاعل مع المادة، فإن الفوتون إما ينقل كل طاقته أو لا ينقل شيئاً.  
الحالة الكمومية لمهتز بلانك: أي وضع اهتزازي لمهتز بلانك، مرقم برقم الكم.  
ثابت بلانك المخفض: ثابت بلانك مقسوماً على  $2\pi$ .  
تجربة رذرفورد للرقاقة الذهبية: أول تجربة لإثبات وجود النواة الذرية.  
ثابت ريديبيرغ للهيدروجين: ثابت فيزيائي في معادلة بلانك.  
صيغة ريديبيرغ: مواقع تم العثور عليها تجريبياً للخطوط الطيفية لذرة الهيدروجين.  
زاوية التبعثر: الزاوية بين الحزمة المنتشرة واتجاه الحزمة الساقطة.  
ثابت ستيفان – بولتزمان: ثابت فيزيائي في قانون ستيفان.  
كمون التوقف: فرق الكمون الذي يتوقف عنده مرور التيار الكهروضوئي في الدائرة.  
رقم الموجة: مطال شعاع الانتشار.  
ميكانيك الكم الموجي: نظرية تشرح فيزياء الذرات والجسيمات دون الذرية.  
ازدواجية "موجة – جسيم": يمكن أن تتصرف الجسيمات كأمواف والإشعاع يمكن أن يتصرف كجسيمات.  
تابع العمل: الطاقة اللازمة لفصل الإلكترونات الضوئية عن سطح المعدن.

- جسيم  $\alpha$ : ذرة هليوم مؤينة بشكل مضاعف.  
 شعاع  $\alpha$ : حزمة من جسيمات ألفا.  
 شعاع  $\beta$ : شعاع من الإلكترونات.  
 شعاع  $\gamma$ : شعاع من الفوتونات عالية الطاقة.

### المعادلات الرئيسية

$\lambda_{\max} T = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$	قانون فين للإزاحة
$P(T) = \sigma AT^4$	قانون ستيفان
$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 4.136 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$	ثابت بلانك
$\Delta E = hf$	الكم الطاقى للإشعاع
$I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda k_B T} - 1}$	قانون بلانك لإشعاع الجسم الأسود
$K_{\max} = e\Delta V_s$	الطاقة الحركية القصوى للإلكترونات الضوئية
$E_f = hf$	طاقة الفوتون
$K_{\max} = hf - \phi$	توازن الطاقة للإلكترونات الضوئية
$f_c = \frac{\phi}{h}$	تردد القطع
$E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4$	معادلة الطاقة الثابتة النسبية
$p_f = \frac{E_f}{c}$	معادلة العزم الطاقى للفوتون
$E_f = hf = \frac{hc}{\lambda}$	طاقة الفوتون
$p_f = \frac{h}{\lambda}$	مطال عزم الفوتون
$\vec{p}_f = \hbar \vec{k}$	شعاع العزم الخطي للفوتون
$\lambda_c = \frac{h}{m_0 c} = 0.00243 \text{ nm}$	طول موجة كومبتون للإلكترون
$\Delta\lambda = \lambda_c(1 - \cos\theta)$	إزاحة كومبتون
$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	معادلة بالمر
$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right), n_i = n_f + 1, n_f + 2, \dots$	معادلة ريديبيرغ
$L_n = n\hbar, n = 1, 2, \dots$	شرط التكميم الأول لبور
$hf =  E_n - E_m $	شرط التكميم الثاني لبور
$a_0 = 4\pi\epsilon_0 \frac{\hbar^2}{m_e e^2} = 0.529 \text{ \AA}$	نصف قطر الهروجين لبور
$r_n = a_0 n^2$	نصف قطر المدار $n$ لبور
$E_0 = \frac{1}{8\epsilon_0^2} \frac{m_e e^4}{h^2} = 13.6 \text{ eV}$	قيمة الطاقة في الحالة الأساسية، حد التأين



$E_n = -E_0 \frac{1}{n^2}$	طاقة الإلكترون في المدار $n$
$E_1 = -E_0 = -13.6 \text{ eV}$	طاقة الحالة الأساسية للهيدروجين
$r_n = \frac{a_0}{Z} n^2$	المدار $n$ للأيون شبيه الهيدروجين
$E_n = -Z^2 E_0 \frac{1}{n^2}$	الطاقة $n$ للأيون شبيه الهيدروجين
$E = hf$	طاقة موجة المادة
$\lambda = \frac{h}{p}$	طول موجة دي برولي
$\lambda f = \frac{c}{\beta}$	علاقة طول موجة الترددات لأموج المادة
$\Delta x \Delta p \geq \frac{1}{2} \hbar$	مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ

## ملخص الفصل السادس

### 1.6 إشعاع الجسم الأسود

- تشع جميع الأجسام طاقة. وتعتمد كمية الإشعاع التي يصدرها الجسم على درجة حرارته. ينص قانون فين التجريبي للإزاحة على أنه كلما زادت حرارة الجسم، كان طول الموجة الموافق لذروة الإصدار في منحنى الإشعاع أقصر. ينص قانون ستيفان التجريبي على أن الطاقة الكلية للإشعاع المنبعث عبر كل طيف الأطوال الموجية عند درجة حرارة معينة تتناسب مع القوة الرابعة لدرجة حرارة الجسم المشع مقدرة بالكلفن.
- تمت دراسة امتصاص وإصدار الإشعاع ضمن نموذج الجسم الأسود. في المقاربة الكلاسيكية، يكون تبادل الطاقة بين الإشعاع وجدران التجويف مستمرًا. لا تفسر المقاربة الكلاسيكية منحنى إشعاع الجسم الأسود.
- افترض بلانك لتفسير منحنى إشعاع الجسم الأسود، أن تبادل الطاقة بين الإشعاع وجدران التجويف يحدث على شكل كم طاقي متقطع فقط. أدت فرضية بلانك حول الكم الطاقي إلى قانون إشعاع بلانك النظري، والذي يتوافق مع منحنى إشعاع الجسم الأسود التجريبي؛ كما أنه يفسر قوانين فين وستيفان.

### 2.6 المفعول الكهروضوئي

- يحدث المفعول الكهروضوئي عند اقتلاع الإلكترونات الضوئية من سطح معدني استجابة لإشعاع أحادي اللون وارد على سطحه. وله ثلاث خصائص: (1) لحظية، (2) يحدث فقط عندما يكون تردد الإشعاع أعلى من تردد القطع، و(3) لا تعتمد الطاقات الحركية للإلكترونات الضوئية عند السطح على شدة الإشعاع. لا يمكن تفسير المفعول الكهروضوئي بالنظرية الكلاسيكية.
- يمكننا شرح المفعول الكهروضوئي من خلال افتراض أن الإشعاع يتكون من فوتونات (جسيمات الضوء). يحمل كل فوتون كمية من الطاقة. تعتمد طاقة الفوتون فقط على تردده، وهو تردد الإشعاع. عند السطح، يتم نقل كامل طاقة الفوتون إلى إلكترون ضوئي واحد.
- الحد الأقصى للطاقة الحركية للإلكترون الضوئي عند سطح المعدن هو الفرق بين طاقة الفوتون الوارد وتابع عمل المعدن. تابع العمل هو طاقة ربط الإلكترونات بسطح المعدن. كل معدن له تابع عمل مميز خاص به.

### 3.6 مفعول كومبتون

- في مفعول كومبتون، يكون للأشعة السينية المتبعثرة عن بعض المواد أطوالاً موجية مختلفة عن الطول الموجي للأشعة السينية الواردة. هذه الظاهرة ليس لها تفسيراً كلاسيكياً.
- يتم تفسير مفعول كومبتون بافتراض أن الإشعاع يتكون من فوتونات تتصادم مع إلكترونات ضعيفة الارتباط في المادة المستهدفة. يعامل كل من الإلكترون والفوتون كجسيمات نسبية. يتم الالتزام بقوانين مصونية الطاقة الكلية ومصونية العزم في التصادم.
- إن التعامل مع الفوتون كجسيم له عزم يمكن نقله إلى إلكترون يؤدي إلى إزاحة كومبتون النظرية التي تتفق مع إزاحة الطول الموجي المقاس في التجربة. وهذا يعطينا دليلاً على أن الإشعاع يتكون من فوتونات.
- تبعثر كومبتون هو تبعثر غير مرئي، حيث يكون للإشعاع المتبعثر طول موجة أكبر من طول الإشعاع الوارد.

### 4.6 نموذج بور لذرة الهيدروجين

- تُعطى مواضع الامتصاص وخطوط الإصدار في طيف الهيدروجين الذري بواسطة معادلة ريديبرغ التجريبية. لا تستطيع الفيزياء الكلاسيكية تفسير طيف الهيدروجين الذري.
- نموذج بور للهيدروجين كان أول نموذج للبنية الذرية لشرح أطيف الإشعاع للهيدروجين الذري بشكل صحيح. وسبقه نموذج رذرفورد النووي للذرة. في نموذج رذرفورد، تتكون الذرة من نواة تشبه نقطة موجبة الشحنة والتي تحتوي على كتلة الذرة بأكملها تقريباً ومن الإلكترونات السالبة الموجودة بعيداً عن النواة.
- يستند نموذج بور لذرة الهيدروجين على ثلاث فرضيات: (1) تتم حركة الإلكترون حول النواة وفق مدار دائري، (2) عزم الإلكترون الزاوي في المدار مكتمل، و(3) التغير في طاقة الإلكترون عندما يقوم بقفزة كمومية من مدار إلى آخر يصاحبها دائماً إصدار أو امتصاص للفوتون. نموذج بور هو نموذج شبه كلاسيكي لأنه يجمع بين المفهوم الكلاسيكي لمدار الإلكترون (الفرضية 1) والمفهوم الجديد للتكميم (الفرضية 2 و3).
- يشرح نموذج بور لذرة الهيدروجين أطيف الإصدار والامتصاص للهيدروجين الذري والأيونات شبيهة الهيدروجين ذات الأرقام الذرية المنخفضة. وقد كان هذا هو النموذج الأول لإدخال مفهوم الرقم الكمي لوصف الحالات الذرية لافتراض تكميم مدارات الإلكترونات في الذرة. يعتبر نموذج بور خطوة مهمة في تطوير ميكانيك الكم، والتي تتعامل مع ذرات متعددة الإلكترونات.

### 5.6 أمواج دي برولي

- تفترض فرضية دي برولي لأمواع المادة أن أي جسيم من المادة له عزم خطي هو أيضاً موجة. الطول الموجي لموجة المادة المرتبطة بالجسيم يتناسب عكساً مع قيمة العزم الخطي للجسيم. سرعة موجة المادة هي سرعة الجسيم.
- يوفر مفهوم دي برولي لموجة المادة الإلكترونية أساساً منطقياً لتكميم العزم الزاوي للإلكترون في نموذج بور لذرة الهيدروجين.
- في تجربة ديفيسون - جيرمر، تنتشر الإلكترونات عند سطح النيكل البلوري. وقد لوحظت أنماط حيود لأمواع المادة الإلكترونية. تعد هذه الأنماط دليلاً على وجود موجات المادة. كما لوحظت موجات المادة في تجارب الحيود مع جسيمات مختلفة.

### 6.6 الازدواجية "موجة - جسيم"

- إن الازدواجية "موجة - جسيم" توجد في الطبيعة: في ظل بعض الظروف التجريبية، يتصرف الجسيم كجسيم؛ ولكن في ظل ظروف تجريبية أخرى، فإنه يتصرف كموجة. وعلى العكس، فإنه في بعض الظروف المادية، يتصرف الإشعاع الكهرطيسي كموجة، وفي ظل ظروف مادية أخرى، فإنه يتصرف كحزمة من الفوتونات.

- أظهرت تجارب العصر الحديث ذات الشق المزدوج مع الإلكترونات وبشكل قاطع أن أخيلة حيود الإلكترونات تتشكل بسبب الطبيعة الموجية للإلكترونات.
- الطبيعة الازدواجية "موجة - جسيم" الجسيمات وللإشعاع ليس لها تفسير كلاسيكي.
- تأخذ نظرية الكم الخاصة بالموجية على أنها الخاصة الأساسية لجميع الجسيمات. وينظر إلى الجسيم كحزمة موجية متحركة. تفرض الطبيعة الموجية للجسيمات قيودًا على القياس المتزامن لموضع الجسيم وعزمه. مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ يضبط حدود الدقة في مثل هذه القياسات المتزامنة.
- يتم استغلال الازدواجية "موجة - جسيم" في العديد من الأجهزة، مثل أجهزة إقتران الشحنة (المستخدمة في الكاميرات الرقمية) أو في المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) والمجهر الإلكتروني النافذ (TEM).

## أسئلة نظرية

### 1.6 إشعاع الجسم الأسود

1. أي من السطحين التاليين له درجة حرارة أعلى - سطح النجمة الصفراء أم سطح النجمة الحمراء؟
2. صف ما تراه عند النظر إلى جسم ترتفع درجة حرارته من 1000 كلفن إلى 1,000,000 كلفن.
3. اشرح تغيرات اللون في جسم ساخن مع ازدياد درجة حرارته.
4. خمن لماذا يسبب ضوء الأشعة فوق البنفسجية حروق شمسية، في حين أن الضوء المرئي لا يسبب ذلك.
5. تم بناء مشعين تجويفيين بجدران مصنوعة من معادن مختلفة. كيف ستختلف أطياهم الإشعاعية عند نفس درجة الحرارة؟
6. ناقش سبب ظهور بعض الأجسام باللون الأسود، في حين ظهور أخرى باللون الأحمر وكذلك أخرى باللون الأبيض.
7. إذا كان كل شيء يشع طاقة كهرومغناطيسية، فلماذا لا يمكننا رؤية الأشياء في غرفة مظلمة عند درجة حرارة الغرفة.
8. ما مقدار الطاقة التي يشعها الجسم الأسود عندما تزيد درجة حرارته (مقدرة بالكلفن) بمقدار ثلاثة أضعاف؟

### 2.6 المفعول الكهروضوئي

9. باستخدام مصدر ضوء أحادي اللون نفسه، هل سيحدث المفعول الكهروضوئي لجميع المعادن؟
10. في تفسير المفعول الكهروضوئي، كيف عُرف أن الإلكترون لا يمتص أكثر من فوتون واحد؟
11. اشرح كيف يمكنك تحديد تابع العمل من منحنى كمون التوقف بدلالة تردد الإشعاع الوارد في تجربة المفعول الكهروضوئي. هل يمكنك تحديد قيمة ثابت بلانك من هذا المنحنى؟
12. لنفترض أننا في تجربة المفعول الكهروضوئي نقوم برسم منحنٍ للتيار بدلالة فرق الكمون المطبق. ما هي المعلومات التي نحصل عليها من هذا المنحنى؟ هل يمكننا أن نحدد قيمة ثابت بلانك منه؟ هل يمكننا تحديد تابع العمل للمعدن؟
13. حدد كيف تؤثر زيادة درجة حرارة القطب الكهروضوئي على نتائج تجربة المفعول الكهروضوئي.
14. ما هي ظواهر المفعول الكهروضوئي التي لا يمكن تفسيرها بواسطة الفيزياء الكلاسيكية؟
15. هل المفعول الكهروضوئي هو نتيجة للطبيعة الموجية للإشعاع أم أنه نتيجة للطبيعة الجسيمية للإشعاع؟ اشرح باختصار.
16. معادن الصوديوم والحديد والموليبدنوم لها توابع العمل  $2.5 \text{ eV}$  و  $3.9 \text{ eV}$  و  $4.2 \text{ eV}$  على التوالي. أي من هذه المعادن سوف يصدر إلكترونات ضوئية عندما تتم إضاءته بضوء طول موجته  $400 \text{ nm}$ ؟

### 3.6 مفعول كومبتون

17. ناقش أوجه التشابه والاختلاف بين المفعول الكهروضوئي ومفعول كومبتون.

18. أي من الفوتونين التاليين له عزم الأكبر: فوتون الأشعة فوق البنفسجية أم فوتون الأشعة تحت الحمراء؟
19. هل يؤثر تغيير شدة شعاع الضوء أحادي اللون على عزم الفوتونات الفردية في الشعاع؟ هل يؤثر هذا التغيير على العزم الصافي للشعاع؟
20. هل يمكن أن يحدث مفعول كومبتون مع الضوء المرئي؟ إذا كان الأمر كذلك، فهل يمكن اكتشافه؟
21. هل من الممكن في تجربة كومبتون رصد الأشعة السينية المتبعثرة التي يكون لها طول موجة أقصر من الأشعة السينية الواردة؟
22. بين أن طول موجة كومبتون له بُعد طول.
23. عند أي زاوية انتشار يكون إزاحة طول الموجة في مفعول كومبتون مساوياً لطول موجة كومبتون؟

#### 4.6 نموذج بور لذرة الهيدروجين

24. وضح سبب أن أنماط خطوط طيف الإصدار الساطعة لها موضع طيفي مماثل لنمط خطوط طيف الامتصاص المظلمة لعنصر غازي معين.
25. هل تتداخل الخطوط الطيفية المختلفة لذرة الهيدروجين؟
26. تم اكتشاف سلسلة بلامر للهيدروجين قبل سلسلتي ليمان وباشن لماذا؟
27. عند تحليل طيف الامتصاص للهيدروجين عند درجة حرارة الغرفة، تم العثور على خطوط امتصاص لسلسلة ليمان، ولكن لا توجد أية خطوط لسلسلة بالمر. ماذا يخبرنا هذا عن الحالة الطاقة لمعظم ذرات الهيدروجين عند درجة حرارة الغرفة؟
28. يمثل الهيدروجين نحو 75% من كتلة المادة على أسطح معظم النجوم. ومع ذلك، فإن خطوط امتصاص الهيدروجين هي الأقوى (كثافتها هي الأعلى) في أطراف النجوم التي تبلغ درجة حرارتها نحو 9000 k. فهي الأضعف في طيف الشمس وغير موجودة بشكل أساسي في النجوم الحارة جداً (درجات حرارة أعلى من 25000 k) أو الأكثر برودة (درجات حرارة أقل من 3500k). حدد لماذا تؤثر درجة حرارة السطح على خطوط امتصاص الهيدروجين التي نلاحظها.
29. ناقش أوجه التشابه والاختلاف بين نموذج طومسون ونموذج بور لذرة الهيدروجين.
30. ناقش الطريقة التي يكون بها نموذج طومسون غير فيزيائي. ادمج حججك بالأدلة التجريبية.
31. إذا انتقل الإلكترون في ذرة الهيدروجين إلى مدار نصف قطره أكبر، فهل تزيد طاقة ذرة الهيدروجين أم تقل؟
32. كيف تصان الطاقة عندما تنتقل الذرة من حالة طاقة أعلى إلى حالة طاقة أقل؟
33. لنفترض أن الإلكترون الموجود في ذرة الهيدروجين ينتقل من المدار  $(n+1)$  إلى المدار  $n$ . هل يزداد الطول الموجي للفوتون المنبعث عند قيم أكبر أم أصغر للعدد  $n$ ؟
34. ناقش سبب كون الطاقات المسموح بها لذرة الهيدروجين سالبة.
35. هل يمكن لذرة الهيدروجين أن تمتص الفوتون الذي تزيد طاقته على 13.6 eV؟
36. لماذا يمكننا أن نرى عبر الزجاج وليس عبر الخشب؟
37. هل لقوى الجاذبية تأثير كبير على سويات الطاقة الذرية؟
38. بين أن ثابت بلانك له أبعاد العزم الزاوي.

#### 5.6 أمواج دي برولي

39. أي نوع من الإشعاع هو الأنسب لمراقبة أنماط الحيود على المواد الصلبة البلورية؛ موجات الراديو أم الضوء المرئي أم الأشعة السينية؟ اشرح الإجابة.

40. بين كيف تتأثر أنماط الحيود لبلورة نموذجية عند استخدام أشعة غاما بدلاً من الأشعات السينية.
41. إذا كان هناك إلكترون وبروتون يسيران بنفس السرعة، فأيهما له طول موجة دي بروي أقصر؟
42. إذا كان الجسم يتسارع، فكيف يؤثر ذلك على طول موجة دي بروي؟
43. لماذا لا يتم ملاحظة الطبيعة شبه الموجية للمادة بالنسبة للأشياء العيانية يومياً؟
44. ما هو الطول الموجي للنترون في حالة السكون؟ اشرح الإجابة.
45. لماذا يجب وضع تجهيزات تجربة ديفيسون - جرير في حجرة مفرغة من الهواء؟ ناقش النتيجة التي تتوقعها عندما لا يتم إخلاء الحجرة من الهواء.

### 6.6 الازدواجية "موجة - جسيم"

46. أعط مثالاً عن تجربة يتصرف فيها الضوء كموجة. أعط مثالاً عن تجربة يتصرف فيها الضوء كسيل من الفوتونات.
47. ناقش: كيف يختلف تداخل موجات الماء عن تداخل الإلكترونات؟ ما هو وجه الشبه بينهم؟
48. أعط حجة واحدة على الأقل لدعم فرضية موجة المادة.
49. أعط حجة واحدة على الأقل لدعم الطبيعة الجسيمية للإشعاع.
50. اشرح أهمية تجربة شقي يونغ.
51. هل مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ يسمح للجسيم أن يبقى في حالة سكون في منطقة معينة في الفراغ؟
52. هل يمكن معرفة طول موجة دي بروي للجسيم بالضبط؟
53. هل تنتج فوتونات الضوء الأحمر دقة أفضل في المجهر من فوتونات الضوء الأزرق؟ اشرح الإجابة.
54. ناقش الفرق الرئيسي بين SEM و TEM.

### مسائل:

#### 1.6 إشعاع الجسم الأسود

55. سخان استطاعته 200 W، يصدر إشعاعاً طول موجته  $1.5 \mu\text{m}$ . (a) ماهي قيمة الكم الطاقوي الذي يصدره؟ (b) بفرض أن الحرارة النوعية لوزن 4.0 kg من الجسم تساوي  $0.83 \text{ kcal/kg.k}$ ، ماهو عدد هذه الفوتونات التي يجب أن يمتصها الجسم لزيادة درجة حرارته بمقدار 2K؟ (c) ما هي المدة الزمنية التي تستغرقها عملية التسخين في الطلب (b)، باعتبار أن الجسم يمتص كل الإشعاعات الصادرة من السخان؟
56. يقوم مولد أمواج ميكروية استطاعته 900W في فرن مايكرويف بتوليد كم طاقي بتردد 2560 MHz. (a) ماهو عدد الكم الطاقوي الصادر منه في الثانية؟ (b) ماهو عدد الكم الطاقوي الواجب امتصاصه بواسطة طبق المعكرونة الموجود في التجويف الإشعاعي لزيادة درجة حرارته بمقدار 45.0K؟ افترض أن الطبق يحوي كتلة 0.5 kg وأن حرارته النوعية تساوي  $0.9 \text{ kcal/kg.k}$ . (c) افترض أن طبق المعكرونة يمتص كل الكم الطاقوي الصادر من المولد. كم من الوقت يجب أن ننتظر حتى يصبح الطبق الوارد في الطلب (b) جاهزاً؟
57. (a) ماهي درجة الحرارة التي تصل إليها ذروة طيف إشعاع الجسم الأسود عند الطول الموجي 400nm؟ (b) إذا كانت درجة حرارة الجسم الأسود تبلغ 800k، فعند أي طول موجي يصدر طاقته العظمى؟
58. تعمل سلك التنغستن في المصابيح الإضاءة المتوهجة عند 3200 k. عند أي تردد تصدر الفتيلا أقصى طاقة؟

59. الفضاء بين النجوم مليء بإشعاعات طولها الموجي  $970 \mu\text{m}$ . ويعد هذا الإشعاع من بقايا "الانفجار الكبير". ما هي درجة حرارة الجسم الأسود الموافقة لهذا الإشعاع؟

60. تصل الطاقة المشعة الصادرة من الشمس إلى أقصى حد لها عند طول موجي يبلغ نحو  $500.0\text{nm}$ . ما هي درجة الحرارة التقريبية لسطح الشمس؟

## 2.6 المفعول الكهروضوئي

61. فوتون تبلغ طاقته  $20 \text{ keV}$ . ما هو تردده وطول موجته؟

62. تتراوح أطوال الأمواج المرئية من نحو  $400\text{nm}$  إلى  $750\text{nm}$ . ما هو المجال الموافق لطاقات فوتونات الضوء المرئي؟

63. ما هو أكبر طول موجي للإشعاع يمكنه أن يخرج الإلكترون الضوئي من الفضة؟ هل يقع في المجال المرئي؟

64. ما هو أكبر طول موجي للإشعاع يمكنه إخراج الإلكترون الضوئي من البوتاسيوم، علماً أن تابع عمل البوتاسيوم هو  $2.24\text{keV}$ ؟ هل يقع في المجال المرئي؟

65. قم بتقدير طاقة تراطبات الإلكترونات في المغنيزيوم، إذا علمت بأن الطول الموجي البالغ  $337\text{nm}$  هو أكبر طول موجي يجب أن يمتلكه الفوتون لإخراج إلكترون ضوئي من القطب الكهروضوئي المصنوع من المغنيزيوم.

66. تابع العمل للبوتاسيوم هو  $2.26 \text{ eV}$ . ما هو تردد القطع عند استخدام هذا المعدن كقطب كهروضوئي؟ ما هو كمون التوقف إذا علمت أن الإلكترونات تنبعث عندما يتعرض هذا القطب الكهروضوئي لإشعاع تردده يساوي  $1200 \text{ THz}$ ؟

67. قم بتقدير تابع عمل الألومنيوم، إذا علمت أن الطول الموجي البالغ  $304 \text{ nm}$  هو أكبر طول موجي يجب أن يمتلكه الفوتون لإخراج إلكترون ضوئي من القطب الكهروضوئي المصنوع من الألومنيوم.

68. ما هي الطاقة الحركية القصوى للإلكترونات الضوئية التي يتم إخراجها من الصوديوم بواسطة إشعاع وارد طولها الموجي  $450\text{nm}$ ؟

69. يضيء الإشعاع فوق البنفسجي ذو الطول الموجي  $120\text{nm}$  قطباً مطلياً بالذهب. ما هي الطاقة الحركية القصوى للإلكترونات الضوئية المقذوفة؟

70. يقوم ضوء بنفسجي طولها الموجي  $400\text{nm}$  بإخراج الإلكترونات الضوئية بطاقتها الحركية القصوى البالغة  $0.860\text{eV}$  من قطب كهروضوئي مصنوع من الصوديوم. ما هو تابع عمل الصوديوم؟

71. يسقط ضوء طولها الموجي  $600\text{nm}$  على سطح كهروضوئية وتنبعث الإلكترونات بطاقتها الحركية القصوى البالغة  $0.17\text{eV}$ . احسب (a) تابع العمل و (b) تردد القطع للسطح. (c) ما هو كمون التوقف عند إضاءة السطح بضوء طولها الموجي  $400\text{eV}$ ؟

72. يبلغ طول موجة القطع لإصدار الإلكترونات الضوئية من سطح معين  $500\text{nm}$ . أوجد أقصى طاقة حركية للإلكترونات الضوئية المقذوفة عندما يتم إضاءة السطح بضوء طولها الموجي  $600\text{nm}$ .

73. أوجد الطول الموجي للإشعاع الذي يمكنه إخراج إلكترونات تبلغ طاقتها الحركية  $2.00\text{eV}$  من قطب مصنوع من الكالسيوم. تابع عمل الكالسيوم هو  $2.71 \text{ eV}$ . في أي مجال يقع هذا الإشعاع؟

74. أوجد الطول الموجي للإشعاع الذي يمكنه إخراج إلكترونات تبلغ طاقتها الحركية  $0.10\text{eV}$  من قطب مصنوع من البوتاسيوم. تابع عمل البوتاسيوم هو  $2.24 \text{ eV}$ . في أي مجال يقع هذا الإشعاع؟

75. أوجد الحد الأقصى لسرعة الإلكترونات الضوئية التي يتم إخراجها بواسطة إشعاع طولها الموجي  $80\text{nm}$ ، إذا كان تابع عمل القطب الكهروضوئي هو  $4.73\text{eV}$ .

### 3.6 تأثير كومبتون

76. ما هو عزم الفوتون الأصفر ذي الطول الموجي 589nm؟
77. ما هو عزم فوتون الأمواج الميكروية ذات الطول الموجي 4cm؟
78. في حزمة الضوء الأبيض (التي تتراوح أطوالها الموجية من 400nm إلى 750nm)، ما هو نطاق العزم الذي يمكن أن تملكه الفوتونات؟
79. ما هي طاقة الفوتون الذي يبلغ عزمه  $3.0 \times 10^{-24} \text{ kg}\cdot\text{m/s}$ ؟
80. ما هو الطول الموجي لكل من (a) فوتون الأشعة السينية الذي تبلغ طاقته 12keV؛ (b) فوتون أشعة غاما الذي تبلغ طاقته 2.0eV؟
81. احسب عزم وطاقة فوتون طوله الموجي 1.0 A.
82. احسب طول موجة وطاقة فوتون عزمه يساوي  $5.00 \times 10^{-29} \text{ kg}\cdot\text{m/s}$ .
83. فوتون شعاع غاما عزمه يساوي  $8.00 \times 10^{-21} \text{ kg}\cdot\text{m/s}$ . احسب طوله الموجي وطاقته.
84. (a) احسب عزم فوتون طوله الموجي  $2.5\mu\text{m}$ . (b) أوجد سرعة إلكترون له نفس قيمة العزم. (c) ما هي الطاقة الحركية للإلكترون، وكيف يمكن مقارنتها بطاقة الفوتون؟
85. أثبت أن  $p = h/\lambda$  و  $E_f = hf$  متوافقة مع العلاقة النسبية  $E^2 = p^2c^2 + m_0^2c^2$ .
86. أثبت أن طاقة الفوتون  $E$  مقدره بوحدة eV تُعطى بالعلاقة  $E = 1.241 \times 10^{-6} \text{ eV}\cdot\text{m}/\lambda$  حيث  $\lambda$  هو طوله الموجي مقدرًا بوحدة المتر.
87. قارن إزاحة كومبتون لفوتون متبعثر عند الزاوية 30 درجة مع فوتون متبعثر عند الزاوية 45 درجة عند التصادم مع إلكترونات حرة.
88. تتبعثر أشعة سينية طولها الموجي 12.5pm عن كتلة كربونية. ما هي أطوال أمواج الفوتونات المتبعثرة عند كل من الزوايا (a) 30 درجة؛ (b) 90 درجة؛ و (c) 180 درجة؟

### 4.6 نموذج بور لذرة الهيدروجين

89. احسب الطول الموجي للخط الأول في سلسلة ليمان وأثبت أن هذا الخط يقع في الجزء فوق البنفسجي من الطيف.
90. احسب الطول الموجي للخط الخامس في سلسلة ليمان وأثبت أن هذا الخط يقع في الجزء فوق البنفسجي من الطيف.
91. احسب التغيرات الطاقية الموافقة للانتقالات التالية في ذرة الهيدروجين: (a) من  $n = 3$  إلى  $n = 4$ ؛ (b) من  $n = 2$  إلى  $n = 1$ ؛ و (c) من  $n = 3$  إلى  $n = \infty$ .
92. حدد الطول الموجي لخط بالمر الثالث (الانتقال من  $n = 5$  إلى  $n = 2$ ).
93. ما هو تردد الفوتون الممتص عندما تقوم ذرة الهيدروجين بالانتقال من الحالة الأساسية إلى الحالة  $n = 4$ ؟
94. عندما تكون ذرة الهيدروجين في الحالة الأساسية، ما هو أقصر وأكبر طول موجي للفوتونات التي يمكنها أن تمتصها دون أن تتأين؟
95. عندما تكون ذرة الهيدروجين في حالتها الثالثة المثارة، ما هو أقصر وأكبر طول موجي للفوتونات التي يمكن أن تنبعث منها؟
96. ما هو أكبر طول موجي يمكن أن يكون للضوء إذا كان قادراً على تأيين ذرة الهيدروجين في حالتها الأساسية؟

97. بالنسبة للإلكترون الموجود في ذرة الهيدروجين في الحالة  $n = 2$ ، احسب: (a) العزم الزاوي؛ (b) الطاقة الحركية؛ (c) الطاقة الكامنة؛ (d) الطاقة الكلية.
98. أوجد طاقة التأين لذرة الهيدروجين في الحالة الطاقية الرابعة.
99. بعد إجراء القياس تبين أن إزالة إلكترون من ذرة الهيدروجين يتطلب طاقة قدرها  $0.850 \text{ eV}$ . في أي حالة كانت الذرة قبل حدوث التأين؟
100. ما هو نصف قطر ذرة الهيدروجين عندما يكون الإلكترون في الحالة المثارة الأولى؟
101. أوجد أقصر طول موجي في سلسلة بالمر. في أي جزء من الطيف يقع هذا الخط؟
102. أثبت أن سلسلة باشن بأكملها تقع في الجزء تحت الأحمر من الطيف.
103. هل تتداخل سلسلة بالمر وسلسلة ليمان؟ لماذا؟ لم لا؟ (تلميح: احسب أقصر خط في سلسلة بالمر وأكبر خط في سلسلة ليمان).
104. (a) أي خط في سلسلة بالمر هو أول خط في الجزء فوق البنفسجي من الطيف؟ (b) ماهو عدد خطوط بالمر الموجودة في الجزء المرئي من الطيف؟ (c) ماهو عدد خطوط بالمر الموجودة في الجزء فوق البنفسجي؟
105. خط إصدار الهيدروجين الذري ذي الطول الموجي  $4.653 \mu\text{m}$  يوافق الانتقال بين الحالات  $n_f = 5$  و  $n_i$ . أوجد  $n_i$ .

### 5.6 أمواج دي برولي

106. ماهي سرعة الإلكترون التي يبلغ عنده طولها الموجي  $1.00 \text{ m}$ ؟
107. ما هو طول موجة دي برولي لإلكترون سرعته  $5.0 \times 10^6 \text{ m/s}$ ؟
108. ما هو طول موجة دي برولي لإلكترون مسرع من حالة السكون بفرق كمون قدره  $20 \text{ keV}$ ؟
109. ما هو طول موجة دي برولي لبروتون تبلغ طاقته الحركية  $2.0 \text{ MeV}$  و  $10.0 \text{ MeV}$ ؟
110. ما هو طول موجة دي برولي للاعب كرة قدم وزنه  $10 \text{ kg}$  ويركض بسرعة  $8.0 \text{ m/s}$ ؟
111. (a) ما هي طاقة الإلكترون الذي يكون طول موجة دي برولي له مساوياً لطول موجة دي برولي لفوتون من الضوء الأصفر ذي الطول الموجي  $590 \text{ nm}$ ؟ (b) ما هو طول موجة دي برولي لإلكترون الذي تكون طاقته مساوية لطاقة فوتون من الضوء الأصفر؟
112. إذا كان طول موجة دي برولي لنترون هو  $0.01 \text{ nm}$ . فما هي سرعة وطاقة هذا النترون؟
113. ما هو الطول الموجي للإلكترون الذي يتحرك بسرعة تبلغ  $3\%$  من سرعة الضوء؟
114. ما هي سرعة البروتون ذي الطول الموجي  $6.0 \text{ fm}$  (حجم النواة تقريباً)؟ اكتب الإجابة كنسبة من سرعة الضوء.
115. ما هي سرعة كرة البلياردو التي يبلغ وزنها  $0.400 \text{ kg}$  إذا كان طولها الموجي هو  $7.50 \text{ fm}$ ؟
116. أوجد الطول الموجي لبروتون يتحرك بسرعة تبلغ  $1.00\%$  من سرعة الضوء (حيث  $\beta = 0.01$ ).

### 6.6 الازدواجية "موجة - جسيم"

117. يشع جهاز إرسال راديو AM باستطاعة قدرها  $500 \text{ kW}$  بتردد قدره  $760 \text{ KHz}$ . ماهو عدد الفوتونات التي يصدرها الجهاز في الثانية؟
118. أوجد عامل لورنتز  $\gamma$  وطول موجة دي برولي لإلكترون طاقته  $50 \text{ GeV}$  في مسرع الجسيمات.
119. أوجد عامل لورنتز  $\gamma$  وطول موجة دي برولي لبروتون طاقته  $1.0 \text{ TeV}$  في مسرع الجسيمات.
120. ما هي الطاقة الحركية لإلكترون طول موجته  $0.01 \text{ nm}$  في المجهر الإلكتروني النافذ؟



**121.** إذا تم تحييد إلكترون بشكل كبير بواسطة بلورة، فإن طول موجته يجب أن يساوي المسافة بين مستويات البلورة  $d$ . بفرض أن  $d = 0.250\text{nm}$ ، قم بتقدير فرق الكمون الواجب استخدامه لتسريع الإلكترون من حالة السكون إذا كان من المفروض أن يحميد بواسطة هذه المستويات.

**122.** تشكل الأشعة السينية إشعاعات مؤينة تشكل خطراً على الأنسجة الحية ولا يمكن اكتشافها بالعين البشرية. بفرض أن الباحث الذي يعمل في مختبر حيود الأشعة السينية يتعرض بطريق الخطأ لجرعة مميتة من الإشعاع. احسب زيادة درجة حرارة الباحث ضمن الشروط التالية: طاقة فوتونات الأشعة السينية  $200\text{keV}$  ويمتص الباحث  $4 \times 10^{13}$  فوتون لكل كيلوغرام من وزنه أثناء تعرضه للإشعاع. بفرض أن الحرارة النوعية لجسم الباحث تساوي  $0.83\text{kcal/kg}\cdot\text{K}$ .

**123.** يبلغ متوسط شدة الرياح الشمسية (الإشعاعات) التي تسقط على الجزء العلوي من الغلاف الجوي للأرض  $1.3\text{kW/m}^2$ . بفرض أننا نبنى شراعاً شمسياً لدفع سفينة صغيرة للألعاب ذات كتلة تبلغ  $0.1\text{kg}$  في الفضاء بين محطة الفضاء الدولية والقمر. يتكون الشراع من مادة خفيفة جداً، والتي تعكس الإشعاع الوارد كلياً. لتقوم فيما إذا كان مثل هذا المشروع ممكناً، أجب عن الأسئلة التالية: بفرض أن فوتونات الإشعاع ترد فقط في الاتجاه العمودي على سطح العاكس للشراع. (a) ما هو الضغط الإشعاعي (القوة لكل متر مربع) للإشعاع الذي يسقط على الشراع الشبيه بالمرآة؟ (b) باعتبار ضغط الإشعاع المحسوب في الطلب (a)، ما هو تسارع سفينة الفضاء إذا كانت مساحة الشراع  $10.0\text{m}^2$ ؟ (c) باعتبار التسارع المقدر في الطلب (b)، ماهي سرعة تحرك سفينة الفضاء بعد  $24\text{h}$  على انطلاقها من السكون؟

**124.** تعامل مع جسم الإنسان على أنه جسم أسود وحدد النسبة المئوية للزيادة في الطاقة الإشعاعية الكلية عندما ترتفع درجة حرارته من  $98.6\text{F}$  إلى  $103\text{F}$ .

**125.** أثبت أن قانون فين للإزاحة ينتج عن قانون بلانك للإشعاع. (تلميح: استبدل  $x = hc/\lambda k_B T$  واكتب قانون بلانك على الشكل  $I(x, T) = Ax^5 / (e^x - 1)$  حيث  $A = 2\pi(k_B T)^5 / (h^4 \cdot c^3)$ . الآن، من أجل قيمة ثابتة لدرجة الحرارة  $T$ ، أوجد موضع الشدة العظمى من خلال حل المعادلة  $dI(x, T)/dx = 0$  من أجل قيمة  $x$ ).

**126.** أثبت أن قانون ستيفان ينتج عن قانون بلانك للإشعاع. تلميح: لحساب القدرة الكلية لإشعاع الجسم الأسود الصادر عبر كامل طيف الأطوال الموجية عند درجة حرارة معينة، قم بمكاملة قانون بلانك على الطيف بأكمله  $P(T) = \int_0^\infty I(\lambda, T) d\lambda$  استخدام التعويض  $x = hc/\lambda k_B T$  والقيمة للتكامل  $\int_0^\infty dx x^3 / (e^x - 1) = \pi^4/15$ .

## مسائل للتحدي

**127.** احسب الشدة الطاقية بوحدة الطول الموجي لإشعاع منبعث عند طول موجي قدره  $500.0\text{nm}$  من جسم أسود عند درجة حرارة  $10000\text{k}$ .

**128.** يهتز الجزيء HCl عند تردد قدره  $87.0\text{THz}$ . ما هو الفرق (مقدراً بالفولت) بين سويات الطاقة المجاورة له؟

**129.** مهتر ميكانيكي كمي يهتز بتردد  $250.0\text{THz}$ . ما هي أدنى طاقة للإشعاع الذي يمكن أن يصدر عنه؟

**130.** خلال نحو 5 مليارات سنة، ستتطور الشمس إلى عملاق أحمر. افترض أن درجة حرارة سطحها ستتنخفض إلى نحو نصف قيمتها الحالية البالغة  $6000\text{k}$ ، بينما سيزيد نصف قطرها الحالي البالغ  $7.0 \times 10^8\text{m}$  إلى  $1.5 \times 10^{11}\text{m}$  (وهي المسافة الحالية بين الأرض والشمس). احسب نسبة الطاقة الكلية المنبعثة من الشمس في مرحلة العملاق الأحمر إلى طاقتها الحالية.

**131.** يصدر مصباح الصوديوم طاقة مشعة قدرها  $2.0$  واط، يبلغ الطول الموجي لمعظمها نحو  $589\text{nm}$ . قدر عدد الفوتونات المنبعثة من المصباح في الثانية.

132. يتم إخراج الإلكترونات الضوئية من القطب الكهروضوئي ويتم التقاطها على بعد 2.50cm من القطب الكهروضوئي. فإذا علمت أن تابع عمل القطب الكهروضوئي هو 2.71eV وأن طول موجة الإشعاع الوارد 420nm. كم من الوقت يستغرق الإلكترون الضوئي حتى يصل إلى الكاشف؟
133. إذا كان تابع عمل المعدن هو 3.2eV، فما هو الطول الموجي الأقصى الذي يمكن أن يمتلكه الفوتون لإخراج الإلكترون الضوئي من هذا السطح المعدني.
134. تابع عمل سطح كهروضوئي هو 2.00eV. ما هي أقصى سرعة للإلكترونات الضوئية المنبعثة من هذا السطح عندما يسقط عليه ضوء طول موجته 450nm؟
135. يتم توجيه شعاع ليزر طول موجته 400nm على قطب مصنوع من الكالسيوم. قدرة شعاع الليزر هي 2.00 mW وتابع عمل الكالسيوم هو 2.31nm. (a) ماهو عدد الإلكترونات الضوئية التي يتم إخراجها في الثانية؟ (b) ما هي القدرة الصافية التي تحملها الإلكترونات الضوئية؟
136. (a) احسب عدد الإلكترونات الضوئية التي يتم إخراجها في الثانية من منطقة مساحتها 1.00 mm<sup>2</sup> من معدن الصوديوم بإشعاع طول موجته 500nm وشدته 1.30kW/m<sup>2</sup> (شدة ضوء الشمس فوق الغلاف الجوي للأرض). (b) باعتبار أن تابع عمل المعدن هو 2.28eV، ما هي القوة التي تحملها هذه الإلكترونات الضوئية؟
137. يستخدم ليزر ذو قدرة خرج تبلغ 2.00 mW بطول موجة يبلغ 400nm لإسقاط حزمة ضوئية على قطب كهروضوئي مصنوع من الكالسيوم. (a) كم عدد الإلكترونات الضوئية المنطلقة من سطح الكالسيوم في الثانية؟ (b) ما هي الطاقة التي تحملها الإلكترونات الضوئية المحررة، باعتبار أن تابع عمل الكالسيوم هو 2.31eV؟ (c) احسب التيار الكهروضوئي. (d) إذا أصبح القطب الكهروضوئي فجأة معزولاً كهربائياً، وبدأ القطبان الموجودان في الدارة بالعمل كمكثف سعته 2.00pF، كم من الزمن سيتدفق التيار قبل أن يوقفه كمون المكثف؟
138. تابع عمل الباريوم هو 2.48eV. أوجد أقصى طاقة حركية للإلكترونات الضوئية المقذوفة عندما يتم إضاءة سطح الباريوم بكل ممايلي: (a) إشعاع صادر من محطة إذاعية قدرته 100kW تبث عند تردد 800 KHz؛ (b) ضوء ليزر طول موجته 633 nm ينبعث من ليزر He-Ne قوي؛ و (c) ضوء أزرق طول موجته 434 nm صادر من أنبوب صغير لانفراغ غاز الهيدروجين.
139. (a) احسب الطول الموجي لفوتون له نفس عزم بروتون يتحرك بسرعة تبلغ 1% من سرعة الضوء في الفراغ. (b) ما هي طاقة هذا الفوتون مقدره بوحدة MeV؟ (c) ما هي الطاقة الحركية للبروتون مقدره بوحدة MeV؟
140. (a) أوجد عزم فوتون أشعة سينية طاقتها 100keV. (b) أوجد سرعة نوترون له نفس العزم. (c) ما هي الطاقة الحركية للنوترون مقدره بوحدة eV؟
141. عزم الضوء، والذي هو أيضاً عزم الجسيمات، ينقلب تماماً عندما ينعكس الفوتون إلى الخلف مباشرة من المرآة، بفرض أن ارتداد المرآة يمكن إهماله. التغير في العزم هو ضعف عزم الفوتون الوارد، والذي هو أيضاً عزم الجسيمات. افترض أن شدة شعاع الضوء هي 1.0kW/m<sup>2</sup> وأنه يسقط على مرآة مساحتها 2.0-m<sup>2</sup> و ينعكس منها. (a) احسب الطاقة المنعكسة في 1.00s. (a) ما هو العزم المنقول إلى المرآة؟ (b) استخدم قانون نيوتن الثاني لإيجاد القوة على المرآة. (c) هل افتراض عدم وجود ارتداد للمرآة يبدو معقولاً؟
142. يصطدم فوتون طاقته 5.0 keV بإلكترون ثابت وينتشر عند زاوية 60 درجة. ما هي الطاقة التي اكتسبها الإلكترون في التصادم؟
143. فوتون طول موجته يساوي 0.75nm يتبعثر بواسطة إلكترون ساكن. تبلغ سرعة ارتداد الإلكترون نحو 1.5×10<sup>6</sup> m/s. (a) أوجد إزاحة الطول الموجي للفوتون. (b) أوجد زاوية تبعثر الفوتون.

144. أوجد التغير الأعظمي في طول موجة الأشعة السينية الذي يمكن أن يحدث بسبب تبعثر كومبتون. هل يعتمد هذا التغير على الطول الموجي للحزمة الواردة؟
145. يرد فوتون طول موجته 700 nm على ذرة هيدروجين. عندما يتم امتصاص هذا الفوتون، تصبح الذرة مؤينة. ما هو أدنى مدار يمكن أن يشغله الإلكترون قبل تأينه؟
146. ما هي الطاقة الحركية القصوى للإلكترون التي يكون عندها التصادم بين الإلكترون وذرة الهيدروجين الثابتة في حالتها الأساسية مرناً بشكل قاطع؟
147. الهليوم الذري المتأين بشكل منفرد  $He^{+1}$  هو أيون شبيه الهيدروجين. (a) ما هو نصف قطر حالته الأساسية؟ (b) احسب طاقات الحالات الطاقية الأربع الدنيا. (c) كرر الحسابات من أجل الأيون  $Li^{2+}$ .
148. ذرة متأينة بشكل ثلاثي من البريليوم  $Be^{3+}$  هي أيون شبيه الهيدروجين. عندما تكون  $Be^{3+}$  في إحدى حالاتها المثارة، فإن نصف قطرها في هذه الحالة  $n$  هو نفس نصف قطر المدار الأول للهيدروجين لبور تماماً. أوجد  $n$  واحسب طاقة التأين لهذه الحالة للبريليوم  $Be^{3+}$ .
149. في البيئات شديدة الحرارة، كتلك الموجودة في الإكليل الشمسي، قد تتأين الذرات عبر التصادم مع ذرات أخرى. ومن الأمثلة على هذا التأين في الإكليل الشمسي هو وجود أيونات  $C^{5+}$  المكتشفة في طيف فراونهورفر. (a) ماهي نسبة طاقات مقياس الأيون  $C^{5+}$  إلى طيف الطاقة لذرة الهيدروجين؟ (b) ما هو الطول الموجي للخط الأول في سلسلة باشن من  $C^{5+}$ ؟ (c) في أي جزء من الطيف تقع هذه الخطوط؟
150. (a) احسب طاقة التأين  $He^{+}$ . (b) ما هو الحد الأدنى لتردد الفوتون القادر على تأين  $He^{+}$ ؟
151. يتم إجراء تجارب على نترونات فائقة البرودة لها سرعة لا تقل عن 1.00 m/s. أوجد الطول الموجي والطاقة الحركية لمثل هذا النيوترون الفائق البرودة.
152. أوجد السرعة والطاقة الحركية لنترون طول موجته 6.0 fm. (طاقة الكتلة الساكنة للنترون هي  $E_0 = 940$  MeV).
153. تبلغ المسافة بين المستويات البلورية في بلورة كلور الصوديوم 0.281nm، عندما يتم تحديدها بحيود الأشعة السينية باستخدام أشعة سينية طول موجتها 0.170nm. ما هي طاقة النترونات في حزمة النترونات التي تنتج قمم الحيود في نفس المواضع التي تصل فيها الأشعة السينية إلى القمم؟
154. ما هو الطول الموجي للإلكترون يتسارع من السكون عند فرق كمون 30.0 kV؟
155. احسب سرعة إلكترون طول موجته  $1.0 \mu m$  و فرق الكمون المستخدم لتسريعه من حالة السكون لهذه السرعة.
156. في المصادم الفائق في CERN، تم تسريع البروتونات إلى سرعات تبلغ  $0.25c$ . ما هي أطوالهم الموجية عند هذه السرعة؟ ما هي طاقتهم الحركية؟ إذا اكتسبت حزمة البروتونات طاقتها الحركية من خلال مرور واحد فقط عبر فرق الكمون، فما قيمة هذا الفرق الكموني؟ (طاقة الكتلة الساكنة للبروتون هي  $E_0 = 938$  MeV).
157. أوجد طول موجة دي بروي للإلكترون تم تسريعه من حالة السكون في أنبوب الأشعة السينية ضمن فرق كمون يبلغ 100 kV. (طاقة الكتلة الساكنة للإلكترون هي  $E_0 = 511$  keV).
158. يبلغ طول موجة القطع لانبعث الإلكترونات الضوئية من سطح معين 500nm. أوجد أقصى طاقة حركية للإلكترونات الضوئية التي تم إخراجها عند إضاءة السطح بضوء طول موجته 450nm.

159. قارن إزاحة الطول الموجي لفوتون متبعثر بواسطة إلكترون حر مع إزاحة الطول الموجي لفوتون متبعثر عند نفس الزاوية بواسطة بروتون حر.

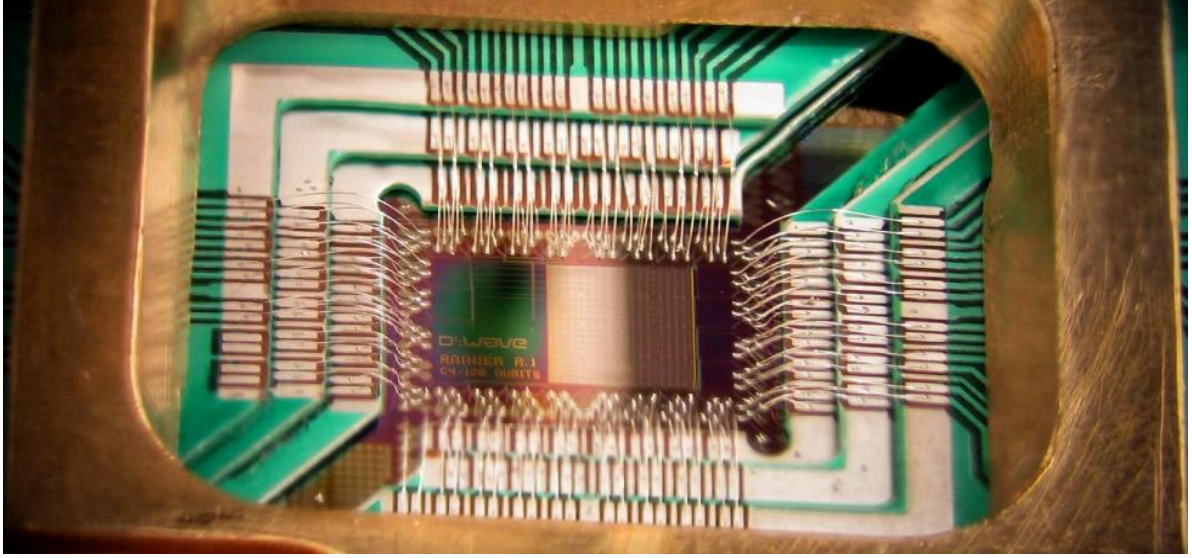
160. مقياس الطيف المستخدم لقياس الطول الموجي للأشعة السينية المنتشرة في تجربة كومبتون تصل دقته إلى  $5.0 \times 10^{-4} \text{nm}$ . ما هو الحد الأدنى لزاوية التبعثر التي يمكن عندها تمييز الأشعة السينية التي تتفاعل مع الإلكترونات الحرة عن تلك التي تتفاعل مع الذرات؟

161. باعتبار وجود أيون شبيه الهيدروجين حيث يدور الإلكترون حول نواة شحنتها  $+Ze$ . استنتج معادلات طاقة الإلكترون  $E_n$  في المدار  $n$  ونصف قطر المدار  $r_n$ .

162. افترض أن ذرة الهيدروجين توجد في الحالة المثارة  $n = 2$  لمدة  $10^{-8}$  ثوان قبل أن تنتقل إلى حالتها الأساسية. كم مرة يدور الإلكترون حول نواة البروتون خلال هذه الفترة الزمنية؟ كم من الزمن تأخذه الأرض لتدور حول الشمس هذا العدد من المرات؟

163. يمكن أن تتشكل ذرة عندما يقوم البروتون بالتقاط ميون سالب. الميون له نفس شحنة الإلكترون وكتلته تبلغ 207 أضعاف كتلة الإلكترون. احسب تردد الفوتون المنبعث عندما تقوم هذه الذرة بالانتقال من الحالة  $n = 2$  إلى الحالة  $n = 1$ . افترض أن الميون يدور حول بروتون ثابت.

## الفصل السابع | ميكانيك الكم | QUANTUM MECHANICS



**الشكل 1.7:** معالج الكيوبت qubit من شركة D-Wave: هو دماغ الحاسب الكومبي الذي يقوم بتشفير المعلومات بالبيئات الكومبية لإجراء الحسابات المعقدة. (الانتماء: تعديل العمل من قبل D-Wave Systems Inc.).

### مخطط الفصل

1.7 التتابع الموجية

2.7 مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ

3.7 معادلة شرودنغر

4.7 الجسيم الكومبي ضمن صندوق

5.7 الهزاز التوافقي الكومبي

6.7 النفق الكومبي للجسيمات عبر الحواجز الكومبية

### المقدمة

يُعدُّ ميكانيك الكم إطاراً قوياً لفهم حركة الجسيمات الصغيرة، كالذرات والجزيئات، وتفاعلاتها. غالباً ما تبدو الأفكار الكامنة وراء ميكانيك الكم غريبة جداً. لا تؤهلنا تجربتنا اليومية مع العالم المادي الماكروسكوبي (الجهري) في الكثير من النواحي لفهم العالم الجهري لميكانيك الكم. والغرض من هذا الفصل هو أن نستعرض لكم هذا العالم المثير.

يبين **الشكل 1.7** معالج حاسب كومبي. هذا المعالج هو "دماغ" الحاسب الكومبي الذي يعمل عند درجات حرارة قريبة من الصفر المطلق. وعلى عكس الحاسب الرقمي، الذي يشفر المعلومات بالأرقام الثنائية (حالات محددة إما صفر أو واحد). يقوم الحاسب الكومبي بترميز المعلومات بالبت الكومبي أو الكيوبت (حالات مختلطة من الصفر والواحد). ستتم مناقشة أجهزة الحاسب الكومبية في القسم الأول من هذا الفصل.

## الأهداف التعليمية

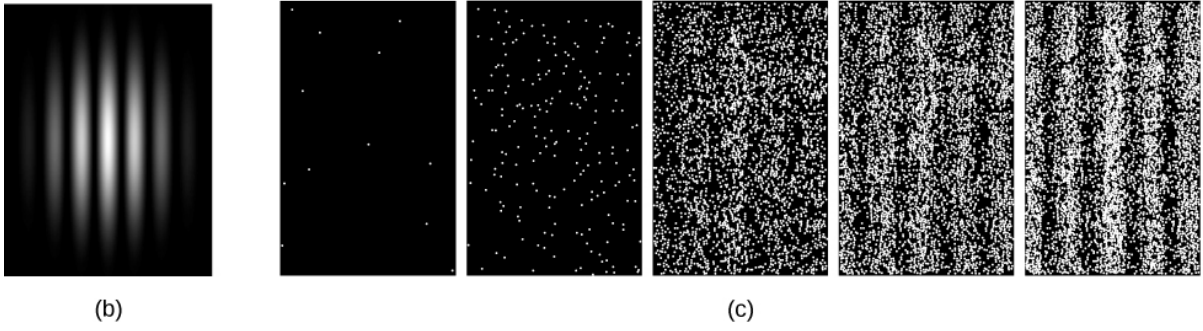
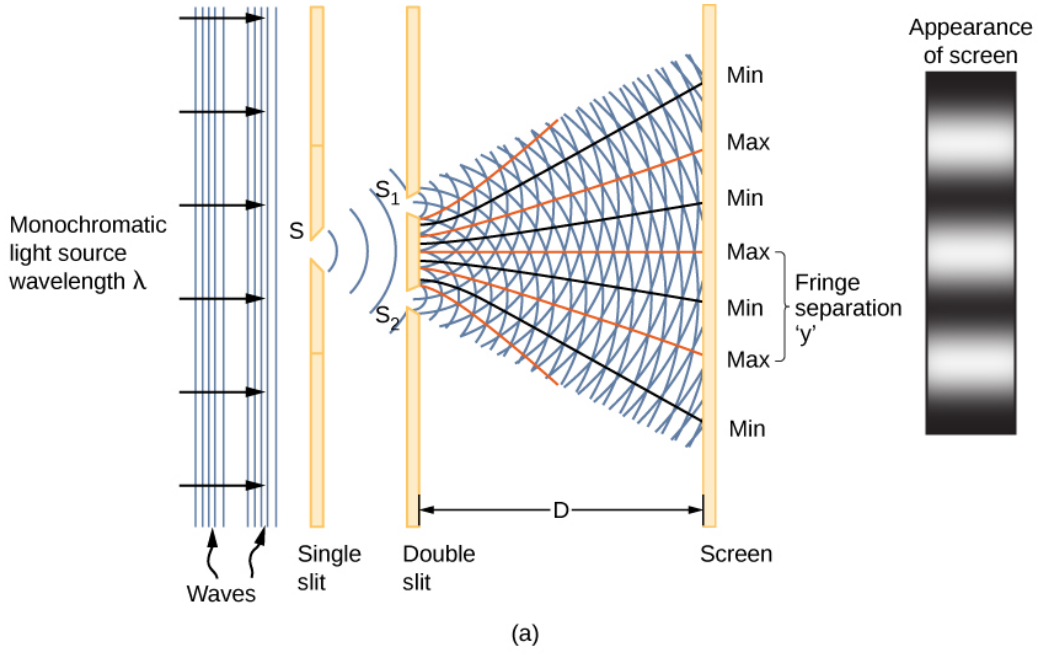
في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- وصف التفسير الإحصائي للتابع الموجي.
- استخدام التابع الموجي لتحديد الاحتمالات.
- حساب القيم المتوقعة للموضع والعزم والطاقة الحركية.

رأينا في الفصل السابق أن الجسيمات تتصرف في بعض الحالات كجسيمات وفي حالات أخرى كأموج. ولكن ماذا يعني أن يتصرف الجسيم كموجة؟ ما هو "التموج" بالضبط؟ ما هي القواعد التي تحكم كيفية تغير هذه الموجة وانتشارها؟ كيف يتم استخدام التابع الموجي لتحديد التنبؤات؟ على سبيل المثال، إذا تم إعطاء مطال موجة الإلكترون على شكل تابع للموضع والزمن،  $\Psi(x, t)$ ، محدد من أجل جميع قيم  $x$ ، أين يقع هذا الإلكترون بالضبط؟ الغرض من هذا الفصل هو الإجابة عن مثل هذه التساؤلات.

## استخدام التابع الموجي

يمكن أخذ فكرة عن المعنى الفيزيائي للتابع الموجي  $\Psi(x, t)$  من خلال تداخل مزدوج الشق لضوء أحادي اللون (**الشكل 2.7**). كما يمكن مشاهدة **الموجات الكهرطيسية والتداخل في الرابط** (<http://cnx.org/content/m58495/latest/>). يُرمز للتابع الموجي لموجة الضوء بالرمز  $E(x, t)$  ويرمز لشدته الطاقية بالرمز  $|E|^2$ ، حيث  $E$  هي شدة الحقل الكهربائي. تعتمد طاقة الفوتون الفردي فقط على تردد الضوء،  $\epsilon_{\text{photon}} = hf$ ، لذلك فإن تناسب  $|E|^2$  مع عدد الفوتونات. عندما تتداخل أمواج الضوء من الشق  $S_1$  مع أمواج الضوء من الشق  $S_2$  على شاشة العرض (على بعد  $D$ )، يتشكل نمط تداخل (الجزء (a) من هذا الشكل). توافق الأهداب المضيفة نقاط التداخل البتء لأموج الضوء، بينما توافق الأهداب المظلمة نقاط التداخل الهدام لأموج الضوء (الجزء (b) من هذا الشكل). لنفترض أن الشاشة غير معرضة للضوء في البداية. فإذا تعرضت هذه الشاشة لضوء ضعيف جداً، فسيظهر نمط التداخل تدريجياً (**الشكل 2.7** (c))، من اليسار إلى اليمين). وستظهر أماكن ضربات الفوتون الفردية على الشاشة كنقاط. من المتوقع أن يكون عدد النقاط كبيراً في المواقع، التي سيكون فيها مخطط التداخل هو الأكثر شدة. بمعنى آخر، يتناسب احتمال (في واحدة المساحة) أن يصطدم فوتون واحد بقعة معينة على الشاشة مع مربع شدة الحقل الكهربائي الكلي  $|E|^2$  في تلك النقطة.



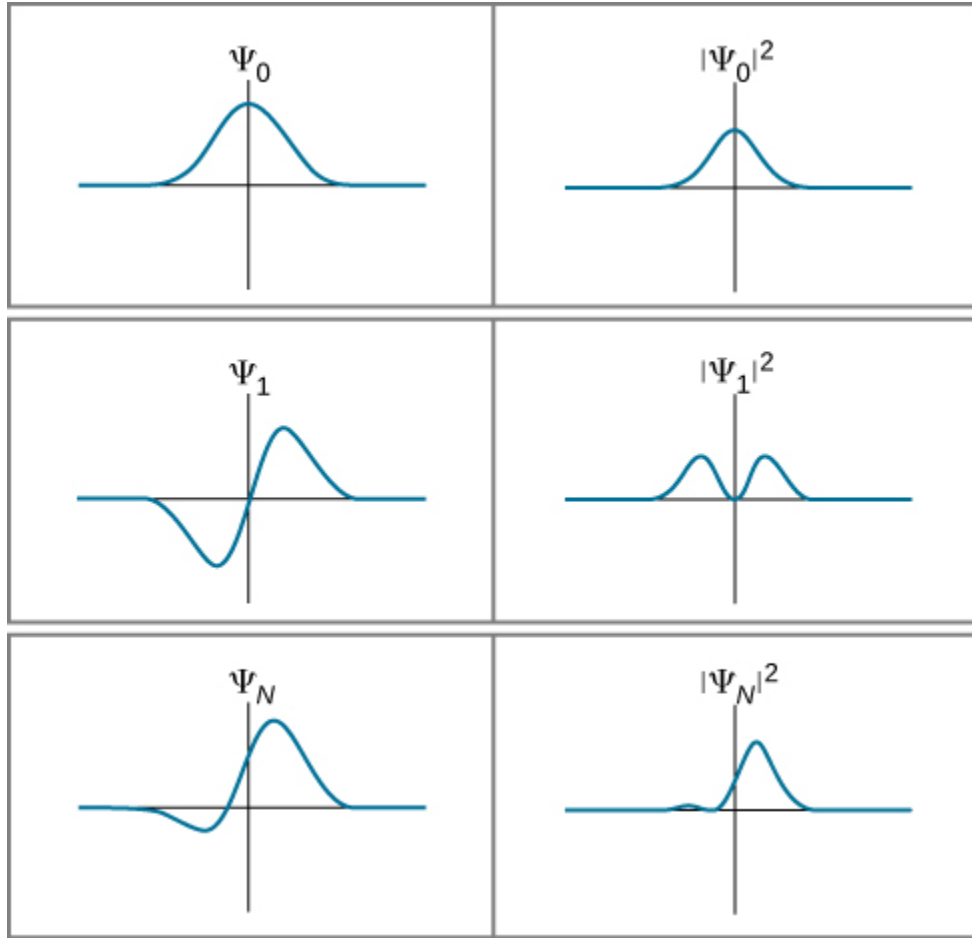
**الشكل 2.7:** مخطط تداخل مزدوج الشق لضوء أحادي اللون (a) مخطط لتداخل مزدوج الشق؛ (b) طيف التداخل الضوئي؛ (c) طيفوف التداخل المتراكمة تدريجياً تحت ضوء منخفض الشدة (من اليسار إلى اليمين).

❖ تفضل بزيارة **المحاكاة التفاعلية** (<https://openstaxcollege.org/l/21intquawavint>) لمعرفة المزيد حول تداخل الموجة الكمومية.

مربع موجة المادة  $|\Psi|^2$  في بعد واحد له المعنى نفسه لمربع شدة الحقل الكهربائي  $|E|^2$ ، والذي يعطي احتمال وجود الجسيم في موضع وزمان معينين في وحدة الطول، وتسمى أيضاً **كثافة الاحتمال**. إن احتمال ( $P$ ) وجود جسيم في نطاق ضيق  $(x, x + dx)$  في اللحظة  $t$  هو:

$$P(x, x + dx) = |\Psi(x, t)|^2 dx. \quad (7.1)$$

(سنحدد لاحقاً أن القيمة التربيعية للحالة العامة لتابع ما تحوي "أجزاء تخيلية"). يُسمى هذا التفسير الاحتمالي للتابع الموجي بتفسير بورن. يبين **الشكل 3.7** أمثلة على التوابع الموجي ومربعاتها من أجل زمن معين  $t$ .



**الشكل 3.7** عدة أمثلة على التوابع الموجي ومربعاتها.

إذا تغير التابع الموجي ببطء على امتداد المسافة  $\Delta x$ ، فإن احتمال وجود الجسيم في هذه المسافة تقريباً هو:

$$P(x, x + \Delta x) \approx |\Psi(x, t)|^2 \Delta x. \quad (7.2)$$

لاحظ أن تربيع التابع الموجي يضمن أن يكون الاحتمال موجباً. (هذا مشابه لتربيع شدة الحقل الكهربائي - والتي قد تكون موجبة أو سالبة - للحصول على قيمة موجبة). ومع ذلك، إذا لم يتغير التابع الموجي ببطء، فيجب أن نكمل:

$$P(x, x + \Delta x) = \int_x^{x + \Delta x} |\Psi(x, t)|^2 dx. \quad (7.3)$$

هذا الاحتمال هو المنطقة الواقعة تحت التابع  $|\Psi(x, t)|^2$  بين  $x$  و  $x + \Delta x$  فقط. احتمال وجود الجسيم "في مكان ما" (شرط التنظيم أو التطبيع) هو:

$$P(-\infty, +\infty) = \int_{-\infty}^{\infty} |\Psi(x, t)|^2 dx = 1. \quad (7.4)$$

بالنسبة لجسيم في بعدين، يكون التكامل سطحياً، ويتطلب تكاملاً ثنائياً؛ أما بالنسبة للجسيمات الواقعة ضمن ثلاثة أبعاد، فيكون التكامل حجمياً، ويتطلب تكاملاً ثلاثياً. في الوقت الحالي، سنهتم بالحالة البسيطة أحادية البعد.

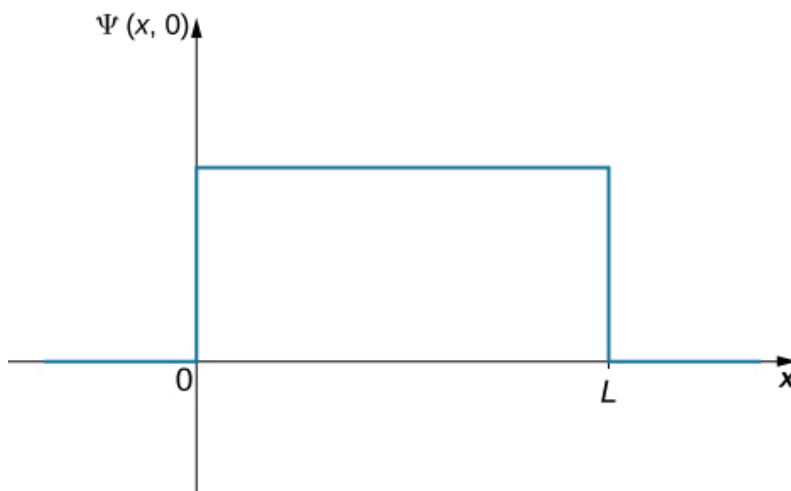


أين هي الكرة؟ (الجزء الأول)

كرة مقيدة الحركة على طول خط داخل أنبوب طوله  $L$ . إن احتمالية تواجد هذه الكرة في أي مكان داخل هذا الأنبوب في الزمن  $t$  متساوية. ما هو احتمال وجود هذه الكرة في النصف الأيسر من الأنبوب في ذلك الزمن؟ (الإجابة هي 50٪ حتماً، لكن كيف نحصل على هذه الإجابة باستخدام التفسير الاحتمالي للتابع الموجي في الميكانيك الكمومي؟)

خطة الحل:

الخطوة الأولى هي كتابة التابع الموجي. احتمالية تواجد الكرة في أي مكان من الأنبوب متساوية، وعليه فإن إحدى طرق وصف الكرة هي بالتابع الموجي الثابت (الشكل 4.7). يمكن استخدام شرط التطبيع لإيجاد قيمة التابع، ثم نقوم بمكاملة بسيطة على نصف الأنبوب لنحصل على الإجابة النهائية.



الشكل 4.7 التابع الموجي لكرة في أنبوب طوله  $L$ .

الحل:

يمكن كتابة التابع الموجي للكرة على الشكل التالي  $\Psi(x, t) = C(0 < x < L)$ ، حيث  $C$  ثابت، وفيما عدا ذلك يكون  $\Psi(x, t) = 0$ . يمكننا تحديد قيمة الثابت  $C$  من خلال تطبيق شرط التطبيع (حيث عوضنا قيمة  $t = 0$  لتبسيط الترميز):

$$P(x = -\infty, +\infty) = \int_{-\infty}^{\infty} |C|^2 dx = 1.$$

يمكن تقسيم هذا التكامل إلى ثلاثة أجزاء: (1) من اللانهاية السالبة إلى الصفر، (2) من الصفر إلى  $L$ ، و(3) من  $L$  إلى ما لانهاية. وبما أن الجسيم مقيد بالحركة داخل الأنبوب، لذا فإن  $C = 0$  خارج الأنبوب والتكامل الأول والأخير يساويان الصفر. وبالتالي يمكن كتابة المعادلة السابقة كما يلي:

$$P(x = 0, L) = \int_0^L |C|^2 dx = 1.$$

لا تعتمد قيمة  $C$  على  $x$  ويمكن إخراجها من التكامل، فنحصل على:

$$|C|^2 \int_0^L dx = 1.$$

بالتكامل نجد:

$$C = \sqrt{\frac{1}{L}}$$

لتحديد احتمال وجود الكرة في النصف الأول من الأنبوب ( $0 < x < L$ )، لدينا

$$P(x = 0, L/2) = \int_0^{L/2} \left| \sqrt{\frac{1}{L}} \right|^2 dx = \left( \frac{1}{L} \right) \frac{L}{2} = 0.50.$$

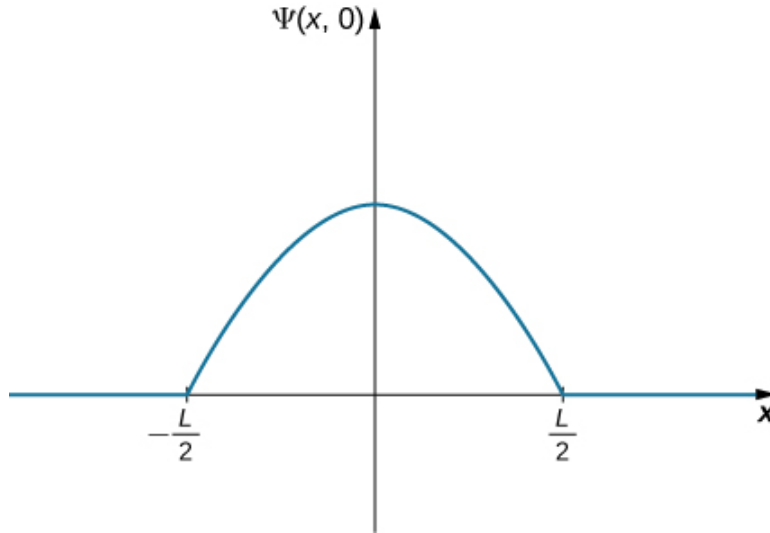
**ملاحظة:**

احتمال وجود الكرة في النصف الأول من الأنبوب هو 50٪، كما هو متوقع. ولكن هناك ملاحظتان جديرتان بالاهتمام. أولاً، تتوافق هذه النتيجة مع المنطقة الواقعة تحت التابع من  $x=0$  إلى  $L/2$  (مساحة المربع الأيسر من  $L/2$ ). ثانياً، يتطلب هذا الحساب تكامل مربع التابع الموجي. من الأخطاء الشائعة في إجراء مثل هذه الحسابات هو نسيان تربيع التابع الموجي قبل التكامل.

## مثال 2.7

**أين هي الكرة؟ (الجزء الثاني)**

كرة مقيدة الحركة مرة أخرى على طول خط داخل أنبوب طوله  $L$ . هذه المرة، إن احتمال وجود الكرة في منتصف الأنبوب هو أغلب ما يكون. إحدى طرق تمثيل التابع الموجي هي تابع جيب التمام (**الشكل 5.7**). ما هو احتمال وجود الكرة في الربع الأخير من هذا الأنبوب؟



**الشكل 5.7** التابع الموجي لكرة داخل أنبوب طوله  $L$ ، حيث غالباً ما تكون الكرة في منتصف الأنبوب.

**خطة الحل:**

نستخدم خطة الحل نفسها المتبعة في المثال السابق. في هذه الحالة، يحتوي التابع الموجي على ثابتين مجهولين: أحدهما يرتبط بطول الموجة والآخر هو مطال الموجة. نحدد المطال باستخدام الشروط الحدية للمسألة، ونقوم بطول الموجة باستخدام شرط التطبيع. يعطي تكامل مربع التابع الموجي على الربع الأخير من الأنبوب الإجابة النهائية. ويتم تبسيط الحساب بجعل مركز نظام الإحداثيات عند قمة التابع الموجي.

**الحل:**

يمكن كتابة التابع الموجي للكرة على الشكل التالي:

$$\Psi(x, 0) = A \cos(kx) \quad (-L/2 < x < L/2),$$

حيث  $A$  هو مطال التابع الموجي و  $k = 2\pi/\lambda$  هي رقمها الموجي. بعد هذا الفاصل الزمني، يكون مطال التابع الموجي مساوياً الصفر لأن الكرة محصورة داخل الأنبوب. يجعل التابع الموجي ينتهي في الطرف الأيمن من الأنبوب نحصل على:

$$\Psi(x = L/2, 0) = 0$$

يعطي تقويم التابع الموجي عند  $x = L/2$ :

$$A \cos(kL/2) = 0$$

تكون هذه المعادلة محققة عندما يكون جيب التمام هو أحد المضاعفات الصحيحة:  $\pi/2$  و  $3\pi/2$  و  $5\pi/2$ . في هذه الحالة، يكون لدينا:

$$\frac{kL}{2} = \frac{\pi}{2},$$

أو

$$k = \frac{\pi}{L}.$$

بتطبيق شرط التطبيع نجد  $A = \sqrt{2/L}$ ، وبالتالي فإن التابع الموجي للكرة هو:

$$\Psi(x, 0) = \sqrt{\frac{2}{L}} \cos(\pi x/L), \quad -L/2 < x < L/2.$$

لتحديد احتمال وجود الكرة في الربع الأخير من الأنبوب، نقوم بتربيع التابع ونكامله:

$$P(x = L/4, L/2) = \int_{L/4}^{L/2} \left| \sqrt{\frac{2}{L}} \cos\left(\frac{\pi x}{L}\right) \right|^2 dx = 0.091.$$

### ملاحظة:

احتمال وجود الكرة في الربع الأخير من الأنبوب هو 9.1%. تتمتع الكرة بطول موجي محدد ( $\lambda = 2L$ ). إذا كان الأنبوب ذا طول جهري ( $L = 1 \text{ m}$ )، فإن عزم الكرة يكون:

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{h}{2L} \sim 10^{-36} \text{ m/s}.$$

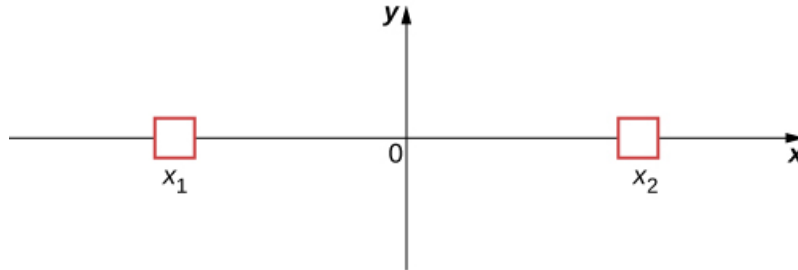
هذا العزم صغير جداً، بحيث لا يمكن قياسه بأي أداة بشرية.

### تأويل (معنى) التابع الموجي

نحن الآن في وضع يسمح لنا بالبداية بالإجابة عن الأسئلة التي طُرحت في بداية هذا القسم. أولاً، بالنسبة للجسيمات المتحركة الموصوفة بالعلاقة:  $\Psi(x, t) = A \sin(kx - \omega t)$ ، ما هو "التموج؟" بناءً على المناقشة أعلاه، فإن الإجابة هي تابع رياضي، من بين الأشياء الأخرى، يمكن أن يُستخدم لتحديد المكان، الذي من المتوقع أن يكون فيه الجسيم عند إجراء قياس الموضع. ثانياً، كيف يتم استخدام التابع الموجي لتقدير تنبؤات؟ إذا كان من الضروري إيجاد احتمال وجود جسيم في مجال معين، فقم بتربيع التابع الموجي وكامله ضمن المجال المطلوب. قريباً، سوف تتعلم أن التابع الموجي يمكن استخدامه للقيام بالعديد من أنواع التنبؤات أيضاً.

ثالثاً، إذا أُعطيت موجة المادة بالتابع الموجي  $\Psi(x, t)$ ، فأين الجسيم بالضبط؟ هناك إجابتان على هذا السؤال: (1) عندما لا ينظر المراقب (أو لا يتم الكشف عن الجسيم بطريقة أخرى)، يكون الجسيم في كل مكان ( $x = -\infty, +\infty$ )؛ و (2) عندما ينظر المراقب (يتم الكشف عن الجسيمات)، فإن الجسيمات "تقفز إلى" حالة موضعية معينة ( $x, x + dx$ ) ويُعطى احتمال وجودها بالعلاقة  $P(x, x + dx) = |\Psi(x, t)|^2 dx$ . تُسمى هذه العملية اختزال الحالة أو انهيار التابع الموجي. تُسمى هذه الإجابة تأويل كوبنهاغن للتابع الموجي، أو ميكانيك الكم.

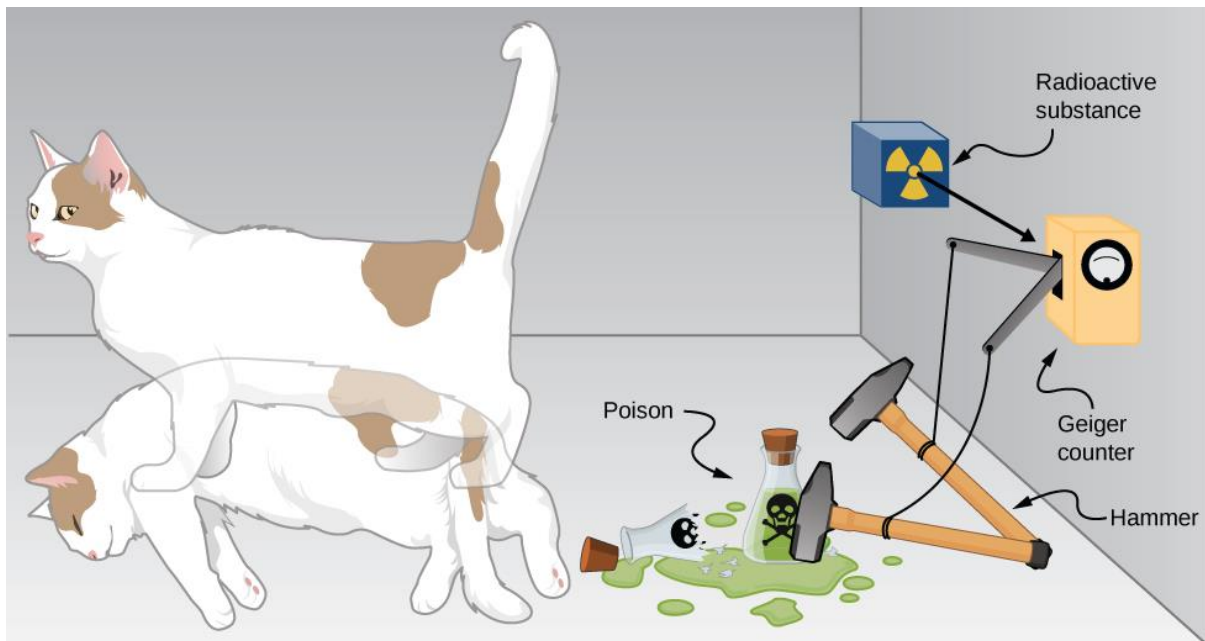
لتوضيح هذا التاويل، انظر إلى الحالة البسيطة لجسيم يمكن أن يشغل حاوية صغيرة إما في  $x_1$  أو  $x_2$  (الشكل 6.7). نفترض في الفيزياء الكلاسيكية أن الجسيم يقع إما في  $x_1$  أو  $x_2$  عندما لا ينظر المراقب. ومع ذلك، في ميكانيك الكم، قد يوجد الجسيم في موضع غير محدد، أي أنه قد يكون موجوداً في  $x_1$  و  $x_2$  عندما لا ينظر المراقب. تم التخلي عن الافتراض القائل إنه يمكن أن يكون للجسيم قيمة واحدة فقط للموضع (عندما لا ينظر المراقب). يمكن التعليق بالمثل حول كميات أخرى قابلة للقياس، كالعزم والطاقة.



**الشكل 6.7** نظام موضع الجسيم ثنائي الحالات.

يتم توضيح النتائج الغريبة لتأويل كوبنهاغن لميكانيك الكم من خلال تجربة التفكير الإبداعي التي أوضحها لأول مرة إروين شرودنغر (National Geographic, 2013) (الشكل 7.7):

"يتم وضع قطعة في صندوق فولاذي بالإضافة إلى عداد جيجر وقارورة من السم ومطرقة ومادة مشعة. عندما تتحلل المادة المشعة، يكتشفها عداد جيجر ويحرق المطرقة التي تقوم بإطلاق السم، الذي يقتل القط بعد ذلك. التحلل الإشعاعي هو عملية عشوائية [احتمالية]، ولا توجد طريقة للتنبؤ بموعد حدوثها. يقول الفيزيائيون إن الذرة موجودة في حالة تُعرف باسم التراكب superposition أي أنها تتحلل ولا تتحلل في الوقت نفسه. لا يعرف المراقب فيما إذا كانت القطعة حية أم ميتة إلى أن يتم فتح الصندوق، لأن مصير القطعة مرتبط ارتباطاً وثيقاً بما إذا كانت الذرة قد تحللت أم لا، وستكون القطعة [وفقاً لتأويل كوبنهاغن] ميتة... في أجزاء متساوية "حتى يتم ملاحظتها".



**الشكل 7.7** قطة شرودنغر.

أخذ شرودنغر الآثار السخيفة (العشبية) لهذه التجربة الفكرية (قطعة ميتة وحية في الوقت نفسه) كحجة ضد تأويل كوبنهاغن. ومع ذلك، لا يزال هذا التأويل هو النظرة الأكثر شيوعاً لتدريس ميكانيك الكم .


غالبًا ما تستخدم أنظمة أو جمل ثنائية الحالة (اليسار واليمين، والذرة تتحلل ولا تتحلل، وما إلى ذلك) لتوضيح مبادئ ميكانيك الكم. يوجد لهذه الأنظمة العديد من التطبيقات في الطبيعة، بما في ذلك دوران الإلكترون والحالات المختلطة للجسيمات والذرات حتى الجزيئات. كما يوجد للأنظمة ثنائية الحالة أيضاً تطبيقات على الحاسب الكمومي، كما هو مذكور في مقدمة هذا الفصل. بخلاف الكمبيوتر الرقمي، الذي يقوم بتشفير المعلومات بالأرقام الثنائية (الأصفر والأحادي)، فإن الحاسب الكمومي يقوم بتخزين البيانات ومعالجتها على شكل بتات كمومية أو كيوبتات. بشكل عام، الكيوبت ليس حالة من الصفر أو الواحد، وإنما هي حالة مختلطة من الصفر والواحد. إذا تم وضع عدد كبير من البتات في الحالة الكمومية نفسها، فإن قياس البتات الفردية ينتج صفرًا باحتمال  $p$ ، وواحدًا باحتمال  $q = 1 - p$ . يعتقد العديد من العلماء بأن أجهزة الكمبيوتر الكمومية هي مستقبل صناعة الكمبيوتر.

### المرافقات العقدية

في وقت لاحق من هذا الجزء من الفصل، سترى كيفية استخدام التابع الموجي لوصف الجسيمات "الحرّة" أو المرتبطة بقوى مع الجسيمات الأخرى. يعتمد الشكل المحدد للتابع الموجي على تفاصيل النظام المادي. وخصوصية نظرية الكم هي أن هذه التوابع عادةً ما تكون توابعاً عقديّة. يحتوي التابع العقدي على رقم تخيلي واحد أو أكثر ( $i = \sqrt{-1}$ ). تعطي القياسات التجريبية أرقاماً حقيقية (غير تخيلية) فقط، لذلك يجب تعديل الإجراء المذكور أعلاه قليلاً لاستخدام التابع الموجي. بشكل عام، يُعطى احتمال وجود جسيم في المجال الضيق  $(x, x + dx)$  في الزمن  $t$  بالعلاقة:

$$P(x, x + dx) = |\Psi(x, t)|^2 dx = \Psi^*(x, t)\Psi(x, t)dx, \quad (7.5)$$

حيث  $\Psi^*(x, t)$  هي المرافق العقدي للتابع الموجي. يتم الحصول على المرافق العقدي للتابع من خلال استبدال كل  $i = -1$  في ذلك التابع بـ  $-i$ . يزيل هذا الإجراء الأعداد العقدية في جميع التنبؤات لأن ناتج الجداء  $\Psi^*(x, t)\Psi(x, t)$  هو دائماً عدد حقيقي.

**1.7 تحقق من فهمك:** إذا كانت  $a = 3 + 4i$ ، ما هو ناتج الجداء  $a * a$ ؟ 

بالنظر إلى حركة جسيم حر يتحرك على طول محور السينات، فإن هذا الجسيم الحر لا يواجه أي قوى، وبالتالي يتحرك بسرعة ثابتة. كما سنرى في جزء لاحق من هذا الفصل، يشير ميكانيك الكم لجسيم الحر إلى أن التابع الموجي له جزء حقيقي وجزء تخيلي. وتحديدًا يُعطى التابع الموجي بالعلاقة:

$$\Psi(x, t) = A \cos(kx - \omega t) + iA \sin(kx - \omega t),$$

حيث  $A$  هو المطال،  $k$  هو رقم الموجة، و  $\omega$  هو التردد الزاوي. باستخدام معادلة أويلر،  $e^{i\phi} = \cos(\phi) + i\sin(\phi)$  يمكن كتابة هذه المعادلة على الشكل التالي:

$$\Psi(x, t) = A e^{i(kx - \omega t)} = A e^{i\phi},$$

حيث:  $\phi$  هي زاوية الطور. إذا تغير التابع الموجي ببطء خلال المجال  $\Delta x$ ، فإن احتمال وجود الجسيم في ذلك المجال هو:

$$P(x, x + \Delta x) \approx \Psi^*(x, t)\Psi(x, t)\Delta x = (A e^{-i\phi})(A e^{i\phi})\Delta x = (A * A)\Delta x.$$

إذا كانت  $A$  تحتوي على أجزاء حقيقية وتخيلية  $(a + ib)$  حيث  $a$  و  $b$  هما ثوابت حقيقية، إذًا:

$$A * A = (a + ib)(a - ib) = a^2 + b^2$$

لاحظ أن الأرقام العقدية قد اختفت، وبالتالي:

$$P(x, x + \Delta x) \approx |A|^2 \Delta x$$

هو كمية حقيقية. إن تأويل  $\Psi^*(x, t)\Psi(x, t)$ ، كشدة احتمالية يضمن إمكانية التحقق من تنبؤات ميكانيك الكم في "العالم الحقيقي".



**2.7 تحقق من فهمك:** لنفترض أن جسيم طاقته  $E$  يتحرك على طول محور السينات ومحصور في المنطقة الواقعة بين  $0$  و  $L$ . أحد التوابع الموجية الممكنة هو:

$$\psi(x, t) = \begin{cases} Ae^{-iEt/\hbar} \sin \frac{\pi x}{L}, & \text{when } 0 \leq x \leq L \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

حدّد شرط التطبيع.

### القيم المتوقعة

حل معادلة الحركة في الميكانيك الكلاسيكي هو تابع لكمية قابلة للقياس، مثل  $x(t)$ ، حيث  $x$  هي الموضع و  $t$  هو الزمن. لاحظ أن لموضع الجسيم قيمة واحدة عند أي زمن  $t$ ، بينما في ميكانيك الكم، فإن حل معادلة الحركة هو تابع موجي  $\Psi(x, t)$ . وللجسيم العديد من قيم الموضع بالنسبة لأي زمن  $t$ ، وكثافة احتمال وجود الجسيم  $|\Psi(x, t)|^2$  يمكن أن تكون معلومة. من المتوقع أن يكون متوسط قيمة الموضع  $\langle x \rangle$  لعدد كبير من الجسيمات التي لها التابع الموجي نفس هو:

$$\langle x \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} xP(x, t)dx = \int_{-\infty}^{\infty} x\Psi^*(x, t)\Psi(x, t)dx. \quad (7.6)$$

وهذا ما يُسمى بالقيمة المتوقعة للموضع. وعادةً ما تُكتب على الشكل التالي:

$$\langle x \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi^*(x, t)x\Psi(x, t)dx, \quad (7.7)$$

حيث يقع  $x$  بين التوابع الموجية. والسبب في ذلك سيتوضح قريباً. يُسمى  $x$  مؤثر الموضع. في هذه المرحلة، من المهم التأكيد على أنه يمكن كتابة التابع الموجي بدلالة الكميات الأخرى أيضاً، كالسرعة ( $v$ )، والعزم ( $p$ )، والطاقة الحركية ( $K$ ). على سبيل المثال، يمكن كتابة قيمة العزم المتوقع:

$$\langle p \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi^*(p, t)p\Psi(p, t)dp, \quad (7.8)$$

يتم استخدام  $dp$  بدلاً من  $dx$  للإشارة إلى مجال متناهي الصغر في العزم. في بعض الحالات، يكون التابع الموجي الموجود في الموضع معلوم،  $\Psi(x, t)$ ، ولكننا نبحث عن العزم المتوقع. والإجراء للقيام بذلك هو:

$$\langle p \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi^*(x, t)\left(-i\hbar\frac{d}{dx}\right)\Psi(x, t)dx, \quad (7.9)$$

تُسمى الكمية الموجودة بين قوسين، والمحصورة بين التابعين الموجيين، بمؤثر العزم في اتجاه محور السينات. [يقال إن مؤثر العزم في المعادلة 7.9 هو التمثيل الزمكاني لمؤثر العزم]. يجب أن يؤثر مؤثر العزم على التابع الموجي من اليمين، ومن ثم يجب ضرب النتيجة بالمرافق العقدي للتابع الموجي من اليسار، قبل التكامل. يُعرّف أحياناً مؤثر العزم باتجاه  $x$  بالعلاقة التالية:

$$(p_x)_{op} = -i\hbar\frac{d}{dx}, \quad (7.10)$$

يُعرّف مؤثر العزم للاتجاهين  $y$  و  $z$  بالطريقة نفسها. يتم اشتقاق هذا المؤثر والكثير غيره في دورة أكثر تقدماً في الفيزياء الحديثة. في بعض الحالات، يكون هذا الاشتقاق بسيطاً نسبياً. على سبيل المثال، مؤثر الطاقة الحركية هو:

$$(K)_{\text{op}} = \frac{1}{2}m(v_x)_{\text{op}}^2 = \frac{(p_x)_{\text{op}}^2}{2m} = \frac{(-i\hbar \frac{d}{dx})^2}{2m} = \frac{-\hbar^2}{2m} \left( \frac{d}{dx} \right) \left( \frac{d}{dx} \right). \quad (7.11)$$

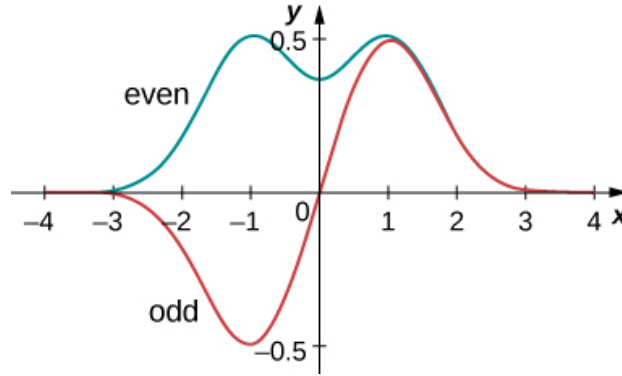
وبالتالي، يلزم لإيجاد القيمة المتوقعة للطاقة الحركية لجسيم ما في بعد واحد اشتقاقان عاديان متتاليان للتابع الموجي قبل التكامل. غالباً ما يتم تبسيط حسابات القيمة المتوقعة من خلال استغلال تناظر التابع الموجي. يمكن أن تكون التوابع الموجية المتناظرة زوجية أو فردية. التابع الزوجي هو تابع يحقق الشرط التالي:

$$\psi(x) = \psi(-x). \quad (7.12)$$

في المقابل، التابع الفردي هو تابع يحقق الشرط التالي:

$$\psi(x) = -\psi(-x). \quad (7.13)$$

يوضح الشكل 8.7 مثالاً عن التوابع الزوجية والفردية. التابع الزوجي متناظر حول المحور  $y$ . ينتج هذا التابع من خلال عكس  $\psi(x)$  من أجل قيم  $x > 0$  حول المحور العمودي  $y$ . في المقابل، يتم إنشاء التابع الفردي عن طريق عكس التابع حول المحور  $y$  ثم حول المحور  $x$  (يشار إلى التابع الفردي أيضاً بالتابع مضاد التناظر).



الشكل 8.7 أمثلة عن التوابع الموجية الزوجية والفردية.

بشكل عام، جداء تابع زوجي بتابع زوجي يعطي تابعاً زوجياً. مثال بسيط عن التابع الزوجي هو ناتج الجداء  $x^2 e^{-x^2}$  (جداء الأعداد الزوجية يعطينا عدداً زوجياً). وبالمثل، فإن جداء تابع فردي بتابع زوجي، مثل  $x \sin x$  (يعطي جداء عدد فردي بعدد فردي عدداً زوجياً). ومع ذلك، فإن جداء تابع فردي بتابع زوجي يعطي تابعاً فردياً، مثل  $x e^{-x^2}$  (جداء عدد فردي بعدد زوجي يعطينا عدداً فردياً). التكامل على كامل مساحة التابع الفردي يساوي صفرًا، لأن المساحة الكلية للتابع فوق المحور السيني تلغي المنطقة (السالبة) الموجودة تحتها. كما يوضح المثال التالي، فإن هذه الخاصية للتوابع الفردية مفيدة جداً.

### مثال 3.7

#### القيمة المتوقعة (الجزء الأول)

التابع الموجي المطبق لجسيم هو:

$$\psi(x) = e^{-|x|/x_0} / \sqrt{x_0}.$$

أوجد القيمة المتوقعة للموضع.

### خطه الحل:

عوض التابع الموجي في المعادلة 7.7 وقم بتقييمه. يقدم مؤثر الموضع معاملاً مضاعفاً فقط، لذلك يجب أن لا يكون مؤثر الموضع "محصوراً".

الحل:

اضرب أولاً، ثم قم بالمكاملة:

$$\langle x \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} dx x |\psi(x)|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} dx x \left| \frac{e^{-|x/x_0|}}{\sqrt{x_0}} \right|^2 = \frac{1}{x_0} \int_{-\infty}^{+\infty} dx x e^{-2|x/x_0|} = 0.$$

### ملاحظة:

التابع الموجودة في التكامل ( $x e^{-2|x/x_0|}$ ) غريب نظراً لأنه ناتج عن جداء تابع فردي ( $x$ ) بتابع زوجي ( $e^{-2|x/x_0|}$ ). ينزل التكامل لأن المساحة الكلية للتابع حول محور السينات تلغي المنطقة (السالبة) الواقعة تحتها. النتيجة ( $\langle x \rangle = 0$ ) ليست مفاجئة لأن تابع كثافة الاحتمال متناظر حول  $x = 0$ .

## مثال 4.7

### القيمة المتوقعة (الجزء الثاني)

تابع موجي معتمد على الزمن لجسيم ما محصور في المنطقة ما بين 0 و  $L$  هو:

$$\psi(x, t) = A e^{-i\omega t} \sin(\pi x/L)$$

حيث  $\omega$  هو التردد الزاوي و  $E$  هي طاقة الجسيم. (ملاحظة: تتغير التابع كتابي جيبى بسبب الحدود (0 إلى  $L$ ). عندما يكون  $x = 0$ ، يكون عامل الجيب صفراً والتابع الموجي صفري، بما يتفق مع الشروط الحدية). احسب القيم المتوقعة للموضع والعزم والطاقة الحركية.

### خطه الحل:

يجب علينا أولاً تطبيع التابع الموجي لإيجاد  $A$ . ثم نستخدم المؤثرات لحساب القيم المتوقعة.

الحل:

حساب ثابت التطبيع:

$$1 = \int_0^L dx \psi^*(x) \psi(x) = \int_0^L dx \left( A e^{+i\omega t} \sin \frac{\pi x}{L} \right) \left( A e^{-i\omega t} \sin \frac{\pi x}{L} \right) = A^2 \int_0^L dx \sin^2 \frac{\pi x}{L} = A^2 \frac{L}{2} \Rightarrow A = \sqrt{\frac{2}{L}}.$$

القيمة التوقعية للموضع هي:

$$\langle x \rangle = \int_0^L dx \psi^*(x) x \psi(x) = \int_0^L dx \left( A e^{+i\omega t} \sin \frac{\pi x}{L} \right) x \left( A e^{-i\omega t} \sin \frac{\pi x}{L} \right) = A^2 \int_0^L dx x \sin^2 \frac{\pi x}{L} = A^2 \frac{L^2}{4} = \frac{L}{2}.$$

يجب مكاملة قيمة العزم التوقعية في الاتجاه  $x$  أيضاً. لتعيين هذا التكامل، فإن المؤثر المرتبط بها - بحسب القاعدة - يجب أن يعمل على يمين التابع الموجي  $\psi(x)$ :

$$-i\hbar \frac{d}{dx} \psi(x) = -i\hbar \frac{d}{dx} A e^{-i\omega t} \sin \frac{\pi x}{L} = -i \frac{\hbar \pi}{2L} A e^{-i\omega t} \cos \frac{\pi x}{L}.$$

لذلك، فإن قيمة العزم المتوقعة هي:



$$\langle p \rangle = \int_0^L dx \left( A e^{+i\omega t} \sin \frac{\pi x}{L} \right) \left( -i \frac{A \hbar}{2L} e^{-i\omega t} \cos \frac{\pi x}{L} \right) = -i \frac{A^2 \hbar}{4L} \int_0^L dx \sin \frac{2\pi x}{L} = 0.$$

التابع الموجود في التكامل هو تابع جيبى بطول موجة يساوي عرض البئر،  $L$  - تابع فردي حول  $x = L/2$ . نتيجة لذلك، يعدم التكامل.

تتطلب القيمة المتوقعة للطاقة الحركية في الاتجاه  $x$  أن يعمل المؤثر المرتبط على التابع الموجي:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} \psi(x) = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} A e^{-i\omega t} \sin \frac{\pi x}{L} = -\frac{\hbar^2}{2m} A e^{-i\omega t} \frac{d^2}{dx^2} \sin \frac{\pi x}{L} = \frac{A \hbar^2}{2mL^2} e^{-i\omega t} \sin \frac{\pi x}{L}.$$

وبالتالي، فإن القيمة المتوقعة للطاقة الحركية هي:


$$\begin{aligned} \langle K \rangle &= \int_0^L dx \left( A e^{+i\omega t} \sin \frac{\pi x}{L} \right) \left( \frac{A \hbar^2}{2mL^2} e^{-i\omega t} \sin \frac{\pi x}{L} \right) \\ &= \frac{A^2 \hbar^2}{2mL^2} \int_0^L dx \sin^2 \frac{\pi x}{L} = \frac{A^2 \hbar^2}{2mL^2} \frac{L}{2} = \frac{\hbar^2}{2mL^2}. \end{aligned}$$

### ملاحظة:

الموضع المتوسط لعدد كبير من الجسيمات في هذه الحالة هو  $L/2$ . العزم المتوسط لهذه الجسيمات هو صفر لأن الجسيم المعطى من المرجح أن يتحرك على اليمين أو اليسار. ومع ذلك، فإن الجسيم ليس في حالة سكون لأن متوسط طاقته الحركية ليس صفرًا. أخيرًا، الكثافة الاحتمالية هي:

$$|\psi|^2 = (2/L) \sin^2(\pi x/L)$$

هذه الكثافة الاحتمالية هي أكبر ما يكون في الموضع  $L/2$  وتساوي الصفر عند  $x = 0$  وعند  $x = L$ . لاحظ أن هذه الاستنتاجات لا تعتمد على الزمن صراحة.

 تحقق من فهمك: أوجد احتمال تحديد موقع الجسيم المبين في المثال أعلاه بين المواضع 0 و  $L/4$ .

يعطي ميكانيك الكم العديد من التوقعات المدهشة. ومع ذلك، في عام 1920، أكد نيلز بور (مؤسس معهد نيلز بور في كوبنهاغن، ومن هنا ظهر مصطلح "تأويل كوبنهاغن") أن تنبؤات ميكانيك الكم والميكانيك الكلاسيكي يجب أن تتوافق لجميع النظم الماكروسكوبية (الجهرية)، كالكواكب المدارية والكرات المرتدة والكراسي الهزازة والنوابض. مبدأ التقابل (التناظر) هذا مقبول الآن بشكل عام. فهو يشير إلى أن قواعد الميكانيك الكلاسيكي هي تقريبا لقواعد الميكانيك الكمومي للأنظمة ذات الطاقات الكبيرة جداً. يصف ميكانيك الكم كلاً من العالم المجهرى والجهري، ولكن يصف الميكانيك الكلاسيكي هذا الأخير فقط.

## 2.7 | مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ The Heisenberg Uncertainty Principle

### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- وصف المعنى الفيزيائي لعلاقة عدم اليقين للموضع والعزم.
- شرح أصول مبدأ عدم اليقين في نظرية الكم.
- وصف المعنى الفيزيائي لعلاقة عدم اليقين للزمن والطاقة

مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ هو مبدأ رئيس في ميكانيك الكم. ويشير إلى أنه إذا عرفنا كل شيء عن مكان وجود الجسيم (حالة عدم اليقين في الموضع صغيرة)، فإننا لا نعرف شيئاً عن عزمه (عدم اليقين في العزم كبير)، والعكس بالعكس. كما يوجد نسخ من مبدأ عدم اليقين للكميات الأخرى أيضاً، كالطاقة والزمن. وسناقش مبادئ عدم اليقين للموضع والعزم وللطاقة والزمن، كل على حدة.

## العزم والموضع

لتوضيح مبدأ عدم اليقين للموضع والعزم، فكر في جسيم حر يتحرك وفق طول محور السينات. يتحرك هذا الجسيم بسرعة ثابتة  $u$  وعزم  $p = mu$ . وفقاً لعلاقات دي بروي، فإن:  $E = \hbar\omega$  و  $p = \hbar k$ . كما ناقشنا في القسم السابق، يُعطى التابع الموجي لهذا الجسيم بالعلاقة:

$$\psi_k(x, t) = A[\cos(\omega t - kx) - i \sin(\omega t - kx)] = Ae^{-i(\omega t - kx)} = Ae^{-i\omega t} e^{ikx} \quad (7.14)$$

وتكون الكثافة الاحتمالية  $|\psi_k(x, t)|^2 = A^2$  موحدة ومستقلة عن الزمن. من المرجح أن يوجد الجسيم في أي مكان على طول المحور السيني، ولكنه يتمتع بقيمة محددة لطول الموجة ورقمها، وبالتالي العزم. عدم اليقين للموضع هو لانهاضي (ذلك لأننا لسنا متأكدين تماماً بشأن الموضع)، وعدم التيقن للعزم يساوي الصفر (لأننا واثقون تماماً بشأن العزم). ويتمشى حساب الجسيم الحر هذا مع مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ.

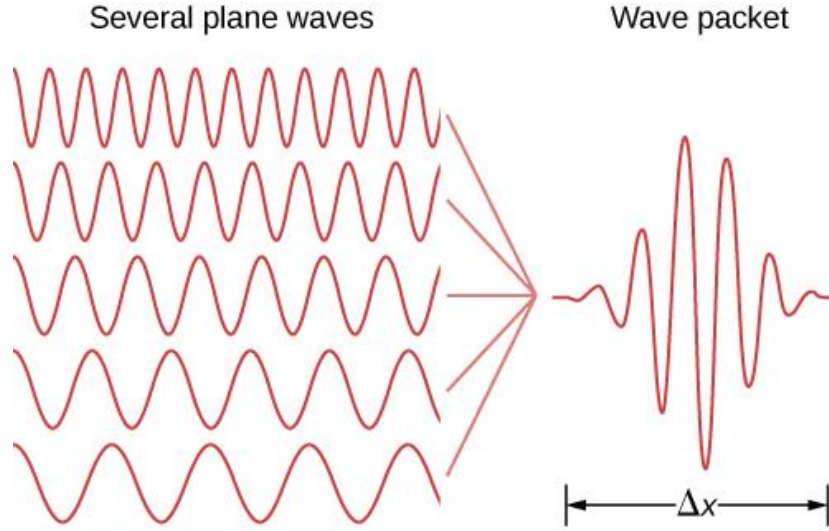
يمكن القول بالمثل عن الجسيمات التي تم تحديد موضعها. في نظرية الكم، يتم وضع نموذج للجسيم المحدد الموقع من خلال تراكب خطي لحالات الجسيم الحر (أو موجة مستوية) تُسمى **الحزمة الموجية**. يبين **الشكل 9.7** مثلاً عن الحزمة الموجية. تحتوي الحزمة الموجية على العديد من الأطوال الموجية، وبالتالي بواسطة علاقات دي بروي، هناك الكثير من العزم - يمكن في ميكانيك الكم! لهذا الجسيم أيضاً قيم عديدة للموضع، على الرغم من أن الجسيم في الغالب مقيد في المجال  $\Delta x$ . يمكن تحديد موضع الجسيم بشكل أفضل (يمكن تقليل  $\Delta x$ ) في حالة إضافة المزيد من حالات الموجة المستوية ذات الأطوال الموجية أو العزم المختلفة معاً بالطريقة الصحيحة (زيادة  $\Delta p$ ) وفقاً لهايزنبرغ، فإن هذه الشكوك تحقق العلاقة التالية.

## مبدأ الشك (عدم اليقين) لهايزنبرغ

لا يمكن أن يكون ناتج جداء عدم اليقين في موضع الجسيم بعدم اليقين في عزمه أقل من نصف ثابت بلانك  $\hbar$ :

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar/2. \quad (7.15)$$

تُعبّر هذه العلاقة عن مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ. والذي بدوره يضع قيوداً على ما يمكن أن نعرفه عن الجسيم من خلال القياسات المتزامنة للموضع والعزم. إذا كان  $\Delta x$  كبيراً، فإن  $\Delta p$  يكون صغيراً، والعكس بالعكس. يمكن اشتقاق **المعادلة 7.15** في دورة أكثر تقدماً في الفيزياء الحديثة. استناداً إلى هذه العلاقة في عمله "المبادئ الفيزيائية لنظرية الكم"، كتب هايزنبرغ "إن أي استخدام للكلمات "الموضع" و "السرعة" بدقة تتجاوز تلك المعطاة بواسطة [العلاقة] لا معنى له تماماً مثل استخدام الكلمات التي لا معنى لها".



**الشكل 9.7** تؤدي إضافة عدة أمواج مستوية ذات أطوال موجي مختلفة إلى توليد موجة محددة الموضع نسبياً.

لاحظ أن مبدأ عدم اليقين لا علاقة له بدقة الجهاز التجريبي. حتى بالنسبة لأجهزة القياس المثالية، فإن أوجه عدم اليقين هذه تظل قائمة لأنها تنشأ من طبيعة المادة الشبيهة بالموجة. تعتمد القيمة الدقيقة لنتائج الجداء  $\Delta x \Delta p$  على الصيغة المحددة للتابع الموجي. ومن المثير للاهتمام، يُعطي تابع غاوص (أو توزع منحني الجرس) القيمة الدنيا لنتائج جداء عدم اليقين:  $\Delta x \Delta p = \hbar/2$ .

## المثال 7.5

### مبدأ عدم اليقين للكبير والصغير

حدد الحد الأدنى من عدم اليقين في مواضع الجسيمات التالية إذا كانت سرعتها معروفة بدقة تبلغ  $1.0 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ : (a) إلكترون و (b) كرة بولينج كتلتها  $6.0 \text{ kg}$ .

### خطة الحل:

بما أن عدم اليقين في السرعة  $\Delta u = 1.0 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ، يتعين علينا أولاً تحديد عدم اليقين في العزم  $\Delta p = m \Delta u$  ثم قلب **المعادلة 7.15** لإيجاد عدم اليقين في الموضع  $\Delta x = \hbar/(2\Delta p)$ .

### الحل:

(a) للإلكترون:

$$\Delta p = m \Delta u = (9.1 \times 10^{-31} \text{ kg})(1.0 \times 10^{-3} \text{ m/s}) = 9.1 \times 10^{-34} \text{ kg} \cdot \text{m/s},$$

$$\Delta x = \frac{\hbar}{2\Delta p} = 5.8 \text{ cm}.$$

(b) لكرة البولينج:

$$\Delta p = m \Delta u = (6.0 \text{ kg})(1.0 \times 10^{-3} \text{ m/s}) = 6.0 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m/s},$$

$$\Delta x = \frac{\hbar}{2\Delta p} = 8.8 \times 10^{-33} \text{ m}.$$

### ملاحظة:

على عكس حالة عدم اليقين الموضحة للإلكترون، فإن حالة عدم اليقين في موضع كرة البولينج صغيرة للغاية. ثابت بلانك صغير جداً، لذا فإن القيود التي يفرضها مبدأ عدم اليقين ليست ملحوظة في الأنظمة الجهرية مثل كرة البولينج.

### عدم اليقين وذرة الهيدروجين

قم بتقدير طاقة الحالة الأساسية لذرة الهيدروجين باستخدام مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ. (تلميح: وفقاً للتجارب المبكرة، يبلغ بعد ذرة الهيدروجين نحو 0.1 nm).

#### خطة الحل:

يمكن نمذجة الإلكترون المرتبط بذرة الهيدروجين كجسيم مرتبط بصندوق أحادي البعد  $L = 0.1 \text{ nm}$ . التابع الموجي للحالة الأساسية لهذا النظام هو نصف موجة، كتلك الواردة في المثال 7.1.

هذا هو أكبر طول موجي يمكن أن "يوضع" في الصندوق، وبالتالي يقابل التابع الموجي أدنى حالة طاقة. لاحظ أن هذا التابع مشابه جداً في الشكل لتابع غاوس (منحنى الجرس). يمكننا أن نأخذ متوسط الطاقة لجسيم موصوف بهذا التابع ( $E$ ) كتقدير جيد لطاقة الحالة الأساسية ( $E_0$ ). يرتبط متوسط الطاقة هذا للجسيم بمرجع متوسط عزمه، والذي يرتبط بدوره بعدم اليقين للعزم.

#### الحل:

لحل هذه المشكلة، يجب أن نكون محددتين بشأن المقصود بعبارة "عدم اليقين في الموضع" و "عدم اليقين في العزم". نحدد عدم اليقين في الموضع ( $\Delta x$ ) مع الانحراف المعياري للموضع ( $\sigma_x$ )، وعدم اليقين في العزم ( $\Delta p$ ) مع الانحراف المعياري للعزم ( $\sigma_p$ ). ناتج جداء عدم اليقين لتابع غاوس هو:

$$\sigma_x \sigma_p = \frac{\hbar}{2}$$

حيث:

$$\sigma_x^2 = x^2 - \bar{x}^2 \quad \text{and} \quad \sigma_p^2 = p^2 - \bar{p}^2.$$

من المرجح أن يتحرك هذا الجسيم إلى اليسار كما يتحرك إلى اليمين، لذلك فإن  $\bar{p} = 0$ . كما أن عدم اليقين في الموضع يقارن بأبعاد الصندوق، لذلك  $\sigma_x = L$ . وبالتالي فإن طاقة الحالة الأساسية المقدرة هي:

$$E_0 = E_{\text{Gaussian}} = \frac{\bar{p}^2}{m} = \frac{\sigma_p^2}{2m} = \frac{1}{2m} \left( \frac{\hbar}{2\sigma_x} \right)^2 = \frac{1}{2m} \left( \frac{\hbar}{2L} \right)^2 = \frac{\hbar^2}{8mL^2}.$$

بضرب البسط والمقام بالمقدار  $c^2$  نحصل على:

$$E_0 = \frac{(\hbar c)^2}{8(mc^2)L^2} = \frac{(197.3 \text{ eV} \cdot \text{nm})^2}{8(0.511 \cdot 10^6 \text{ eV})(0.1 \text{ nm})^2} = 0.952 \text{ eV} \approx 1 \text{ eV}.$$

#### ملاحظة:

استناداً إلى التقديرات المبكرة لأبعاد ذرة الهيدروجين ومبدأ عدم اليقين، تكون طاقة الحالة الأساسية لذرة الهيدروجين من مرتبة نطاق eV. تبلغ طاقة التأين للإلكترون في طاقة الحالة الأساسية نحو 10 eV، لذلك يتم تأكيد هذا التنبؤ تقريباً. (ملاحظة: غالباً ما يكون ناتج الجداء  $\hbar c$  قيمة مفيدة عند إجراء العمليات الحسابية في ميكانيك الكم).

#### الطاقة والزمن

هناك نوع آخر من مبدأ عدم اليقين يتعلق بعدم اليقين في القياسات المتزامنة لطاقة الحالة الكمية وعمرها،

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2},$$

(7.16)

حيث  $\Delta E$  هو عدم اليقين في قياس الطاقة و  $\Delta t$  هو عدم اليقين في قياس العمر. لا يعطي مبدأ عدم اليقين في الزمن والطاقة علاقة من النوع المعبر عنه **بالمعادلة 7.15** لأسباب فنية خارجة عن نطاق هذه المناقشة. ومع ذلك، فإن المعنى العام لمبدأ الزمن والطاقة هو أن الحالة الكمية الموجودة لفترة قصيرة فقط لا يمكن أن يكون لها طاقة محددة. والسبب هو أن تردد الحالة يتناسب عكساً مع الزمن ويرتبط التردد بطاقة الحالة، لذلك لقياس الطاقة بدقة جيدة، يجب رصد الحالة لعدة دورات. لتوضيح ذلك، فكر في الحالات المثارة للذرة. يمكن استنتاج العمر المحدود لهذه الحالات من أشكال الخطوط الطيفية الملحوظة في أطيف الانبعاث الذري. في كل مرة تتحلل فيها الحالة المثارة، تكون الطاقة الصادرة مختلفة قليلاً، وبالتالي يتميز خط الانبعاث بتوزيع الترددات الطيفية (أو الأطوال الموجية) للفوتونات الصادرة. نتيجة لذلك، تتميز جميع الخطوط الطيفية بعرض طيفي. يقابل متوسط طاقة الفوتون الصادر الطاقة النظرية للحالة المثارة، ويعطي الموقع الطيفي لذروة خط الانبعاث. تتميز الحالات ذات العمر القصير بعروض طيفية واسعة، بينما للحالات ذات العمر الطويل عروض طيفية ضيقة.

## مثال 7.7

### الانتقالات الذرية

توجد الذرة عادةً في الحالة المثارة لمدة  $\Delta t = 10^{-8}$  s. قم بتقدير قيمة عدم اليقين في تردد الفوتونات الصادرة  $\Delta f$  عندما تقوم الذرة بالانتقال من الحالة المثارة مع إصدار فوتون متوسط تردده  $f = 7.1 \times 10^{14}$  Hz. هل الإشعاع الصادر أحادي اللون؟

### خطة الحل:

نقلب **المعادلة 7.16** للحصول على قيمة عدم اليقين في الطاقة  $\Delta E \approx \hbar / 2\Delta t$  وندمجها مع طاقة الفوتون  $E = hf$  للحصول على  $\Delta f$ . لتقدير فيما إذا كان الإصدار أحادي اللون أم لا، نقوم بحساب النسبة  $\Delta f/f$ .


### الحل:

التغير في طاقة الفوتون هو  $\Delta E = h\Delta f$ . وبالتالي:

$$\Delta E \approx \frac{\hbar}{2\Delta t} \Rightarrow h\Delta f \approx \frac{\hbar}{2\Delta t} \Rightarrow \Delta f \approx \frac{1}{4\pi\Delta t} = \frac{1}{4\pi(10^{-8} \text{ s})} = 8.0 \times 10^6 \text{ Hz},$$

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{8.0 \times 10^6 \text{ Hz}}{7.1 \times 10^{14} \text{ Hz}} = 1.1 \times 10^{-8}.$$

### ملاحظة:

لأن ترددات الفوتونات الصادرة في حدود  $1.1 \times 10^{-6}$  بالمائة من متوسط التردد، فإنه يمكن اعتبار الإشعاع الصادر أحادي اللون.  **تحقق من فهمك:** تقوم ذرة الصوديوم بالانتقال من الحالة المثارة الأولى إلى الحالة الأساسية، حيث ينبعث منها فوتون طول موجته 589.0 nm وطاقته 2.105 eV. إذا كان عمر هذه الحالة المثارة هو  $1.6 \times 10^{-8}$  s، فما هو عدم اليقين في طاقة هذه الحالة المثارة؟ ما هو عرض الخط الطيفي المقابل؟

### الأهداف التعليمية

- في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:
- وصف الدور الذي تؤديه معادلة شرودنجر في ميكانيك الكم.
- تفسير الفرق بين معادلات شرودنجر المعتمدة على الزمن والمستقلة عن الزمن.
- تفسير حلول معادلة شرودنجر .

في القسمين السابقين، وصفنا كيفية استخدام التابع الموجي في الميكانيك الكمومي وناقشنا مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ. في هذا القسم، سنقدم نظرية متكاملة لميكانيك الكم، التي يمكن استخدامها لعمل التنبؤات. لفهم هذه النظرية، من المفيد مراجعة نظرية لموجة الضوء. بالنسبة لموجة الضوء، فإن الحقل الكهربائي  $E(x,t)$  يحقق العلاقة:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}, \quad (7.17)$$

حيث  $c$  هي سرعة الضوء ويمثل الرمز  $\partial$  المشتق الجزئي). تذكر من الاهتزازات المبينة في الرابط التالي (<http://cnx.org/content/m58360/latest/>) أن المشتق الجزئي يرتبط ارتباطاً وثيقاً بالمشتق العادي، ولكنه يتضمن تابعاً لأكثر من متغير واحد. عند أخذ المشتق الجزئي للتابع بمتغير معين، يتم الاحتفاظ بجميع المتغيرات الأخرى ثابتة). تتكون الموجة الضوئية من عدد كبير جداً من الفوتونات، وبالتالي فإن الكمية  $|E(x,t)|^2$  يمكن تأويلها على أنها الكثافة الاحتمالية لوجود فوتون واحد عند نقطة معينة في الفراغ (على سبيل المثال، على شاشة عرض). هناك العديد من الحلول لهذه المعادلة. ولكن حلاً واحداً له أهمية خاصة وهو:

$$E(x, t) = A \sin(kx - \omega t), \quad (7.18)$$

حيث  $A$  هو مطال الحقل الكهربائي،  $k$  هو رقم الموجة، و  $\omega$  هو التردد الزاوي. بجمع هذه المعادلة مع المعادلة 7.17 نحصل على

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2}. \quad (7.19)$$

وفقاً لمعادلات دي بروي، لدينا  $p = \hbar k$  و  $E = \hbar \omega$ . وباستبدال هذه المعادلات في المعادلة 7.19 نجد:

$$p = \frac{E}{c}, \quad (7.20)$$

أو

$$E = pc. \quad (7.21)$$

لذلك، وفقاً لمعادلة أينشتاين العامة للوزن والطاقة (المعادلة 5.11)، فإن المعادلة 7.17 تصف جسيماً ذا كتلة ساكنة صفرية. وهذا يتفق مع مانعوه عن الفوتون.

يمكن عكس هذه العملية، إذ يمكننا أن نبدأ بمعادلة العزم والطاقة للجسيم ثم نسأل ما هي معادلة الموجة التي تقابلها. معادلة العزم والطاقة لجسيم غير نسبي في بعد واحد هي:

$$E = \frac{p^2}{2m} + U(x, t), \quad (7.22)$$

حيث  $p$  هو العزم،  $m$  هي الكتلة، و  $U$  هي الطاقة الكامنة للجسيم. معادلة الموجة التي تتفق معها تبين أنها المعادلة الرئيسية في ميكانيك الكم، وتدعى معادلة شرودنغر المعتمدة على الزمن.

### معادلة شرودنغر المعتمدة على الزمن

تُعرف المعادلة التي تصف طاقة وعزم تابع موجي باسم معادلة شرودنغر:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x, t)}{\partial x^2} + U(x, t) \Psi(x, t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(x, t)}{\partial t} \quad (7.23)$$

كما هو موضح في **الطاقة الكامنة ومصونية الطاقة** (<http://cnx.org/content/m58311/latest/>)، فإن القوة المؤثرة على الجسيم الموصوفة في هذه المعادلة تُعطى بالعلاقة:

$$F = -\frac{\partial U(x, t)}{\partial x} \quad (7.24)$$

تؤدي هذه المعادلة دوراً في ميكانيك الكم يشبه دور قانون نيوتن الثاني في الميكانيك الكلاسيكي. بمجرد تحديد الطاقة الكامنة للجسيم - أو، بشكل مكافئ، بمجرد تحديد القوة على الجسيم - يمكننا حل هذه المعادلة التفاضلية للتابع الموجي. حل معادلة القانون الثاني لنيوتن (أيضاً معادلة تفاضلية) في بعد واحد هو التابع  $x(t)$  الذي يحدد مكان وجود الجسيم في أي لحظة زمنية  $t$ . يُعطي حل معادلة شرودنغر المعتمدة على الزمن التابع الموجي، الذي يمكن استخدامه لتحديد الموضع المرجح للجسيم. يمكن أيضاً كتابة هذه المعادلة في بعدين أو ثلاثة أبعاد. غالباً ما يتطلب حل معادلة شرودنغر المعتمدة على الزمن مساعدة الكمبيوتر. بالنظر إلى الحالة الخاصة لجسيم حر لا يواجه أي قوة ( $F=0$ ). استناداً إلى **المعادلة 7.24**، وهذا يتطلب فقط أن يكون:

$$U(x, t) = U_0 = \text{constant} \quad (7.25)$$

للبساطة، نعوض  $U_0 = 0$ . عندئذ تُختصر معادلة شرودنغر إلى الشكل التالي:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x, t)}{\partial x^2} = i\hbar \frac{\partial \Psi(x, t)}{\partial t} \quad (7.26)$$

وحل هذه المعادلة هو:

$$\Psi(x, t) = A e^{i(kx - \omega t)} \quad (7.27)$$

ليس من الغريب أن يحتوي هذا الحل على رقم تخيلي ( $i = \sqrt{-1}$ ) لأن المعادلة التفاضلية نفسها تحتوي على رقم تخيلي. كما أكد من قبل، ومع ذلك، تعتمد التنبؤات الميكانيكية الكمية فقط على  $|\Psi(x, t)|^2$ ، والتي تعطي قيمة حقيقية تماماً. لاحظ أن حلول الموجة المستوية الحقيقية،  $\Psi(x, t) = A \sin(kx - \omega t)$  و  $\Psi(x, t) = A \cos(kx - \omega t)$ ، لا تحقق معادلة شرودنغر. يمكن رؤية تابع موجي ولمسه وشعوره في الطبيعة تتلاشى بسبب ظهور الرقم التخيلي. في نظرية شرودنغر لميكانيك الكم، يُعد التابع الموجي مجرد أداة لحساب الأشياء.

إذا كان تابع الطاقة الكامنة ( $U$ ) لا يعتمد على الزمن، فمن الممكن إثبات أن:

$$\Psi(x, t) = \psi(x) e^{-i\omega t} \quad (7.28)$$

تحقق معادلة شرودنغر المعتمدة على الزمن، حيث  $\psi(x)$  هو التابع المستقل عن الزمن و  $e^{-i\omega t}$  هو التابع المستقل عن المكان. بمعنى آخر، يكون التابع الموجي قابل للفصل إلى جزأين: جزء مكاني فقط وجزء زمني فقط. يشار أحياناً إلى العامل  $e^{-i\omega t}$  **بمعامل التعديل الزمني**، لأنه يعدل التابع المكاني فقط. وفقاً لدي برولي، تُعطى طاقة موجة المادة بالعلاقة  $E = \hbar \omega$ ، حيث  $E$  هي طاقتها الكلية. وبالتالي، يمكن أيضاً كتابة المعادلة الواردة أعلاه وفق الشكل التالي:

$$\Psi(x, t) = \psi(x)e^{-iEt/\hbar}. \quad (7.29)$$

أي مزيج خطي لهذه الحالات (حالة مختلطة من الطاقة أو العزم) هو أيضاً حل صحيح لهذه المعادلة. يمكن لمثل هذه الحالات، على سبيل المثال، وصف جسيم محدد الموضع (انظر الشكل 9.7).

**5.7 تحقق من فهمك:** يتحرك جسيم ذو كتلة  $m$  على طول المحور السيني ضمن احتمال مُعطى بتابع الطاقة الكامنة  $U(x) = 0.5m\omega^2x^2$ . احسب ناتج الجداء  $\Psi(x, t) * U(x)\Psi(x, t)$ . عبر عن إجابتك بدلالة التابع الموجي المستقل عن الزمن  $\psi(x)$ . بدمج المعادلة 7.23 و المعادلة 7.28، تُختزل معادلة شرودنغر المعتمدة على الزمن إلى:

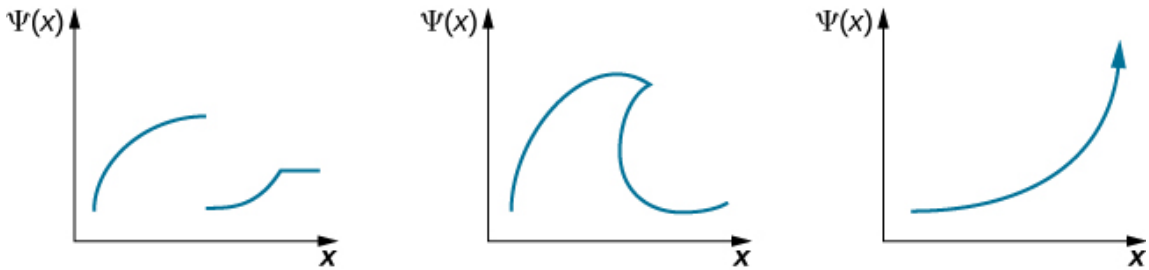
$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + U(x)\psi(x) = E\psi(x), \quad (7.30)$$

حيث  $E$  هي الطاقة الكلية للجسيم (عدد حقيقي). وتُسمى هذه المعادلة بمعادلة شرودنغر المستقلة عن الزمن. لاحظ أننا نستخدم حرف بساي كبير ( $\Psi$ ) للتابع الموجي المعتمد على الزمن و بساي صغير ( $\psi$ ) للتابع الموجي المستقل عن الزمن. يجب ضرب حل التابع الموجي لهذه المعادلة بعامل التعديل الزمني للحصول على التابع الموجي المعتمد على الزمن. في الأقسام التالية، نحل معادلة شرودنغر المستقلة عن الزمن لثلاث حالات: جسيم كمي في صندوق، هزاز توافقي بسيط، وحاجز كمي. توفر هذه الحالات دروساً مهمة يمكن استخدامها لحل أنظمة أكثر تعقيداً. يجب أن تحقق حلول التابع الموجي المستقل عن الزمن  $\psi(x)$  ثلاثة شروط:

- $\psi(x)$  يجب أن يكون تابعاً مستمراً.
- يجب أن يكون المشتق الأول لـ  $\psi(x)$  بالنسبة للمكان،  $d\psi(x)/dx$ ، مستمراً، إلا إذا كانت  $V(x) = \infty$ .
- $\psi(x)$  يجب ألا تتباعد ("تنفجر") عند  $x = \pm \infty$ .

يُجنب الشرط الأول القفزات المفاجئة أو الفجوات في التابع الموجي. يتطلب الشرط الثاني أن يكون التابع الموجي انسيابياً في جميع النقاط، باستثناء الحالات الخاصة. (في دورة أكثر تقدماً في ميكانيك الكم، على سبيل المثال، يتم استخدام قمم محتملة للعمق والارتفاع اللانهائي في نموذج المواد الصلبة). يتطلب الشرط الثالث من التابع الموجي أن يكون طبيعياً. يتبع الشرط الثالث من تفسير بورن لميكانيك الكم. حيث إنه يضمن أن  $|\psi(x)|^2$  هو عدد محدود، بحيث يمكن استخدامه لحساب الاحتمالات.

**6.7 تحقق من فهمك:** أي من التوابع الموجية التالية هو الحل الصحيح للتابع الموجي لمعادلة شرودنغر؟





## 4.7 | الجسيم الكمومي ضمن صندوق The Quantum Particle in a Box

### الأهداف التعليمية

- في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:
- وصف كيفية إعداد مسألة القيمة الحدية لمعادلة شرودنغر المستقرة.
- شرح لماذا يتم تكميم طاقة الجسيم الكمي في الصندوق.
- وصف المعنى الفيزيائي للحلول المستقرة لمعادلة شرودنغر وربط هذه الحلول بالحالات الكمية المعتمدة على الزمن.
- شرح المعنى الفيزيائي لمبدأ التبادل لبور.

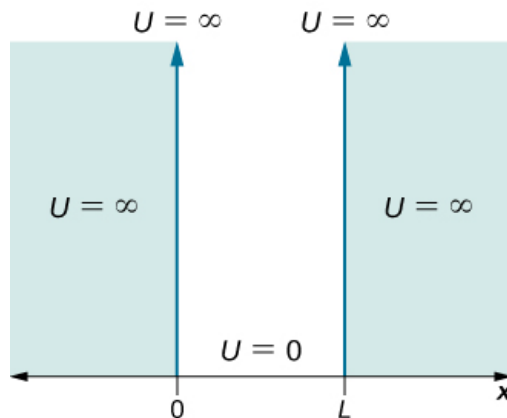
في هذا الجزء من الفصل، نطبق معادلة شرودنغر على جسيم مرتبط بصندوق أحادي البعد. تعطي هذه الحالة الخاصة دروساً لفهم ميكانيك الكم في الأنظمة الأكثر تعقيداً. يتم تكميم طاقة الجسيم كنتيجة لحالة الموجة الساكنة داخل الصندوق. باعتبار جسيم كتلته  $m$  يُسمح له بالتحرك فقط على طول المحور  $x$ ، وتقتصر حركته على المنطقة بين الجدران الصلبة والمتماسكة الموجودة عند  $x=0$  وعند  $x=L$  (الشكل 10.7). يتحرك هذا الجسيم بحرية بين الجدران. يُطلق على هذه الحالة الفيزيائية اسم البئر المربع اللانهائي، الموصوفة بتابع الطاقة الكامنة التالي:

$$U(x) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x \leq L, \\ \infty, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (7.31)$$

بجمع هذه المعادلة مع معادلة شرودنغر الموجية المستقلة عن الزمن نحصل على:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \psi(x)}{dx^2} = E\psi(x), \text{ for } 0 \leq x \leq L \quad (7.32)$$

حيث  $E$  هي الطاقة الكلية للجسيم. ما هي أنواع الحلول التي نتوقعها؟ طاقة الجسيم هي رقم موجب، لذلك إذا كانت قيمة التابع الموجي موجبة (الطرف الأيمن من المعادلة)، يكون ميلان التابع الموجي سالباً أو مقعراً للأسفل (الطرف الأيسر للمعادلة). وبالمثل، إذا كانت قيمة التابع الموجي سالبة (الطرف الأيمن للمعادلة)، يكون ميلان التابع الموجي موجباً أو مقعراً (الطرف الأيسر للمعادلة). يتحقق هذا الشرط عندما يكون التابع الموجي متأرجحاً، كالموجة الجيبية أو موجة جيب التمام. ولما كانت هذه الأمواج محصورة ضمن الصندوق، يمكن أن نتصور أن الأمواج الساكنة ذات نهايات ثابتة عند  $x=0$  و  $x=L$ .



الشكل 10.7 تابع الطاقة الكامنة الذي يحصر الجسيم ضمن صندوق أحادي البعد.

حلول  $\psi(x)$  لهذه المعادلة لها تفسير احتمالي. وتحديدًا، المربع  $|\psi(x)|^2$  الذي يمثل الكثافة الاحتمالية لوجود الجسيم في موضع معين  $x$ . يجب أن يكامل هذا التابع لتحديد احتمالية وجود الجسيم في مجال معين من الفراغ. لذلك نحن نبحث عن حل يحقق شرط التطبيع التالي:

$$\int_0^L dx |\psi(x)|^2 = 1. \quad (7.33)$$

الحدان صلبة وغير قابلة للاختراق، مما يعني أن الجسيم لا يمكن أن يكون خارج الجدار. رياضياً، هذا يعني أن الحل يجب أن ينعدم على الحدان:

$$\psi(0) = \psi(L) = 0. \quad (7.34)$$

نتوقع حلولاً متذبذبة، لذا فإن الحل لهذه المعادلة هو:

$$\psi_k(x) = A_k \cos kx + B_k \sin kx \quad (7.35)$$

حيث  $k$  هو رقم الموجة، و  $A_k$  و  $B_k$  هما ثابتان. بتطبيق الشرط الحدي المعبر عنه في **المعادلة 7.34** نحصل على:

$$\psi_k(0) = A_k \cos(k \cdot 0) + B_k \sin(k \cdot 0) = A_k = 0. \quad (7.36)$$

لما كان  $A_k = 0$ ، فإن الحل يجب أن يكون:

$$\psi_k(x) = B_k \sin kx. \quad (7.37)$$

إذا كانت  $B_k$  تساوي صفرًا، فإن  $\psi_k(x) = 0$  لجميع قيم  $x$  ولا يمكن تحقيق شرط التطبيع، **المعادلة 7.33**. بفرض أن  $B_k \neq 0$ ، عندئذ تعطي **المعادلة 7.34** من أجل  $x = L$ :

$$0 = B_k \sin(kL) \Rightarrow \sin(kL) = 0 \Rightarrow kL = n\pi, n = 1, 2, 3, \dots \quad (7.38)$$

تجاهل الحل  $n = 0$  لأن  $\psi(x)$  لهذا الرقم الكمي سيكون صفرًا في كل مكان - وهو حل غير قابل للتطبيع وغير فيزيائي. بتعويض **المعادلة 7.37** في **المعادلة 7.32** نحصل على:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} (B_k \sin(kx)) = E (B_k \sin(kx)). \quad (7.39)$$

يؤدي حساب هذه المشتقات إلى:

$$E = E_k = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}. \quad (7.40)$$

وفقًا لدي برولي،  $p = \hbar k$ ، فإن هذا العلاقة تعني أن الطاقة الكلية تساوي الطاقة الحركية، بما يتفق مع افتراضنا أن "الجسيم يتحرك بحرية". بالجمع بين نتائج **المعادلة 7.38** و **المعادلة 7.40** نحصل على:

$$E_n = n^2 \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2}, n = 1, 2, 3, \dots \quad (7.41)$$

غريب! الجسيم المرتبط بصندوق أحادي البعد يمكن أن يكون له قيم منفصلة للطاقة (مكممة). علاوةً على ذلك، لا يمكن أن يكون للجسيم طاقة حركية صفرية - فمن المستحيل أن يكون الجسيم المرتبط بصندوق "في حالة سكون".

لتقسيم التوابع الموجية المسموح بها والتي تتوافق مع هذه الطاقات، يجب أن نجد ثابت التطبيع  $B_n$ . نفرض شرط التطبيع **المعادلة 7.33** على التابع الموجي:

$$\psi_n(x) = B_n \sin n\pi x/L \quad (7.42)$$

$$1 = \int_0^L dx |\psi_n(x)|^2 = \int_0^L dx B_n^2 \sin^2 \frac{n\pi x}{L} = B_n^2 \int_0^L dx \sin^2 \frac{n\pi x}{L} = B_n^2 \frac{L}{2} \Rightarrow B_n = \sqrt{\frac{2}{L}}$$

وبالتالي، فإن التوابع الموجية التي تتوافق مع قيم الطاقة الواردة في **المعادلة 7.41** هي:

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin \frac{n\pi x}{L}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (7.43)$$

من أجل أدنى حالة طاقة أو طاقة الحالة الأساسية، يكون لدينا:

$$E_1 = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2}, \quad \psi_1(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right). \quad (7.44)$$

يمكن التعبير عن جميع حالات الطاقة الأخرى بالشكل التالي:

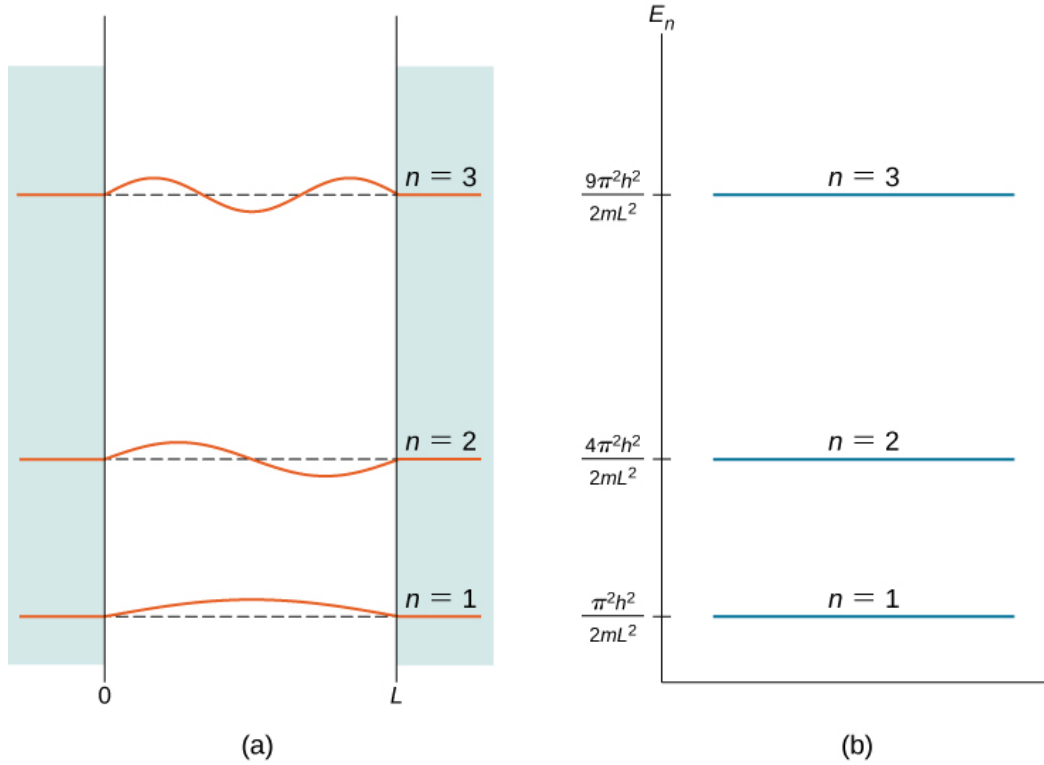
$$E_n = n^2 E_1, \quad \psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right). \quad (7.45)$$

يُسمى الرمز  $n$  الرقم الكمي الطاقي أو الرقم الكمي الرئيس، حيث الحالة  $n = 2$  هي الحالة المثارة الأولى، والحالة حيث  $n = 3$  هي الحالة المثارة الثانية، وهكذا. أول ثلاث حالات كمومية (حيث  $n = 1, 2, \text{ and } 3$ ) لجسيم في صندوق والمبينة في

### الشكل 7.11.

يشار أحياناً إلى التابع الموجي في **المعادلة 7.45** باسم "حالات الطاقة المحددة." ويقال إن الجسيمات في هذه الحالات تشغل **السويات الطاقية**، والتي تمثلها الخطوط الأفقية في **الشكل 7.11**. تشبه السويات الطاقية درجات سلم يمكن للجسيم أن "يصعده" أثناء اكتسابه أو فقده للطاقة.

تُسمى التوابع الموجية في **المعادلة 7.45** أيضاً **بالحالات المستقرة والحالات الموجية الدائمة**. هذه التوابع "مستقرة"، لأن توابع الكثافة الاحتمالية لها،  $|\Psi(x, t)|^2$ ، لا تتغير مع الزمن، وهي "أمواج دائمة" لأن أجزائها الحقيقية والتخيلية تتأرجح صعوداً وهبوطاً كالموجة الدائمة - تماماً كحبل يلوح بين طفلين في ملعب. الحالات المستقرة هي حالات طاقة محددة [ **المعادلة 7.45** ]، ولكن التركيبات الخطية لهذه الحالات، مثل  $\psi(x) = a\psi_1 + b\psi_2$  (هي أيضاً حلول لمعادلة شرودنغر) هي حالات طاقة مختلطة.



**الشكل 11.7** الحالات الكمومية الثلاثة الأولى لجسيم كمومي ضمن صندوق من أجل الأرقام الكمية الرئيسية  $n = 1, 2, \& 3$  (a) حلول الموجة الدائمة و (b) حالات الطاقة المسموح بها.

تكميم الطاقة هو نتيجة للشروط الحدية. إذا لم يكن الجسيم محصوراً في صندوق بل يتحرك بحرية، فإن الطاقات المسموح بها ستكون مستمرة. ومع ذلك، في هذه الحالة، يُسمح فقط بطاقات معينة ( $E_1, 4E_1, 9E_1, \dots$ ). ويُعطى فرق الطاقة بين السويات الطاقة المجاورة بالعلاقة التالية:

$$\Delta E_{n+1, n} = E_{n+1} - E_n = (n+1)^2 E_1 - n^2 E_1 = (2n+1)E_1. \quad (7.46)$$

تقتضي مصونية الطاقة أنه في حالة تغير طاقة النظام، فإن فرق الطاقة ينتقل إلى شكل آخر من أشكال الطاقة. بالنسبة للحالة الخاصة لجسيم مشحون محصور ضمن حجم صغير (ضمن ذرة مثلاً)، غالباً ما تُحمل التغيرات في الطاقة عن طريق الفوتونات. لنا ترددات الفوتونات الصادرة معلومات حول الفروق الطاقية (التباعد) للنظام وحجم الاحتواء - حجم "الصندوق" [انظر المعادلة 7.44].

## مثال 8.7

### نموذج بسيط للنواة

افتراض أن البروتون محصور في صندوق بعرض  $L = 1.00 \times 10^{-14} \text{ m}$  (نصف قطر نواة نموذجي). ما هي طاقة الحالة الأساسية والحالة المثارة الأولى؟ إذا كان البروتون ينتقل من الحالة المثارة الأولى إلى الحالة الأساسية، فما هي طاقة الفوتون الصادر وتردده؟

### خطة الحل:

إذا افترضنا أن البروتون المحصور ضمن النواة يمكن أن يمثل كجسيم كمي ضمن صندوق، فكل ما نحتاج إلى فعله هو استخدام

**المعادلة 7.41** لإيجاد طاقاته  $E_1$  و  $E_2$ . كتلة البروتون  $m = 1.76 \times 10^{-27} \text{ kg}$ .

يحمل الفوتون الصادر فرق الطاقة  $\Delta E = E_2 - E_1$ . يمكننا استخدام العلاقة  $Ef = hf$  لحساب ترددها  $f$ .

## الحل:

طاقة الحالة الأساسية:

$$E_1 = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} = \frac{\pi^2 (1.05 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})^2}{2(1.67 \times 10^{-27} \text{ kg})(1.00 \times 10^{-14} \text{ m})^2} = 3.28 \times 10^{-13} \text{ J} = 2.05 \text{ MeV}.$$

طاقة الحالة المثارة الأولى:  $E_2 = 2^2 E_1 = 4(2.05 \text{ MeV}) = 8.20 \text{ MeV}$ .

طاقة الفوتون الصادر هي:  $E_f = \Delta E = E_2 - E_1 = 8.20 \text{ MeV} - 2.05 \text{ MeV} = 6.15 \text{ MeV}$ .

تردد الفوتون الصادر هو:

$$f = \frac{E_f}{h} = \frac{6.15 \text{ MeV}}{4.14 \times 10^{-21} \text{ MeV} \cdot \text{s}} = 1.49 \times 10^{21} \text{ Hz}.$$

## ملاحظة:

هذا هو التردد النموذجي لأشعة غاما الصادرة من النواة. طاقة هذا الفوتون تزيد بنحو 10 مليون مرة عن طاقة فوتون الضوء المرئي. تُعطى القيمة المتوقعة لموضع الجسيم في صندوق بالعلاقة:

$$\langle x \rangle = \int_0^L dx \psi_n^*(x) x \psi_n(x) = \int_0^L dx x |\psi_n^*(x)|^2 = \int_0^L dx x \frac{2}{L} \sin^2 \frac{n\pi x}{L} = \frac{L}{2}. \quad (7.47)$$

يمكننا أيضاً إيجاد القيمة المتوقعة للعزم أو متوسط العزم لعدد كبير من الجسيمات في حالة معينة:

$$\begin{aligned} \langle p \rangle &= \int_0^L dx \psi_n^*(x) \left[ -i\hbar \frac{d}{dx} \psi_n(x) \right] \quad (7.48) \\ &= -i\hbar \int_0^L dx \sqrt{\frac{2}{L}} \sin \frac{n\pi x}{L} \left[ \frac{d}{dx} \sqrt{\frac{2}{L}} \sin \frac{n\pi x}{L} \right] = -i\frac{2\hbar}{L} \int_0^L dx \sin \frac{n\pi x}{L} \left[ \frac{n\pi}{L} \cos \frac{n\pi x}{L} \right] \\ &= -i\frac{2n\pi\hbar}{L^2} \int_0^L dx \frac{1}{2} \sin \frac{2n\pi x}{L} = -i\frac{n\pi\hbar}{L^2} \frac{L}{2n\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi \sin \varphi = -i\frac{\hbar}{2L} \cdot 0 = 0. \end{aligned}$$

وبالتالي، بالنسبة للجسيم الذي يكون في حالة طاقة محددة، يكون متوسط الموضع في منتصف الصندوق ومتوسط عزم الجسيم هو صفر - كما سيكون للجسيم الكلاسيكي. لاحظ أنه على الرغم من أن الحد الأدنى لطاقة للجسيم الكلاسيكي يمكن أن يكون صفرية (يمكن أن يكون الجسيم في منتصف الصندوق)، فإن الحد الأدنى من الطاقة للجسيم الكمي ليس صفرية ويعطى **بالمعادلة 7.44** متوسط طاقة الجسيم في الحالة الكمومية  $n$  - القيمة المتوقعة لطاقته - هي:

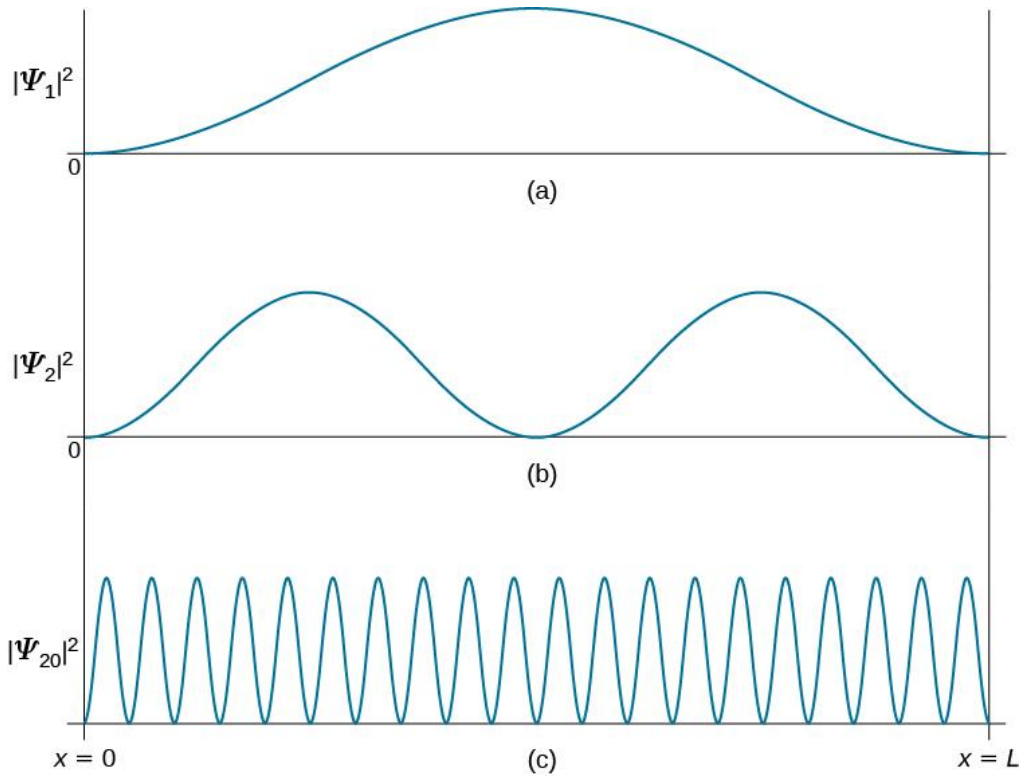
$$E_n = \langle E \rangle = n^2 \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2}. \quad (7.49)$$

النتيجة ليست مفاجئة لأن حالة الموجة المستقرة هي حالة طاقة محددة. أي قياس للطاقة لهذا النظام يجب أن يُرجع قيمة مساوية لإحدى هذه الطاقات المسموح بها.

تحليلنا للجسيمات الكمومية ضمن صندوق ما لن يكتمل دون مناقشة مبدأ التناظر لبور. ينص هذا المبدأ على أنه من أجل الأرقام الكمومية الكبيرة، يجب أن تعطي قوانين فيزياء الكم نتائج مطابقة لتلك التي تعطيها قوانين الفيزياء الكلاسيكية. لتوضيح كيفية عمل هذا المبدأ لجسيم كمي ضمن صندوق ما، نرسم توزيع الكثافة الاحتمالية:

$$|\psi_n(x)|^2 = \frac{2}{L} \sin^2(n\pi x/L) \quad (7.50)$$

لإيجاد الجسيم حول موقع  $x$  بين الجدران عندما يكون الجسيم في حالة كمومية  $\psi_m$ . يوضح **الشكل 12.7** هذه التوزيعات الاحتمالية للحالة الأساسية، وللحالة المثارة الأولى، وللحالة شديدة الإثارة التي تتوافق مع رقم كمي كبير. نرى من هذه المنحنيات أنه عندما يكون الجسيم الكمومي في الحالة الأساسية، فمن المرجح أن يوجد في منتصف الصندوق، حيث يكون للتوزيع الاحتمالي أكبر قيمة. ولكن الحال ليس كذلك عندما يكون الجسيم في الحالة المثارة الأولى لأن التوزيع الاحتمالي له قيمة صفرية في منتصف الصندوق، لذلك لا توجد فرصة لوجود الجسيم هناك. عندما يكون الجسيم الكمي في الحالة المثارة الأولى، يكون للتوزيع الاحتمالي حدان، وتكون أفضل فرصة لوجود الجسيم في مواضع قريبة من مواضع هذه القيمة القصوى. هذه الصورة الكمومية لا تشبه الصورة الكلاسيكية.



**الشكل 12.7** توزيع الكثافة الاحتمالية  $|\psi_m(x)|^2$  لجسيم كمومي في صندوق في: (a) الحالة الأساسية  $n=1$ ؛ (b) الحالة المثارة الأولى  $n=2$ ؛ و (c) الحالة المثارة التاسعة عشرة  $n=20$ .

تعتمد الكثافة الاحتمالية لوجود جسيم كلاسيكي بين  $x$  و  $x + \Delta x$  على الزمن  $\Delta t$  الذي قضاه الجسيم في هذه المنطقة. على افتراض أن سرعته  $u$  ثابتة، فإن هذا الزمن هو  $\Delta t = \Delta x/u$ ، والذي هو أيضاً ثابت لأي مكان بين الجدران. لذلك، تكون الكثافة الاحتمالية لوجود الجسيمات الكلاسيكية في  $x$  موحدة في جميع أنحاء الصندوق، وليس هناك موقع مفضل لوجود الجسيم الكلاسيكي. هذه الصورة الكلاسيكية محققة في حد أرقام الكم الكبيرة. على سبيل المثال، عندما يكون الجسيم الكمومي في حالة مثارة جداً، كما هو موضح في **الشكل 12.7**، تتميز الكثافة الاحتمالية بتقلبات سريعة، ومن ثم لا يعتمد احتمال وجود جسيم كمومي في المجال  $\Delta x$  على المكان الذي يقع فيه هذا المجال بين الجدران.

## جسيم كلاسيكي في صندوق

تتحرك عربة صغيرة وزنها 0.40 kg ذهاباً وإياباً على طول مسار هوائي بين مصدرين يفصل بينهما مسافة 2.0 m. بفرض عدم وجود احتكاك. التصادمات مع المصدات مرنة للغاية، بحيث أن العربة بين المصدات تحافظ على سرعة ثابتة تبلغ 0.50 m/s. وبالتعامل مع العربة كجسيم كمومي، قم بتقدير قيمة الرقم الكمي الرئيس، الذي يتوافق مع طاقتها الكلاسيكية.

## خطة الحل:

نحسب الطاقة الحركية  $K$  للعربة وطاقة حالتها الأساسية  $E_1$  كما لو أنها جسيم كمومي. تُعدُّ طاقة العربة حركية تماماً، لذلك فإن  $K = n^2 E_1$  (المعادلة 7.45). نقوم بالحل من أجل قيمة  $n$  فنحصل على  $n = (K/E_1)^{1/2}$ .

## الحل:

الطاقة الحركية للعربة:

$$K = \frac{1}{2}mu^2 = \frac{1}{2}(0.40 \text{ kg})(0.50 \text{ m/s})^2 = 0.050 \text{ J.}$$

طاقة الحالة الأساسية للعربة، عند التعامل معها كجسيم كمي، هي:

$$E_1 = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} = \frac{\pi^2 (1.05 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})^2}{2(0.40 \text{ kg})(2.0 \text{ m})^2} = 1.700 \times 10^{-68} \text{ J.}$$

لذلك،  $n = (K/E_1)^{1/2} = (0.050/1.700 \times 10^{-68})^{1/2} = 1.2 \times 10^{33}$

## ملاحظة:

نرى من هذا المثال أن طاقة النظام الكلاسيكي تتميز برقم كمي كبير جداً. يتعلق مبدأ التقابل لبور بهذا النوع من الموضوع. يمكننا تطبيق صيغ ميكانيك الكم على أي نوع من النظم الكمومية أو الكلاسيكية، وستكون النتائج صحيحة في كل حالة. في حدود أرقام الكم العالية، لا توجد ميزة في استخدام الصيغة الكمومية لأننا يمكن أن نحصل على نفس النتائج مع الصيغة الأقل تعقيداً للميكانيك الكلاسيكي. ومع ذلك، لا يمكننا تطبيق الصيغ الكلاسيكية على نظام الكم في حالة الطاقة ذات الرقم المنخفض.

**7.7 تحقق من فهمك:** (a) بفرض وجود بئر مربع لانتهائي له حدود جدارية  $x=0$  و  $x=L$ . ما هو احتمال وجود جسيم كمومي في حالته الأساسية في مكان ما بين  $x=0$  و  $x=L/4$ ؟ (b) كرر السؤال (a) للجسيم الكلاسيكي.

بعد إيجاد الحالات الثابتة  $\psi_n(x)$  والطاقات  $E_n$  من خلال حل معادلة شرودنغر المستقلة عن الزمن **المعادلة 7.32**، نستخدم **المعادلة 7.28** لكتابة التابع الموجي  $\Psi_n(x, t)$  التي تُعدُّ حلولاً لمعادلة شرودنغر المعتمدة على الزمن والمعطاة **بالمعادلة 7.23**. بالنسبة لجسيم في صندوق فإن هذا يعطينا

$$\Psi_n(x, t) = e^{-i\omega_n t} \psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} e^{-iE_n t/\hbar} \sin \frac{n\pi x}{L}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (7.51)$$

حيث تُعطى الطاقات **بالمعادلة 7.41**.

لنموذج الجسيم الكمي في صندوق تطبيقات عملية في مجال الإلكترونيات الضوئية الذي ظهر حديثاً نسبياً، والذي يتعامل مع الأجهزة التي تحول الإشارات الكهربائية إلى إشارات ضوئية. يتعامل هذا النموذج أيضاً مع الظواهر الفيزيائية النانوية، كالجسيمات النانوية المحصورة في كمون كهربائي منخفض تحده حواجز عالية الكمون.

### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- وصف نموذج الهزاز التوافقي الكوموي.
- تحديد الاختلافات بين النموذج الكلاسيكي والكوموي للهزاز التوافقي.
- تفسير الحالات الفيزيائية التي يتقاطع فيها النموذج الكلاسيكي والكوموي.

توجد الذبذبات في جميع أنحاء الطبيعة، في أشياء كالأموج الكهرومغناطيسية والحزيمات المهتزة والتأرجح الطفيف لفرع شجرة للأمام والخلف. استخدمنا في الفصول السابقة الميكانيك النيوتوني لدراسة الاهتزازات الجهرية، مثل الكتلة المعلقة بنابض والنواس البسيط. سنبدأ في هذا الفصل بدراسة الأنظمة الاهتزازية باستخدام ميكانيك الكم، وسنبدأ باستعراض الهزاز التوافقي الكلاسيكي.

### الهزاز التوافقي الكلاسيكي

الهزاز التوافقي البسيط هو جسيم أو نظام يخضع لحركة توافقية حول موضع توازنه، مثل جسم له كتلة يهتز على نابض. في هذا القسم، نعتبر الاهتزازات ذات بعد واحد فقط. بفرض أن كتلة تتحرك ذهاباً وإياباً على طول محور السينات حول موضع توازنه  $x = 0$ . في الميكانيك الكلاسيكي، يتحرك الجسيم استجابةً لقوة إرجاع خطية تُعطى بالعلاقة  $Fx = -kx$ ، حيث  $x$  هي إزاحة الجسيم عن موضع التوازن. تحدث الحركة بين نقطتي تحول،  $x = \pm A$ ، حيث تشير  $A$  إلى مطال الحركة. يتغير موضع الجسيم بشكل دوري مع الزمن بتردد زاوي  $\omega = k/m$ ، والذي يعتمد على كتلة الهزاز  $m$  وعلى ثابت القوة  $k$  للقوة الصافية، ويمكن كتابته على الشكل:

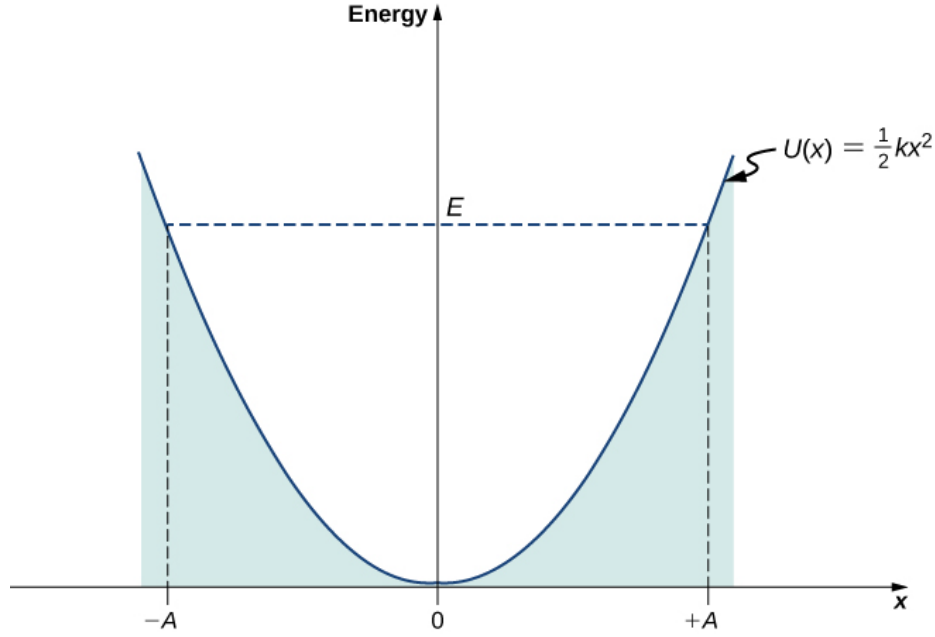
$$x(t) = A \cos(\omega t + \phi). \quad (7.52)$$

الطاقة الكلية  $E$  للهزاز هي مجموع طاقته الحركية  $K = mu^2/2$  وطاقته الكامنة المرنة  $U(x) = kx^2/2$ :

$$E = \frac{1}{2}mu^2 + \frac{1}{2}kx^2. \quad (7.53)$$

عند نقاط السكون  $x = \pm A$ ، تكون سرعة الهزاز صفرًا؛ لذلك، في هذه النقاط، تكون طاقة الاهتزاز فقط على شكل طاقة كامنة  $E = kA^2/2$ . إن منحنى الطاقة الكامنة  $U(x)$  للهزاز بدلالة موقعه  $x$  هو قطع مكافئ (الشكل 13.7). تابع الطاقة الكامنة هي تابع تربيعي للمتحول  $x$  بالنسبة لموضع التوازن. على الرسم البياني نفسه، تم أيضاً تمثيل منحنى الطاقة الكلية للهزاز  $E$ ، كخط أفقي يقطع القطع المكافئ عند  $x = \pm A$ . كما تم تمثيل الطاقة الحركية  $K$  كمسافة عمودية بين خط الطاقة الكلية ومنحنى القطع المكافئ الممثل للطاقة الكامنة.





**الشكل 13.7** بئر الطاقة الكامنة لهزاز توافقي كلاسيكي: الحركة محدودة بين نقطتي السكون في  $x = -A$  وفي  $x = +A$ . طاقة الاهتزازات هي  $E = kA^2/2$ .

تقتصر حركة الهزاز الكلاسيكي في هذا المخطط على المنطقة التي تكون فيها طاقته الحركية غير سالبة، وهذا ما تقوله معادلة الطاقة، **المعادلة 53.7**. من الناحية الفيزيائية، هذا يعني أن الهزاز الكلاسيكي لا يمكنه الوجود أبداً وراء نقاط السكون، وأن طاقته تعتمد فقط على مدى بُعد نقاط السكون عن موضع التوازن. تتغير طاقة الهزاز الكلاسيكي بشكل مستمر. أدنى قيمة لطاقة الهزاز الكلاسيكي هي الصفر، وتوافق الحالة التي يكون فيه الجسم في حالة توازن عند موضع التوازن. تعني حالة الطاقة الصفرية لهزاز كلاسيكي ببساطة عدم وجود اهتزازات وحركة على الإطلاق (جسيم كلاسيكي متوضع في قاع البئر كما في **الشكل 13.7**). عندما يهتز جسم ما، مهما كانت طاقته كبيرة أم صغيرة، فإنه يقضي أطول وقت بالقرب من نقاط السكون، لأن هذا هو المكان الذي يتباطأ فيه ويعكس اتجاه حركته. لذلك، فإن احتمال وجود الهزاز الكلاسيكي بين نقاط السكون يكون أكبر ما يمكن وأقل ما يمكن في موضع توازنه. (لاحظ أن هذا ليس بياناً عن تفضيل الجسيم للانتقال إلى طاقة أقل. وإنما هو بيان حول مدى سرعة تحرك الجسيم عبر مختلف المناطق).

### الهزاز التوافقي الكمومي

إحدى مشاكل هذه الصيغة الكلاسيكية هي أنها ليست عامة. حيث لا يمكننا استخدامها، على سبيل المثال، لوصف اهتزازات الجزيئات ثنائية الذرة، حيث تكون التأثيرات الكمية مهمة. الخطوة الأولى نحو الصيغة الكمومية هي استخدام العلاقة الكلاسيكية  $k = m\omega^2$  للحد من ذكر ثابت "النايوس" بين الذرات. بهذه الطريقة، يمكن كتابة تابع الطاقة الكامنة بشكل أكثر عمومية،

$$U(x) = \frac{1}{2}m\omega^2 x^2. \quad (7.54)$$

بالجمع بين هذه العلاقة ومعادلة شرودنغر المستقلة عن الزمن:

$$-\frac{\hbar}{2m} \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + \frac{1}{2}m\omega^2 x^2 \psi(x) = E\psi(x). \quad (7.55)$$

لحل **المعادلة 7.55**، بمعنى أنه لإيجاد الطاقات المسموح بها  $E$  والتوابع الموجية المقابلة لها  $\psi(x)$ ، فإننا نطلب أن تكون التوابع الموجية متناظرة حول  $x = 0$  (أسفل بئر الطاقة الكامنة) وقابلة للتطبيع. تضمن هذه الشروط أن الكثافة الاحتمالية  $|\psi(x)|^2$  يجب أن تكون محدودة عند مكاملتها على كامل مجال  $x$  من  $-\infty$  إلى  $+\infty$ . كيفية حل **المعادلة 7.55** هو موضوع دورة أكثر تقدماً في ميكانيك الكم؛ هنا، نستشهد بالنتائج للتبسيط. الطاقات المسموح بها هي:

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right)\hbar\omega = \frac{2n+1}{2}\hbar\omega, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (7.56)$$

التوابع الموجية التي تقابل هذه الطاقات (الحالات الثابتة أو حالات الطاقة المحددة) هي:

$$\psi_n(x) = N_n e^{-\beta^2 x^2/2} H_n(\beta x), \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (7.57)$$

حيث هو  $\beta = \sqrt{m\omega/\hbar}$ ،  $N_n$  ثابت التطبيع، و  $H_n(y)$  هو كثير حدود من الدرجة  $n$  يطلق عليه كثير حدود هيرميت. أول أربعة حدود هيرميت هي:

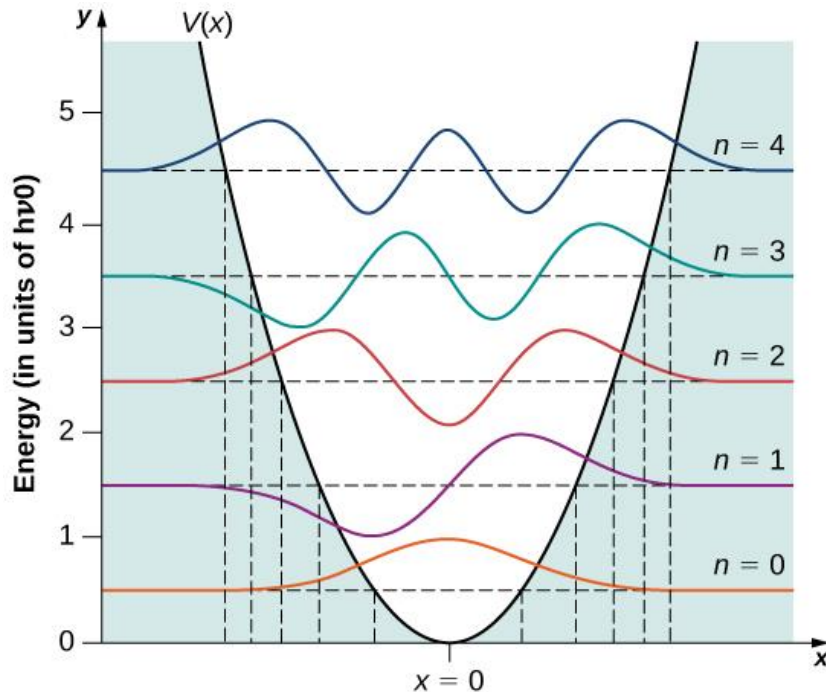
$$H_0(y) = 1$$

$$H_1(y) = 2y$$

$$H_2(y) = 4y^2 - 2$$

$$H_3(y) = 8y^3 - 12y.$$

يبين **الشكل 14.7** عدداً قليلاً من التوابع الموجية النموذجية. مع زيادة قيمة الرقم الرئيسي، تتناوب الحلول بين التوابع الزوجية والتوابع الفردية حول  $x = 0$ .



**الشكل 14.7** التوابع الموجية الخمسة الأولى لهزاز توافقي كمومي. يُشار إلى الحدود الكلاسيكية لحركة الهزاز بخطوط عمودية، والتي تقابل نقاط السكون الكلاسيكية عند  $x = \pm A$  للجسيم الكلاسيكي الذي تكون طاقته نفس طاقة الهزاز الكمومي في الحالة المشار إليها في هذا الشكل.

## مثال 10.7

### المنطقة الكلاسيكية للاهتزازات التوافقية

أوجد مطال الاهتزازات  $A$  لهزاز كلاسيكي طاقته تساوي طاقة هزاز كمومي في الحالة الكمية  $n$ .

#### خطة الحل:

لتحديد المطال  $A$ ، نقوم بمساواة الطاقة الكلاسيكية  $E = kx^2/2 = m\omega^2 A^2/2$  مع الطاقة  $E_n$  المعطاة في **المعادلة 7.56**.

#### الحل:

نحصل على:

$$E_n = m\omega^2 A_n^2/2 \Rightarrow A_n = \sqrt{\frac{2}{m\omega^2} E_n} = \sqrt{\frac{2}{m\omega^2} \frac{2n+1}{2} \hbar\omega} = \sqrt{(2n+1) \frac{\hbar}{m\omega}}$$

#### ملاحظة:

كلما زاد الرقم الكمي  $n$ ، ازدادت طاقة الهزاز وبالتالي يزداد مطال الاهتزاز (لتردد زاوي طبيعي ثابت). عندما تكون قيمة  $n$  كبيرة، يكون المطال متناسب تقريباً مع الجذر التربيعي للرقم الكمي.

يظهر العديد من الميزات المثيرة للاهتمام في هذا الحل. على عكس الهزاز الكلاسيكي، يمكن أن تكون للطاقة المقاسة للهزاز الكمومي قيم طاقية فقط تُعطى **بالمعادلة 7.56**. علاوةً على ذلك، على عكس الحالة بالنسبة للجسيم الكمومي في صندوق، تكون السويات الطاقية المسموح بها متباعدة بشكل متساوٍ،

$$\Delta E = E_{n+1} - E_n = \frac{2(n+1)+1}{2} \hbar\omega - \frac{2n+1}{2} \hbar\omega = \hbar\omega = hf. \quad (7.58)$$

عندما يرتبط الجسيم بنظام كهذا، فإنه ينتقل من حالة طاقية أعلى إلى حالة طاقية أدنى، والطاقة الكمومية التي يحملها الفوتون الصادر هي  $hf$  بالضرورة. وبالمثل، عندما ينتقل الجسيم من حالة طاقية أدنى إلى حالة طاقية أعلى، فإن الطاقة الكمومية الأصغر التي يمكن أن يمتصها الجسيم هي  $hf$ . يمكن للهزاز الكمومي أن يمتص أو يصدر طاقة من مضاعفات هذه الطاقة الكمومية الأصغر فقط. وهذا يتفق مع فرضية بلانك لتبادل الطاقة بين الإشعاع وجدران التجويف في مسألة إشعاع الجسم الأسود.

## مثال 11.7

### الطاقات الاهتزازية لجزيء كلور الهيدروجين

يتكون جزيء ثنائي حمض كلور الماء HCl من ذرة كلور وذرة هيدروجين. ولأن ذرة الكلور أكبر بنحو 35 مرة من ذرة الهيدروجين، يمكن تقريب اهتزازات جزيء حمض كلور الماء بشكل جيد من خلال افتراض أن ذرة الكلور عديمة الحركة وأن ذرة الهيدروجين تؤدي اهتزازات توافقية بسبب القوة الجزيئية المرنة الممثلة بقانون هوك. في طيف الاهتزازات تحت الحمراء المقاسة لحمض كلور الماء يكون خط التردد الأدنى متمركزاً عند  $f = 8.88 \times 10^{13}$  Hz. ما هو التباعد بين الطاقات الاهتزازية لهذا الجزيء؟ ما هو ثابت القوة  $k$  للرابطة الذرية في جزيء حمض كلور الماء؟

#### خطة الحل:

يتوافق خط التردد الأدنى مع إصدار التردد الأدنى للفوتونات. تصدر هذه الفوتونات عندما ينتقل الجزيء بين مستويين طاقيين اهتزازيين متجاورين. بفرض أن السويات الطاقية متباعدة بشكل متساوٍ، فإننا نستخدم **المعادلة 7.58** لتقدير هذا الفرق الطاقي. يتم تقريب الجزيء جيداً من خلال التعامل مع ذرة الكلور على أنها ثقيلة بشكل لانهائي، وذرة الهيدروجين ذات الكتلة  $m$  هي التي

تؤدي الاهتزازات. بالتعامل مع هذا النظام الجزئي كهزاز كلاسيكي، يمكن حساب ثابت القوة من العلاقة الكلاسيكية التالية:  $k = m\omega^2$ .

**الحل:**

الفرق الطاقى هو:

$$\Delta E = hf = (4.14 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s})(8.88 \times 10^{13} \text{ Hz}) = 0.368 \text{ eV}.$$

ثابت القوة هو:

$$k = m\omega^2 = m(2\pi f)^2 = (1.67 \times 10^{-27} \text{ kg})(2\pi \times 8.88 \times 10^{13} \text{ Hz})^2 = 520 \text{ N/m}.$$

**ملاحظة:**

القوة بين الذرات في جزيء حمض كلور الماء قوية بشكل مدهش. الطاقة النموذجية الصادرة عن الانتقالات الطاقية بين السويات الاهتزازية موجودة في المجال تحت الأحمر. كما سنرى لاحقاً، غالباً ما تصاحب الانتقالات بين السويات الطاقية الاهتزازية لجزيء ثنائي الذرة انتقالات بين السويات الطاقية الدورانية.

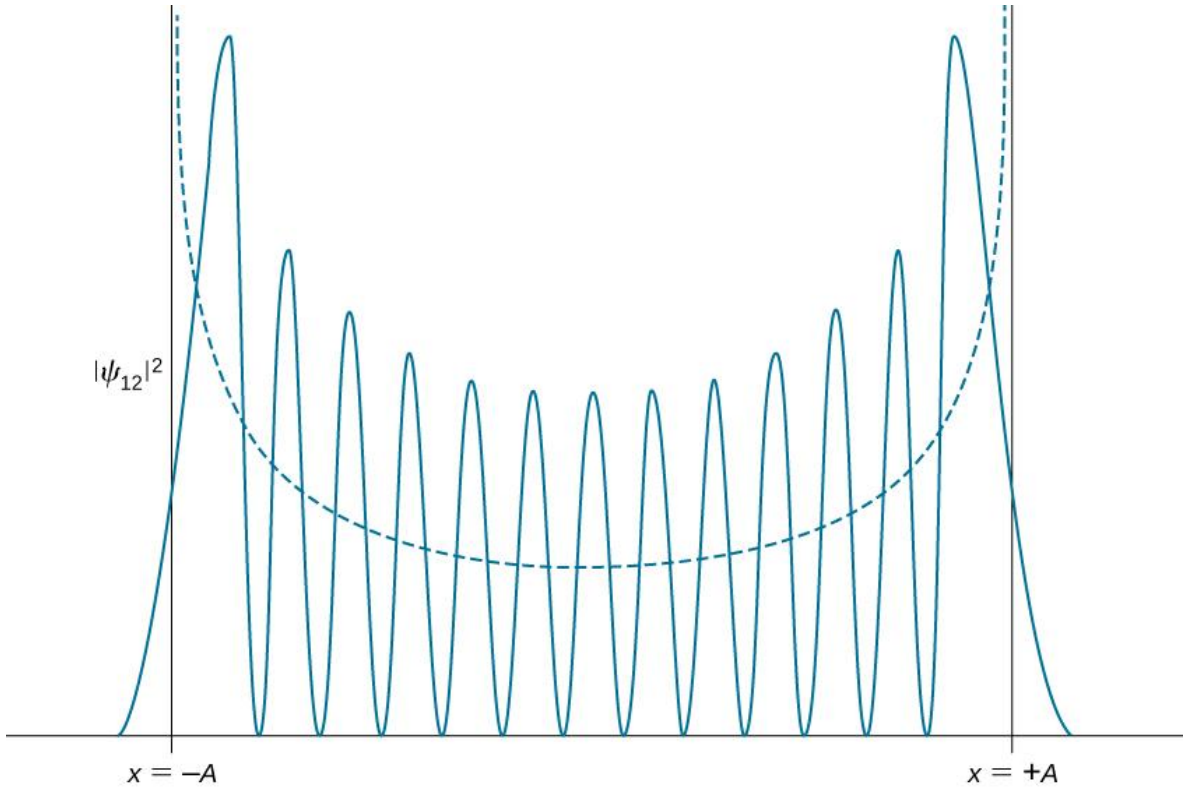
**8.7 تحقق من فهمك:** تردد الاهتزاز لجزيء ثنائي الذرة HI هو  $6.69 \times 10^{13} \text{ Hz}$ . (a) ما هو ثابت قوة الرابطة الجزيئية بين ذرات الهيدروجين واليود؟ (b) ما هي طاقة الفوتون الصادر عندما ينتقل هذا الجزيء بين مستويين طاقيين اهتزازيين متجاورين؟ يختلف الهزاز الكمومي عن الهزاز الكلاسيكي بثلاثة أشياء:

أولاً، الحالة الأساسية للهزاز الكمومي هي  $E_0 = \hbar \omega/2$ ، وليس صفراً. في النظرة الكلاسيكية، أدنى طاقة هي الصفر. يعد عدم وجود حالة طاقية صفرية أمراً شائعاً في جميع الأنظمة الميكانيكية الكمومية بسبب التقلبات الموجودة في كل مكان، والتي هي نتيجة لمبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ. إذا جلس جسيم كمى بلا حراك في قاع البئر الكموني، فإن عزمه وكذلك موضعه لا بد أن يكونا دقيقين في وقت واحد، وهو ما يتعارض مع مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ. لذلك، يجب أن تتميز الحالة الأدنى للطاقة بعدم اليقين في العزم والموضع، لذلك يجب أن تكون الحالة الأساسية للجسيم الكمومي في أعلى قاع البئر الكموني. ثانياً، يمكن أن يكون الجسيم في منحنى الهزاز التوافقي الكمومي باحتمال غير صفري خارج المجال  $-A \leq x \leq +A$ . في الصيغة الكلاسيكية للمسألة، لن يكون للجسيم أي طاقة في هذه المنطقة. يبلغ احتمال وجود جسيم كمومي في الحالة الأساسية في المنطقة المحظورة كلاسيكياً نحو 16٪.

ثالثاً، يكون توزيع الكثافة الاحتمالية  $|\psi_m(x)|^2$  للهزاز الكمومي في حالة الطاقة المنخفضة الأساسية،  $\psi_0(x)$  أكبر ما يمكن في منتصف البئر ( $x=0$ ). لكي يوجد الجسيم ذو الاحتمال الأكبر في مركز البئر، نتوقع أن يقضي الجسيم معظم الزمن هناك أثناء اهتزازة. وهذا عكس سلوك الهزاز الكلاسيكي، حيث يقضي الجسيم معظم وقته في الحركة بسرعات صغيرة نسبية بالقرب من نقاط السكون.

**9.7 تحقق من فهمك:** أوجد القيمة المتوقعة للموضع لجسيم في الحالة الأساسية لهزاز توافقي باستخدام التناظر.

يتغير شكل توزيع الكثافة الاحتمالية الكمومية للحالات المثارة، حيث تصبح أكثر شبيهاً بالتوزيع الكلاسيكي عندما تزداد قيمة الرقم الكمي. نلاحظ هذا التغيير بالفعل لأول حالة مثارة للهزاز الكمومي لأن التوزيع  $|\psi_1(x)|^2$  يصل إلى أعلى قيمة له عند نقاط الكمون ويختفي في وضع توازنه، كما هو موضح في **الشكل 12.7** وفقاً لمبدأ التبادل لبور، في حدود الأرقام الكمية العالية، يتقارب الوصف الكمومي للهزاز التوافقي مع الوصف الكلاسيكي، الموضح في **الشكل 15.7**. توزيع الكثافة الاحتمالية الكلاسيكية المقابلة للطاقة الكمومية للحالة  $n = 12$  هو تقريب جيد إلى حد ما لتوزيع الاحتمالية الكمومية لهزاز كمومي في هذه الحالة المثارة. يصبح هذا التوافق أفضل بشكل متزايد للحالات المثارة بشكل كبير.



**الشكل 15.7** توزيع الكثافة الاحتمالية لوجود هزاز توافقي في حالته الكمومية  $n = 12$ . يُظهر المنحنى المتقطع توزيع الكثافة الاحتمالية لهزاز كلاسيكي بالطاقة نفسها.

## 6.7 | النفق الكمومي للجسيمات عبر الحواجز الكمومية

### The Quantum Tunneling of Particles through Potential Barriers

#### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- وصف كيف يمكن لجسيم كمومي أن ينفذ عبر حاجز كمومي.
- تحديد الوسائط الفيزيائية المهمة التي تؤثر على احتمالية النفاذ عبر نفق.
- تحديد الظواهر الفيزيائية حيث يتم رصد النفق الكمي.
- تفسير كيف يتم استخدام نفق الكم في التقنيات الحديثة.

نفق الكم (النفاذ عبر النفق الكمومي) هو ظاهرة تخترق فيها الجزيئات حاجز الطاقة الكامنة بارتفاع أكبر من الطاقة الكلية للجسيمات. هذه الظاهرة مثيرة للاهتمام وهامة لأنها تنتهك مبادئ الميكانيك الكلاسيكي. نفق الكم مهم وله مجموعة واسعة من التطبيقات، مثل المجهر النفقي الماسح والديود النفقي.

## النفق والطاقة الكامنة

لتوضيح نفق الكم، فكر في كرة تتدحرج على طول سطح بطاقة حركية تبلغ  $100 \text{ J}$ . وخلال تدحرج هذه الكرة، فإنها تواجه تلة. الطاقة الكامنة للكرة الموضوعة أعلى التلة هي  $10 \text{ J}$ . لذلك، فإن الكرة (والتي تبلغ طاقتها الحركية  $100 \text{ J}$ ) تتدحرج بسهولة فوق التلة وتتابع حركتها. في الميكانيك الكلاسيكي، يكون احتمال مرور الكرة فوق التلة هو 1 بالضبط – أي أنها قادرة على تحطيمها في كل مرة. ومع ذلك، إذا تم زيادة ارتفاع التلة – الكرة الموضوعة أعلى التل لها طاقة كامنة قدرها  $200 \text{ J}$  – فإن الكرة ستتخطى جزءاً فقط من الطريق باتجاه قمة التلة، وستتوقف، وتعود في الاتجاه الذي جاءت منه. ويتم تحويل الطاقة الكلية للكرة كلياً إلى طاقة كامنة قبل أن تصل إلى أعلى التلة. لا نتوقع، حتى بعد المحاولات المتكررة، وجود الكرة ذات الطاقة البالغة  $100 \text{ J}$  وراء التلة. لذلك، فإن احتمال أن تمر الكرة فوق التلة هو بالضبط 0، واحتمالية إعادتها أو "انعكاسها" بواسطة التل هي بالضبط 1. الكرة لا تتخطى التلة. وجود الكرة وراء التلة هو أمر مستحيل أو "ممنوع طاقياً".

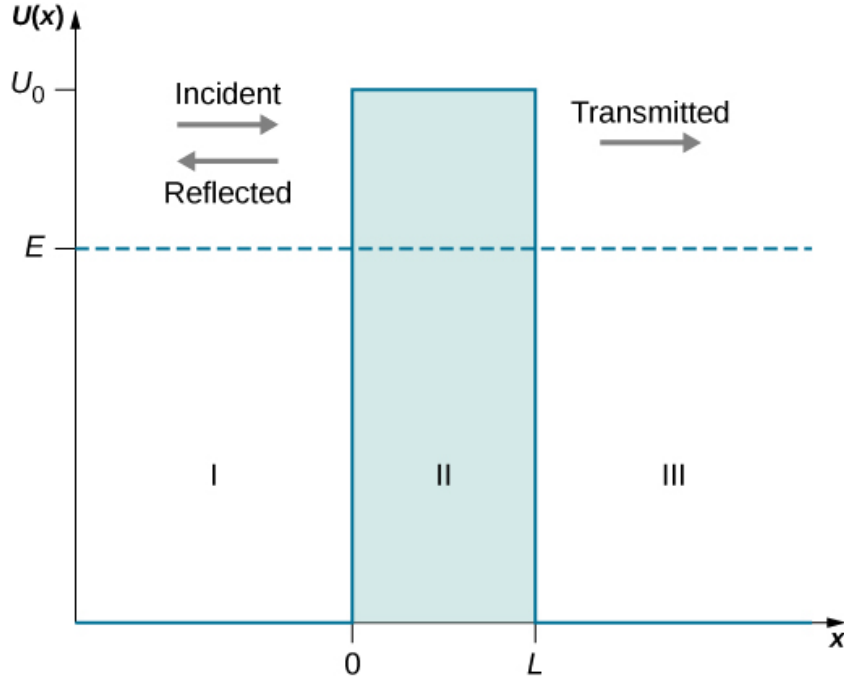
ومع ذلك، وفقاً لميكانيك الكم، فإن الكرة لها تابع موجي ويتم تعريف هذه التابع في كل المساحة. قد تكون التابع الموجي محددة الموقع بشكل كبير، ولكن هناك دائماً احتمال أنه عندما تواجه الكرة التلة، فإنها ستوجد خلفها بشكل مفاجئ. في الواقع، يكون هذا الاحتمال ممكناً إذا كانت "الحزمة الموجي" للكرة أوسع من الحاجز.

❖ استعرض هذه المحاكاة التفاعلية (<https://openstaxcollege.org/l/21intquanvid>) لمحاكاة النفق.

في لغة ميكانيك الكم، تتميز التلة بحاجز كموني. يتم وصف الحاجز المربع المحدود الارتفاع بتابع الطاقة الكامنة التالية:

$$U(x) = \begin{cases} 0, & \text{when } x < 0 \\ U_0, & \text{when } 0 \leq x \leq L \\ 0, & \text{when } x > L. \end{cases} \quad (7.59)$$

مخطط الحاجز الكموني مبين في الشكل 16.7. عندما يكون ارتفاع الحاجز  $U_0$  غير محدود، فإن الحزمة الموجي التي تمثل الجسم الكمومي الوارد غير قادرة على اختراقه، وترتد الجسيمات الكمومية من حدود الحاجز، تماماً كالجسيمات الكلاسيكية. عندما يكون عرض الحاجز  $L$  لانهائياً وارتفاعه محدوداً، فإن جزءاً من الحزمة الموجي التي تمثل جسماً كمياً وارداً يمكنه أن ينفذ عبر حدود الحاجز ثم يهلك في النهاية بعد أن يقطع مسافة داخل هذا الحاجز.



**الشكل 16.7** مخطط حاجز الطاقة الكموني ذي الارتفاع  $U_0$  ، الذي يشكل ثلاث مناطق فيزيائية بثلاث سلوكيات موجية مختلفة. في المنطقة I حيث  $x < 0$ ، تتحرك الحزمة الموجي الواردة (الجسيم الوارد) في منطقة عديمة الكمون وتوجد مع الحزمة الموجي المنعكسة (الجسيم المنعكس). في المنطقة الثانية، وهي الجزء من الموجة الواردة، الذي لم ينعكس عند  $x = 0$  يتحرك كموجة تنتقل عند كمون ثابت  $U(x) = +U_0$  وتنفذ إلى المنطقة III عند  $x = L$ . في المنطقة III من أجل قيم  $x > L$ ، تتحرك الحزمة الموجي (الجسيم المُرسَل) التي نفذت عبر الحاجز الكموني كجسيم عديم الكمون في منطقة عديمة الكمون. طاقة الجسيم الوارد  $E$  تمثل بالخط الأفقي.

عندما يكون كلٌّ من العرض  $L$  والارتفاع  $U_0$  عدداً محدوداً، فإن جزءاً من الحزمة الموجية الكمومية الساقطة على أحد جانبي الحاجز يمكن أن تخترق حد الحاجز وتتابع حركتها داخل هذا الحاجز، حيث تتخادم تدريجياً في طريقها إلى الجانب الآخر. في النهاية يظهر جزء من الحزمة الموجية الكمومية الساقطة على الجانب الآخر من الحاجز على شكل الحزمة الموجية المنقولة التي تنفذ عبر الحاجز. يعتمد مقدار الموجة الساقطة التي يمكن أن تنفذ عبر حاجز على عرض الحاجز  $L$  وارتفاعه  $U_0$ ، وعلى طاقة الجسيم الكمومي  $E$  الساقط على الحاجز. هذه هي فيزياء النفق (النفوذ عبر النفق الكمومي).

تم تحليل اختراق الحاجز بالتتابع الموجية الكمومية نظرياً للمرة الأولى من قبل فريدريتش هوند في عام 1927، بعد فترة قصيرة قيام شرودنغر بنشر المعادلة التي تحمل اسمه. وبعد مرور عام، استخدم جورج جامو صيغة ميكانيك الكم لتفسير التحلل ألفا الإشعاعي للنوى الذرية كظاهرة نفق كمي. أوضح اختراع الدايدود (الثنائي) النفقي في عام 1957 أن نفق الكم مهم لصناعة أشباه الناقلات. في التقنيات النانوية الحديثة، يتم التعامل مع الذرات الفردية باستخدام نفق الكم.

### النفق والتابع الموجي

لنفترض أن شعاعاً موحداً ومستقلاً عن الزمن من الإلكترونات أو الجسيمات الكمومية الأخرى ذات الطاقة  $E$  يتحرك على طول المحور السيني (في الاتجاه الموجب إلى اليمين) ويواجه حاجزاً كمونياً موصوفاً في **المعادلة 7.59**. السؤال هو: ما هو احتمال نفاذ جسيم من هذا الشعاع عبر الحاجز الكموني؟ يمكن إيجاد الإجابة من خلال حل مسألة القيمة الحدية لمعادلة شرودنغر المستقلة عن الزمن لجسيم في الحزمة. يُقدّم الشكل العام لهذه المعادلة في **المعادلة 7.60**، والتي نعيد صياغتها كما يلي:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + U(x)\psi(x) = E\psi(x), \text{ where } -\infty < x < +\infty. \quad (7.60)$$

في **المعادلة 7.60**، يتم تعريف التابع الكموني  $U(x)$  **بالمعادلة 7.59** نفرض أن الطاقة المعطاة  $E$  للجسيم الوارد أصغر من ارتفاع الحاجز الكموني  $U_0$ ،  $E < U_0$ ، لأن هذه هي القضية المثيرة للاهتمام. بمعرفة طاقة الجسيم الوارد  $E$ ، فإن مهمتنا تتمثل في حل **المعادلة 7.60** لتابع  $\psi(x)$  يكون مستمراً وله مشتقات أولية مستمرة لجميع قيم  $x$ . بمعنى آخر، نحن نبحث عن حل "سلس المظهر" (لأن هذا هو شكل التوابع الموجية) يستطيع تقلص تفسير احتمالي بحيث تكون العلاقة  $\psi^*(x)\psi(x) = |\psi(x)|^2$  هي الكثافة الاحتمالية. نقسم المحور الحقيقي إلى ثلاث مناطق محدود محددة بواسطة التابع الكموني في **المعادلة 7.59** (كما هو موضح في **الشكل 16.7**) ونسخ **المعادلة 7.60** لكل منطقة. باستخدام الرمز  $\psi_I(x)$  الحل في المنطقة I من أجل قيم  $x < 0$ ، والرمز  $\psi_{II}(x)$  للحل في المنطقة II من أجل قيم  $0 \leq x \leq L$ ، والرمز  $\psi_{III}(x)$  للحل في المنطقة III من أجل قيم  $x > L$ ، فإن معادلة شرودنغر الثابتة في المناطق الثلاث تأخذ الأشكال التالية:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi_I(x)}{dx^2} = E\psi_I(x), \text{ in region I: } -\infty < x < 0, \quad (7.61)$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi_{II}(x)}{dx^2} + U_0\psi_{II}(x) = E\psi_{II}(x), \text{ in region II: } 0 \leq x \leq L, \quad (7.62)$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi_{III}(x)}{dx^2} = E\psi_{III}(x), \text{ in region III: } L < x < +\infty. \quad (7.63)$$

تتطلب حالة الاستمرارية عند حدود المنطقة ما يلي:

$$\psi_I(0) = \psi_{II}(0) \quad (7.64)$$

و

$$\psi_{II}(L) = \psi_{III}(L) \quad (7.65)$$

تتطلب حالة "النعومة" أن يكون المشتق الأول للحل مستمراً عند حدود المنطقة:

$$\left. \frac{d\psi_I(x)}{dx} \right|_{x=0} = \left. \frac{d\psi_{II}(x)}{dx} \right|_{x=0}, \quad (7.66)$$

و

$$\left. \frac{d\psi_{II}(x)}{dx} \right|_{x=L} = \left. \frac{d\psi_{III}(x)}{dx} \right|_{x=L}, \quad (7.67)$$

في ما يلي، نجد التوابع  $\psi_I(x)$  و  $\psi_{II}(x)$  و  $\psi_{III}(x)$ .

يمكننا أن نتحقق بسهولة (عن طريق استبدال المعادلة الأصلية والاشتقاق) من أنه في المنطقتين الأولى والثالثة، يجب أن تكون الحلول من الأشكال العامة التالية:

$$\psi_I(x) = Ae^{+ikx} + Be^{-ikx} \quad (7.68)$$

$$\psi_{III}(x) = Fe^{+ikx} + Ge^{-ikx} \quad (7.69)$$

حيث:  $k = \sqrt{2mE}/\hbar$  عبارة عن رقم موجي والأس التخيلي يشير إلى الاهتزازات،

$$e^{\pm ikx} = \cos kx \pm i \sin kx. \quad (7.70)$$



الثوابت  $A$  و  $B$  و  $F$  و  $G$  في **المعادلة 7.68** و **المعادلة 7.69** قد تكون تخيلية. هذه الحلول موضحة في **الشكل 16.7**. في المنطقة I، توجد موجتان - إحداهما هي الواردة (التي تتحرك باتجاه اليمين) والأخرى هي المنعكسة (التي تتحرك باتجاه اليسار) - بحيث لا ينعدم أي من الثوابت  $A$  و  $B$  في **المعادلة 7.68**. في المنطقة III، هناك موجة واحدة فقط (تتحرك إلى اليمين)، وهي الموجة المرسلية، لذلك يجب أن يكون الثابت  $G$  صفراً في **المعادلة 7.69**،  $G=0$ . يمكن أن نكتب صراحةً أن الموجة الواردة هي  $\psi_{in}(x) = Ae^{+ikx}$ ، وأن الموجة المنعكسة هي  $\psi_{ref}(x) = Be^{-ikx}$ ، وأن الموجة المرسلية هي:  $\psi_{tra}(x) = Fe^{+ikx}$ . مطال الموجة الواردة هي:

$$|\psi_{in}(x)|^2 = \psi_{in}^*(x)\psi_{in}(x) = (Ae^{+ikx})^* Ae^{+ikx} = A^* e^{-ikx} Ae^{+ikx} = A^* A = |A|^2.$$

وبالمثل، فإن مطال الموجة المنعكسة هو  $|\psi_{ref}(x)|^2 = |B|^2$  ومطال الموجة المرسلية هو  $|\psi_{tra}(x)|^2 = |F|^2$ . نعلم من نظرية الأمواج أن مربع مطال الموجة يتناسب طردياً مع كثافة الموجة. إذا أردنا معرفة المقدار الذي ينفذ من الموجة الواردة عبر الحاجز، فإننا نحتاج إلى حساب مربع مطال الموجة المرسلية. احتمالية النفوذية أو احتمالية النفق هي نسبة الشدة المنقولة ( $|F|^2$ ) إلى الشدة الواردة ( $|A|^2$ )، وتكتب على الشكل:

$$T(L, E) = \frac{|\psi_{tra}(x)|^2}{|\psi_{in}(x)|^2} = \frac{|F|^2}{|A|^2} = \left| \frac{F}{A} \right|^2 \quad (7.71)$$

حيث  $L$  هو عرض الحاجز و  $E$  هي الطاقة الكلية للجسيم. هذا هو احتمال قيام جسيم فردي في الحزمة الواردة بالنفوذ عبر الحاجز الكمي. نحن نفهم بشكل حدسي أن هذا الاحتمال يجب أن يعتمد على ارتفاع الحاجز  $U_0$ . في المنطقة II، يمكن إعادة ترتيب الحدود في **المعادلة 7.62**:

$$\frac{d^2 \psi_{II}(x)}{dx^2} = \beta^2 \psi_{II}(x) \quad (7.72)$$

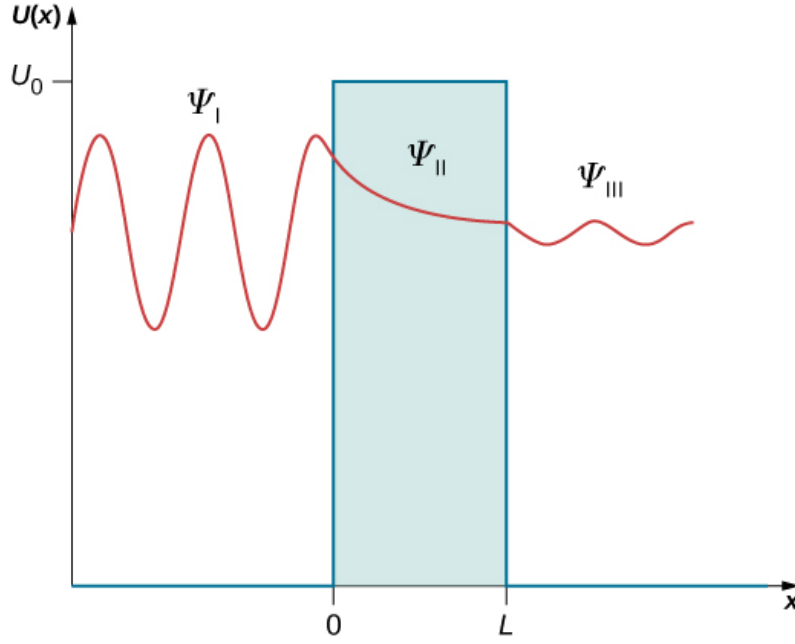
حيث  $\beta_2$  موجبة لأن  $U_0 > E$  والوسيط  $\beta$  هو رقم حقيقي:

$$\beta^2 = \frac{2m}{\hbar^2}(U_0 - E). \quad (7.73)$$

الحل العام **للمعادلة 7.72** ليس اهتزازياً (على عكس المناطق الأخرى) وهو من الشكل الأسّي الذي يصف التخماد التدريجي للتابع  $\psi_{II}(x)$

$$\psi_{II}(x) = Ce^{-\beta x} + De^{+\beta x}. \quad (7.74)$$

تم توضيح النوعين من الحلول في المناطق الثلاثة في **الشكل 17.7**.



**الشكل 17.7** ثلاثة أنواع من الحلول لمعادلة شرودنجر لمسألة النفق الكمومي: سلوك اهتزازي في المناطق الأولى والثالثة حيث يتحرك الجسيم الكمومي بحرية، وسلوك انحلاي - آسي في المنطقة II (منطقة الحاجز) حيث يتحرك الجسيم في  $U_0$  الكموني.

نستخدم الآن الشروط الحدية لإيجاد معادلات الثوابت غير المعلومة. يتم تعويض **المعادلة 7.68** و**المعادلة 7.74** في **المعادلة 7.64** فنحصل على:

$$A + B = C + D. \quad (7.75)$$

يتم تعويض **المعادلة 7.74** و**المعادلة 7.69** في **المعادلة 7.65** فنحصل على:

$$Ce^{-\beta L} + De^{+\beta L} = Fe^{+ikL}. \quad (7.76)$$

وبالمثل، فإننا نقوم بتعويض **المعادلة 7.68** و**المعادلة 7.74** في **المعادلة 7.66**، وبعد التفاضل نحصل على:

$$-ik(A - B) = \beta(D - C). \quad (7.77)$$

وبالمثل، نكتب صراحةً **المعادلة 7.67** وهي الشرط الحدي:

$$\beta(De^{+\beta L} - Ce^{-\beta L}) = -ikFe^{+ikL}. \quad (7.78)$$

لدينا الآن أربع معادلات لخمسة ثوابت غير معلومة. ومع ذلك، لأن الكمية التي نسعى وراءها هي معامل النفوذ المحدد في **المعادلة 7.71** بالكسر  $F/A$ ، فإن عدد المعادلات صحيح تماماً لأنه عندما نقسم كل من المعادلات المذكورة أعلاه على  $A$ ، سنحصل في نهاية المطاف على أربعة كسور مجهولة فقط، هي:  $B/A$ ،  $C/A$ ،  $D/A$ ، و  $F/A$ ، ثلاثة منها يمكن التخلص منها لإيجاد  $F/A$ . إجراءات الوصول إلى العلاقة  $F/A$  طويلة جداً، لكن يمكن إجراؤها يدوياً أو بمساعدة برنامج حاسوبي. النتيجة النهائية هي:

$$\frac{F}{A} = \frac{e^{-ikL}}{\cosh(\beta L) + i(\gamma/2)\sinh(\beta L)}. \quad (7.79)$$

لتجنب الفوضى في اشتقاق **المعادلة 7.79**، نستخدم البدائل  $\gamma \equiv \beta/k - k/\beta$

$$\cosh y = \frac{e^y + e^{-y}}{2}, \text{ and } \sinh y = \frac{e^y - e^{-y}}{2}.$$

نقوم بتعويض **المعادلة 7.79** في **المعادلة 7.71** ونحصل على العلاقة الدقيقة لمعامل النفوذ عبر الحاجز:

$$T(L, E) = \left(\frac{F}{A}\right) * \frac{F}{A} = \frac{e^{+ikL}}{\cosh(\beta L) - i(\gamma/2)\sinh(\beta L)} \cdot \frac{e^{-ikL}}{\cosh(\beta L) + i(\gamma/2)\sinh(\beta L)}$$

أو

$$T(L, E) = \frac{1}{\cosh^2(\beta L) + (\gamma/2)^2 \sinh^2(\beta L)} \quad (7.80)$$

حيث

$$\left(\frac{\gamma}{2}\right)^2 = \frac{1}{4} \left( \frac{1 - E/U_0}{E/U_0} + \frac{E/U_0}{1 - E/U_0} - 2 \right)$$

بالنسبة للحاجز العريض والعالي سيء النفوذية، يمكن تقريب **المعادلة 7.80** إلى الشكل التالي:

$$T(L, E) = 16 \frac{E}{U_0} \left(1 - \frac{E}{U_0}\right) e^{-2\beta L}. \quad (7.81)$$

نرى من خلال العلاقة الدقيقة **المعادلة 7.80** أو العلاقة التقريبية **المعادلة 7.81**، أن تأثير النفق يعتمد بشدة على عرض الحاجز الكموني  $L$ . في المختبر، يمكننا ضبط كل من الارتفاع الكموني  $U_0$  والعرض  $L$  لتصميم الأجهزة النانوية بمعاملات النفوذية المرغوبة.

### معامل النفوذية

#### مثال 12.7

يتم عزل إثنين من أسلاك النحاس النانوية بطبقة نانوية من أكسيد النحاس والتي توفر حاجزاً كمونياً  $10.00 \text{ eV}$ . قم بتقدير احتمالية النفق بين الأسلاك النانوية للإلكترونات طاقتها  $7.00 \text{ eV}$  عبر طبقة الأكسيد التي تبلغ ثخانتها  $5.00 \text{ nm}$ . ماذا لو تم تخفيض ثخانة الطبقة إلى  $1.00 \text{ nm}$  فقط؟ ماذا لو زادت طاقة الإلكترونات إلى  $9.00 \text{ eV}$ ؟

#### خطة الحل:

باعتبار طبقة الأكسيد العازل كحاجز كموني له ارتفاع محدد، نستخدم **المعادلة 7.81** نحدد  $U_0 = 10.0 \text{ eV}$  و  $E_1 = 7.00 \text{ eV}$  و  $E_2 = 9.00 \text{ eV}$  و  $L_1 = 5.00 \text{ nm}$  و  $L_2 = 1.00 \text{ nm}$ . نستخدم **المعادلة 7.73** لحساب الأس. أيضاً، نحن بحاجة إلى الكتلة الساكنة للإلكترون  $m = 511 \text{ keV}/c^2$  وثابت بلانك  $\hbar = 0.1973 \text{ keV} \cdot \text{nm}/c$ . عادةً ما يتعامل هذا النوع من التقديرات مع الكميات الصغيرة جداً، والتي هي غالباً غير مناسبة للآلات الحاسبة المحمولة. لإجراء تقديرات صحيحة للحدود، نقوم بالتحويل  $e^y = 10^{y/\ln 10}$ .

.

#### الحل:

الثوابت:

$$\frac{2m}{\hbar^2} = \frac{2(511 \text{ keV}/c^2)}{(0.1973 \text{ keV} \cdot \text{nm}/c)^2} = 26,254 \frac{1}{\text{keV} \cdot (\text{nm})^2},$$

$$\beta = \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2}(U_0 - E)} = \sqrt{26,254 \frac{(10.0 \text{ eV} - E)}{\text{keV} \cdot (\text{nm})^2}} = \sqrt{26.254(10.0 \text{ eV} - E)/\text{eV}} \frac{1}{\text{nm}}.$$

للإلكترون ذي الطاقة المنخفضة، حيث  $E_1 = 7.00 \text{ eV}$

$$\beta_1 = \sqrt{26.254(10.00 \text{ eV} - E_1)/\text{eV}} \frac{1}{\text{nm}} = \sqrt{26.254(10.00 - 7.00)} \frac{1}{\text{nm}} = \frac{8.875}{\text{nm}},$$

$$T(L, E_1) = 16 \frac{E_1}{U_0} \left(1 - \frac{E_1}{U_0}\right) e^{-2\beta_1 L} = 16 \frac{7}{10} \left(1 - \frac{7}{10}\right) e^{-17.75 L/\text{nm}} = 3.36 e^{-17.75 L/\text{nm}}.$$

للإلكترون ذي الطاقة المرتفعة  $E_2 = 9.00 \text{ eV}$ :

$$\beta_2 = \sqrt{26.254(10.00 \text{ eV} - E_2)/\text{eV}} \frac{1}{\text{nm}} = \sqrt{26.254(10.00 - 9.00)} \frac{1}{\text{nm}} = \frac{5.124}{\text{nm}},$$

$$T(L, E_2) = 16 \frac{E_2}{U_0} \left(1 - \frac{E_2}{U_0}\right) e^{-2\beta_2 L} = 16 \frac{9}{10} \left(1 - \frac{9}{10}\right) e^{-5.12 L/\text{nm}} = 1.44 e^{-5.12 L/\text{nm}}.$$

للحاجز العريض حيث  $L_1 = 5.00 \text{ nm}$ :

$$T(L_1, E_1) = 3.36 e^{-17.75 L_1/\text{nm}} = 3.36 e^{-17.75 \cdot 5.00 \text{ nm/nm}} = 3.36 e^{-88} = 3.36(6.2 \times 10^{-39}) = 2.1\% \times 10^{-36},$$

$$T(L_1, E_2) = 1.44 e^{-5.12 L_1/\text{nm}} = 1.44 e^{-5.12 \cdot 5.00 \text{ nm/nm}} = 1.44 e^{-25.6} = 1.44(7.62 \times 10^{-12}) = 1.1\% \times 10^{-9}.$$


للحاجز الضيق حيث  $L_2 = 1.00 \text{ nm}$ :

$$T(L_2, E_1) = 3.36 e^{-17.75 L_2/\text{nm}} = 3.36 e^{-17.75 \cdot 1.00 \text{ nm/nm}} = 3.36 e^{-17.75} = 3.36(5.1 \times 10^{-7}) = 1.7\% \times 10^{-4},$$

$$T(L_2, E_2) = 1.44 e^{-5.12 L_2/\text{nm}} = 1.44 e^{-5.12 \cdot 1.00 \text{ nm/nm}} = 1.44 e^{-5.12} = 1.44(5.98 \times 10^{-3}) = 0.86\%.$$

### ملاحظة:

نرى من هذه التقديرات أن احتمالية النفق تتأثر بدرجة أكبر بعرض الحاجز الكموني أكثر من طاقة الجسيم الساقط. في التقنيات الحديثة، يمكننا معالجة الذرات الفردية على الأسطح المعدنية لإنشاء حواجز كمونية تشكل أجزاءاً من النانومتر، مما يؤدي إلى تيارات نفق قابلة للقياس. واحد من العديد من تطبيقات هذه التقنية هو المجهر النفقي الماسح (STM)، والذي سنناقشه لاحقاً في هذا الجزء من الفصل.

 **10.7 تحقق من فهمك:** يرد بروتون ذو طاقة حركية  $1.00 \text{ eV}$  على حاجز كموني مربع بارتفاع  $10.00 \text{ eV}$ . إذا كان البروتون له احتمالية النفوذية نفسها للإلكترون من الطاقة نفسها، فكم يجب أن يكون عرض الحاجز بالنسبة لعرض الحاجز الذي يواجهه الإلكترون؟

### الانحلال الإشعاعي

في عام 1928، عرّف جامو نفق الكم على أنه الآلية المسؤولة عن التحلل الإشعاعي للنواة الذرية. ولاحظ أن بعض نظائر الثوريوم واليورانيوم والبزموت تتحلل عن طريق إصدار جسيمات ألفا (وهي ذرات الهليوم المؤينة بشكل مضاعف أو ما تُسمى ببساطة نوى الهليوم). خلال عملية إصدار جسيم  $\alpha$ ، تتحول النواة الأصلية إلى نواة جديدة تحتوي على نوترونين أقل وبروتونين أقل من النواة الأصلية. تتمتع جسيمات ألفا، الصادرة من النظير نفسه، تقريباً بالطاقة الحركية نفسها. عندما ننظر إلى فروق هذه الطاقات بين نظائر العناصر المختلفة، فإن أدنى طاقة حركية تبلغ نحو  $4 \text{ MeV}$ ، والأعلى تبلغ نحو  $9 \text{ MeV}$ ، لذلك تكون هذه الطاقات من المرتبة نفسها. وهنا تنتهي أوجه التشابه بين النظائر المختلفة.

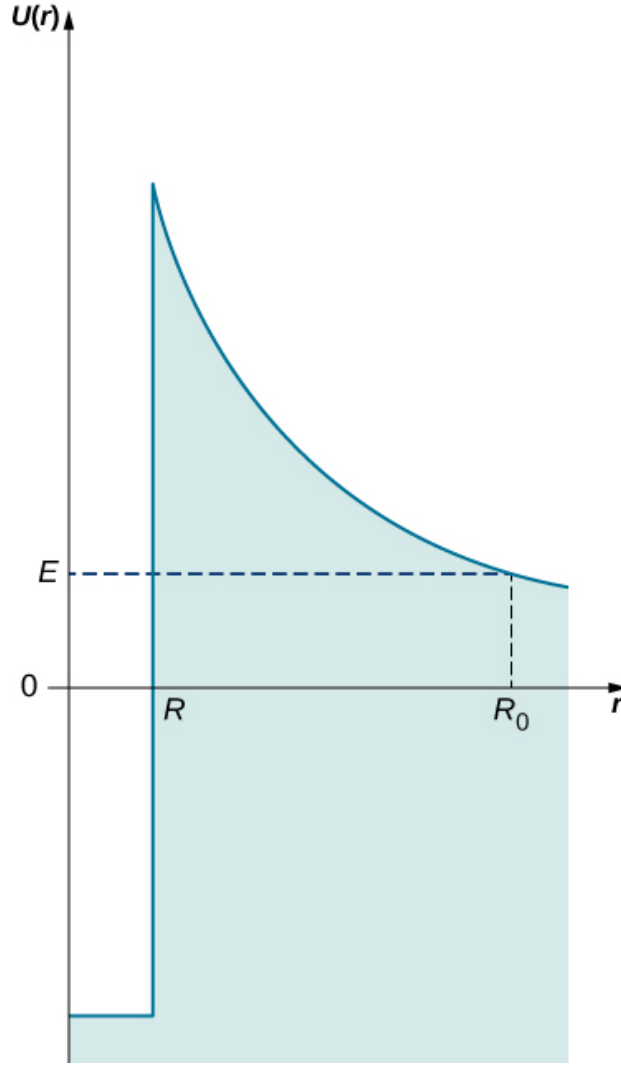
عندما نفحص عمر النصف (عمر النصف هو الزمن الذي تفقد فيه عينة مشعة نصف نواتها بسبب التحلل)، تختلف النظائر المختلفة على نطاق واسع. فعلى سبيل المثال، عمر النصف للبولونيوم 214 هو  $160 \mu\text{s}$  وعمر النصف لليورانيوم يبلغ  $4.5$  مليار سنة. أوضح جامو أن هذا الاختلاف من خلال النظر اعتبار نموذج "الصندوق الكروي" للنواة، حيث يمكن لجسيمات  $\alpha$  أن ترتد جيئةً وذهاباً بين الجدران كجسيمات حرة. يتم التقييد من خلال كمونات نووية قوية عند الجدار الكروي للصندوق. ومع ذلك،

فإن ثخانة هذا الجدار ليست لانهائية وإنما هي محدودة، لذا من حيث المبدأ، فإن الجسيم النووي لديه فرصة للهروب من هذا الحبس النووي. عند الجدار الداخلي لحاجز الحصر، يوجد كمون نووي عالٍ يحافظ على جسيم ألفا ضمن مكان صغير. ولكن عندما يخرج جسيم  $\alpha$  إلى الجانب الآخر من هذا الجدار، فإنه يخضع لقوة كولون الساكنة، وينتقل مبتعداً عن النواة. هذه الفكرة موضحة في **الشكل 18.7**. يعتمد عرض الحاجز الكموني  $L$ ، الذي يفصل جسيم ألفا عن العالم الخارجي، على الطاقة الحركية للجسيم  $E$ . وهذا العرض  $L = R_0 - R$  هو المسافة بين النقطة الممثلة بنصف قطر النواة  $R$  والنقطة  $R_0$ ، حيث يظهر جسيم ألفا على الجانب الآخر من الجدار. عند المسافة  $R_0$ ، يجب أن تتوافق طاقتها الحركية على الأقل مع الطاقة الكهربائية للتنافر،

$E = (4\pi\epsilon_0)^{-1}Ze^2/R_0$  (حيث  $+Ze$  هي شحنة النواة). وبهذه الطريقة يمكننا تقدير عرض الحاجز النووي:

$$L = \frac{e^2 Z}{4\pi\epsilon_0 E} - R.$$

نرى من هذا التقدير أنه كلما زادت طاقة جسيم  $\alpha$ ، ضاق عرض الحاجز الذي يخترقه. نعلم أيضاً أن عرض الحاجز الكموني هو أهم معيار في احتمالية النفق. وبالتالي، فإن جسيمات ألفا عالية النشاط تتمتع بفرصة جيدة للهروب من النوى، وبالنسبة لهذه النوى، يكون عمر النصف للتفكك النووي قصيراً. لاحظ أن هذه العملية غير خطية إلى حد كبير، مما يعني أن الزيادة الصغيرة في طاقة جسيمات ألفا لها تأثير معزز كبير بشكل غير متناسب على احتمالية النفق، وبالتالي على تقصير عمر النصف. هذا يفسر لماذا عمر النصف للبولونيوم، الذي يصدر جسيمات ألفا طاقتها  $8 \text{ eV}$ ، ليس سوى مئات من الملي ثانية، وعمر النصف لليورانيوم الذي يصدر جسيمات ألفا طاقتها  $4 \text{ eV}$ ، هو مليارات السنين.



**الشكل 18.7** حاجز الطاقة الكموني لجسيم ألفا مرتبط في النواة؛ للهروب من النواة، توجب على جسيم ألفا ذي الطاقة  $E$  أن ينفذ عبر الحاجز من مسافة  $R$  إلى المسافة  $R_0$  بعيداً عن المركز.

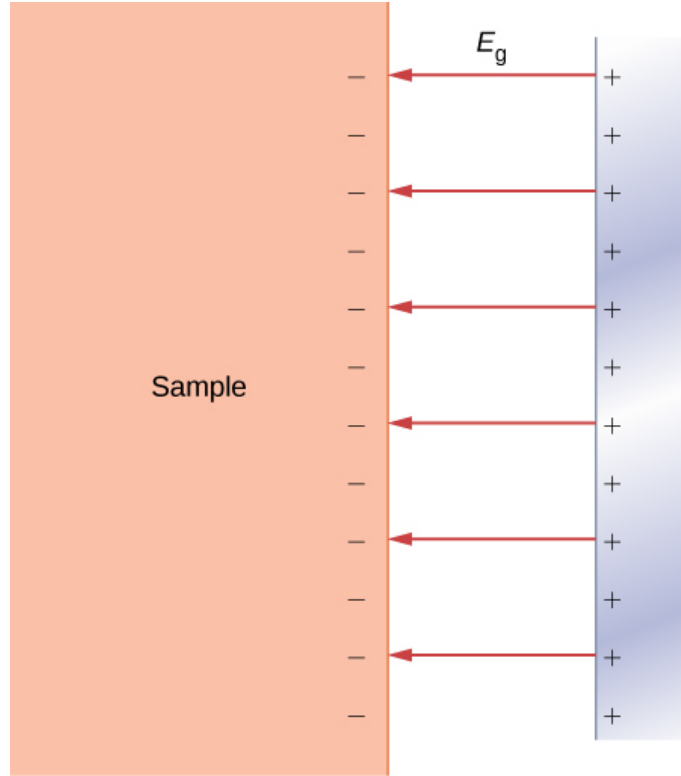
### الإصدار الحقلي

الإصدار الحقلي هو عملية إصدار الإلكترونات من سطوح ناقلة بسبب وجود حقل كهربائي خارجي قوي مطبق في الاتجاه الناظمي على السطح (**الشكل 19.7**). كما نعلم من دراستنا للحقول الكهربائية في الفصول السابقة، يؤدي الحقل الكهربائي الخارجي المطبق إلى انتقال الإلكترونات الموجودة في الناقل إلى سطحه والبقاء هناك مادام الحقل الخارجي الحالي ليس قوياً بشكل مفرط. في هذه الحالة، لدينا كمون كهربائي ثابت في جميع أنحاء الناقل، بما في ذلك سطحه. بلغة الطاقة الكامنة، نقول أن للإلكترون الموجود داخل الناقل طاقة كامنة ثابتة  $U(x) = -U_0$  (هنا،  $x$  تعني داخل الناقل). في الحالة الموضحة في

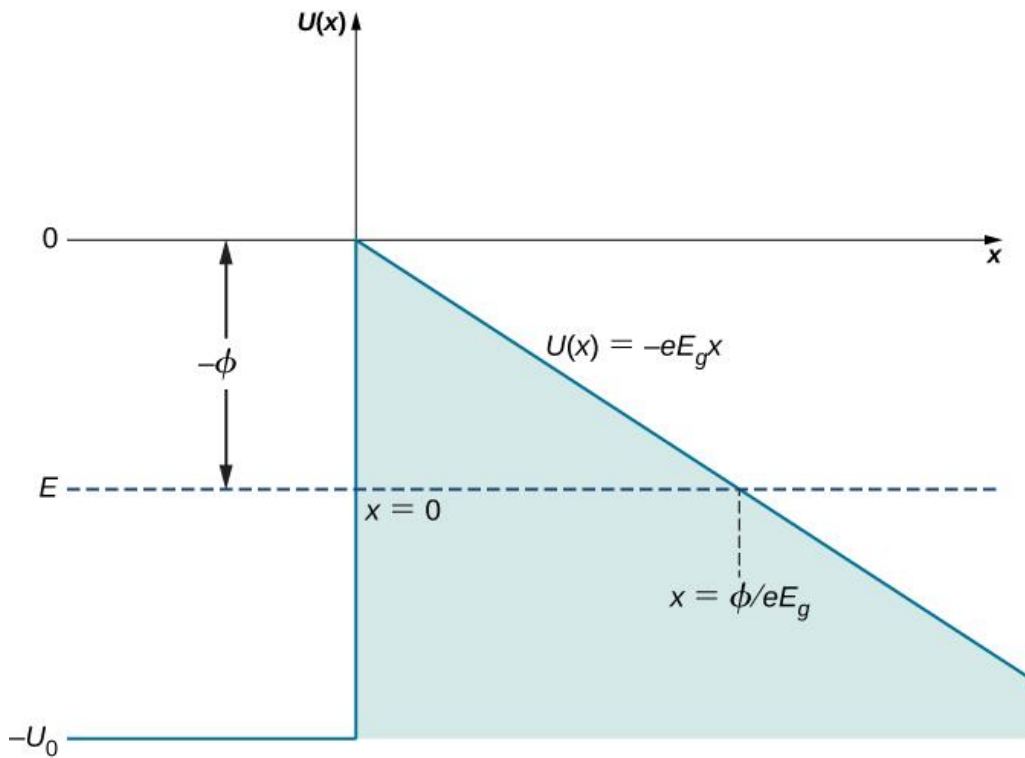
**الشكل 19.7**، حيث يكون الحقل الكهربائي الخارجي موحداً ومطاله  $E_g$ ، إذا وُجد إلكترون خارج الناقل على مسافة  $x$  بعيداً عن سطحه، فيجب أن تكون طاقته الكامنة هي  $U(x) = -eE_g x$  (هنا، تشير  $x$  إلى البعد عن السطح). باعتبار نقطة المبدأ على السطح، بحيث يكون  $x = 0$  هو موقع السطح، يمكننا تمثيل الطاقة الكامنة للإلكترونات الناقلية في الناقل كحاجز طاقة كموني الموضح في

**الشكل 20.7**. في حالة عدم وجود الحقل الخارجي، تصبح الطاقة الكامنة بمنزلة حاجز خطوة محدد بالعلاقة:

$$U(x > 0) = 0 \text{ و } U(x \leq 0) = -U_0$$



**الشكل 19.7** حقل كهربائي خارجي ناظمي على سطح ناقل: في الحقل القوي، قد يتم فصل الإلكترونات الموجودة على سطح الناقل عنه وتسريعها عكس الحقل الكهربائي الخارجي بعيداً عن السطح.



**الشكل 20.7** مخطط حاجز الطاقة الكمومي على سطح ناقل معدني بوجود حقل كهربائي موحد خارجي،  $E_g$ ، ناظمي على السطح: يصبح حاجزاً ذا تابع سلمي عند إزالة الحقل الخارجي. يُشار إلى تابع المعدن بالرمز  $\phi$ .

عندما يكون الحقل الكهربائي الخارجي قوياً، يمكن فصل إلكترونات الناقلية الموجودة على السطح عنه وتسريعها على طول خطوط الحقل الكهربائي في اتجاه معاكس للحقل الخارجي بعيداً عن السطح. باختصار، قد تحرب إلكترونات الناقلية من السطح. يمكن فهم حقل الإصدار باعتباره النفق الكمي لإلكترونات الناقلية عبر الحاجز الكموني على سطح الناقل. المبدأ المادي في العمل هنا يشبه إلى حد كبير آلية إصدار  $\alpha$  من نواة مشعة.

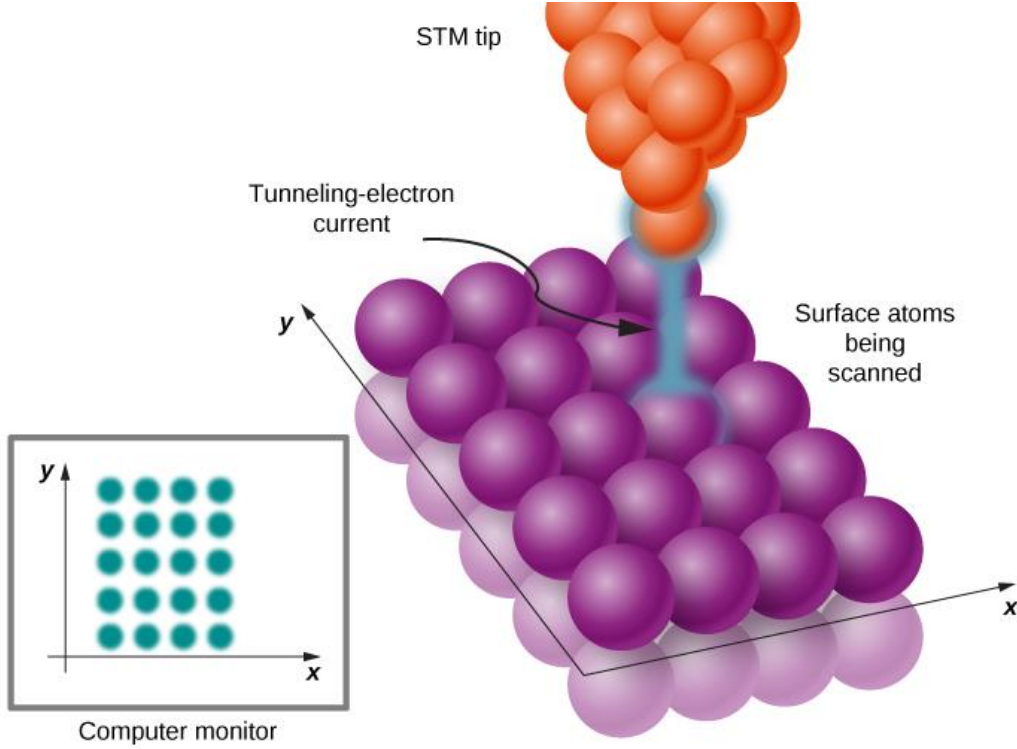
لنفترض أن للإلكترون طاقة حركية  $E$  (متوسط الطاقة الحركية للإلكترون في المعدن هي تابع عمل المعدن  $\phi$ ، ويمكن قياسها، كما تمت مناقشته في فقرة المفعول الكهروضوئي في فصل **الفوتونات وأمواج المادة**)، والحقل الكهربائي الخارجي يمكن تقريبه محلياً بحقل كهربائي موحد قوته  $E_g$ . عرض الحاجز الكموني  $L$  الذي يجب أن يعبره الإلكترون هو المسافة من سطح الناقل إلى نقطة تقع خارج السطح، حيث تكون طاقته الحركية مطابقة لقيمة الطاقة الكامنة في الحقل الخارجي. في **الشكل 20.7**، يتم قياس هذه المسافة على طول الخط الأفقي المتقطع  $U(x) = E$  من  $x = 0$  إلى التقاطع مع  $U(x) = -eE_g x$ ، وبالتالي فإن عرض الحاجز هو:

$$L = \frac{e^{-1}E}{E_g} = \frac{e^{-1}\phi}{E_g}$$

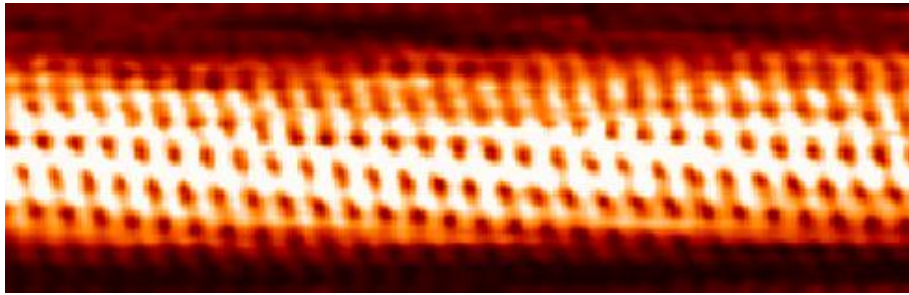
تناسب  $L$  عكساً مع قوة الحقل الخارجي  $E_g$ . عندما تزيد من قوة الحقل الخارجي، يصبح الحاجز الكموني خارج الناقل أكثر حدة وينخفض عرضه لإلكترون ذي طاقة حركية معينة. بدوره، فإن احتمال أن الإلكترون سوف ينفذ عبر الحاجز (سطح الناقل) يزداد بشكل أسي. تشكل الإلكترونات التي تظهر على الجانب الآخر من هذا الحاجز تياراً (تيار الإلكترون النفقي) يمكن اكتشافه فوق السطح. يتناسب تيار الإلكترون النفقي مع احتمالية النفق. تعتمد احتمالية النفق بشكل غير خطي على عرض الحاجز  $L$ ، ويمكن تغيير  $L$  عن طريق ضبط  $E_g$ . ولذلك، فإن تيار الإلكترون النفقي يمكن ضبطه عن طريق ضبط قوة الحقل الكهربائي الخارجي على السطح. عندما تكون قوة الحقل الكهربائي الخارجي ثابتة، يكون لتيار الإلكترون النفقي قيم مختلفة على ارتفاعات مختلفة  $L$  فوق السطح.

إن ظاهرة النفق الكمومي على الأسطح المعدنية، والتي وصفناها للتو، هي المبدأ المادي وراء تشغيل **المجهر النفقي الماسح (STM)**، الذي ابتكره عام 1981 كل من جيرد بينيج وهينريش روهري. يتكون جهاز STM من إبرة مسح، (عادةً ما تكون مصنوعة من التنغستن أو البلاتين إيريديوم أو الذهب)؛ وجهاز كهروضغطي يتحكم في ارتفاع الإبرة في مجال نموذجي من 0.4 nm إلى 0.7 nm فوق السطح المراد فحصه؛ وبعض الأجهزة التي تتحكم في حركة الإبرة على طول السطح؛ وجهاز كمبيوتر. لعرض الصور. بينما يتم الاحتفاظ بالعينة عند كمون انحياز مناسب، تتحرك إبرة المسح على طول السطح (**الشكل 21.7**)، ويتم تسجيل تيار الإلكترون النفقي بين الإبرة والسطح في كل موضع. تعتمد كمية التيار على احتمالية نفق الإلكترون من السطح إلى الإبرة، والذي بدوره يعتمد على ارتفاع الإبرة فوق السطح. وبالتالي، في كل موضع للإبرة، يتم قياس المسافة من الإبرة إلى السطح من خلال قياس عدد الإلكترونات التي تنفذ خارجة من السطح إلى الإبرة. يمكن أن تعطي هذه الطريقة دقة غير مسبوقه تبلغ نحو 0.001 nm، أي نحو 1% من متوسط قطر الذرة. وبهذه الطريقة، يمكننا أن نرى الذرات الفردية على السطح، كما في صورة أنابيب الكربون النانوية في **الشكل 22.7**.





**الشكل 21.7** في مخطط المجهر STM، يتم فحص السطح عند كمون ثابت بواسطة إبرة ضيقة تتحرك على طول السطح. عندما تتحرك الإبرة بالقرب من ذرات السطح، يمكن للإلكترونات أن تنفذ من السطح إلى الإبرة. يتم رصد تيار الإلكترون النفقي هذا باستمرار بينما تكون الإبرة قيد الحركة. يعطي مقدار التيار في الموقع  $(x,y)$  معلومات حول ارتفاع الإبرة فوق السطح في هذا الموقع. بهذه الطريقة، يتم إنشاء خريطة طبوغرافية مفصلة للسطح وعرضها على شاشة الكمبيوتر.



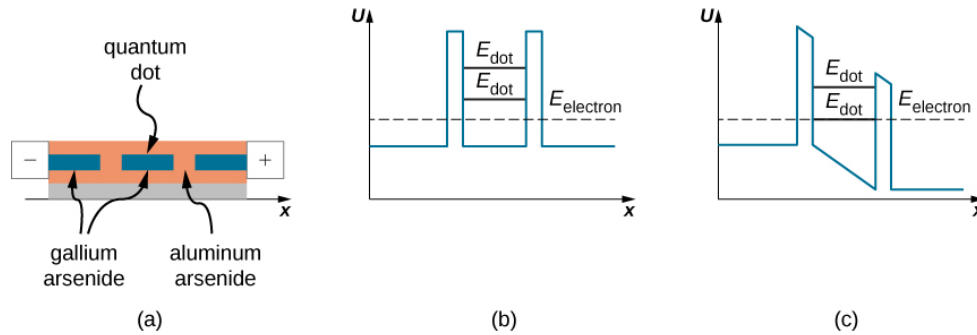
**الشكل 22.7** صورة STM لأنابيب الكربون: دقة القياس الذرية تسمح لنا برؤية الذرات الأحادية على السطح. صور المجهر STM في التدرج الرمادي، ويتم إضافة تلوين لإظهار التفاصيل للعين البشرية.

### النفق الكمومي الرنان (المجاوب)

للنفق الكمومي العديد من التطبيقات في العناصر نصف الناقلة كمكونات الدوائر الإلكترونية أو الدوائر المتكاملة المصممة عند المقاس النانوية؛ ومن هنا جاء مصطلح "تكنولوجيا النانو". على سبيل المثال، الثنائي (وهو عنصر يستخدم في الدارات الكهربائية) ويجعل تيار الإلكترونات المار في أحد الاتجاهين مختلفاً عن التيار المار في الاتجاه المعاكس، عندما يتم عكس قطبية كمون الانحياز) يمكن تنفيذه باستخدام الوصلة النفقية بين نوعين مختلفين من المواد نصف الناقلة. في مثل هذا الثنائي النفقي، تنفذ الإلكترونات عبر حاجز كمومي واحد عند منطقة التماس بين نوعين مختلفين من أنصاف النواقل. يتغير عند الوصلة تيار النفق الإلكتروني بشكل غير خطي تبعاً للكمون المطبق على طرفي الوصلة، وقد يتناقص بسرعة عند زيادة كمون الانحياز. وهذا بعكس سلوك قانون أوم،

الذي نعرفه في الدوائر المنزلية. هذا النوع من السلوك السريع (الناجم عن النفق الكمومي) هو أمر مرغوب فيه في الأجهزة الإلكترونية عالية السرعة.

نوع آخر من أجهزة النانو الإلكترونية يستخدم **النفق الرنيني** للإلكترونات عبر الحواجز الكمومية التي تحدث في النقاط الكمومية. **النقطة الكمومية** هي منطقة صغيرة من البلورة النانوية نصف الناقلة التي تنمو، على سبيل المثال، في بلورة السيليكون أو زرنيخ الألمونيوم. **الشكل 23.7 (a)** نقطة كمومية من زرنيخ الغاليوم والمتضمنة في رقاقة زرنيخ الألمونيوم. تتصرف منطقة النقطة الكمومية كبئر كمومي ذي ارتفاع محدود (كما هو موضح في **الشكل 23.7 (b)**) وله حاجزان كمونيان محدودا الارتفاع عند حدود النقطة. وبالمثل، كما هو الحال بالنسبة لجسيم كمومي في صندوق (أي بئر كمومي لانتهائي)، يتم تكميم الطاقات المنخفضة لجسيم كمومي محصور في بئر كمومي ذي ارتفاع محدود. الفرق بين الصندوق والبئر الكمومي هو أن الجسيم الكمومي الموجود في الصندوق له عدد لانتهائي من الطاقات المكممة ويكون محصوراً في الصندوق إلى أجل غير مسمى، في حين أن الجسيم الكمومي الموجود في بئر كمومي له عدد محدود من السويات الطاقية المكممة، ويمكن أن ينفذ عبر الحواجز الكمومية عند حدود البئر إلى خارج البئر. وبالتالي، فإن النقطة الكمومية من زرنيخ الغاليوم الموجودة في زرنيخ الألمونيوم هي بئر كمومي، حيث يتم تكميم الطاقات المنخفضة للإلكترون، والتي يرمز لها بالرمز  $E_{dot}$  في الجزء (b) من الشكل. عندما لا تتطابق طاقة الإلكترون  $E_{electron}$  في المنطقة الخارجية من النقطة مع الطاقة التي يمكن أن تكون له في هذه النقطة، فإن الإلكترون لا ينفذ عبر منطقة النقطة، ولا يمر تيار عبر هذا العنصر الإلكتروني، حتى لو تم تطبيق فرق كمون كهربائي (انحياز). ومع ذلك، عندما يتغير كمون الانحياز هذا، بحيث ينخفض أحد الحواجز، وبحيث تتساوى قيم  $E_{dot}$  و  $E_{electron}$ ، كما هو مبين في الجزء (c) من هذا الشكل، فإن تيار الإلكترونات يتدفق عبر النقطة. عندما يزداد كمون الانحياز في هذه اللحظة، تصبح القيم غير متساوية، ويتوقف التيار عن التدفق. عندما يزداد كمون الانحياز بشكل أكبر، يصبح النفق الإلكتروني غير محتمل (مستحيل الحدوث) حتى يصل كمون الانحياز إلى قيمة تتطابق عندها طاقة الإلكترون الخارجي مع المستوى الطاقى للإلكترون التالي في النقطة. كلمة "رنين" في اسم الجهاز تعني أن تيار النفق الإلكتروني يحدث فقط عندما يتم الحصول على المستوى الطاقى المختار من خلال ضبط كمون الانحياز المطبق، كما هو الحال في آلية تشغيل **الصمام الثنائي النفقي الرنان**، والذي تم وصفه للتو. تستخدم الثنائيات النفقية الرنانة كمفاتيح تبديل نانوية فائقة السرعة.



**الشكل 23.7** مخطط الثنائي النفقي الرنان: (a) نقطة كمومية من زرنيخ الغاليوم متضمنة في زرنيخ الألمونيوم. (b) بئر كمومي يتكون من اثنين من الحواجز الكمومية لنقطة كمومية دون كمون انحياز. لا تتساوى طاقات الإلكترون  $E_{electron}$  في زرنيخ الألمونيوم سوياتها الطاقية في النقطة الكمومية  $E_{dot}$ ، لذلك لا تنفذ الإلكترونات عبر هذه النقطة. (c) البئر الكمومي للنقطة ذو كمون انحياز على طرفي الجهاز. يؤدي فرق الكمون المضبوط بشكل مناسب إلى تشويه البئر بحيث تتساوى السويات الطاقية الإلكترونية في النقطة مع طاقاتها في زرنيخ الألمونيوم، مما يتسبب في نفاذ الإلكترونات عبر النقطة.

## مراجعة الفصل السابع

### الكلمات المفتاحية

التابع مضاد التناظر: تابع الفردي.

تأويل بورن: ينص على أن مربع التابع الموجي هو الكثافة الاحتمالية.

التابع العقدي: تابع يحتوي على أجزاء حقيقية وتخيلية.

تأويل كوبنهاغن: ينص على أنه عندما لا ينظر المراقب، أو عندما لا يتم إجراء القياس، يكون للجسيم عدة قيم للكميات القابلة للقياس، كالموضع.

مبدأ التقابل (الانسجام): في حدود الطاقات الكبيرة، تتوافق تنبؤات ميكانيك الكم مع تنبؤات الميكانيك الكلاسيكي.

السويات الطاقية: حالات طاقة محددة، يتم تمثيلها غالباً بخطوط أفقية في المخطط "السلمي" للطاقة.

الرقم الكمي الطاقى: مؤشر يحدد حالات الطاقة المسموح بها.

مبدأ عدم اليقين في الزمن والطاقة: علاقة الزمن والطاقة بعدم اليقين في القياسات المترامنة لطاقة الحالة الكمومية وعمرها.

التابع الزوجي: في بعد واحد، تابع متماثل مع نقطة مبدأ نظام الإحداثيات.

القيمة المتوقعة: متوسط قيمة كمية فيزيائية على افتراض وجود عدد كبير من الجسيمات التي لها التابع الموجي نفسه.

إصدار الحقل: إصدار إلكترونات من سطح ناقل عندما يتم تطبيق حقل كهربائي خارجي قوي في الاتجاه الناظمي على سطح الناقل.

طاقة الحالة الأساسية: أدنى حالة طاقية في طيف الطاقة.

مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ: يضع قيوداً على ما يمكن معرفته من خلال القياسات المترامنة للموضع والعزم؛ وينص على أنه إذا كانت حالة عدم اليقين في الموضع صغيرة، فإن حالة عدم اليقين في العزم كبيرة، والعكس صحيح.

بئر مربع لانتهائي: تابع كموني يكون صفراً في نطاق ثابت ولانهائي خلف هذا النطاق.

عامل العزم: العامل الذي يوافق عزم الجسيم.

تقنية النانو: تكنولوجيا (تقانة) تعتمد على معالجة البنى النانوية كالجزيئات أو الذرات الفردية لإنتاج أجهزة نانوية مثل الدوائر المتكاملة.

شرط التطبيع: يتطلب أن ينتج عن تكامل الكثافة الاحتمالية على كامل المساحة الفيزيائية الرقم واحد.

التابع الفردي: في بعد واحد، تابع غير متناظر مع نقطة مبدأ جملة الإحداثيات.

عامل الموضع: العامل الذي يوافق موضع الجسيم.

الحاجز الكموني: تابع كموني يرتفع وينخفض مع زيادة قيم الموضع.

الرقم الكمي الرئيس: الرقم الكمي الطاقى.

الكثافة الاحتمالية: مربع التابع الموجي للجسيم.

النقطة الكمومية: منطقة صغيرة من بلورة نانوية نصف ناقلة متضمنة في بلورة نانوية أخرى نصف ناقلة، تعمل كبئر كموني للإلكترونات.

نفق الكم: ظاهرة تنفذ فيها الجزيئات عبر حاجز طاقة كامنة ذي ارتفاع أكبر من الطاقة الكلية للجسيمات.

نفق الرنين: نفق إلكتروني عبر بئر كمومي محدود الارتفاع، يحدث فقط عندما تتوافق طاقات الإلكترون مع المستوى الطاقوي في البئر في النقاط الكمومية.

ثنائي الرنين النفقي: نقطة كمومية مطبق على طرفيها كمون انحياز.

المجهر النفقي الماسح (STM): جهاز يستخدم ظاهرة النفق الكمومي على الأسطح المعدنية للحصول على صور لبنيتها النانوية. معادلة شرودنغر المعتمدة على الزمن: معادلة في المكان والزمان تسمح لنا بتحديد التوابع الموجية للجسيم الكمومي.

معادلة شرودنغر المستقلة عن الزمن: معادلة في المكان تسمح لنا بتحديد التوابع الموجية للجسيم الكمومي، ويجب أن يتم جداء هذا التابع الموجي بعامل التعديل الزمني للحصول على التابع الموجي المعتمد على الزمن.

حالة الموجة الدائمة: حالة ثابتة تتأرجح فيها الأجزاء الحقيقية والتخيلية لـ  $\Psi(x, t)$  للأعلى وللأسفل كالموجة الدائمة (غالباً ما تمثل بتابع الجيب وجيب التمام).

تخفيض الحالة: عملية افتراضية يقفز فيها الجسيم المرصود، أو الذي تم الكشف عنه، إلى حالة محددة، يتم وصفها غالباً بدلالة انحياز التابع الموجي للجسيم.

الحالة الثابتة: الحالة التي لا تتغير فيها الكثافة الاحتمالية  $|\Psi(x, t)|^2$  مع الزمن.

عامل تعديل الزمن: العامل  $e^{-i\omega t}$  الذي يضرب به التابع الموجي المستقل عن الزمن عندما تكون الطاقة الكامنة للجسيم مستقلة عن الزمن.

احتمالية النفوذ: وتسمى أيضاً احتمالية النفق، وهي احتمال أن ينفذ الجسيم عبر الحاجز الكمومي.

الثنائي النفقي: وصلة النفق الإلكتروني بين مواد نصف ناقلة مختلفة.

احتمالية النفق: وهي احتمالية نفاذ الجسيم عبر الحاجز الكمومي.

التابع الموجي: تابع تمثل الحالة الكمومية للجسيم (نظام الكم).

انهيار التابع الموجي: تكافئ تخفيض الحالة.

الحزمة الموجي: تراكب العديد من أمواج المادة المستوية، التي يمكن استخدامها لتمثيل الجسيم المحدد الموقع.

### المعادلات الرئيسية

$P(x = -\infty, +\infty) = \int_{-\infty}^{\infty}  \Psi(x, t) ^2 dx = 1$	شرط التطبيع في بعد واحد
$P(x, x + dx) = \Psi^*(x, t)\Psi(x, t)dx$	احتمال وجود جسيم في مجال موضعي ضيق في بعد واحد $(x, x + dx)$
$\langle x \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi^*(x, t)x\Psi(x, t)dx$	القيمة المتوقعة للموضع في بعد واحد
$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$	مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ للعزم والموضع
$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$	مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ للزمن والطاقة
$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x, t)}{\partial x^2} + U(x, t)\Psi(x, t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(x, t)}{\partial t}$	معادلة شرودنغر المعتمدة على الزمن
$\Psi(x, t) = \psi(x)e^{-i\omega t}$	الشكل العام للتابع الموجي للكمون المستقل عن الزمن في بعد واحد
$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \psi(x)}{dx^2} + U(x)\psi(x) = E\psi(x)$	معادلة شرودنغر المستقلة على الزمن

$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \psi(x)}{dx^2} = E\psi(x)$	معادلة شرودنجر (الجسيم الحر)
$E_n = n^2 \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2}, n = 1, 2, 3, \dots$	الطاقات المسموح بها (الجسيم ضمن صندوق طوله $L$ )
$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin \frac{n\pi x}{L}, n = 1, 2, 3, \dots$	الحالات الثابتة (الجسيم ضمن صندوق طوله $L$ )
$U(x) = \frac{1}{2}m\omega^2 x^2$	التابع الطاقي الكموني للهاز التوافقي
$-\frac{\hbar}{2m} \frac{d^2 \psi(x)}{dx^2} + \frac{1}{2}m\omega^2 x^2 \psi(x) = E\psi(x)$	معادلة شرودنجر الثابتة
$E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right)\hbar\omega, n = 0, 1, 2, 3, \dots$	الطيف الطاقي
$\psi_n(x) = N_n e^{-\beta^2 x^2/2} H_n(\beta x), n = 0, 1, 2, 3, \dots$	التابع الموجي الطاقي
$U(x) = \begin{cases} 0, & \text{when } x < 0 \\ U_0, & \text{when } 0 \leq x \leq L \\ 0, & \text{when } x > L \end{cases}$	الحاجز الكموني
$T(L, E) = \frac{ \psi_{\text{tra}}(x) ^2}{ \psi_{\text{in}}(x) ^2}$	تعريف معامل النفوذ
$\beta^2 = \frac{2m}{\hbar^2}(U_0 - E)$	المعيار في معامل النفوذ
$T(L, E) = \frac{1}{\cosh^2 \beta L + (\gamma/2)^2 \sinh^2 \beta L}$	معامل النفوذ، القيمة الدقيقة
$T(L, E) = 16 \frac{E}{U_0} \left(1 - \frac{E}{U_0}\right) e^{-2\beta L}$	معامل النفوذ، القيمة التقريبية

## ملخص الفصل السابع

### 1.7 التوابع الموجية

- في ميكانيك الكم، يتم تمثيل حالة النظام الفيزيائية بتابع موجي.
- في تأويل بورن، يمثل مربع التابع الموجي للجسيم الكثافة الاحتمالية لوجود الجسيم حول موقع معين في الفراغ.
- يجب أولاً تطبيع التوابع الموجية قبل استخدامها لعمل تنبؤات.
- القيمة المتوقعة هي القيمة المتوسطة للكمية التي تتطلب تابع موجي وتكامل.

### 2.7 مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ

- ينص مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ أنه من المستحيل في وقت واحد قياس المركبات السينية لموضع وعزم جسيم بدقة عالية وبشكل اعتباطي. ناتج جداء عدم اليقين التجريبي دائماً أكبر من أو يساوي  $\hbar/2$ .
- لاعلاقة لقيود هذا المبدأ بجودة الجهاز التجريبي ولكنها تنشأ من طبيعة المادة شبيهة الموجة.
- مبدأ عدم اليقين للزمن والطاقة يعبر عن الملاحظة التجريبية بأن الحالة الكمومية التي توجد لفترة قصيرة فقط لا يمكن أن يكون لها طاقة محددة.

### 3.7 معادلة شرودنجر

- إن معادلة شرودنجر هي المعادلة الأساسية لميكانيك الكم الموجي. وتتيح لنا عمل تنبؤات حول التوابع الموجية.

- عندما يتحرك جسيم في كمون مستقل عن الزمن، يكون حل معادلة شرودنغر المعتمدة على الزمن هو ناتج جداء التابع الموجي المستقل عن الزمن وعامل التعديل الزمني.
- يمكن تطبيق معادلة شرودنغر على كثير من الحالات الفيزيائية.

#### 4.7 الجسيمات الكمومية ضمن صندوق

- يتم إيجاد الحالات الطاقية لجسيم كمومي ضمن صندوق من خلال حل معادلة شرودنغر المستقلة عن الزمن.
- لحل معادلة شرودنغر المستقلة عن الزمن لجسيم ضمن صندوق وإيجاد الحالة المستقرة والطاقت المسموح بها، نعدم التابع الموجي عند جدار الصندوق.
- يتم تكميم الحالات الطاقية لجسيمات موجودة ضمن صندوق وفهرستها بحسب الرقم الكمي الرئيس.
- تختلف الصورة الكمومية بشكل كبير عن الصورة الكلاسيكية عندما يكون الجسيم في حالة منخفضة الطاقة ذات رقم كمي منخفض.
- في حدود الأرقام الكمية العالية، عندما يكون الجسيم الكمومي في حالة شديدة الإثارة، يتقاطع الوصف الكمومي للجسيم ضمن صندوق مع الوصف الكلاسيكي، بروح مبدأ التقابل لبور.

#### 5.7 الهزاز التوافقي الكمومي

- الهزاز التوافقي الكمومي هو نموذج مبني على القياس مع نموذج الهزاز التوافقي الكلاسيكي. إنه يصور سلوك العديد من الأنظمة الفيزيائية، مثل الاهتزازات الجزيئية أو الحزم الموجي في البصريات الكمومية.
- طاقت الهزاز الكمومي المسموح بها منفصلة ومتساوية البعد فيما بينها. يساوي التباعد الطاقى الكم الطاقى لبلانك.
- طاقة الحالة الأساسية أكبر من الصفر. وهذا يعني أنه على عكس الهزاز الكلاسيكي، فإن الهزاز الكمومي لن يهدأ أبداً، حتى في قاع البئر الكمومي، ويخضع للتقلبات الكمية.
- الحالات الثابتة (حالات الطاقة المحددة) لها قيم غير صفرية أيضاً في المناطق الواقعة خلف نقاط السكون الكلاسيكية. عندما يكون الهزاز الكمومي في الحالة الأساسي فمن المرجح أن يوجد حول موضع الحد الأدنى للبئر الكمومي، وهو الموضع الأقل احتمالاً للهزاز الكلاسيكي.
- عند الأرقام الكمومية المرتفعة، تصبح حركة الهزاز الكمومي أقرب لحركة الهزاز الكلاسيكي، وفقاً لمبدأ التقابل لبور.

#### 6.7 النفق الكمومي للجسيمات عبر الحواجز الكمونية

- الجسيم الكمومي الذي يقع على حاجز كموني ذي عرض وارتفاع محدد قد يعبر الحاجز ويظهر على جانبه الآخر. وتسمى هذه الظاهرة "نفق الكم أو النفق الكمومي". وليس لها نظير كلاسيكي.
- لمعرفة احتمالية النفق الكمومي، نفرض طاقة الجسيم الوارد ونحل معادلة شرودنغر الثابتة لإيجاد التوابع الموجية داخل الحاجز وخارجه. احتمالية النفق هي نسبة المطال المربع للموجة بعد الحاجز إلى الموجة الواردة.
- تعتمد احتمالية النفق على طاقة الجسيم الوارد بالنسبة لارتفاع الحاجز وعلى عرض الحاجز. وتتأثر بشدة بعرض الحاجز بطريقة غير خطية أسية بحيث أن أي تغيير بسيط في عرض الحاجز يؤدي إلى تغيير كبير بشكل غير متناسب في احتمالية النفوذ.
- ظواهر الأنفاق الكمومية تحكم الانحلال النووي المشع. ويتم استخدامها في العديد من التقنيات الحديثة مثل STM والإلكترونيات النانوية. يتيح لنا STM رؤية الذرات الفردية على الأسطح المعدنية. أحدثت أجهزة الأنفاق الإلكترونية ثورة في الإلكترونيات وسمحت لنا ببناء أجهزة إلكترونية سريعة ذات أحجام مصغرة.

## أسئلة نظرية

### 1.7 التابع الموجي

1. ما هي الوحدة الفيزيائية للتابع الموجي،  $\Psi(x, t)$ ؟ ما هي الوحدة الفيزيائية لمربع هذا التابع الموجي؟
2. هل يمكن أن تكون قيمة التابع الموجي  $(\Psi^*(x, t) \Psi(x, t))$  سالبة؟ فسّر الإجابة.
3. ما هو نوع الكمية الفيزيائية التي يمثلها التابع الموجي للإلكترون؟
4. ما هو المعنى الفيزيائي للتابع الموجي للجسيم؟
5. ما هو المقصود بالتعبير "القيمة المتوقعة"؟ وضّح ذلك.

### 2.7 مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ

6. إذا كانت صيغة ميكانيك الكم "أكثر دقة" من الميكانيك الكلاسيكي، فلماذا لا نستخدم ميكانيك الكم لوصف حركة الضفدع المتسابق؟ فسّر الإجابة.
7. هل يمكن معرفة طول موجة دي بروي لجسيم بدقة؟ هل يمكن معرفة موضع هذا الجسيم بدقة؟
8. هل يمكننا قياس طاقة جسيم محدد الموضع بدقة كاملة؟
9. هل يمكننا قياس موضع جسيم وعزمه بدقة كاملة؟

### 3.7 معادلة شرودنغر

10. ما هو الفرق بين التابع الموجي  $\psi(x, y, z)$  والتابع الموجي  $\Psi(x, y, z, t)$  للجسيم نفسه؟
11. إذا كان الجسيم الكمومي في حالة ثابتة، فهل هذا يعني أنه لا يتحرك؟
12. اشرح الفرق بين معادلتى شرودنغر المعتمدة على الزمن والمستقلة عن الزمن.
13. لنفترض أن التابع الموجي متقطع عند نقطة ما. هل يمكن أن يمثل هذا التابع الحالة الكمومية لجسيم فيزيائي ما؟ لماذا؟

### 4.7 الجسيمات الكمومية ضمن صندوق

14. باستخدام الجسيم الكمومي ضمن الصندوق، صف كيف ترتبط الطاقات الممكنة للجسيم بحجم الصندوق.
15. هل من الممكن، عندما نقيس طاقة جسيم كمومي ضمن صندوق ما، أن يعطينا القياس قيمة أصغر من طاقة الحالة الأساسية؟ ما هي أعلى قيمة للطاقة يمكن قياسها لهذا الجسيم؟
16. بالنسبة لجسيم كمومي ضمن صندوق ما، تكون الحالة المثارة الأولى ( $\Psi_2$ ) ذات قيمة صفرية في موضع نقطة الوسط في الصندوق، بحيث تكون الكثافة الاحتمالية لوجود جسيم عند هذه النقطة هي صفر تمامًا. اشرح مبيناً ما هو الخطأ في التفكير التالي: "إذا كان احتمال وجود جسيم كمومي عند نقطة المنتصف يساوي الصفر، فلن يكون الجسيم في هذه النقطة أبداً، هل هذا صحيح؟ كيف يمكن إذاً للجسيم أن يعبر هذه النقطة في طريقه من الجانب الأيسر إلى الجانب الأيمن من الصندوق؟"

### 5.7 الهزاز التوافقي الكمومي

17. هل من الممكن قياس طاقة مقدارها  $0.75 \hbar \omega$  لهزاز توافقي؟ لماذا؟ فسّر الإجابة.
18. اشرح العلاقة بين فرضية بلانك حول الكم الطاقوي وطاقات الهزاز التوافقي الكمومي.
19. إذا كان الهزاز التوافقي الكلاسيكي في حالة سکون، فلماذا لا يمكن للهزاز التوافقي الكمومي أن يكون في حالة سکون؟ هل هذا يتعارض مع مبدأ التقابل لبور؟
20. استخدم مثلاً لجسيم كمومي ضمن صندوق أو هزاز كمومي لشرح المعنى الفيزيائي لمبدأ التقابل لبور.

21. هل يمكننا قياس موضع الهزاز الكومومي وطاقته في الوقت نفسه؟ لماذا؟

### 6.7 النفق الكومومي للجسيمات عبر الحواجز الكومونية

22. عندما يواجه إلكترون وبروتون لهما الطاقة الحركية نفسها حاجزاً كومونياً له الارتفاع والعرض نفسيهما، أيّ منهما سيمر عبر الحاجز بسهولة أكبر؟ ولماذا؟

23. ما الذي يقلل من احتمالية النفق أكثر: مضاعفة عرض الحاجز أم خفض الطاقة الحركية للجسيم الوارد إلى النصف؟

24. اشرح الفرق بين كمون الصندوق وكمون النقطة الكومومية.

25. هل يمكن للجسيم الكومومي أن يهرب من البئر الكوموني اللانهائي كما هو الحال في الصندوق؟ ولماذا؟

26. يستخدم كل من الصمام الثنائي النفقي والصمام الثنائي النفقي الرنان المبدأ الفيزيائي نفسه للنفق الكومومي. فما هي الفروق المهمة بينهما؟

## مسائل

### 1.7 التابع الموجي

27. احسب  $|\Psi(x, t)|^2$  للتابع  $\Psi(x, t) = \psi(x) \sin \omega t$  حيث  $\omega$  ثابت حقيقي.

28. إذا أعطي التابع ذو القيمة المعقدة  $f(x, y) = (x - iy)/(x + iy)$ ، احسب  $|f(x, y)|^2$ .

29. أي من التوابع التالية، ولماذا، مؤهلة لتكون التابع الموجي لجسيم يمكن أن يتحرك على طول المحور الحقيقي بأكمله؟

(a)  $\psi(x) = Ae^{-x^2}$  (b)  $\psi(x) = Ae^{-x}$  (c)  $\psi(x) = A \tan x$  (d)  $\psi(x) = A(\sin x)/x$  (e)  $\psi(x) = Ae^{-|x|}$ .

30. جسيم كتلته  $m$  يتحرك على طول المحور السيني وتمثل حالته الكومومية بالتابع الموجي التالي:

$$\Psi(x, t) = \begin{cases} 0, & x < 0, \\ Axe^{-ax} e^{-iEt/\hbar}, & x \geq 0, \end{cases}$$

حيث  $\alpha = 2.0 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$ .

(a) أوجد ثابت التطبيع. (b) أوجد احتمالية وجود الجسيم ضمن الحقل  $0 \leq x \leq L$ . (c) أوجد القيمة المتوقعة للموضع. (d) أوجد القيمة المتوقعة للطاقة الحركية.

31. يُعطى التابع الموجي لجسيم كتلته  $m$  بالعلاقة:

$$\psi(x) = \begin{cases} A \cos \alpha x, & -\frac{\pi}{2\alpha} \leq x \leq +\frac{\pi}{2\alpha}, \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

حيث  $\alpha = 1.00 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$ .

(a) أوجد ثابت التطبيع. (b) أوجد احتمالية وجود الجسيم في الحقل  $0 \leq x \leq 0.5 \times 10^{-10} \text{ m}$ . (c) أوجد متوسط موضع الجسيم.

(d) أوجد متوسط عزمه. (e) أوجد متوسط الطاقة الحركية  $-0.5 \times 10^{-10} \text{ m} \leq x \leq +0.5 \times 10^{-10} \text{ m}$ .

### 2.7 مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ

32. تم إجراء القياس لسرعة جسيم  $\alpha$  بدقة تبلغ  $0.02 \text{ mm/s}$ . ما هو الحد الأدنى لعدم اليقين في موضعه؟

33. غاز من ذرات الهيليوم يوجد عند الدرجة  $273 \text{ K}$  في حاوية مكعبة طول بعدها  $25.0 \text{ cm}$ . (a) ما هو الحد الأدنى لعدم اليقين

في مركبات العزم لذرات الهليوم؟ (b) ما هو الحد الأدنى لعدم اليقين في مركبات السرعة؟ (c) أوجد نسبة عدم اليقين في (b) إلى

متوسط سرعة الذرة في كل اتجاه.



34. إذا كان عدم اليقين في المركب  $y$  لموضع البروتون هو  $2.0 \text{ pm}$ ، أوجد الحد الأدنى لعدم اليقين في القياس المتزامن للمركب  $y$  لسرعة البروتون. ما هو الحد الأدنى لعدم اليقين في القياس المتزامن للمركب  $x$  لسرعة البروتون؟

35. تبلغ طاقة السكون لجسيم أولي غير مستقر  $80.41 \text{ GeV}$ ، كما أن عدم اليقين في طاقة السكون يبلغ  $2.06 \text{ GeV}$ . قم بتقدير عمر هذا الجسيم.

36. يبلغ عمر الذرة في الحالة شبه المستقرة  $5.2 \text{ ms}$ . أوجد الحد الأدنى لعدم اليقين في قياس طاقة الحالة المثارة.

37. تشير القياسات إلى أن الذرة تظل في الحالة المثارة لفترة متوسطة تبلغ  $50.0 \text{ ns}$  قبل الانتقال إلى الحالة الأساسية مع الانبعاث المتزامن لفوتون طاقته  $2.1 \text{ eV}$ . (a) قم بتقدير عدم اليقين في تردد الفوتون. (b) ما هي نسبة عدم اليقين المحسوب إلى التردد المتوسط للفوتون؟

38. لنفترض أن الإلكترون محصور في منطقة يبلغ طولها  $0.1 \text{ nm}$  (من رتبة حجم ذرة الهيدروجين) وأن طاقته الحركية تساوي طاقة الحالة الأساسية لذرة الهيدروجين في نموذج بور ( $13.6 \text{ eV}$ ). (a) ما هو الحد الأدنى لعدم اليقين في عزمه؟ ما هي نسبة عدم اليقين المحسوب من عزمه؟ (b) ماذا سيكون عدم اليقين في الطاقة الحركية لهذا الإلكترون لو أن عزمه كان مساوياً لإجابتك في الطلب (a)؟ ما هي نسبة عدم اليقين المحسوب من طاقته الحركية؟

### 3.7 معادلة شرودنغر

39. اجمع المعادلة 7.17 و المعادلة 7.18 مبيناً أن:

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2}$$

40. أثبت أن  $\Psi(x, t) = Ae^{i(kx - \omega t)}$  هو حل صحيح لمعادلة شرودنغر المعتمدة على الزمن.

41. أثبت أن  $\Psi(x, t) = A \sin(kx - \omega t)$  و  $\Psi(x, t) = A \cos(kx - \omega t)$  لا يحققان معادلة شرودنغر المعتمدة على الزمن.

42. أثبت أن عندما يكون  $\Psi_1(x, t)$  و  $\Psi_2(x, t)$  حلولاً لمعادلة شرودنغر المعتمدة على الزمن و  $A$ ،  $B$  أرقاماً، فإن التابع  $\Psi(x, t)$  الذي يعد تراكباً لهذا التابع هو أيضاً حل:  $\Psi(x, t) = A\Psi_1(x, t) + B\Psi_2(x, t)$ .

43. جسيم كتلته  $m$  ويوصف بالتابع الموجي التالي:  $\psi(x) = A \cos kx + B \sin kx$ ، حيث  $A$  و  $B$  و  $k$  ثوابت. بفرض أن الجسيم حر، أثبت أن هذا التابع هي حل لمعادلة شرودنغر المستقرة لهذا الجسيم وأوجد طاقة الجسيم في هذه الحالة.

44. أوجد القيمة المتوقعة للطاقة الحركية للجسيم في الحالة،  $\Psi(x, t) = Ae^{i(kx - \omega t)}$ . ما الخلاصة التي يمكنك استخلاصها من حلك؟

45. أوجد القيمة المتوقعة لمربع العزم التريبيعي للجسيم في الحالة،  $\Psi(x, t) = Aei(kx - \omega t)$ . ما الخلاصة التي يمكنك استخلاصها من حلك؟

46. التابع الموجي لبروتون حر من الشكل:  $\Psi(x, t) = Ae^{i(5.02 \times 10^{11}x - 8.00 \times 10^{15}t)}$ .

معامل  $x$  هو مقلوب المتر ( $\text{m}^{-1}$ ) ومعامل  $t$  هو مقلوب الثانية ( $\text{s}^{-1}$ ). أوجد عزمه وطاقته.

### 4.7 الجسيمات الكمومية في صندوق

47. افترض أنه يمكن التعامل مع الإلكترون الموجود في الذرة كما لو أنه محصور في صندوق بعرض  $2.0 \text{ \AA}$ . ما هي الطاقة الأساسية للإلكترون؟ قارن نتيجتك مع الطاقة الحركية للحالة الأساسية لذرة الهيدروجين في نموذج بور لذرة الهيدروجين.

48. افترض أنه يمكن التعامل مع البروتون الموجود في النواة كما لو أنه محصور في صندوق أحادي البعد بعرض  $10.0 \text{ fm}$ . (a) ما هي طاقات البروتون عندما يكون في الحالات المقابلة لـ  $n = 1$ ،  $n = 2$ ، و  $n = 3$ ؟ (b) ما هي طاقات الفوتونات الصادرة عندما ينتقل البروتون من الحالتين المتطرفتين الأولى والثانية إلى الحالة الأساسية؟

49. إلكترون محصور ضمن صندوق تبلغ طاقته في الحالة الأساسية 2.5 eV. ما هو عرض الصندوق؟
50. ما هي طاقة الحالة الأساسية (مقدرة بوحدة eV) للبروتون المحصور في صندوق أحادي البعد بحجم نواة اليورانيوم التي يبلغ قطرها نحو 15.0 fm؟
51. ما هي طاقة الحالة الأساسية (مقدرة بوحدة eV) لجسيم  $\alpha$  محصور ضمن صندوق أحادي البعد بحجم نواة اليورانيوم التي يبلغ نصف قطرها نحو 15.0 fm؟
52. لإثارة الإلكترون ضمن صندوق أحادي البعد من حالته المثارة الأولى إلى الحالة المثارة الثالثة يتطلب 20.0 eV. ما هو عرض الصندوق؟
53. يقوم الإلكترون المحصور ضمن صندوق بعرض 0.15 eV بجواز طاقة كمونية لانتهائية بإصدار فوتون عند قيامه بالانتقال من الحالة المثارة الأولى إلى الحالة الأساسية. أوجد الطول الموجي للفوتون الصادر.
54. إذا كانت طاقة الحالة المثارة الأولى للإلكترون في صندوق هي 25.0 eV، فما هو عرض الصندوق؟
55. لنفترض أن الإلكترون المحصور ضمن صندوق يصدر فوتونات. وكان أطول طول موجي مسجل هو 500.0 nm. فما هو عرض الصندوق؟
56. تُحفظ جزيئات الهيدروجين  $H_2$  عند الدرجة 300.0 K في حاوية مكعبة بطول جانبي يبلغ 20.0 cm. افترض أنه يمكنك التعامل مع الجزيئات كما لو أنها تتحرك في صندوق أحادي البعد. (a) أوجد طاقة الحالة الأساسية لجزيء الهيدروجين في الحاوية. (b) افرض أن الطاقة الحرارية للجزيء تعطى بالعلاقة  $k_B T/2$  وأوجد الرقم الكمي  $n$  الموافق للحالة الكمومية التي قد توافقت هذه الطاقة الحرارية.
57. إلكترون محصور في صندوق بعرض 0.25 nm. (a) ارسم مخطط السويات الطاقية الذي يمثل الحالات الخمس الأولى للإلكترون. (b) احسب الأطوال الموجي للفوتونات الصادرة عندما يقوم الإلكترون بالانتقال بين الحالة الرابعة والحالة المثارة الثانية، وبين الحالة المثارة الثانية والحالة الأساسية، وبين الحالة الثالثة والحالة المثارة الثانية.
58. إلكترون في صندوق في الحالة الأساسية تبلغ طاقته 2.0 eV. (a) أوجد عرض الصندوق. (b) ما مقدار الطاقة اللازمة لإثارة الإلكترون إلى الحالة المثارة الأولى؟ (c) إذا قام الإلكترون بالانتقال من الحالة المثارة إلى الحالة الأساسية مع الانبعاث المتزامن لفوتون طاقته 30.0-eV، أوجد الرقم الكمي للحالة المثارة؟

### 5.7 الهزاز التوافقي الكمومي

59. بين أن الحالتين الطاقيتين الدنيتين للهزاز التوافقي البسيط،  $\psi_0(x)$  و  $\psi_1(x)$  من المعادلة 7.57، تحققان المعادلة 7.55.
60. إذا كانت طاقة الحالة الأساسية لهزاز توافقي بسيط هي 1.25 eV، فما هو تردد حركته؟
61. عندما ينتقل الهزاز التوافقي الكمومي من الحالة  $(n + 1)$  إلى الحالة  $n$  وينبعث فوتون طاقته 450 nm، ما هو تردده؟
62. يمكن نمذجة اهتزازات جزيء الهيدروجين  $H_2$  كهزاز توافقي بسيط ثابت النابض له هو  $k = 1.13 \times 10^3$  N/m وكتلته  $m = 1.67 \times 10^{-27}$  kg. (a) ما هو التردد الاهتزازي لهذا الجزيء؟ (b) ما هي طاقة وطول موجة الفوتون الصادر عندما ينتقل الجزيء بين حالتيه الثالثة والثانية؟
63. جسيم كتلته 0.030 kg يتأرجح ذهاباً وإياباً على نابض بتردد 4.0 Hz. عند وضع التوازن، تبلغ سرعته 0.60 m/s. إذا كان الجسيم في حالة الطاقة المحددة، أوجد الرقم الكمي الطاقى.
64. أوجد القيمة المتوقعة  $\langle x^2 \rangle$  لمربع موضع هزاز توافقي كمومي في الحالة الأساسية. ملاحظة:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} dx x^2 e^{-ax^2} = \sqrt{\pi} (2a^{3/2})^{-1}.$$

65. حدّد القيمة المتوقعة للطاقة الكامنة لهزاز توافقي كمومي في الحالة الأساسية. استخدم هذه القيمة لحساب القيمة المتوقعة للطاقة الحركية.

66. تحقق من أن المعطاة في المعادلة 7.57 هي حل لمعادلة شرودنغر للهزاز التوافقي الكمومي.

67. قم بتقدير طاقة الحالة الأساسية للهزاز التوافقي الكمومي وفقاً لمبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ. ابدأ من فرضية أن ناتج جداء عدم اليقين  $\Delta x$  و  $\Delta p$  يقع عند أدنى مستوى له. اكتب  $\Delta p$  بدلالة  $\Delta x$  وافرض أنه في الحالة الأساسية  $x \approx \Delta x$  و  $p \approx \Delta p$ ، ثم اكتب طاقة الحالة الأساسية بدلالة  $x$ . أخيراً، أوجد قيمة  $x$  التي تقلل من الطاقة وأوجد الحد الأدنى للطاقة.

68. تمتاز كتلة قدرها 0.250 kg بثابت قوة يبلغ 110 N/m. احسب السوية الطاقي الأساسي والبعد بين السويات الطاقية المتجاورة. اكتب النتائج مقدرة بوحدة الجول وبوحدة الإلكترون فولت. هل الآثار الكمومية مهمة؟

### 6.7 النفق الكمومي للجسيمات عبر الحواجز الكمونية

69. بيّن أن التابع الموجي في (a) المعادلة 7.68 تحقق المعادلة 7.61، و (b) المعادلة 7.69 تحقق المعادلة 7.63.

70. يؤثر إلكترون طاقته 6.0 eV على حاجز ارتفاعه 11.0 eV. أوجد احتمالية نفاذ الإلكترون عبر الحاجز إذا كان عرض الحاجز هو (a) 0.80 nm و (b) 0.40 nm.

71. يؤثر إلكترون طاقته 5.0 eV على حاجز عرضه 0.60 nm. أوجد احتمالية نفاذ الإلكترون عبر الحاجز إذا كان ارتفاع الحاجز (a) 7.0 eV؛ (b) 9.0 eV؛ و (ج) 13.0 eV.

72. يواجه إلكترون طاقته 12.0 eV حاجزاً ارتفاعه 15.0 eV. إذا كانت احتمالية نفق الإلكترون عبر الحاجز هي 2.5٪، أوجد عرض الحاجز.

73. جسيم كمومي تبلغ طاقته الحركية الأولية 32.0 eV يواجه حاجزاً مربعاً ارتفاعه 41.0 eV وعرضه 0.25 nm. أوجد احتمالية نفق الجسيم عبر هذا الحاجز إذا كان الجسيم (a) إلكترون، و (b) بروتون.

74. يفترض نموذج بسيط للانحلال النووي المشع أن جسيمات ألفا محاصرة داخل بئر كموني نووي لأن الجدران هي حواجز عرضها المحدود يبلغ 2.0 fm وارتفاعها 30.0 MeV. أوجد احتمالية النفق عبر الحاجز الكموني المكون من الجدار لجسيمات ألفا التي تبلغ طاقتها الحركية (a) 29.0 eV و (b) 20.0 eV. كتلة جسيم ألفا هي  $m = 6.64 \times 10^{-27}$  kg.

75. ميون، وهو جسيم كمي تبلغ كتلته نحو 200 ضعف كتلة الإلكترون، يرد على حاجز كموني ارتفاعه 10.0 eV. تبلغ الطاقة الحركية للميون المؤثر 5.5 eV، ونحو 0.10٪ فقط من المطال التريبي لمرشحات تابعه الموجي الوارد عبر الحاجز. ما هو عرض الحاجز؟

76. حبيبة من الرمال كتلتها 1.0 mg وطاقته الحركية 1.0 J ترد على حاجز طاقة كمونية ارتفاعه 1.000001 J وعرضه 2500 nm. كم من حبيبات الرمل وسطياً يجب أن يسقط على هذا الحاجز قبل أن تعبر إحداها هذا الحاجز؟

### مسائل إضافية

77. بيّن أنه إذا كان عدم اليقين لموضع الجسيم من رتبة طول موجة دي بروي، فإن عدم اليقين في عزمه يكون من رتبة قيمة عزمه.

78. عند قياس كتلة ميزون  $p$  تبين أنها تساوي  $770 \text{ MeV}/c^2$  بارتياح قيمته  $100 \text{ MeV}/c^2$ . قم بتقدير عمر هذا الميزون.

79. جسيم كتلته  $m$  محصور ضمن صندوق عرضه  $L$ . إذا كان الجسيم في الحالة المثارة الأولى، فما هي احتمالات وجود الجسيم في منطقة بعرض  $0.020 L$  حول النقطة المحددة  $x$ : (a)  $x = 0.25 L$ ؛ (b)  $x = 0.40 L$ ؛ (c)  $x = 0.75 L$ ؛ (d)  $x = 0.90 L$ .

80. جسيم ضمن صندوق  $[0; L]$  في الحالة الثالثة المثارة. ما هي مواضعه الأكثر احتمالاً؟

**81.** كرة بلياردو يبلغ وزنها 0.20 kg وترتد ذهاباً وإياباً دون أن تفقد طاقتها بين حواف طاولة يبلغ طولها 1.5 m. (a) إذا كانت الكرة في وضعها الأساسي، فكم سنة تحتاج إلى الانتقال من حافة إلى أخرى؟ بإمكانك مقارنة هذا الفاصل الزمني بعمر الكون. (b) ما مقدار الطاقة اللازمة لجعل الكرة تنتقل من حالتها الأساسية إلى الحالة المثارة الأولى؟ قارنها مع الطاقة الحركية للكرة التي تتحرك بسرعة 2.0 m/s.

**82.** أوجد القيمة المتوقعة التربيعية للموضع عندما يكون الجسيم الموجود ضمن الصندوق في الحالة المثارة الثالثة وطول الصندوق هو  $L$ .

**83.** بفرض وجود بئر مربعة لانتهائية حدودها الجدارية  $x=0$  و  $x=L$ . أثبت أن التابع  $\psi(x) = A \sin kx$  هو الحل لمعادلة شرودنغر المستقرة للجسيم في صندوق فقط إذا كان  $k = \sqrt{2mE}/\hbar$ . اشرح لماذا تكون هذه التابع الموجي مقبولة فقط إذا كان  $k$  من المضاعفات الصحيحة ل  $\pi/L$ .

**84.** بفرض وجود بئر مربعة لانتهائية حدودها الجدارية  $x=0$  و  $x=L$ . اشرح السبب في أن التابع  $\psi(x) = A \cos kx$  ليست حلاً لمعادلة شرودنغرالثابتة لجسيم في صندوق.

**85.** تهتز الذرات في الشبكة البلورية بحركة توافقية بسيطة. بفرض أن ذرة منها كتلتها  $9.4 \times 10^{-26}$  kg، ما هو ثابت القوة للشبكة إذا كانت الذرة تنتقل من الحالة الأساسية للحالة المثارة الأولى عندما تمتص فوتون طوله الموجي  $525 \mu\text{m}$ ؟

**86.** جزيء ثنائي الذرة يتصرف كهزاز توافقي كمومي بثابت قوة يبلغ  $12.0 \text{ N/m}$  وكتلته  $5.60 \times 10^{-26}$  kg. (a) ما هو طول موجة الفوتون الصادر عندما ينتقل الجزيء من الحالة المثارة الثالثة إلى الحالة المثارة الثانية؟ (b) أوجد طاقة الحالة الأساسية للاهتزازات لهذا الجزيء ثنائي الذرة.

**87.** يواجه إلكترون طاقته الحركية  $2.0 \text{ MeV}$  حاجزاً كمونياً ارتفاعه  $16.0 \text{ MeV}$  وعرضه  $2.00 \text{ nm}$ . ما هو احتمال ظهور الإلكترون على الجانب الآخر من الحاجز؟

**88.** تقع حزمة من البروتونات أحادية الطاقة تبلغ طاقتها  $2.0 \text{ MeV}$  على حاجز كموني يبلغ ارتفاعه  $20.0 \text{ MeV}$  وعرضه  $1.5 \text{ fm}$ . ما هي النسبة المئوية من الحزمة التي تنتقل عبر الحاجز؟

## مسائل للتحدي

**89.** إلكترون موجود في جزيء عضوي طويل يستخدم في الليزر الصباغي يتصرف تقريباً كجسيم كمومي ضمن صندوق عرضه  $4.18 \text{ nm}$ . أوجد الفوتون الصادر عندما ينتقل الإلكترون من الحالة المثارة الأولى إلى الحالة الأساسية ومن الحالة المثارة الثانية إلى الحالة المثارة الأولى.

**90.** في المجهر STM، يمكن تحديد ارتفاع الطرف فوق السطح الذي يتم مسحه بدقة عالية، لأن تيار الإلكترون النفقي بين ذرات السطح وذرات الإبرة حساس للغاية لتغير فجوة الفصل بينهما من نقطة إلى نقطة على طول السطح. بافتراض أن تيار النفق الإلكتروني يتناسب طردياً مع احتمالية النفق وأن احتمالية النفق هي تقرب جيد يعبر عنه التابع الأسّي  $e^{-2\beta L}$  حيث  $\beta = 10.0/\text{nm}$ ، حدد نسبة تيار النفق عندما يكون الطرف  $0.500 \text{ nm}$  فوق السطح إلى التيار عندما يكون الطرف  $0.515 \text{ nm}$  فوق السطح.

**91.** إذا كان على STM أن تكتشف خصائص السطح ذات الارتفاعات الموضعية التي تبلغ نحو  $0.00200 \text{ nm}$ ، فما هي النسبة المئوية للتغير في تيار الإلكترون النفقي، الذي يجب على إلكترونيات STM اكتشافه؟ افترض أن تيار الإلكترون النفقي له خصائص محددة في المسألة السابقة.

92. استخدم مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ لتقدير طاقة الحالة الأساسية لجسيم ما يتأرجح في نابض بتردد زاوي،  $\omega = k/m$ ، حيث  $k$  هي ثابت النابض و  $m$  هي الكتلة.
93. بفرض وجود بئر لانمائي يمتد من  $-L/2$  إلى  $+L/2$ . حل معادلة شرودنغر المستقلة عن الزمن لإيجاد الطاقات المسموح بها والحالات الثابتة لجسيم كتلته  $m$  محصور في هذا البئر. ثم بيّن أن هذه الحلول يمكن الحصول عليها من خلال تنسيق التحول  $x' = x - L/2$  للحصول عليها للبئر الممتدة ما بين  $0$  و  $L$ .
94. جسيم كتلته  $m$  محصور ضمن صندوق بعرض  $L$  ويوجد في أول حالة مثارة له. (a) أوجد متوسط موضعه (وهو القيمة المتوقعة للمركز). (b) أين يوجد الجسيم على الأرجح؟

## الفصل الثامن | البنية الذرية ATOMIC STRUCTURE



**الشكل 1.8** صورة NGC1763 لسديم صادر عن سحابة ماجلان الكبيرة، وهي مجرة ضمن مجرة درب التبانة. يمكن تفسير الألوان التي نراها بتطبيق أفكار ميكانيك الكم على التركيب الذري.  
(credit:modification of work by NASA, ESA, and Josh Lake)

### مخطط الفصل

1.8 ذرة الهيدروجين

2.8 العزم ثنائي القطب المغناطيسي الدوراني للإلكترون

3.8 السبين (اللف المغزلي) للإلكترون

4.8 مبدأ الاستبعاد والجدول الدوري

5.8 الأطياف الذرية والأشعة السينية (X-ray)

6.8 الليزر

### المقدمة

نستخدم في هذا الفصل ميكانيك الكم لدراسة تركيب الذرات وخواصها. تقدم هذه الدراسة الأفكار والمفاهيم الضرورية لفهم الأنظمة (الجملة) الأكثر تعقيداً، مثل الجزيئات والبلورات والمعادن. وسوف نقوم بتعميق فهمنا للذرات، ونبنى على أشياء نعرفها بالفعل، مثل نموذج رذرفورد (Rutherford) النووي للذرة، ونموذج بور (Bohr) لذرة الهيدروجين، وفرضية موجة دي بروي (de Broglie).

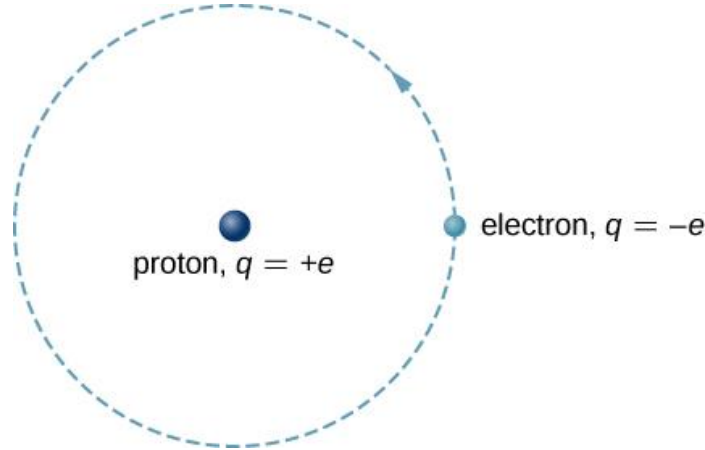
يبين **الشكل 1.8** صورة NGC1763 لسديم صادر عن سحابة ماجلان الكبيرة Large Magellan Cloud، وهي مجرة ضمن مجرة درب التبانة. تؤين الأشعة فوق البنفسجية، الصادرة عن النجوم الساخنة، ذرات الهيدروجين في السديم. يصدر عند إعادة تجميع البروتونات والإلكترونات إشعاع بترددات مختلفة. يمكن التنبؤ بشكل صحيح بتفاصيل هذه العملية بواسطة ميكانيك الكم، وستتم دراستها في هذا الفصل.

### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- وصف ذرة الهيدروجين من خلال التابع الموجي والكثافة الاحتمالية والطاقة الكلية وعزم الزاوي.
- تحديد الأهمية الفيزيائية لكل من الأرقام الكمومية  $(n, l, m)$  في ذرة الهيدروجين.
- التمييز بين نموذج بور وشروذنغر للذرة.
- استخدام أعداد الكم لحساب المعلومات المهمة حول ذرة الهيدروجين.

تُعد ذرة الهيدروجين أبسط ذرة في الطبيعة، وبالتالي فهي نقطة انطلاق جيدة لدراسة الذرات وتركيبها الذري. تتكون ذرة الهيدروجين من إلكترون واحد سالب الشحنة يتحرك حول بروتون موجب الشحنة (الشكل 2.8). في نموذج بور، يتم جذب الإلكترون حول البروتون في مدار دائري تماماً بواسطة قوة كولون الجاذبة. يكون البروتون أكبر بنحو 1800 مرة من الإلكترون، لذلك يتحرك البروتون قليلاً جداً استجابةً لقوة الإلكترون المؤثرة عليه. (وهذا مشابه لنظام الأرض-الشمس، حيث تتحرك الشمس قليلاً جداً استجابةً للقوة التي تؤثر عليها الأرض). ويفسر هذا التأثير باستخدام قوانين نيوتن في الفوتونات وأمواج المادة .



الشكل 2.8 تمثيل نموذج بور

للذرة الهيدروجين.

مع افتراض أن البروتون ثابت، نركز على حركة الإلكترون حوله. في الحقل الكهربائي للبروتون، تُعطى الطاقة الكامنة للإلكترون بالعلاقة:

$$(8.1) \quad U(r) = -k \frac{e^2}{r}$$

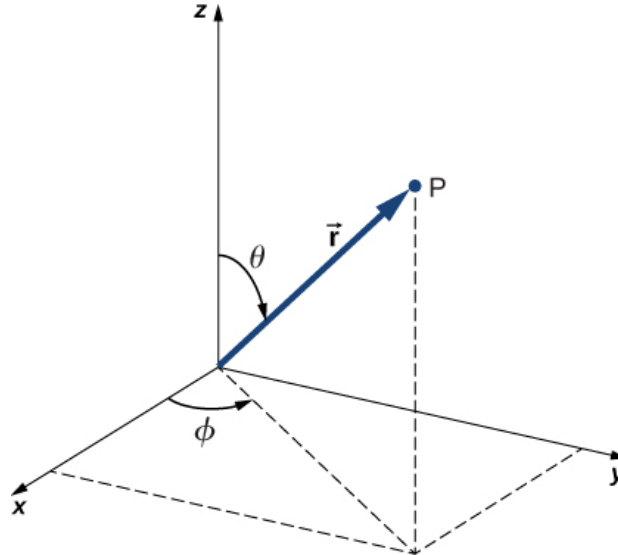
حيث:  $k = 1 / 4\pi\epsilon_0$  و  $r$  هي المسافة بين الإلكترون والبروتون. كما رأينا سابقاً، تكون القوة على جسم ما مساويةً للتدرج السالب (أو الميل) لتابع الطاقة الكامنة. بالنسبة لحالة ذرة الهيدروجين، فإن القوة بين الإلكترون والبروتون هي قوة كولون الجاذبة. لاحظ أن تابع الطاقة الكامنة  $U(r)$  لا يتغير مع الزمن. ونتيجة لذلك، فإن معادلة شروذنغر لذرة الهيدروجين يمكن أن تُختزل إلى معادلتين بسيطتين: تعتمد الأولى فقط على الإحداثيات  $(x, y, z)$ ، وتعتمد الأخرى فقط على الزمن  $(t)$ . (إن تفريق التابع الموجي إلى

أجزاء تعتمد على الإحداثيات والزمن من أجل تابع طاقة كامنة مستقلة عن الزمن قد تمت مناقشته في الفصل السابع "ميكانيك الكم". ونحن مهتمون هنا أكثر بالمعادلة المعتمدة على الإحداثيات، والتي تتمتع بالشكل التالي:

$$(8.2) \quad \frac{-\hbar^2}{2m_e} \left( \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right) - k \frac{e^2}{r} \psi = E \psi$$

حيث:  $\psi = \psi(x, y, z)$  (تابع الموجة ثلاثي الأبعاد للإلكترون)،  $m_e$  كتلة الإلكترون،  $E$  الطاقة الكلية للإلكترون. نُذكر أن تابع الموجة الكلي  $\Psi(x, y, z, t)$  هو نتاج جداء تابع الموجة المعتمد على الإحداثيات  $\psi = \psi(x, y, z)$  في تابع الموجة المعتمد على الزمن  $\varphi = \varphi(t)$ . بالإضافة إلى كون هذه المعادلة مستقلة عن الزمن، فإن  $U(r)$  متناظر كروياً. وهذا يشير إلى أن حل معادلة شرودنغر يكون أسهل إذا قمنا بالتعبير عنها من خلال الإحداثيات الكروية  $(r, \theta, \phi)$  بدلاً من الإحداثيات الديكارتية  $(x, y, z)$ . يُظهر الشكل 3.8 العلاقة بين جملة الإحداثيات الكروية والديكارتية. يكون المتغير  $(r)$  في الإحداثيات الكروية هو الإشعاعي الشعاعي و  $(\theta)$  هي الزاوية القطبية (نسبة إلى المحور  $(z)$  العمودي) و  $(\phi)$  هي زاوية السميت (بالنسبة إلى المحور  $x$ ). والعلاقات بين الإحداثيات الكروية والديكارتية هي:

$$x = r \sin \theta \cos \phi, \quad y = r \sin \theta \sin \phi, \quad z = r \cos \theta$$



. العلاقة بين جملة الإحداثيات الكروية والديكارتية 3.8 الشكل

إن  $r \sin \theta$  هو مطال الشعاع الناتج عن مسقط الشعاع القطبي في المستوي  $xy$ . يتم أيضاً الحصول على الإحداثيين  $x$  و  $y$  من خلال إسقاط هذا اشعاع على المحورين  $x$  و  $y$  على التوالي. يُعطي التحويل العكسي

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad \text{و} \quad \theta = \cos^{-1} \left( \frac{z}{r} \right) \quad \text{و} \quad \phi = \cos^{-1} \left( \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right)$$

تناقش معادلة شرودنغر الموجية لذرة الهيدروجين في الإحداثيات الكروية ضمن دورات أكثر تقدماً في الفيزياء الحديثة، لذلك نحن لن ندرسها هنا بالتفصيل. ومع ذلك، ونظراً للتناظر الكروي للتابع  $U(r)$ ، تبسط هذه المعادلة إلى ثلاث معادلات أبسط: معادلة واحدة لكل من الإحداثيات الثلاثة  $(r, \theta, \phi)$ ، ويكون الحل مستقلاً عن الزمن. ويكون التابع الموج هو نتاج جداء ثلاثة توابع:

$$\psi(r, \theta, \phi) = R(r)\Theta(\theta)\Phi(\phi),$$

حيث  $R$  هو التابع الشعاعي الذي يعتمد على الإحداثي الشعاعي  $r$  فقط،  $\Theta$  هي التابع القطبي الذي يعتمد على الإحداثي القطبي  $\theta$  فقط، و  $\Phi$  هو تابع للمتحوّل  $\phi$  فقط. يُرمز للحلول الصحيحة لمعادلة شرودنغر  $\psi(r, \theta, \phi)$  بالأرقام (الأعداد) الكمومية

$$: m \quad l \quad n$$



$n$ : رقم الكم الرئيسي (الرقم الكومومي الرئيسي).

$l$ : الرقم الكمي للعزم الزاوي المداري.

$m$ : الرقم الكمي لمستقط العزم الزاوي (الرقم الكمي المغنطيسي)

(سيتم شرح أسباب هذا الترميز في الجزء التالي من هذا الفصل). يعتمد التابع الشعاعي  $R$  فقط على  $n$  و  $l$ ، ويعتمد التابع القطبي

فقط على  $l$  و  $m$ ؛ تابع فاي  $\Phi$  تعتمد فقط على  $m$ . يُشار إلى اعتماد كل تابع على الرقم الكمي بالمعادلة التالية:

$$\Psi_{\min}(r, \theta, \phi) = R_{nl}(r)\Theta_{lm}(\theta)\Phi_m(\phi).$$

ليست جميع المجموعات من الأرقام الكمية ( $n, l, m$ ) ممكنة. على سبيل المثال، لا يمكن أبداً أن يكون الرقم الكمي لعزم الزاوي

المداري ( $l$ ) أكبر أو يساوي رقم الكم الرئيسي ( $n$ ). أي ( $l < n$ )، وعلى وجه التحديد، لدينا:

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

$$l = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$$

$$m = -l, (-l+1), \dots, 0, \dots, (+l-1), +l$$

لاحظ أنه بالنسبة للحالة الأساسية  $n=1$ ،  $l=0$ ، و  $m=0$ . بمعنى آخر، هناك حالة كمية واحدة فقط لها تابع موجي من أجل

$n=1$ ، وهي  $\psi_{100}$ . ومع ذلك، لأجل  $n=2$  يكون لدينا:

$$l=0, m=0$$

$$l=1, m=-1, 0, 1.$$

لذلك، الحالات المسموح بها للحالة  $n=2$  هي  $\psi_{200}$ ،  $\psi_{21-1}$ ،  $\psi_{210}$  و  $\psi_{211}$ . يُبين **الجدول 1.8** أمثلة على توابع الموجة لذرة

الهدروجين. لاحظ أن بعض هذه العلاقات في **الجدول 1.8** تحتوي على الحرف  $i$  الذي يمثل  $\sqrt{-1}$ . عندما يتم حساب الاحتمالات،

لا تظهر هذه الأرقام المعقدة في الإجابة النهائية.

### الجدول 1.8 تابع الموجة لذرة الهدروجين

$n=1, l=0, m_l=0$	$\psi_{100} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{a_0^{3/2}} e^{-r/a_0}$
$n=2, l=0, m_l=0$	$\psi_{200} = \frac{1}{4\sqrt{2\pi}} \frac{1}{a_0^{3/2}} \left(2 - \frac{r}{a_0}\right) e^{-r/2a_0}$
$n=2, l=1, m_l=-1$	$\psi_{21-1} = \frac{1}{8\sqrt{\pi}} \frac{1}{a_0^{3/2}} \frac{r}{a_0} e^{-r/2a_0} \sin \theta e^{-i\phi}$
$n=2, l=1, m_l=0$	$\psi_{210} = \frac{1}{4\sqrt{2\pi}} \frac{1}{a_0^{3/2}} \frac{r}{a_0} e^{-r/2a_0} \cos \theta$
$n=2, l=1, m_l=1$	$\psi_{211} = \frac{1}{8\sqrt{\pi}} \frac{1}{a_0^{3/2}} \frac{r}{a_0} e^{-r/2a_0} \sin \theta e^{i\phi}$

### الأهمية الفيزيائية للأرقام الكمية

يرتبط كل من الأرقام الكمية الثلاثة لذرة الهدروجين ( $n, l, m$ ) بكمية فيزيائية مختلفة، حيث يرتبط عدد الكم الرئيسي  $n$  بالطاقة الكلية

للإلكترون  $E_n$  وفقاً لمعادلة شرودنغر:

$$E_n = -\left(\frac{m_e k^2 e^4}{2^2}\right) \left(\frac{1}{n^2}\right) = -E_0 \left(\frac{1}{n^2}\right) \quad (8.3)$$

حيث  $E_0 = -13.6 \text{ eV}$ . لاحظ أن هذه العلاقة موافقة لنموذج بور. كما في نموذج بور، عندما يكون الإلكترون في حالة معينة من

الطاقة فإنه لا يشع.

## مثال 1.8

### كم عدد الحالات الممكنة؟

في حالة ذرة الهيدروجين، كم عدد حالات الكم المحتملة، التي تتوافق مع الرقم الأساسي  $n = 3$ ؟ ما هي طاقات هذه الحالات؟

### خطة الحل

يعتمد عدد الحالات المسموح بها في ذرة الهيدروجين ذات طاقة معينة على العزم الزاوي المداري. يمكننا حساب هذه الحالات لكل قيمة لرقم الكم الرئيس  $n=1,2,3$ . ومع ذلك، تعتمد الطاقة الكلية على رقم الكم الرئيس فقط، مما يعني أنه يمكننا استخدام **المعادلة 8.3** وعدد الحالات التي تم حسابها.

### الحل

إذا كانت  $n=3$ ، فإن القيم المسموح بها للرقم  $l$  هي  $0, 1, 2$ ، وإذا كانت  $l=0$  و  $m=0$  (حالة واحدة). إذا كانت  $l=1$ ،  $m=0, -1, 1$ ، وإذا كانت  $l=2$ ،  $m=0, -1, 1, 2$  (خمس حالات). في الجمل يكون لدينا  $(1+3+5=9)$  حالات مسموح بها. ولأن الطاقة الكلية تعتمد فقط على الرقم الكمي الرئيس ( $n=3$ )، فإن طاقة كل حالة منها:

$$E_3 = -E_0 \left( \frac{1}{n^2} \right) = \frac{-13.6 \text{ eV}}{9} = -1.51 \text{ eV}.$$

### ملاحظة

يمكن أن يشغل الإلكترون الموجود في ذرة الهيدروجين العديد من حالات العزم الزاوي المداري المختلفة، ولكن بالطاقة نفسها. كلما ازداد العزم الزاوي المداري، ازداد عدد الحالات المسموح بها وبالطاقة نفسها. يرتبط الرقم الكمي للعزم الزاوي المداري  $l$  مع مطال العزم الزاوي المداري  $L$  للإلكترون في ذرة الهيدروجين. توضح لنا نظرية الكم أنه عندما تكون ذرة الهيدروجين في حالة معينة  $\psi_{nlm}$ ، فإن مطال العزم الزاوي المداري هو:

$$L = \sqrt{l(l+1)}\hbar \quad (8.4)$$

حيث  $l = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$ .

تختلف هذه النتيجة قليلاً عن تلك الموجودة في نظرية بور، والتي تكتم العزم الزاوي وفقاً للقاعدة  $L = n$ ، حيث  $n=1,2,3,\dots$ . يتم تمييز الحالات الكمومية ذات القيم المختلفة للعزم الزاوي المداري باستخدام الترميز الطيفي (**الجدول 2.8**). تنتج التسميات  $s$  و  $p$  و  $d$  و  $f$  عن محاولات تاريخية مبكرة لتصنيف الخطوط الطيفية الذرية. (تعني الحروف السابقة على التوالي: حاد، رئيس، منتشر، أساسي). وبعدها  $f$ ، تستمر الحروف أبجدياً. تم تحديد الحالة الأساس للهيدروجين على أنها الحالة  $1s$ ، حيث تشير "1" إلى السوية الطاقية ( $n=1$ ) و "s" يشير إلى حالة العزم الزاوي المداري ( $l=0$ ). عندما تكون  $n=2$ ، يمكن أن تكون ( $l$ ) إما 0 أو 1. وعندما  $n=2$  و  $l=0$  تم تعيين الحالة "2s"، وعندما  $n=2$ ،  $l=1$  تم تعيين الحالة "2p"، أما عندما  $n=3$  فإن ( $l$ ) يمكن أن تأخذ 0,1,2، وبالتالي يتم تعيين الحالات التالية "3s" و "3p" و "3d" على التوالي. يبين **الجدول 3.8** حالات الكم الأخرى.

يرتبط الرقم الكمي لمسقط العزم الزاوي  $m$  بالزاوية السميتية  $\phi$  (انظر **الشكل 3.8**)، ويرتبط بالمركبة  $z$  من العزم الزاوي المداري  $L_z$  للإلكترون في ذرة الهيدروجين:

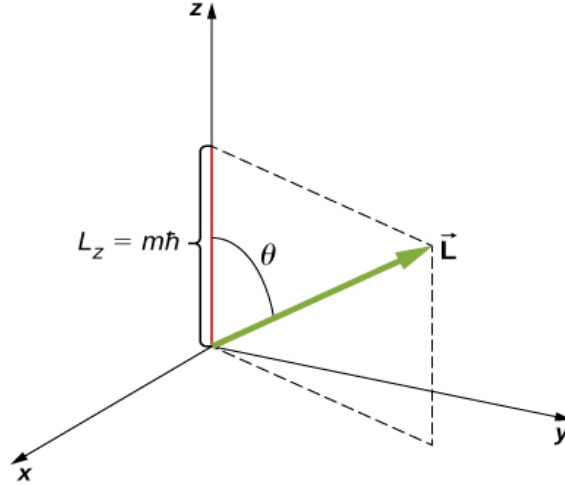
$$L_z = m\hbar \quad (8.5)$$

حيث:  $m = -l, -l + 1, \dots, 0, \dots, +l - 1, l$

ترتبط المركبة  $z$  من العزم الزاوي بمقدار العزم الزاوي من خلال العلاقة التالية:

$$L_z = L \cos \theta \quad (8.6)$$

حيث:  $\theta$  هي الزاوية بين متجه العزم الزاوي والمحور  $z$ . لاحظ أن اتجاه المحور  $z$  يتم تحديده من خلال التجربة، أي على أي اتجاه يفرض المختبر قياس العزم الزاوي. على سبيل المثال، قد يتوافق اتجاه المحور  $z$  مع اتجاه حقل مغناطيسي خارجي، بالتالي العلاقة بين  $L_z$  و  $L$  مبينة في الشكل 4.8



الشكل 4.8 يتم تكميم المركبة  $z$  من العزم الزاوي المداري برقم الكم  $m$  الخاص به

### الجدول 2.8 الترميز الطيفي والعزم الزاوي المداري

الاسم الطيفي	المدار (الحالة)	العزم الزاوي	رقم الكم المداري ( $l$ )
حاد	s	0	0
رئيس	p	$\sqrt{2}h$	1
منتشر	d	$\sqrt{6}h$	2
أساسي	f	$\sqrt{12}h$	3
	g	$\sqrt{20}h$	4
	h	$\sqrt{30}h$	5

**الجدول 3.8 الوصف الطيفي للمدارات (الحالات) الكمومية**

	$l = 0$	$l = 1$	$l = 2$	$l = 3$	$l = 4$	$l = 5$
$n = 1$	1s					
$n = 2$	2s	2p				
$n = 3$	3s	3p	3d			
$n = 4$	4s	4p	4d	4f		
$n = 5$	5s	5p	5d	5f	5g	
$n = 6$	6s	6p	6d	6f	6g	6h

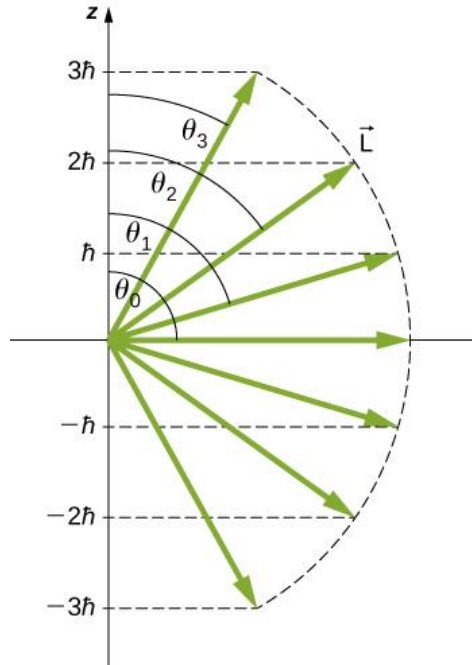
تكافئ المركبة المكممة  $L_z$  الزاوية المكممة  $\theta$ . وإذا تم استبدال  $\sqrt{l(l+1)}\hbar$  عوضاً عن  $L$ ، وتم أيضاً استبدال  $m$  عوضاً عن  $L_z$  في **المعادلة 8.6** نحصل على:

$$m\hbar = \sqrt{l(l+1)}\hbar \cos \theta \quad (8.7)$$

وبالتالي تكون الزاوية  $\theta$  مكممة كما يلي:

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{m}{\sqrt{l(l+1)}} \right) \quad (8.8)$$

لاحظ أن كلاً من الزاوية القطبية ( $\theta$ ) ومسقط شعاع العزم الزاوي على المحور Z الكيفي ( $L_z$ ) هي قيمة مكممة. يبين **الجدول 5.8** تكميم الزاوية القطبية للحالة  $l=3$ . يقع شعاع العزم الزاوي المداري في مكانٍ ما على سطح مخروط مفتوح بزاوية  $\theta$  بالنسبة للمحور Z (ما لم يكن  $m=0$ ، وفي هذه الحالة تكون  $\theta=90^\circ$ ، وتكون نقاط الأشعة متعامدة مع المحور Z).



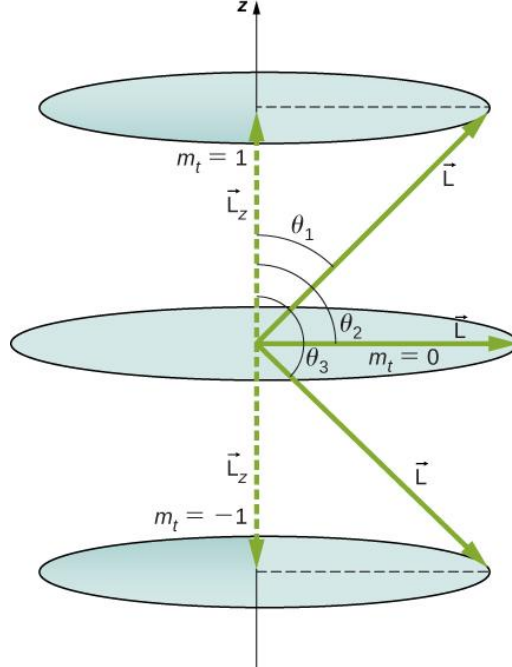
**الشكل 5.8** تكميم العزم الزاوي المداري. يقع كل شعاع على سطح مخروط بمحاور على طول المحور Z.

وتكشف دراسة تفصيلية للعزم الزاوي أنه لا يمكننا أن نعرف جميع المكونات الثلاثة في آن واحد. في القسم السابق، تحتوي المركبة Z للعزم الزاوي المداري على قيم محددة تعتمد على العدد الكمي  $m$ . وهذا يعني أننا لا نستطيع أن نعرف كلاً من المكونين  $x, y$  من العزم الزاوي  $L_x, L_y$  بدقة. ونتيجةً لذلك، فإن الاتجاه الدقيق لشعاع العزم الزاوي المداري غير معروف.

## مثال 2.8

ما الاتجاهات المسموح بها؟

6.8. كما هو موضح في الشكل  $l=1$ ، حيث  $z$ ، والتي يصنعها مع المحور  $L_z$  أحسب الزوايا لشعاع العزم المداري



الشكل 6.8 يمكن أن يكون لمكون العزم الزاوي على طول المحور  $z$  (المحدد بواسطة اتجاه الحقل المغناطيسي) قيم معينة فقط. وتظهر هنا من أجل  $l=1$  حيث يكون  $m_l = -1, 0, 1$  ويكون اتجاه  $L$  مكتم، بمعنى أنه يمكن أن يكون له زوايا معينة فقط بالنسبة إلى المحور  $z$

### خطة الحل

يشكل الشعاعان  $L_x$  و  $L_y$  (في اتجاه المحور  $z$ ) مثلثاً قائماً إلى اليمين، حيث يشكل  $L_x$  وتر المثلث ويشكل  $L_y$  الضلع المجاور. إن نسبة  $L_z$  إلى  $L$  هو جيب تمام زاوية. يُعطى المطال  $L = |\vec{L}|$  و  $L_z$  من خلال العلاقة التالية:

$$L_z = m_l \hbar \quad \text{ولدينا أيضاً} \quad L = \sqrt{l(l+1)}\hbar$$

### الحل

إذا أخذنا  $l=1$ ، بالتالي يمكن أن تأخذ  $m_l$  القيم التالية:  $-1, 0, 1$ . وبالتالي نحصل على قيم  $L$  من خلال العلاقة التالية:

$$L = \sqrt{l(l+1)}\hbar = \sqrt{2}\hbar$$

يمكن أن تأخذ  $L_z$  ثلاث قيم، والتي تُعطى من خلال  $L_z = m_l \hbar$ :

$$L_z = m_l \hbar = \begin{cases} \hbar, & m_l = +1 \\ 0, & m_l = 0 \\ -\hbar, & m_l = -1 \end{cases}$$

كما نرى في الشكل 6.8، حيث  $\cos\theta = L_z/L$ ، وأيضاً من أجل  $m_l = +1$  نحصل على:

$$\cos\theta_1 = \frac{L_z}{L} = \frac{\hbar}{\sqrt{2}\hbar} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$$

وبالتالي:

$$\theta_1 = \cos^{-1} 0.707 = 45.0^\circ$$

وبشكل مشابه من أجل  $m_l = 0$  نحصل على  $\cos \theta_2 = 0$ ، وبالتالي يمكننا إيجاد:

$$\theta_2 = \cos^{-1} 0 = 90.0^\circ$$

ومن أجل  $m_l = -1$  نحصل على:

$$\cos \theta_3 = \frac{L_z}{L} = \frac{-\hbar}{\sqrt{2}\hbar} = -\frac{1}{\sqrt{2}} = -0.707$$

وبالتالي:


$$\theta_3 = \cos^{-1}(-0.707) = 135.0^\circ.$$

### ملاحظة

تكون الزوايا متفقة مع الشكل 6.8. وتكون فقط الزوايا المرتبطة بالمحور Z مكممة. يمكن أن يشير (L) إلى أي اتجاه مادام يشكل زاوية صحيحة مع المحور z. وبالتالي تقع أشعة العزم الزاوي على مخروط كما هو موضح في الشكل 6.8. لمعرفة كيفية تطبيق مبدأ التقابل هنا، ضع في الحسبان أن الزاوية الأصغر ( $\theta_1$  في هذا المثال) هي لأجل أقصى قيمة للرقم  $m_l$ ، أي  $m_l = 1$  لأجل أصغر زاوية:

$$\cos \theta = \frac{L_z}{L} = \frac{l}{\sqrt{l(l+1)}}$$

الذي يقترب من (1) ويصبح  $l$  كبيراً جداً إذا كان  $\cos \theta = 1$ . عندها فإن  $\theta = 0^\circ$ . علاوةً على ذلك من أجل  $l$  كبيرة، فهناك العديد من القيم للرقم  $m_l$ ، وبالتالي فإن جميع الزوايا تكون ممكنة لأن  $l$  تصبح كبيرة جداً.

 **1.8 تحقق من فهمك:** هل يمكن أن تكون قيمة  $L_z$  مساوية إلى قيمة  $L$ ؟

### استخدام التابع الموجي لعمل التنبؤات

كما رأينا سابقاً، يمكننا استخدام ميكانيك الكم لعمل تنبؤات حول الأحداث الفيزيائية باستخدام البيانات الاحتمالية. لذلك من المناسب القول: "إن إلكترون موجود في هذا الحيز بهذا الاحتمال في هذه اللحظة"، ولا يجب القول: "يوجد إلكترون في الموضع (x,y,z) في هذه اللحظة". لتحديد احتمال وجود إلكترون في ذرة الهيدروجين في منطقة معينة من المكان، من الضروري مكملة كثافة الاحتمال  $|\psi_{nlm}|^2$  في تلك المنطقة، أي:

$$\text{Probability (الاحتمال)} = \int_{\text{volume}} |\psi_{nlm}|^2 dV, \quad (8.9)$$

حيث  $dV$  هو عنصر حجم لامتناهي في الصغر. إذا تم حساب هذا التكامل لكامل المكان فتكون النتيجة (1)، لأن احتمال وجود الجسم في مكان ما هو 100% (شرط التطبيع)، في دورة أكثر تقدماً في الفيزياء الحديثة ستجد أن  $|\psi_{nlm}|^2 = \psi_{nlm}^* \psi_{nlm}$ ، حيث  $\psi_{nlm}^*$  هو المرافق العقدي، وهذا يزيل تكرار  $i = \sqrt{-1}$  في الحسابات أعلاه.

بفرض إلكترون عزمه الزاوي معدوم، أي ( $l=0$ ). في هذه الحالة يعتمد تابع موجة هذا الإلكترون فقط على الإحداثي الشعاعي (نصف القطر)  $r$ . (بالرجوع إلى الحالات:  $\psi_{100}$  و  $\psi_{200}$  في الجدول 1.8). يعبر عن عنصر الحجم  $dV$  اللامتناهي في الصغر مع غلاف كروي نصف قطره  $r$ ، وثخائته لامتناهية  $dr$ ، كما يلي:

$$dV = 4\pi r^2 dr \quad (8.10)$$

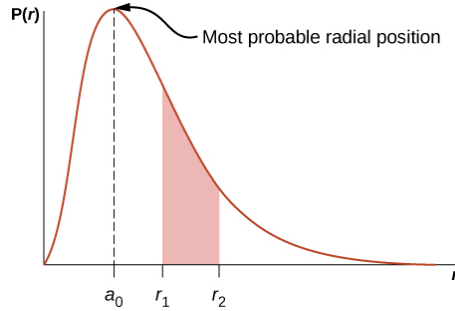
إن احتمال العثور على إلكترون في المنطقة من  $r$  إلى  $r + dr$  (تقريباً عند  $r$ ) هو:

$$p(r)dr = |\psi_{n00}|^2 4\pi r^2 dr \quad (8.11)$$

تُسمى  $p(r)$  تابع كثافة الاحتمال الشعاعي (الاحتمال بوحدة الطول)، لأجل إلكترون في الحالة الأرضية للهيدروجين فإن احتمال العثور على هذا الإلكترون في المنطقة  $r$  إلى  $r + dr$  هو:

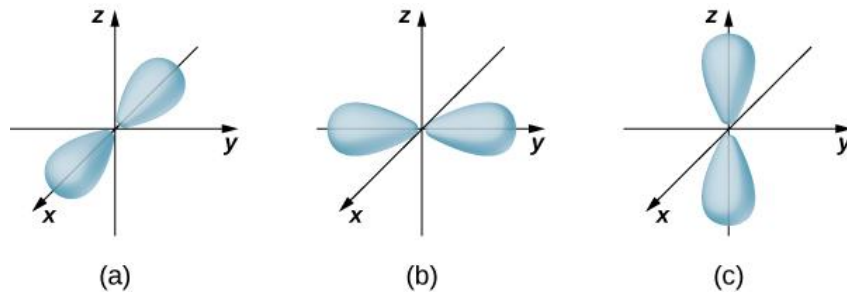
$$|\psi_{n00}|^2 4\pi r^2 dr = (4/a_0^3) r^2 \exp(-2r/a_0) dr, \quad (8.12)$$

حيث  $a_0 = 0.5 \text{ \AA}$ . يبين الشكل 7.8 مخطط تابع كثافة الاحتمال الشعاعي  $P(r)$ . تعطي المنطقة الواقعة تحت المنحنى بين أي موقعين شعاعيين، مثل  $r_1$  و  $r_2$ ، احتمال العثور على إلكترون في هذا الحقل الشعاعي. للعثور على أفضل موضع قطري محتمل، قمنا بمساواة المشتق الأول لهذا التابع مع الصفر ( $dP/dr = 0$ ) وحل المعادلة. لا يساوي الموضع الشعاعي الأكثر احتمالاً متوسط أو القيمة المتوقعة للموضع الشعاعي لأن  $|\psi_{n00}|^2$  غير متناظر حول قيمة ذروته.



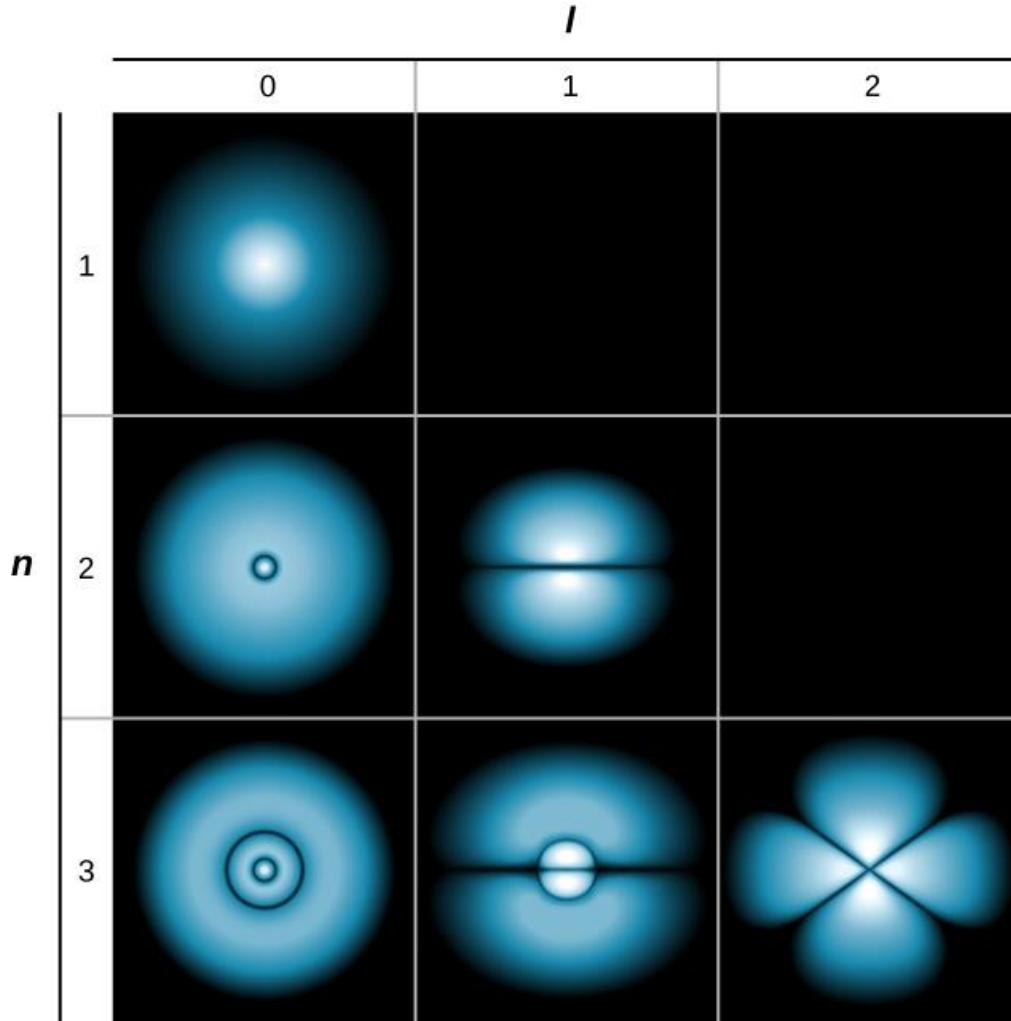
الشكل 7.8 تابع كثافة الاحتمال الشعاعي للحالة الأساس للهيدروجين

إذا كان للإلكترون عزم زاوي مداري ( $l \neq 0$ )، فإن تابع الموجة، الذي يمثل هذا الإلكترون يعتمد على الزاويتين  $\theta$  و  $\phi$ ، أي أن:  $\psi_{nlm} = \psi_{nlm}(r, \theta, \phi)$ . يبين الشكل 8.8 المدارات الذرية من أجل ثلاث حالات:  $l=1, n=2$ . المدار الذري هو منطقة من الفضاء تضم نسبة معينة (عادةً 90%) من احتمال وجود الإلكترون فيها (يُشار إلى المدار الذري عادةً باسم "غمامة" الاحتمال). لاحظ أن هذه التوزعات واضحة ضمن اتجاهات معينة. وهذه الاتجاهية مهمة للكيميائيين عند تحليل كيف ترتبط الذرات بعضها ببعض لتشكيل الجزيئات.



الشكل 8.8 توزيعات كثافة الاحتمال لثلاث حالات:  $l=1$  و  $n=2$ . التوزيع على طول: (a) المحور  $x$  و (b) المحور  $y$  و (c) المحور  $z$ .

يبين الشكل 9.8 تمثيلاً مختلفاً قليلاً عن تابع الموجة. في هذه الحالة، تشير المناطق المضئعة والعاممة إلى مواقع ذات احتمالية مرتفعة ومنخفضة نسبياً على التوالي. على النقيض من نموذج بور لذرة الهيدروجين، لا يتحرك الإلكترون حول نواة البروتون في مسار محدد جيداً. في الواقع، مبدأ عدم اليقين يجعل من المستحيل معرفة كيف ينتقل الإلكترون من مكان إلى آخر.



**الشكل 9.8** الغمامات الاحتمالية للإلكترون في الحالة الأساس والعديد من الحالات المثارة للهيدروجين. يشير ظل اللون إلى احتمال العثور على الإلكترون، وكلما كان اللون أخف زادت فرصة العثور على الإلكترون.

## 2.8 | عزم ثنائي القطب المغناطيسي الدوراني للإلكترون Orbital Magnetic Dipole Moment of the Electron

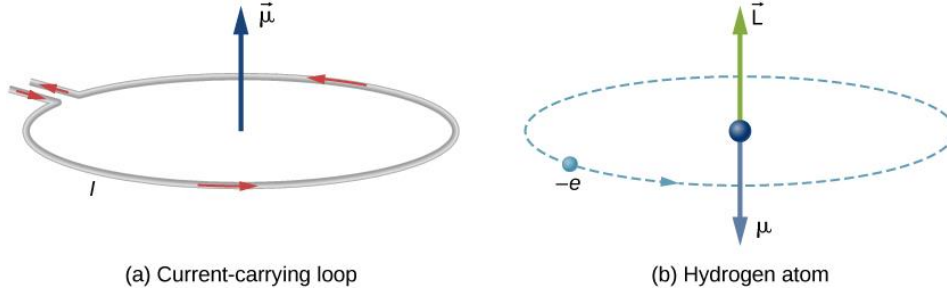
### الأهداف التعليمية

- في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:
- تفسير لماذا تحتوي ذرة الهيدروجين على خواص مغناطيسية.
  - تفسير لماذا يتم تقسيم السويات الطاقة لذرة الهيدروجين المرتبطة بالعزم الزاوي المداري بتأثير حقل مغناطيسي خارجي.
  - استخدام الأرقام الكمية لحساب مقدار واتجاه عزم ثنائي القطب المغناطيسي الدوراني لذرة الهيدروجين.

يتحرك الإلكترون، في نموذج بور لذرة الهيدروجين، وفق مدار دائري حول البروتون. ويمر الإلكترون بنقطة معينة على الحلقة في لحظة معينة، لذا يمكن حساب شدة التيار  $I = Q/t$ . يشبه الإلكترون، الذي يدور حول بروتون في ذرة هيدروجين، التيار الكهربائي الذي



يتدفق عبر سلك دائري (الشكل 10.8). رأينا في دراسة المغناطيسية أن الأسلاك الناقلة للتيار تنتج حقولاً مغناطيسية. لذلك من المنطقي أن نستنتج أن ذرة الهيدروجين تنتج حقلاً مغناطيسياً، وتتفاعل مع الحقول المغناطيسية الأخرى.



(a) Current-carrying loop

(b) Hydrogen atom

الشكل 10.8 يشابه (a) التيار المتدفق عبر سلك دائري. (b) إلكترون يدور حول بروتون في ذرة الهيدروجين .

عزم ثنائي القطب المغناطيسي المداري: هو مقياس لقوة الحقل المغناطيسي الناتج عن العزم الزاوي المداري للإلكترون. وذلك من القوة والعزم في التيار في الحلقات (http://cnx.org/content/m58743/latest/#fs-id1171360245659)، فإن مطالع عزم ثنائي القطب المغناطيسي المداري لتيار الحلقة هو:

$$\mu = IA \quad (8.13)$$

حيث: I هو التيار، A هي مساحة الحلقة (للبساطة، نشير إلى ذلك على أنه عزم مغناطيسي). إن التيار المرتبط بالإلكترون في المدار حول بروتون في ذرة الهيدروجين هو:

$$I = \frac{e}{T} \quad (8.14)$$

حيث: e هي شحنة الإلكترون، و T هي الفترة المدارية إذا افترضنا أن الإلكترون ينتقل في مدار دائري تماماً، فإن الفترة المدارية هي:

$$T = \frac{2\pi r}{v} \quad (8.15)$$

حيث: r هو نصف قطر المدار، و v هي سرعة الإلكترون في مداره. بالنظر إلى أن مساحة الدائرة هي  $\pi r^2$ ، فإن العزم المغناطيسي:

$$\mu = IA = \frac{e}{\left(\frac{2\pi r}{v}\right)} \pi r^2 = \frac{evr}{2} \quad (8.16)$$

من المفيد التعبير عن العزم المغناطيسي  $\mu$  باستخدام شعاع العزم الزاوي المداري  $(\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p})$ . ولأن الإلكترون يتحرك على محيط دائرة، ويشكل كلٌّ من شعاع الموضع  $\vec{r}$  وشعاع كمية الحركة  $\vec{p}$  زاوية صحيحة، وبالتالي يكون مطالع العزم الزاوي المداري هو:

$$L = |\vec{L}| = |\vec{r} \times \vec{p}| = rp \sin \theta = rp = rmv. \quad (8.17)$$

وبالجمع بين هاتين المعادلتين، نحصل على:

$$\mu = \left(\frac{e}{2m_e}\right)L. \quad (8.18)$$

في الشكل الشعاعي، يمكن كتابة هذه المعادلة كما يلي:

$$\vec{\mu} = -\left(\frac{e}{2m_e}\right)\vec{L} \quad (8.19)$$

تظهر الإشارة السالبة لأن للإلكترون شحنة سالبة. لاحظ أن اتجاه العزم المغناطيسي للإلكترون يتعارض مع اتجاه العزم الزاوي

المداري كما هو مبين في الشكل 10.8. (b) في نموذج بور للذرة تكون العلاقة بين  $\vec{L}$  و  $\vec{\mu}$  في المعادلة 8.19 مستقلة عن نصف القطر المداري. يمكن التعبير عن العزم المغناطيسي  $\mu$  بدلالة العزم الزاوي المداري  $l$ . بجمع المعادلة 8.18 مع المعادلة 8.5 يكون مقدار العزم المغناطيسي:

$$\mu = \left( \frac{e}{2m_e} \right) L = \left( \frac{e}{2m_e} \right) \sqrt{l(l+1)} \hbar = \mu_B \sqrt{l(l+1)} \quad (8.20)$$

إن المركبة على المحور Z للعزم المغناطيسي، هي:

$$\mu_z = - \left( \frac{e}{2m_e} \right) L_z = - \left( \frac{e}{2m_e} \right) m \hbar = -\mu_B m \quad (8.21)$$

إن الكمية  $\mu_B$  هي وحدة أساسية في المغناطيسية، وتسمى **مغنون بور**، والتي لها القيمة  $(5.8 \times 10^{-5} \text{ eV/T})$  أو  $(10^{-24} \text{ joule/tesla (J/T)})$ . إن تكميم العزم المغناطيسي هو نتيجة لتكميم العزم الزاوي المداري. كما سنرى في القسم التالي، يُعزى عزم ثنائي القطب المغناطيسي الكلي لذرة الهدروجين إلى كلٍّ من الحركة المدارية للإلكترون وعزم اللف الذاتي للإلكترون (سبين spin). نتجاهل في الوقت الحالي تأثير سبين الإلكترون.

### مثال 3.8

#### العزم ثنائي القطب المغناطيسي المداري

ما هو مقدار العزم المغناطيسي ثنائي القطب  $\mu$  للإلكترون موجود في ذرة الهدروجين ويقع (a) في المدار s، (b) في المدار p، (c) في المدار d؟ (بفرض أن سبين الإلكترون يساوي إلى الصفر).

#### خطة الحل:

يرتبط العزم المغناطيسي للإلكترون بالعزم الزاوي المداري  $L$ . في حال ذرة الهدروجين، فإن هذه الكمية مرتبطة بالرقم الكمي للعزم الزاوي  $l$ . وترتبط هذه الحالات في الترميز الطيفي (بالحروف s, p, d, etc.) بالرقم الكمي.

#### الحل:

يُعطى مطلق العزم المغناطيسي بالمعادلة 8.20:

$$\mu = \left( \frac{e}{2m_e} \right) L = \left( \frac{e}{2m_e} \right) \sqrt{l(l+1)} \hbar = \mu_B \sqrt{l(l+1)}$$

(a) من أجل الحالة s، لدينا  $l=0$ ، وبالتالي فإن:  $\mu = 0$  و  $\mu_z = 0$

(b) من أجل الحالة p، لدينا  $l=1$ ، وبالتالي نحصل على:

$$\mu = \mu_B \sqrt{l(l+1)} = \sqrt{2} \mu_B$$

$$\mu_z = -\mu_B, m, \text{ where } m = (-1, 0, 1)$$

$$\mu_z = \mu_B, 0, -\mu_B$$

(c) من أجل الحالة d، لدينا  $l=2$ ، وبالتالي نحصل على:

$$\mu = \mu_B \sqrt{2(2+1)} = \sqrt{6} \mu_B$$

$$\mu_z = -\mu_B, m, \text{ where } m = (-2, -1, 0, 1, 2)$$

$$\mu_z = 2\mu_B, \mu_B, 0, -\mu_B, -2\mu_B$$

## ملاحظة

لا يوجد في الحالة s عزم زاوي مداري، وبالتالي لا يوجد عزم مغناطيسي. وهذا لا يعني أن الإلكترون في حالة سكون، فقط إن الحركة الكلية للإلكترون لا تنتج حقلاً مغناطيسياً. في الحالة p، يكون للإلكترون عزم مغناطيسي بثلاث قيم ممكنة للمركبة z لهذا العزم المغناطيسي، وهذا يعني أن العزم المغناطيسي يمكن أن يشير إلى ثلاثة اتجاهات قطبية مختلفة - كل منها عكس اتجاه شعاع العزم الزاوي المداري. وفي الحالة d، يكون للإلكترون عزم مغناطيسي بخمس قيم ممكنة للمركبة z لهذا العزم المغناطيسي. في هذه الحالة، يمكن أن يشير العزم المغناطيسي إلى خمس اتجاهات قطبية مختلفة.

تحتوي ذرة الهيدروجين على حقل مغناطيسي، لذلك نتوقع أن تتفاعل ذرة الهيدروجين مع حقل مغناطيسي خارجي - مثل الشد والجذب بين مغناطيسين، من القوة والعزم في حلقة التيار (<http://cnx.org/content/m58743/latest/#fs->)

(id1171360288680)، ونحن نعلم عندما تتفاعل حلقة تيار مع حقل مغناطيسي خارجي  $\vec{B}$ ، فإن العزم يعطى بالعلاقة التالية:

$$\vec{\tau} = I(\vec{A} \times \vec{B}) = \vec{\mu} \times \vec{B} \quad (8.22)$$

حيث:  $I$ : التيار،  $\vec{A}$ : مساحة الحلقة،  $\vec{\mu}$ : العزم المغناطيسي،  $\vec{B}$ : الحقل المغناطيسي الخارجي. يعمل هذا العزم على تدوير شعاع العزم المغناطيسي لذرة الهيدروجين ليتوافق مع الحقل المغناطيسي الخارجي. ونظراً لأن العمل الميكانيكي يتم بواسطة الحقل المغناطيسي الخارجي المطبق على ذرة الهيدروجين، يمكننا التحدث عن تغيرات في طاقة هذه الذرة. يتم إعطاء الطاقة الكامنة لذرة الهيدروجين المرتبطة بهذا التفاعل المغناطيسي بواسطة المعادلة 8.23:

$$U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} \quad (8.23)$$

إذا تعارض العزم المغناطيسي مع الحقل المغناطيسي الخارجي، فإن الطاقة الكامنة كبيرة. ولكن إذا كان العزم المغناطيسي موازياً للحقل، فإن الطاقة الكامنة تكون صغيرة. لذا فإن العمل المنجز على ذرة الهيدروجين لتدوير متجه العزم المغناطيسي للذرة في اتجاه الحقل المغناطيسي الخارجي يرتبط بانخفاض في الطاقة الكامنة. ومع ذلك، يتم الحفاظ على طاقة الجملة لأن انخفاض الطاقة الكامنة ينتج إشعاع (إصدار فوتون). يتم تقدير كمية هذه التغيرات في الطاقة لأن العزم المغناطيسي يمكن أن يشير إلى اتجاهات معينة فقط. إذا أشار الحقل المغناطيسي الخارجي إلى الاتجاه z الموجب، فإن الطاقة الكامنة المرتبطة بالعزم ثنائي القطب المغناطيسي المداري هو:

$$U(\theta) = -\mu_B B \cos \theta = -\mu_z B = -(-\mu_B m) B = m \mu_B B \quad (8.24)$$

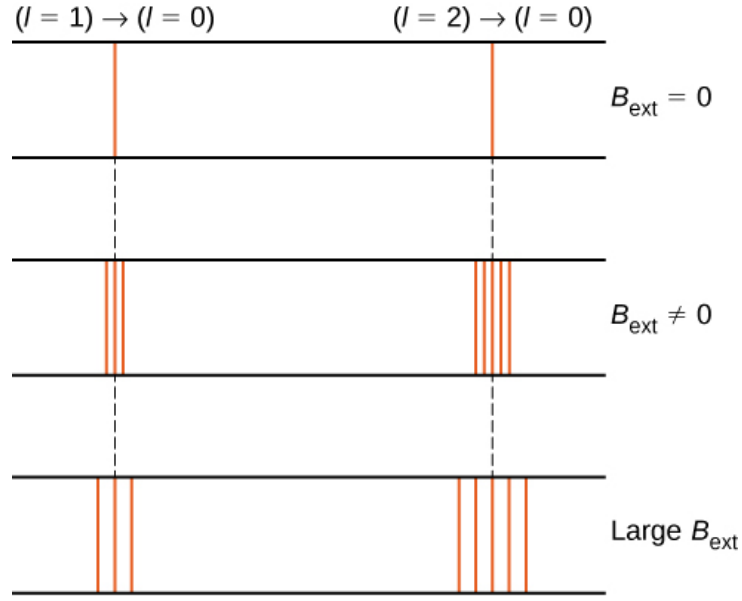
حيث:  $\mu_B$  هو مغنطون بور،  $m$ : الرقم الكمي لمسقط العزم الزاوي المغناطيسي، والذي له القيم:

$$m = -l, -l + 1, \dots, 0, \dots, l - 1, l. \quad (8.25)$$

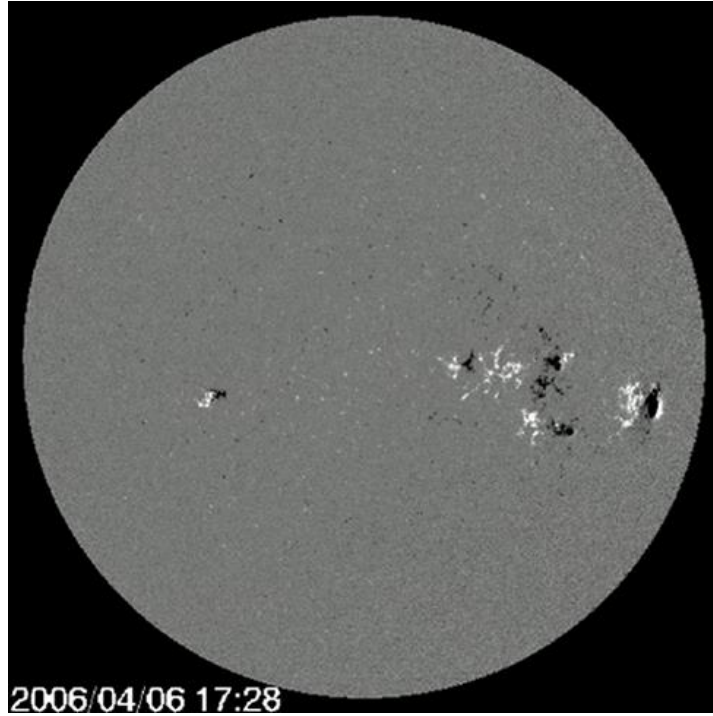
على سبيل المثال، في حالة الإلكترون  $l = 1$  تُقسم طاقته الكلية إلى ثلاث سوويات طاقة مميزة توافق  $0, \mu_B B, -\mu_B B$ .

يُسمى تقسيم السويات الطاقية بتأثير حقل مغناطيسي خارجي بتأثير زيمان "the Zeeman effect". ويتجاهل تأثيرات سبين الإلكترون، ينتج عن الانتقال من الحالة  $l=1$  إلى حالة طاقة منخفضة ثلاثة خطوط طيفية متباعدة (الشكل 11.8، العمود الأيسر). وبالمثل، ينتج عن الانتقالات من الحالة  $l=2$  خمسة خطوط طيفية متباعدة بشكل وثيق (العمود الأيمن). يتناسب تباعد هذه الخطوط مع قوة الحقل المغناطيسي الخارجي. ولهذا التأثير العديد من التطبيقات. على سبيل المثال، يتم استخدام تقسيم الخطوط في طيف الهيدروجين للشمس لتحديد قوة الحقل المغناطيسي للشمس. يمكن استخدام العديد من قياسات الحقل المغناطيسي لوضع خريطة للنشاط المغناطيسي على سطح الشمس، والتي تُسمى المخطط مغناطيسي Magnetogram (الشكل

(12.8)



**الشكل 11.8** يشير تأثير زيمان إلى تقسيم الخطوط الطيفية بواسطة حقل مغناطيسي خارجي، يحدث في العمود الأيسر تقسيم الطاقة بسبب الانتقالات من الحالة  $(n=2, l=1)$  إلى حالة طاقة أقل. ويحدث في العمود الأيمن تقسيم الطاقة بسبب الانتقالات من الحالة  $(n=2, l=2)$  إلى حالة طاقة أقل. ويتناسب تباعد هذه الخطوط مع شدة الحقل المغناطيسي الخارجي.



**الشكل 12.8** المخطط المغناطيسي للشمس. تُظهر البقع المضيئة والمظلمة نشاطاً مغناطيسياً كبيراً على سطح الشمس. (credit: NASA, SDO)

### 3.8 | سبين الإلكترون (رقم الكم لعزم اللف الذاتي للإلكترون) Electron Spin

#### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- التعبير عن حالة الإلكترون في ذرة الهيدروجين من حيث الأرقام الكمية (الكمومية) الخمسة.
- استخدام الأرقام الكمومية لحساب مقدار واتجاه سبين الإلكترون والعزم المغناطيسي للإلكترون.
- شرح البنية فائقة الدقة والدقيقة لطيف الهيدروجين من حيث التفاعلات المغناطيسية داخل ذرة الهيدروجين.

سنأخذ في هذا القسم بالحسابان سبين الإلكترون، يقدم السبين رقمين كميّين إضافيين لنموذج ذرة الهيدروجين، تم اكتشافهما من خلال النظر في التركيب الدقيق للأطياف الذرية. السبين هو سمة أساسية لجميع الجسيمات، وليس فقط الإلكترونات، ويشبه الدوران الذاتي للأجسام حول محاورها، مثل الدوران اليومي للأرض. إن السبين مكتم كما في حالة العزم الزاوي المداري. يُعطى مطال السبين  $S$  للإلكترون بالعلاقة التالية:

$$S = \sqrt{s(s+1)}\hbar \quad (8.27)$$

حيث يتم تعريف  $S$  ليكون عدد الكم السبيني. هذا مشابه إلى مطال  $L$  المعطى في **المعادلة 8.4**، باستثناء أن القيمة الوحيدة المسموح بها لسبين  $s$  للإلكترون هي  $s = 1/2$ . يُقال إن الإلكترون هو "جسيم نصف سبيني". يرتبط العدد الكمي لمسقط السبين  $m_s$  بالمركبة  $z$  للسبين، حيث يعبر عنها بالعلاقة التالية:

$$S_z = m_s \hbar \quad (8.27)$$

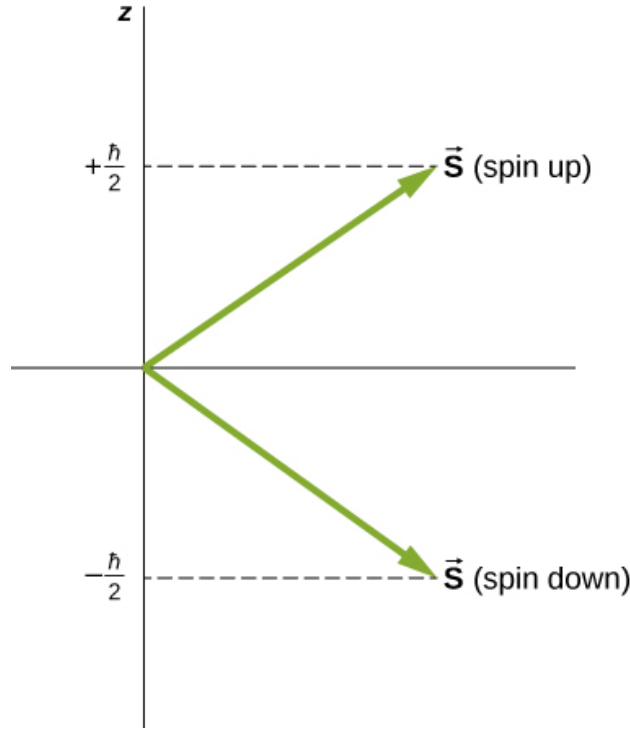
بشكلٍ عام، الأرقام الكمية المسموح بها هي:

$$m_s = -s, -s + 1, \dots, 0, \dots, +s - 1, s \quad (8.28)$$

من أجل حالة خاصة للإلكترون ( $s = 1/2$ ):

$$m = -\frac{1}{2}, \frac{1}{2} \quad (8.29)$$

يتم تحديد اتجاهات السبين تماماً كما في حالة العزم الزاوي المداري. تُسمى الحالة  $m_s = -1/2$  بحالة "سبين سفلي"، وتكون المركبة  $Z$  للدوران  $s_z = -1/2$ ، كما تُسمى الحالة  $m_s = +1/2$  بحالة "سبين علوي"، وتكون المركبة  $z$  للسبين  $s_z = +1/2$ . وهذه الحالات موضحة في **الشكل 13.8**.



**الشكل 13.8** الحالات المحتملتان لسبين الإلكترون.

يمكن التعبير عن العزم ثنائي القطب المغناطيسي للإلكترون  $\mu_e$  من خلال السبين  $S$ . قياساً على العزم الزاوي المداري، فإن مطال العزم المغناطيسي الإلكتروني هو:

$$\mu_s = \left( \frac{e}{2m_e} \right) S \quad (8.30)$$

وفقاً للنظرية النسبية الخاصة، هذه القيم منخفضة مرتين، وبالتالي في الشكل الشعاعي يكون العزم المغناطيسي السبيني كما يلي:

$$\vec{\mu} = \left( \frac{e}{m_e} \right) \vec{S} \quad (8.31)$$

وتكون المركبة  $z$  للعزم المغناطيسي هي:

$$\mu_z = - \left( \frac{e}{2m_e} \right) S_z = - \left( \frac{e}{m_e} \right) m_s \hbar \quad (8.33)$$

يتمتع الرقم الكمي لمسقط السبين بقيمتين فقط  $m_s = \pm 1/2$ ، وبالتالي تأخذ المركبة  $Z$  للعزم المغناطيسي القيمتين:

$$\mu_z = \pm \left( \frac{e}{2m_e} \right) \hbar = \pm \mu_B \hbar \quad (8.33)$$

حيث:  $\mu_B$  مغنطون بور. الإلكترون هو مغناطيس، وبالتالي نتوقع أن يتفاعل الإلكترون مع الحقول المغناطيسية الأخرى. نحن ندرس حالتين خاصتين: الأولى، تفاعل الإلكترون الحر مع حقل مغناطيسي خارجي (غير منتظم)، والثانية، تفاعل إلكترون في ذرة الهدروجين مع حقل مغناطيسي ناتج عن العزم الزاوي المداري للإلكترون.

### إشعاع وسبين الإلكترون

تُوضع ذرة الهيدروجين في الحالة الأساس في حقل مغناطيسي منتظم خارجي. حدد ( $B = 1.5 \text{ T}$ ) تواتر الإشعاع الناتج عن الانتقال بين حالتي "سبين علوي" و"سبين سفلي" للإلكترون.

### خطة الحل

إن رقم الكم لمسقط السبين هو  $m_s = \pm 1/2$ ، والتالي فإن المركبة  $z$  للعزم المغناطيسي هي:

$$\mu_z = \pm \left( \frac{e}{2m_e} \right) \hbar = \pm \mu_B \hbar$$

يعبر عن الطاقة الكامنة المرتبطة بالتفاعل بين العزم المغناطيسي للإلكترون والحقل المغناطيسي الخارجي بالعلاقة:

$$U = -\mu_z B = \pm \mu_B B$$

يتناسب تردد الضوء الصادر مع الفرق الطاقى ( $\Delta E$ ) بين هاتين الحالتين.

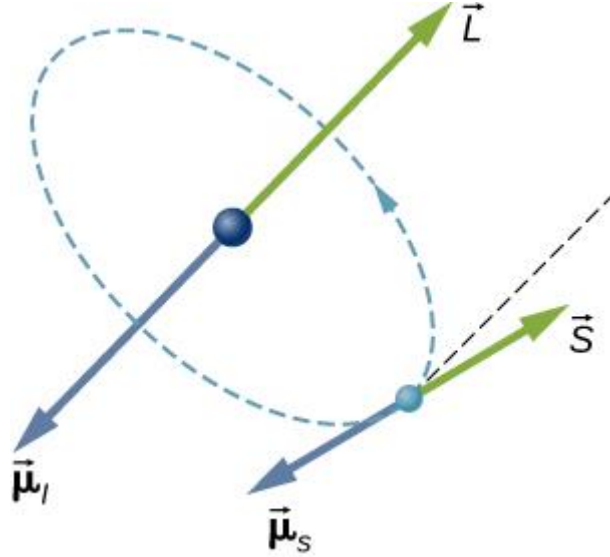
### الحل

الفرق الطاقى بين هاتين الحالتين هو  $\Delta E = 2\mu_B B$ ، وبالتالي فإن تردد الإشعاع الصادر هو:

$$f = \frac{\Delta E}{h} = \frac{2\mu_B B}{h} = \frac{2 \left( 5.79 \times \frac{10^{-5} \text{ eV}}{\text{T}} \right) (1.5 \text{ T})}{4.136 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}} = 4.2 \times 10^{10} \frac{\text{cycles}}{\text{s}}$$

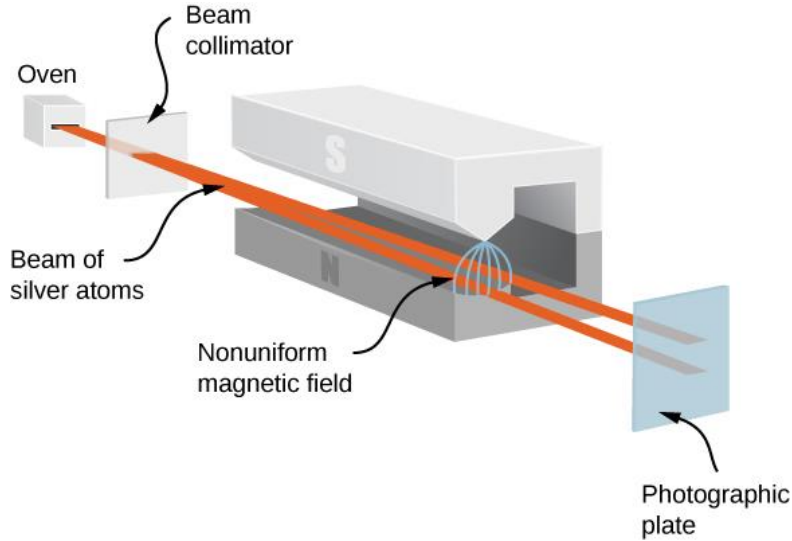
### ملاحظة

يرتبط العزم المغناطيسي للإلكترون بالحقل المغناطيسي الخارجي. وتختلف طاقة هذه الجملة فيما إذا كان الإلكترون في محاذاة البروتون أم لا. يتناسب تردد الإشعاع الصادر من خلال الانتقال بين هاتين الحالتين مع الفرق الطاقى. إذا ضاعفنا قوة الحقل المغناطيسي، مع الحفاظ على بقية الأشياء الأخرى ثابتة، فإن تردد الإشعاع يتضاعف، أما طول الموجة فإنه ينقص إلى النصف. في ذرة الهيدروجين، يمكن أن يتفاعل العزم المغناطيسي للإلكترون مع الحقل المغناطيسي الناتج عن العزم الزاوي المداري، وتدعى هذه الظاهرة **الترباط المداري - الدوراني**. يبين **الشكل 14.8** شعاع عزم الزاوي المداري ( $\vec{L}$ ) والعزم المغناطيسي المداري ( $\vec{\mu}$ ) والسبين ( $\vec{S}$ ) والعزم المغناطيسي الدوراني ( $\vec{\mu}_s$ ). يمكن تقسيم السويات الطاقية لذرة الهيدروجين بتطبيق حقل مغناطيسي خارجي. كذلك يتم تقسيم السويات الطاقية لذرة الهيدروجين بتأثير الحقول المغناطيسية الداخلية للذرة. إذا كان العزم المغناطيسي للإلكترون والعزم المغناطيسي المداري للإلكترون متضادين (عكوسي التوازي)، فإن الطاقة الكامنة من التفاعل المغناطيسي مرتفعة نسبياً، ولكن عندما تكون هذه العزوم متوازية بالاتجاه نفسه، تكون الطاقة الكامنة صغيرة نسبياً. ويؤدي الانتقال من كل من هاتين الحالتين إلى سوية طاقة أقل وإلى إصدار فوتون بتردد مختلف قليلاً. وهذا يعني أن الترباط المداري - الدوراني "يقسم" الخط الطيفي المتوقع لسبين الإلكترون. يتم تفسير البنية الدقيقة لطيف الهيدروجين من خلال الترباط المداري - الدوراني.



**الشكل 14.8** الترابط المداري- الدوراني هو ناتج تفاعل العزم المغناطيسي الدوراني  $\vec{\mu}_s$  مع العزم المغناطيسي المداري  $\vec{\mu}_l$  للإلكترون.


توفر تجربة شتيرن غرلاخ Stern-Gerlach دليلاً تجريبياً على أن للإلكترونات سبيناً. يمرر في هذه التجربة تيار من ذرات الفضة (Ag) عبر حقل مغناطيسي خارجي غير منتظم. تتمتع ذرة الفضة (Ag) بعزم زاوي مداري معدوم، وتحوي إلكترونات واحداً غير مرتبط في مدارها الخارجي. وبالتالي، يرجع العزم الزاوي المداري الكلي لذرة الفضة إلى سبين الإلكترون الخارجي ( $s = 1/2$ ) تعمل ذرات الفضة (Ag) كمغناط صغيرة خلال مرورها عبر الحقل المغناطيسي وذلك بسبب سبين الإلكترونات. لهذه المغناط اتجاهان محتملان، وهما يتوافقان مع حالي السبين السفلي ومثيله العلوي للإلكترون. يحول الحقل المغناطيسي ذرات السبين العلوي في اتجاه واحد وذرات السبين السفلي في اتجاه آخر. ينتج عن ذلك نطاقان متميزان على الشاشة (**الشكل 15.8**)



**الشكل 15.8** في تجربة شتيرن غرلاخ Stern-Gerlach يعمل حقل مغناطيسي خارجي غير منتظم على تحويل حزمة من الإلكترونات إلى اتجاهين مختلفين. وهذه النتيجة بسبب تكميم العزم الزاوي السبيني.


وفقاً للتنبؤات الكلاسيكية، يمكن أن يشير العزم الزاوي (وبالتالي، العزم المغناطيسي) لذرة Ag إلى أي اتجاه، لذلك يتوقع المرء بدلاً من ذلك لطفحة مستمرة على الشاشة. يقدم الجزءان الناتجان من تجربة شتيرن غرلاخ الدعم المذهل لأفكار ميكانيك الكم.



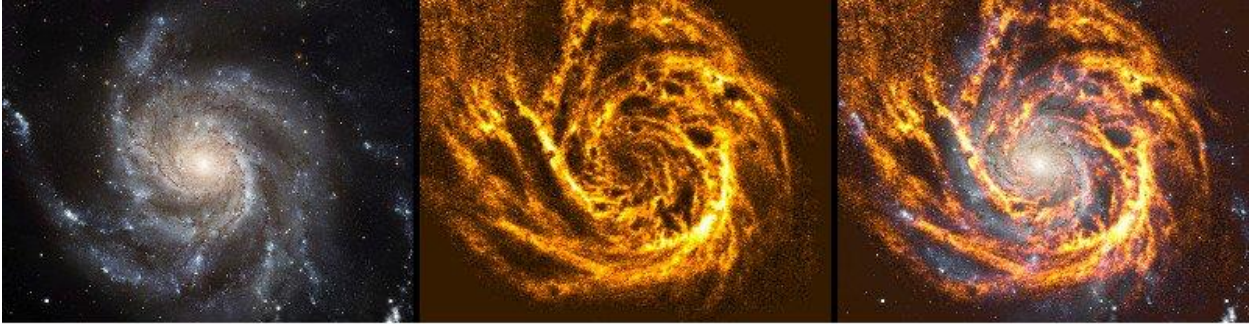
قم بزيارة على متصفح النت: 

(PhET Explorations: Stern-Gerlach Experiment)(<https://openstaxcollege.org/l/21sterngerlach>)

وذلك لمعرفة المزيد عن تجربة شتيرن غرلاخ.

 **2.8 تحقق من فهمك:** إذا أسفرت تجربة شتيرن غرلاخ عن أربعة نطاقات متميزة بدلاً من اثنين، فما الذي يمكن استنتاجه حول عدد الكم السبيني للجسيم المشحون؟

تماماً مثل الإلكترون، فإن سبين البروتون مساوٍ إلى  $1/2$  وله عزم مغناطيسي. (وفقاً للنظرية النووية، فإن هذا العزم يرجع إلى الحركة المدارية للكواركات داخل البروتون). يُفسر التركيب فائق الدقة لطيف الهدروجين بالتفاعل بين العزم المغناطيسي للبروتون والعزم المغناطيسي للإلكترون، وهو التفاعل المعروف باسم الترابط الدوراني-الدوراني. تختلف طاقة نظام بروتون-إلكترون اعتماداً على ما إذا كانت العزوم محاذية أم لا. تؤدي الانتقالات بين هذه الحالات (الانتقالات الاهتزازية-الدورانية) إلى إصدار فوتون بطول موجة يبلغ 21 cm، أي أن  $(\lambda \approx 21 \text{ cm})$  (في المجال الراديوي). إن الخط 21 cm في التحليل الطيفي الذري هو "بصمة" لغاز الهدروجين. استغل علماء الفلك هذا الخط الطيفي لرسم خريطة للأذرع الحلزونية للمجرات، والتي تتكون في معظمها من الهدروجين **(الشكل 16.8)**.



(a)

(b)

(c)

**الشكل 16.8** يستخدم التفاعل المغناطيسي بين الإلكترون والبروتون في ذرة الهدروجين لرسم خريطة للأذرع الحلزونية في المجرة Pinwheel (NGC 5457). (a) تظهر المجرة في الضوء المرئي، (b) شوهدت المجرة في إشعاع الهدروجين ذي طول موجة 21 cm، (c) الصورة المركبة من (a) و (b). لاحظ كيف يخترق الإشعاع الهدروجيني الغبار في المجرة لإظهار الأذرع الحلزونية بشكل واضح للغاية، في حين تظهر النواة المجرية بشكل أفضل في الضوء المرئي. (credit a: modification of work by ESA & NASA; credit b: modification of work by Fabian Walter).

يتطلب الوصف الكامل لحالة الإلكترون في ذرة الهدروجين خمسة أرقام كمية:  $n$  و  $l$  و  $m$  و  $s$  و  $m_s$ . يتضمن **الجدول 4.8** الأسماء والرموز والقيم المسموح بها لهذه الأرقام الكمية.

## الجدول 4.8 ملخص الأرقام الكمية للإلكترون في ذرة الهيدروجين

الاسم	الرمز	القيم المسموحة
رقم الكم الرئيسي	$n$	1, 2, 3, ...
العزم الزاوي المداري	$l$	0, 1, 2, ... $n - 1$
مسقط العزم الزاوي	$m$	0, $\pm 1, \pm 2, \dots \pm l$
السبين	$s$	1/2 (electrons)
مسقط السبين	$m_s$	$-1/2, + 1/2$

إن الرقمين الكميين ( $s$  and  $m_s$ ) صالحان للكثير من الجسيمات وليس فقط للإلكترونات. على سبيل المثال، الكواركات الموجودة في النواة الذرية هي أيضاً جسيمات تتمتع بنصف سبين كما سنرى لاحقاً. تساعد الأرقام الكمومية في تصنيف الجزيئات دون الذرية والدخول في نماذج علمية تحاول شرح كيف يعمل الكون.

## 4.8 مبدأ الاستبعاد والجدول الدوري The Exclusion Principle and the Periodic Table

### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- تفسير أهمية مبدأ الاستبعاد لباولي (Pauli's exclusion) لفهم التركيب الذري والروابط الجزيئية.
- تفسير بنية الجدول الدوري من حيث الطاقة الكلية والعزم الزاوي المداري وسبين الإلكترونات الفردية في الذرة.
- وصف التشكيل الإلكتروني للذرات في الجدول الدوري.

درسنا حتى الآن الهيدروجين فقط، أبسط عنصر كيميائي. لقد وجدنا أن الإلكترون الموجود في ذرة الهيدروجين يمكن تحديده بالكامل من خلال خمسة أرقام كمومية، هي:

$$\begin{aligned}
 n &: \text{رقم الكم الرئيسي} \\
 l &: \text{رقم الكم للعزم الزاوي المداري} \\
 m &: \text{رقم الكم لمسقط العزم الزاوي المغناطيسي} \\
 s &: \text{رقم الكم السبيني} \\
 m_s &: \text{رقم الكم لمسقط العزم الزاوي المغناطيسي}
 \end{aligned}
 \tag{8.34}$$

لبناء الحالة الأساسية (الأرضية) لذرة متعددة الإلكترونات متعادلة، تخيل أن تبدأ من نواة شحنة  $Z_e$  (أي نواة ذات عدد ذري  $Z$ )، ثم تضيف إلكترونات عددها  $Z$  الواحد تلو الآخر. افترض أن كل إلكترون يتحرك في حقل كهربائي متناظر كروي ينتج عن النواة وجميع الإلكترونات الأخرى في هذه الذرة. الافتراض صحيح لأن الإلكترونات موزعة عشوائياً حول النواة وتنتج حقلاً كهربائياً متوسطاً (وكموناً) متماثلاً كروياً. لا تتبع الطاقة الكامنة الكهربائية  $U(r)$  لكل إلكترون النموذج البسيط  $-1/r$  بسبب التفاعلات بين الإلكترونات، لكن اتضح أنه لا يزال بإمكاننا تصنيف كل حالة إلكترون على حدة بأرقام كمية  $(n, l, m, s, m_s)$  { رقم السبين  $s$  هو نفسه لجميع الإلكترونات، لذلك لن يتم استخدامه في هذا الجزء من الفصل}. يتم تفسير بنية الذرات وخصائصها الكيميائية جزئياً باستخدام مبدأ الاستبعاد لباولي: لا يمكن أن يكون لإلكترونين في الذرة القيم نفسها لجميع الأرقام الكمية الأربعة  $(n, l, m, m_s)$ .

يرتبط هذا المبدأ بخاصيتين من خصائص الإلكترونات: جميع الإلكترونات متطابقة ("إذا رأيت إلكترونًا واحدًا، فقد رأيتها جميعًا") ولديها سبين ( $s = 1/2$ ). يبين **الجدول 5.8** الأرقام الكمية للإلكترونات الموجودة في مدارات الذرة. وفقاً لمبدأ استبعاد باولي، لا يوجد صفان من الجدول لهما مجموعة الأرقام الكمية نفسها.

**الجدول 5.8 حالات ذرات الإلكترون** نظراً لمبدأ الاستبعاد لباولي، لا يوجد إلكترونان في الذرة لهما مجموعة الأرقام الأربعة نفسها.

$n$	$l$	$m$	عدد الإلكترونات في المدار الرئيس	عدد الإلكترونات في المدار الفرعي	رمز المدار الفرعي	$m_s$
1	0	0				$1/2$
1	0	0	2	2	1s	$-1/2$
2	0	0	8			$1/2$
2	0	0		2	2s	$-1/2$
2	1	-1				$1/2$
2	1	-1				$-1/2$
2	1	0				$1/2$
2	1	0		6	2p	$-1/2$
2	1	1				$1/2$
2	1	1				$-1/2$
3	0	0				$1/2$
3	0	0		2	3s	$-1/2$
3	1	-1				$1/2$
3	1	-1				$-1/2$
3	1	0				$1/2$
3	1	0		6	3p	$-1/2$
3	1	1	18			$1/2$
3	1	1				$-1/2$
3	2	-2				$1/2$
3	2	-2		10	3d	$-1/2$
3	2	-1				$1/2$
3	2	-1				$-1/2$
3	2	0				$1/2$
3	2	0				$-1/2$
3	2	1				$1/2$
3	2	1				$-1/2$
3	2	2				$1/2$
3	2	2				$-1/2$
3	2	2	$1/2$			
3	2	2	$-1/2$			

تقع الإلكترونات التي لها نفس عدد الكم الرئيس  $n$  في نفس المدار، وتشغل تلك التي لها نفس العدد  $l$  المدارات الفرعية. ويُشار إلى الإلكترون الموجود في الحالة  $n = 1$  لذرة الهيدروجين بالرمز  $1s$ ، حيث يشير الرقم الأول إلى المدار ( $n = 1$ ) والحرف يشير إلى المدار الفرعي (s,p,d,f) الموافقة إلى  $l = 0, 1, 2, 3$ . ويشار إلى إلكترونين في الحالة  $n = 1$  بالرمز  $1s^2$ ، حيث يُشير الرقم العلوي إلى عدد الإلكترونات. ويُشار إلى إلكترون في الحالة  $n = 2$  مع  $l = 1$  بالرمز  $2p$ . يعبر عن إلكترونين في الحالة  $n = 2$  و  $l = 0$  وثلاثة إلكترونات في الحالة  $n = 2$  و  $l = 1$  كما يلي  $2s^2 2p^3$ ، وهكذا. يُسمى هذا التمثيل لحالة الإلكترونات بالتشكيل الإلكتروني للذرة (electron configuration). ويبين **الجدول 8.6** التشكيل الإلكتروني للعديد من الذرات. تُسمى الإلكترونات الموجودة في الغلاف الخارجي للذرة بالإلكترونات التكافؤ. يتم تفسير الروابط الكيميائية بين الذرات في الجزيء عن طريق انتقال وتبادل إلكترونات التكافؤ.

**الجدول 6.8 التشكيلات الإلكترونية في الذرة، يشير الرمز (↑) إلى إلكترون مفرد في المدار الخارجي، في حين يشير الرمز (↓) إلى زوج من الإلكترونات ذات السبين العلوي والسفلي في المدار الخارجي.**

العنصر	التشكيل الإلكتروني	السبين
H	$1s^1$	(↑)
He	$1s^2$	(↑↓)
Li	$1s^2 2s^1$	(↑)
Be	$1s^2 2s^2$	(↑↓)
B	$1s^2 2s^2 2p^1$	(↑↓)(↑)
C	$1s^2 2s^2 2p^2$	(↑↓)(↑)(↑)
N	$1s^2 2s^2 2p^3$	(↑↓)(↑)(↑)(↑)
O	$1s^2 2s^2 2p^4$	(↑↓)(↑↓)(↑)(↑)
F	$1s^2 2s^2 2p^5$	(↑↓)(↑↓)(↑↓)(↑)
Ne	$1s^2 2s^2 2p^6$	(↑↓)(↑↓)(↑↓)(↑↓)
Na	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$	(↑)
Mg	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$	(↑↓)
Al	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$	(↑↓)(↑)

يعتمد الحد الأقصى لعدد الإلكترونات الموجودة في المدار الفرعي على قيمة رقم العزم الزاوي المداري  $l$ . بالنسبة لقيمة معينة، هناك حالات عزم زاوي مداري:  $2l+1$ . ومع ذلك، يمكن ملء كل من هذه الحالات بواسطة إلكترونين (سبين علوي وسبين سفلي، ↑، ↓). وبالتالي، فإن الحد الأقصى لعدد الإلكترونات في المدار الفرعي هو:

$$N = 2(2l + 1) = 4l + 2 \quad (8.35)$$

في المدار الفرعي  $2s$  أي ( $l = 0$ )، يكون العدد الأقصى للإلكترونات هو 2. وفي المدار الفرعي  $2p$  أي ( $l = 1$ ) فإن عدد الأقصى للإلكترونات هو 6. بناءً على ذلك يكون العدد الأقصى الكلي للإلكترونات في المدار  $n = 2$  (الذي يشمل كلاً من  $l = 0$  و

$l = 1$  من المدارات الفرعية ) هو  $2 + 6 = 8$ . وبشكل عام العدد الأقصى للإلكترونات في مدار معين  $n$  هو  $2n^2$ .

## مثال 5.8

### المدارات الفرعية والكلية لأجل $n = 3$

كم عدد المدارات الفرعية الموجودة في المدار  $n = 3$  ؟ وحدد كل مدار فرعي واحسب العدد الأقصى للإلكترونات التي تملأ كل منها، وأظهر أن العدد الأقصى للإلكترونات التي تملأ الذرة هو  $2n^2$

### خطة الحل

يتم تحديد المدارات الفرعية بواسطة قيمة  $l$ ، وبالتالي، نحدد أولاً قيم  $l$  المسموح بها، ثم نطبق المعادلة "الحد الأقصى لعدد الإلكترونات التي يمكن أن تكون في مدار فرعي  $= 2(2l + 1)$ " وذلك للعثور على عدد الإلكترونات في كل مدار فرعي.

### الحل:

من أجل  $n = 3$ ، نحن نعلم أن الرقم  $l$  يمكن أن يكون: 0, 1, 2، والتالي لدينا ثلاثة مدارات فرعية محتملة، ترميزها كما يلي:  $3s, 3p, 3d$ . ولقد رأينا بالفعل أن إلكترونين يمكن أن يوجدوا في الحالة  $s$  وستة إلكترونات في الحالة  $p$ ، ولكن دعونا نستخدم معادلة "الحد الأقصى لعدد الإلكترونات التي يمكن أن تكون في مدار فرعي  $= 2(2l + 1)$  لحساب العدد الأقصى في كل منها:

$$3s \rightarrow l = 0; \rightarrow 2(2l + 1) = 2(0 + 1) = 2$$

$$3p \rightarrow l = 1; \rightarrow 2(2l + 1) = 2(2 + 1) = 6$$

$$3d \rightarrow l = 2; \rightarrow 2(2l + 1) = 2(4 + 1) = 10$$

$$Total = 18$$

أي العدد الكلي للإلكترونات يساوي 18 في المدار  $n = 3$  ولدينا أيضاً المعادلة "الحد الأقصى لعدد الإلكترونات التي يمكن أن تكون في مدار تساوي  $2n^2$ " يعطي الحد الأقصى لعدد الإلكترونات في  $n = 3$  وبالتالي

$$Maximum \text{ number of electrons} = 2n^2 = 2(3)^2 = 18$$

أي العدد الأقصى للإلكترونات هو 18

### ملاحظة:

وبالتالي فإن العدد الإجمالي للإلكترونات في المدارات الفرعية الثلاثة الممكنة هو نفس الصيغة  $2n^2$  يُشار في الترميز الطيفي، إلى المدار  $n = 3$  الممتلئ بالرمز  $3s^2 3p^6 3d^{10}$ . لا تملأ المدارات الأساسية بطريقة بسيطة. قبل أن يتم ملء المدار  $n = 3$  بالكامل، على سبيل المثال، نبدأ في العثور على الإلكترونات في المدار  $n = 4$ .

يمكن فهم بنية الجدول الدوري (الشكل 17.8) من حيث المدارات الأساسية والمدارات الفرعية، وفي نهاية المطاف، الطاقة الكلية، والعزم الزاوي المداري وسبين الإلكترونات في الذرة. نترك المناقشة المفصلة للجدول الدوري لدورة الكيمياء - فنحن نرسم هنا فقط معالمها الأساسية. نفترض في هذه المناقشة أن الذرات معتدلة كهربائياً؛ أي لديها نفس العدد من الإلكترونات والبروتونات. (تذكر أن إجمالي عدد البروتونات في النواة الذرية يُسمى العدد الذري  $Z$ ).

أولاً، يتم ترتيب الجدول الدوري وفق أعمدة وصفوف. تتم قراءة هذا الجدول من اليسار إلى اليمين ومن الأعلى إلى الأسفل بترتيب زيادة العدد الذري  $Z$ . تشترك الذرات التي تنتمي إلى نفس العمود أو المجموعة الكيميائية في العديد من الخصائص الكيميائية. على سبيل المثال، ترتبط ذرات  $Li$  (الليثيوم) و  $Na$  (الصوديوم) (في العمود الأول) مع الذرات الأخرى بنفس الطريقة.

يوافق الصف الأول من هذا الجدول مع المدار 1s أي ( $l=0$ ) للذرة.

بالأخذ بالحسبان الإجراء الافتراضي لإضافة إلكترونات لذرة، واحد تلو الآخر. بالنسبة للهيدروجين (H) (على اليسار)، يُملأ المدار 1s إما بإلكترون مع سبين للأعلى أو للأسفل ( $\uparrow$  أو  $\downarrow$ ). تتم مشاركة هذا الإلكترون الوحيد بسهولة مع الذرات الأخرى، لذلك الهيدروجين نشط كيميائياً. بالنسبة للهيليوم (He) (أعلى اليمين)، يمتلئ المدار 1s بإلكترونين ذوي سبين علوي وسفلي ( $\uparrow\downarrow$ ). هذا يُشبع المدار 1s، لذلك تميل ذرة الهليوم إلى عدم مشاركة هذين الإلكترونين مع ذرات أخرى. يقال إن ذرة الهليوم غير نشطة كيميائياً، أو خاملة، أو نبيلة؛ وبالمثل، يُقال إن غاز الهليوم هو غاز حامل أو غاز نبيل.

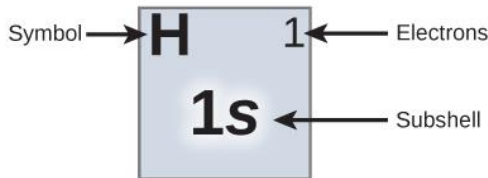
قم ببناء ذرة بإضافة ونزع البروتونات والنيوترونات والإلكترونات. كيف يتغير العنصر وشحنته وكتلته؟



تفضل بزيارة (PhET Explorations: Build a Atom (<https://openstaxcollege.org/l/21buildanatom>)) لاستكشاف

إجابات هذه الأسئلة.

Period	Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1		H 1 1s																	He 1 1s
2		Li 1 2s	Be 2											B 1 2p	C 2	N 3	O 4	F 5	Ne 6
3		Na 1 3s	Mg 2											Al 1 3p	Si 2	P 3	S 4	Cl 5	Ar 6
4		K 1 4s	Ca 2	Sc 1 3d	Ti 2	V 3	Cr 4	Mn 5	Fe 6	Co 7	Ni 8	Cu 9	Zn 10	Ga 1 4p	Ge 2	As 3	Se 4	Br 5	Kr 6
5		Rb 1 5s	Sr 2	Y 1 4d	Zr 2	Nb 3	Mo 4	Tc 5	Ru 6	Rh 7	Pd 8	Ag 9	Cd 10	In 1 5p	Sn 2	Sb 3	Te 4	I 5	Xe 6
6		Cs 1 6s	Ba 2	La *1 5d	Hf 2	Ta 3	W 4	Re 5	Os 6	Ir 7	Pt 8	Au 9	Hg 10	Tl 1 6p	Pb 2	Bi 3	Po 4	At 5	Rn 6
7		Fr 1 7s	Ra 2	Ac **1 6d	Rf 2	Db 3	Sg 4	Bh 5	Hs 6	Mt 7	Ds 8	Rg 9	Cn 10	Uut 1 7p	Fl 2	Uup 3	Lv 4		Uuo 6
				* Ce 1 4f	Pr 2	Nd 3	Pm 4	Sm 5	Eu 6	Gd 7	Tb 8	Dy 9	Ho 10	Er 11	Tm 12	Yb 13	Lu 14		
				** Th 1 5f	Pa 2	U 3	Np 4	Pu 5	Am 6	Cm 7	Bk 8	Cf 9	Es 10	Fm 11	Md 12	No 13	Lr 14		



**الشكل 17.8** الجدول الدوري للعناصر، والذي يبين تركيبه المدارات الأساسية المدارات الفرعية.

يتوافق الصف الثاني مع المدارات الفرعية 2s و 2p. على سبيل المثال الليثيوم (Li) (اليسار العلوي)، يُملأ المدار 1s بإلكترون بسبين علوي و سبين سفلي ( $\uparrow\downarrow$ )، ويملأ المدار 2s إما بإلكترون بسبين للأعلى أو بسبين للأسفل ( $\uparrow$  or  $\downarrow$ ). لذلك فإن التشكيل الإلكتروني هو  $1s^2 2s^1$  أو يمكن القول  $[He]2s$  حيث يشير [He] إلى نواة الهليوم. كما في حالة الهيدروجين، يمكن بسهولة مشاركة الإلكترون الوحيد الموجود في مداره الخارجي مع الذرات الأخرى. في حالة البريليوم (Be)، يُملأ المدار 2s بإلكترون بسبين للأعلى

وللأسفل ( $\uparrow \downarrow$ ) ، ويملك التشكيل الإلكتروني  $2s^2$  [He]. بعد ذلك، ننظر إلى الجانب الأيمن من هذا الجدول. بالنسبة إلى البورون (B)، يُملأ المداران 1s و 2s، بينما يحتوي المدار  $2p$  ( $l=1$ ) على إلكترونين بسبين للأعلى أو للأسفل ( $\uparrow \downarrow$ ). من الكربون (C) إلى النيون (Ne)، تتم تعبئة المدار  $2p$ . الحد الأقصى لعدد الإلكترونات في المدارات  $2p$  هو  $4l + 2 = 4(2) + 2 = 6$ ، بالنسبة إلى النيون (Ne)، يُملأ المدار 1s بالإلكترونين بسبين إلى للأسفل وللأعلى ( $\uparrow \downarrow$ )، ويُملأ المدار  $2p$  بستة إلكترونات ( $\uparrow \downarrow \uparrow \downarrow \uparrow \downarrow$ ). في هذه الحالة تُملأ المدارات الفرعية 1s و 2s و 2p، كما في حالة الهليوم، تميل ذرة النيون إلى عدم مشاركة إلكتروناتها مع الذرات الأخرى. تتكرر عملية ملء الإلكترونات في الصف الثالث. ومع ذلك، بدءاً من الصف الرابع، يتم كسر هذا النمط من الترتيب. ويتم إعطاء الترتيب التالي لملء الإلكترونات:

$$1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 4s, 3d, 4p, 5s, 4d, 5p, 6s, 4f, 5d, 6p, 7s, \dots$$

لاحظ أنه يتم ملء المدارات الفرعية 3d و 4d و 4f و 5d (بالخط الغامق) بالترتيب ويحدث هذا بسبب التفاعلات بين الإلكترونات في الذرة، والتي أهملناها حتى الآن. إن **المعادن الانتقالية** هي عناصر بين العمودين الأولين والأعمدة الستة الأخيرة التي تحتوي على إلكترونات تملأ المدارات الفرعية d أي ( $l=1$ ). كما هو متوقع، يتم ترتيب هذه الذرات وفق  $4l + 2 = 4(2) + 2 = 10$  أعمدة. يمكن فهم بنية الجدول الدوري من حيث تكميم الطاقة الكلية ( $n$ )، والعزم الزاوي المداري ( $l$ ) والسبين ( $s$ ). يتوافق العمودين الأولين مع المدارات الفرعية s أي ( $l=0$ )، تتوافق الأعمدة الستة التالية مع المدارات الفرعية p أي ( $l=1$ )، والفجوة بين هذه الأعمدة مع المدار الفرعي d أي ( $l=2$ ).

يعطي الجدول الدوري أيضاً معلومات عن الروابط الجزيئية. لرؤية ذلك، ضع في اعتبارك الذرات الموجودة في العمود في أقصى اليسار (ما يُسمى بالمعادن القلوية مثل: Li و N و K). تحتوي هذه الذرات على إلكترون واحد في المدار الفرعي 2s، والذي يمنح إلكترونات بسهولة للذرات الأخرى. في المقابل، فإن الذرات في العمود الثاني إلى اليمين (الهالوجينات: مثل Cl و F و Br) تكون بخيلة نسبياً في مشاركة إلكتروناتها. وستقبل هذه الذرات إلكترون، لأنها تحتاج إلى مجرد إلكترون واحد في مدارها الأخير ("لتصبح نبيلة"). لذلك، إذا تم وضع ذرة Na على مقربة من ذرة Cl، فإن ذرة Na سوف تمنح بحرية إلكترون 2s الأمر الذي ستستقبله ذرة Cl بشغف. تصبح في هذه العملية، ذرة Na (شحنة معتدلة في الأصل) ذات شحنة موجبة وتصبح Cl (شحنة معتدلة في الأصل) سالبة الشحنة. وبالتالي تُسمى هذه الذرات المشحونة بالأيونات أو الشوارد. في هذه الحالة، تكون الأيونات  $Na^+$  و  $Cl^-$ ، مع الإشارة إلى شحنتها. يشكل التجاذب الكهربائي كولون بين هذه الأيونات جزيء NaCl (الملح). الرابطة الكيميائية بين اثنين من هذه الأيونات تُسمى **بالرابطة الأيونية (ionic bond)**. هناك أنواع كثيرة من الروابط الكيميائية. على سبيل المثال، في جزيء السينيحين تتم مشاركة إلكترونين  $O_2$  بالتساوي بين الذرتين والرابطة بين ذرات السينيحين هي مثال على **الرابطة التساهمية (التشاركية)**

## 5.8 | الأطياف الذرية والأشعة السينية (X-Ray) Atomic spectra and x-rays

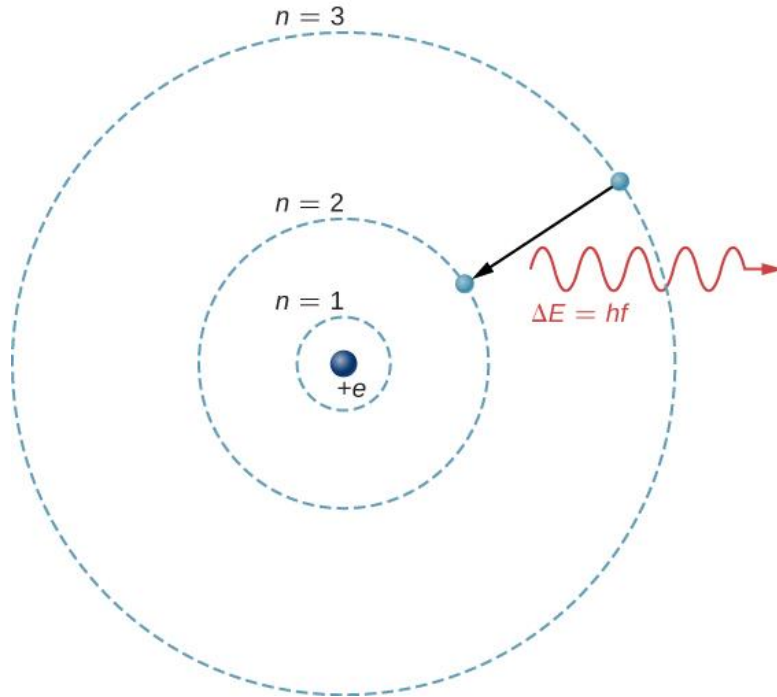
### الأهداف التعليمية

- في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:
- وصف امتصاص الإشعاع وإصداره من حيث السويات الطاقة الذرية والفروق الطاقية.
- استخدام الأرقام الكمومية لتقدير طاقة وتواتر وطول موجة الفوتونات الناتجة عن الانتقالات الذرية في الذرات متعددة الإلكترونات.
- شرح مفاهيم الإشعاع في سياق الفلورة الذرية والأشعة السينية.

توفر دراسة الأطياف الذرية معظم معرفتنا حول الذرات. في العلوم الحديثة، تستخدم الأطياف الذرية لتحديد أنواع الذرات في الأجسام المختلفة، من المجرات البعيدة إلى عينات الدم في مسرح الجريمة. الأساس النظري للطيف الذري هو انتقال الإلكترونات بين السويات الطاقة في الذرات. على سبيل المثال، إذا انتقل الإلكترون الموجود في ذرة الهيدروجين من المدار  $n = 3$  إلى المدار  $n = 2$ ، فإن الذرة تُصدر فوتوناً بطول موجة:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{h \cdot c}{h \cdot f} = \frac{hc}{\Delta E} = \frac{hc}{E_3 - E_2} \quad (8.36)$$

حيث  $\Delta E = E_3 - E_2$  هي الطاقة التي يحملها الفوتون وإن  $hc = 1940 \text{ eV} \cdot \text{nm}$ ، يظهر بعد مرور هذا الإشعاع من خلال مقياس الطيف خط طيفي حاد على الشاشة. يبين الشكل 18.8 نموذج بور لهذه العملية. إذا امتص هذا الإلكترون فوتوناً يحمل الطاقة  $\Delta E$ ، فسيعود هذا الإلكترون إلى المدار  $n = 3$ . (درسنا نموذج بور في وقت سابق، في فصل الفوتونات وأمواج المادة).



**الشكل 18.8** انتقال إلكترون من المدار  $n=3$  إلى المدار  $n=2$  في ذرة الهيدروجين.

لفهم الانتقالات الذرية في الذرات متعددة الإلكترونات، من الضروري النظر في العديد من التأثيرات، بما في ذلك تنافر كولون بين الإلكترونات والتفاعلات المغناطيسية الداخلية (الترباط سبين-سبين، الترباط المداري - السبين). لحسن الحظ، يمكن فهم العديد من خصائص هذه الجمل عبر إهمال التفاعلات بين الإلكترونات وتمثيل كل إلكترون بواسطة تابع الموجة أحادي الجسم  $\psi_{nlm}$ . يجب أن تخضع الانتقالات الذرية إلى قواعد الاصطفاء selection rules. وهذه القواعد مستمدة من مبادئ ميكانيك الكم والتناظر. تصنف قواعد الاختيار الانتقالات إما مسموح بها أو محظورة. (لا تحدث التحولات المحظورة، ولكن يكون احتمال الانتقال المحظور النموذجي صغيراً جداً) من أجل الذرة الشبيهة بالهيدروجين، تخضع الانتقالات الذرية التي تتضمن تفاعلات كهرومغناطيسية (إصدار وامتصاص الفوتونات) إلى قاعدة الاصطفاء التالية:

$$\Delta l = \pm 1,$$

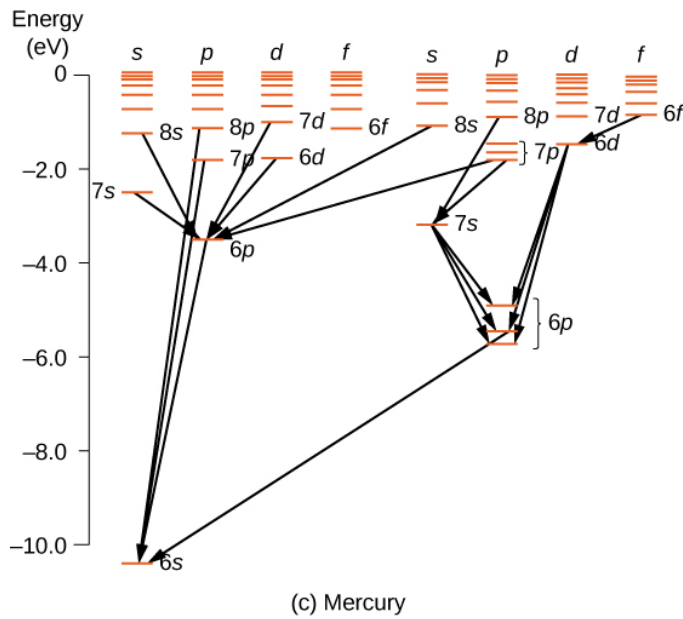
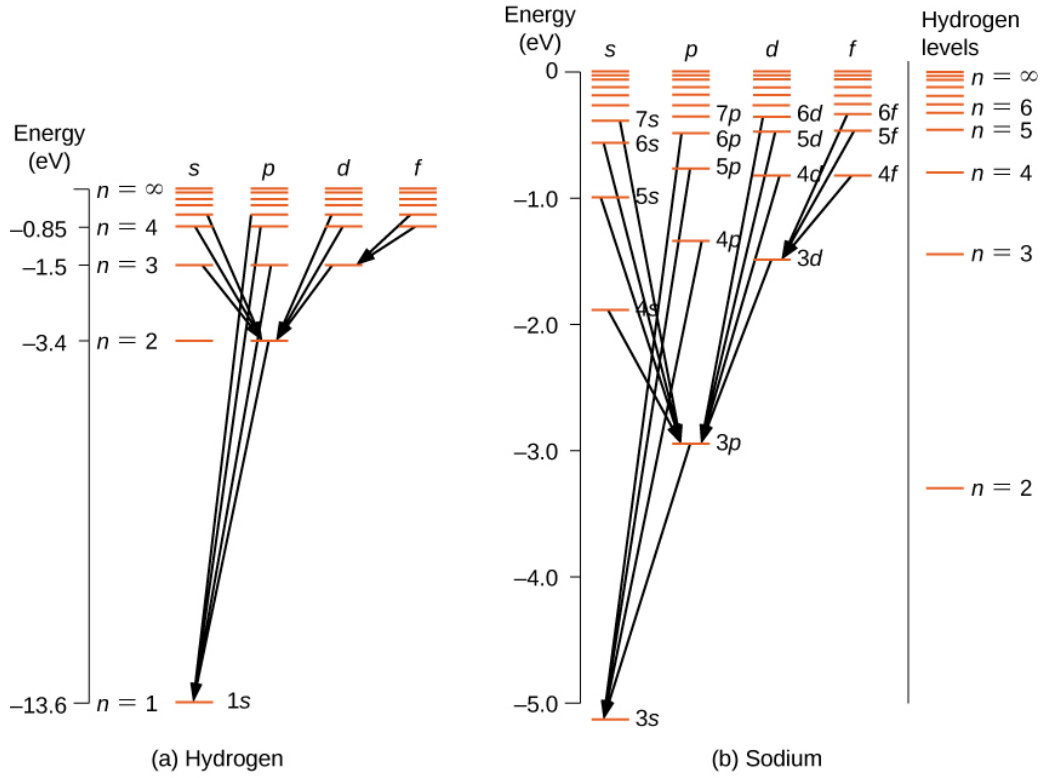
(8.37)

حيث يرتبط  $l$  بمطال العزم الزاوي المداري كما يلي:

$$L = \sqrt{l(l+1)}\hbar \quad (8.38)$$



تطبق قواعد مماثلة في حالة الذرات متعددة الإلكترونات. لتوضيح هذه القاعدة، نأخذ بالحسبان الانتقالات الذرية الملحوظة في الهيدروجين (H) والصوديوم (Na) والزرنيق (Hg) (الشكل 19.8). تتوافق الخطوط الأفقية في هذا المخطط مع سويات الطاقة الذرية، وتظهر الانتقالات المسموح بها بموجب قاعدة الاصطفاء هذه بخطوط مرسومة بين هذه السويات. تكون طاقات هذه الحالات من رتبة عدد قليل من eV، وتكون الفوتونات الصادرة عن هذه الانتقالات في المجال المرئي. من الناحية الفنية، يمكن للانتقالات الذرية أن تعارض قاعدة الاصطفاء، ولكن مثل هذه الانتقالات غير شائعة.



**الشكل 19.8** مخططات السويات الطاقة (a) للهيدروجين، (b) للصوديوم، (c) للزرنيق. وللمقارنة، تم عرض السويات الطاقة للهيدروجين مع مخطط الصوديوم.

تحتوي ذرة الهيدروجين على أبسط مخطط للسويات الطاقية. إذا أهملنا سبين الإلكترون، فإن جميع الحالات التي لها القيمة  $n$  نفسها وتملك الطاقة الكلية نفسها. ومع ذلك، تشطر (تقسم) حالات الترابط المداري- السبين ( $n=2$ ) إلى حالتين من العزم الزاوي ولهما طاقتان مختلفتان فيما بينهما قليلاً ( $S$  و  $p$ ). ( لا يمكن إزاحة هذه السويتين عمودياً، لأن الفرق الطاقى بينهما الطاقة صغير جداً، بحيث لا يظهر في هذا الرسم التخطيطي). وبالمثل تشطر حالات الترابط المداري-السبيني  $n=3$  إلى ثلاث حالات عزم زاوي ( $s$  و  $p$  و  $d$ ).

المخطط البياني للسويات الطاقية للهيدروجين يشبه حالة الصوديوم، لأن لكلتا الذرتين إلكترون واحد في الغلاف الخارجي. يتحرك إلكترون التكافؤ في الصوديوم في الحقل الكهربائي للنواة المحمية بالإلكترونات الموجودة في مداراتها الداخلية، لذلك لا تواجه قوة كولون البسيطة  $1/r$  وتعتمد طاقته الكلية على كل من  $n$  و  $l$ . ومن المثير للاهتمام، أن للزئبق مخططين منفصلين للسويات الطاقية، يتوافق هذان المخططان مع حالتي سبين إلكترونات التكافؤ  $6s$ .

## مثال 6.8

### مزاج الصوديوم

يتم تحليل طيف الصوديوم بواسطة مقياس الطيف. ويلاحظ خطان متباعداً بطول موجة لكل منهما  $589.00\text{nm}$  و  $589.59\text{nm}$ . (a) إذا توافق المزاج مع إلكترون مثار (التكافؤ)، والذي ينتقل من حالة مثارة إلى الحالة  $3s$ ، فما هو العزم الزاوي للإلكترون الأصلي؟ (b) ما هو الفرق الطاقى بين هاتين الحالتين المثارتين؟

### خطة الحل

ينتمي الصوديوم والهيدروجين إلى نفس العمود أو المجموعة الكيميائية في الجدول الدوري، لذا فإن الصوديوم "يشبه الهيدروجين". يمكن إثارة الإلكترون الأبعد (الخارجي) في الصوديوم في المدار الفرعي  $3s$  ( $l=0$ ) إلى سوية طاقة أعلى. بالنسبة للهيدروجين، يجب أن تلتزم الانتقالات اللاحقة إلى سويات طاقة أخفض بقاعدة الاصطفاء:

$$\Delta l = \pm 1$$

يجب علينا أولاً تحديد العدد الكمي للحالة الأولية التي تلي قاعدة الاصطفاء. ثم ، يمكننا استخدام هذا الرقم لتحديد مطال العزم الزاوي المداري للحالة الأولية.

### الحل

(a) الانتقالات المسموح بها يجب أن تخضع لقاعدة الاصطفاء. إذا كان العدد الكمي للحالة الأولية هو  $l=0$  ، فيكون الانتقال محظوراً لأن  $\Delta l=0$ . إذا كان العدد الكمي للحالة الأولية هو  $l=2, 3, 4, \dots$  ،... فيُحظر الانتقال لأن  $\Delta l > 1$ . لذلك ، يجب أن يكون رقم الكم للحالة الأولية هو  $l=1$  العزم الزاوي المداري للحالة الأولية هو:

$$L = \sqrt{l(l+1)}\hbar = 1.41\hbar$$

(b) لأن الحالة النهائية لكلا الانتقالين هي نفسها ( $3s$ )، فيساوي الفرق في طاقة الفوتونات الفرق بين طاقتي الحالتين المثارتين. باستخدام المعادلة:

$$\Delta E = hf = f \left( \frac{c}{\lambda} \right)$$

وبالتالي لدينا:

$$\Delta E = hc \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)$$

$$= (4.14 \times 10^{-15} \text{ eVs}) (3.00 \times 10^8 \text{ m/s}) \times \left( \frac{1}{589.00 \times 10^{-9} \text{ m}} - \frac{1}{589.59 \times 10^{-9} \text{ m}} \right)$$

$$= 2.11 \times 10^{-3} \text{ eV.}$$

### ملاحظة:

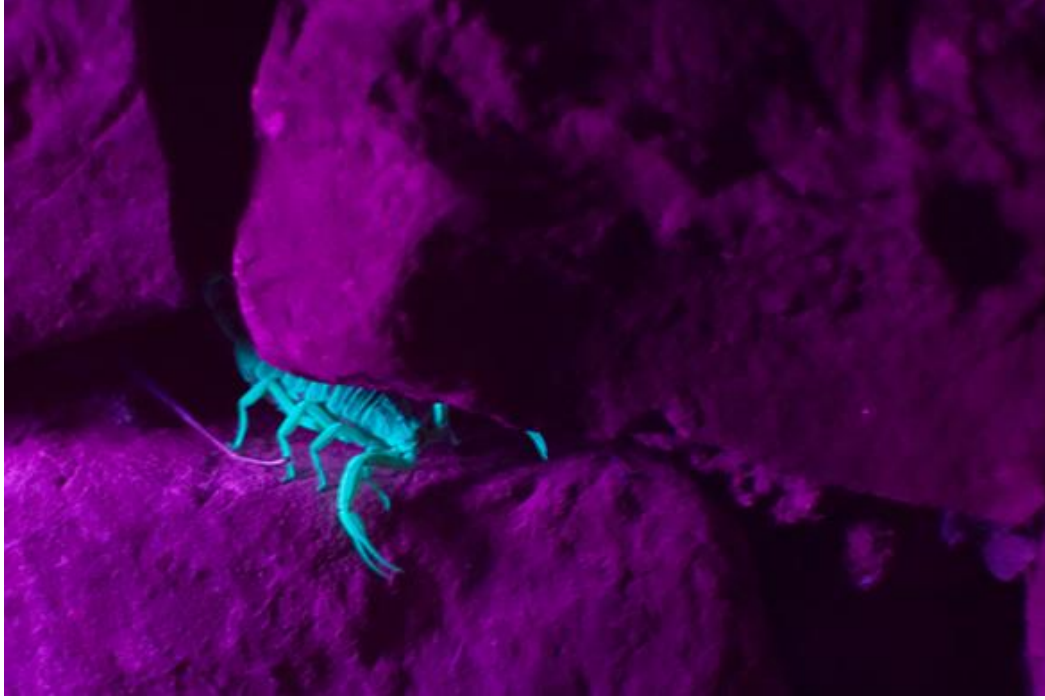
لفهم صعوبة قياس فرق الطاقة هذا، نقارن هذا الفارق بمتوسط طاقة الفوتونين الصادرين خلال الانتقال. لأن متوسط طول الموجة البالغ 589.30nm، فإن متوسط طاقة الفوتونات هو:

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(4.14 \times 10^{-15} \text{ eVs})(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})}{589.30 \times 10^{-9} \text{ m}} = 2.11 \text{ eV}$$

يبلغ الفرق الطاقي  $\Delta E$  نحو 0.1% (جزء واحد في 1000) من هذه الطاقة المتوسطة. ومع ذلك، يمكن قياس هذا الفرق الطاقي باستخدام مقياس الطيف الحساس.

### الفلورة الذرية

تحدث **الفلورة** عند إثارة إلكترون في الذرة عدة خطوات أعلى من حالته الأساس (الأرضية) من خلال امتصاصه لفوتون الأشعة فوق البنفسجية عالية الطاقة (uv). عند إثارة إلكترون، هناك طريقتان لإزالة إثارته. يمكن للإلكترون أن يرجع إلى حالته الأساس ومع إصدار فوتون بطاقة الإثارة الحادثة نفسها، أو أن ينتقل (الإلكترون) بسلسلة من الخطوات الصغيرة، مع إصدار عدة فوتونات ذات طاقة منخفضة. قد تكون بعض هذه الفوتونات في الحقل المرئي. يمكن أن تجعل صبغة الفلورة في الملابس الألوان تبدو أكثر إشراقاً في ضوء الشمس عن طريق تحويل الأشعة فوق البنفسجية إلى ضوء مرئي. مصابيح الفلورة أكثر كفاءة في تحويل الطاقة الكهربائية إلى ضوء مرئي من الفلمنت المتوهج (حوالي أربعة أضعاف الكفاءة). يُظهر **الشكل 20.8** عقرباً مضاءة بمصباح UV. تصدر البروتينات القريبة من سطح الجلد ضوء أزرق مميز.

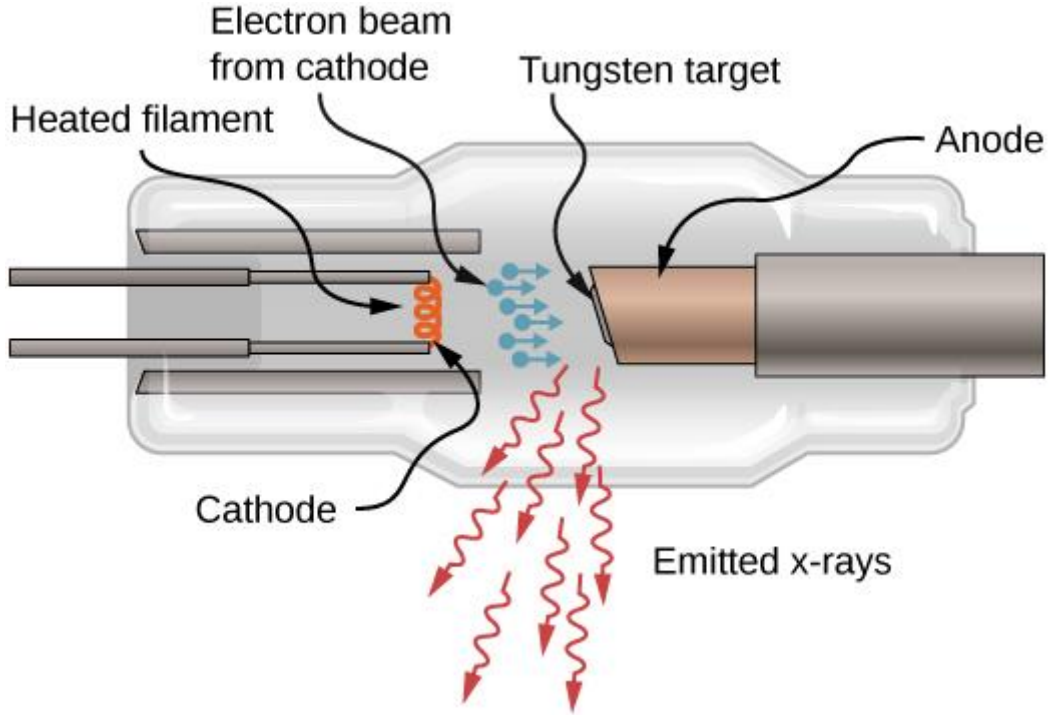


**الشكل 20.8** يظهر العقرب باللون الأزرق عند إضاءته بالأشعة فوق البنفسجية UV .  
(credit: Ken Bosma)

### الأشعة السينية

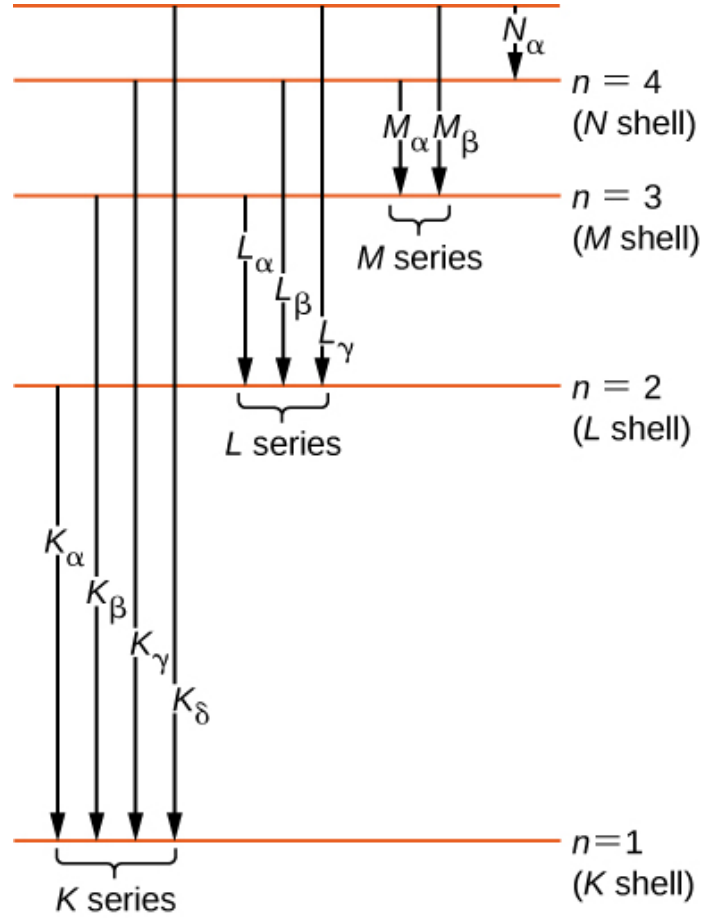
تمكننا دراسة الانتقالات بين السويات الطاقية في الذرة من فهم الأشعة السينية وتقانة هذه الأشعة. مثل كل الأشعة الكهرطيسية، تتكون الأشعة السينية من فوتونات. تصدر فوتونات الأشعة السينية عند انتقال الإلكترونات الموجودة في المدارات الخارجية للذرة إلى المدارات الداخلية. لا تُصدر ذرات الهيدروجين الأشعة السينية، لأن سويات طاقة الإلكترون متقاربة بشكل وثيق للغاية، بحيث لا تسمح بإصدار إشعاعات عالية التردد. وتكون الانتقالات من هذا النوع عادةً محظورة لأن السويات الأقل تكون مملوءة بالإلكترونات ومع ذلك، إذا كان هناك مدار داخلي شاغر (إلكترون داخلي مفقود، ربما يكون مقتلع من الذرة نتيجةً لاصطدامه بإلكترون فائق السرعة)، يمكن للإلكترون من إحدى المدارات الخارجية أن ينتقل لملء هذا الفراغ. تكون فجوة الطاقة لمثل هذا الانتقال كبيرة نسبياً، لذا يكون الطول الموجي لفوتون الأشعة السينية قصيراً نسبياً. يمكن أيضاً إنتاج الأشعة السينية عن طريق قذف هدف معدني بإلكترونات عالية الطاقة كما هو مبين في **الشكل 21.8**. يُلاحظ من هذا الشكل، أنه يتم تسخين الإلكترونات بواسطة سلك كهربائي (فلمنت) وتسريعها بواسطة حقل كهربائي إلى هدف التنغستن. وفقاً للنظرية الكلاسيكية للكهرطيسية، يؤدي تسريع أي جسيم مشحون إلى إصدار الأشعة. وبالتالي، عندما يصطدم الإلكترون بهدف التنغستن، يتباطأ فجأة ويصدر هذا الإلكترون إشعاع الكبح **braking radiation**. (يشير إشعاع الكبح إلى أن الإشعاع الناتج عن أي جسيم مشحون يتباطأ خلال الوسط). في هذه الحالة، يحتوي إشعاع الكبح على مجموعة مستمرة من الترددات، لأن الإلكترونات سوف تصطدم بذرات الهدف بطرق مختلفة.

إشعاع الكبح ليس هو النوع الوحيد من الإشعاع الناتج عن هذا التفاعل. في بعض الحالات، يصطدم الإلكترون مع إلكترون داخلي آخر من ذرات الهدف، ويطرده إلكترون من هذه الذرة - نمط كرة البلياردو. يتم ملء الحالة الفارغة بمهبط (انتقال) إلكترون موجود في مدار أعلى إلى هذه الحالة (انخفاض في السوية الطاقية) مع إصدار فوتون الأشعة السينية.



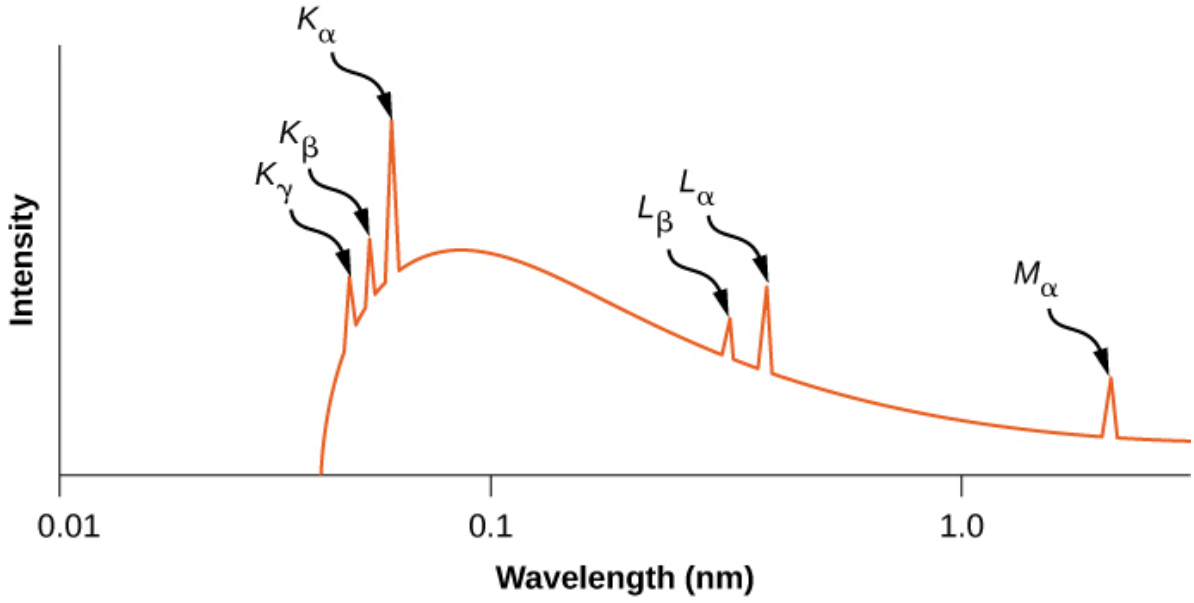
**الشكل 21.8** مخطط أنبوب الأشعة السينية. تصدر الأشعة السينية من هدف التنغستن.

تاريخياً، جرى ترميز الخطوط الطيفية للأشعة السينية بالحروف (K, L, M, N, ...)، تتوافق هذه الحروف مع المدارات الذرية ( $n = 1, 2, 3, 4, \dots$ ). يرمز للأشعة السينية التي تنتج عن الانتقال من أي مدار عالٍ إلى المدار K أي ( $n = 1$ ) بالرمز k أي (K X-rays). وتُسمى الأشعة السينية التي يتم إنتاجها أثناء الانتقال من المدار L أي ( $n = 2$ ) بالأشعة السينية  $K_{\alpha}$  أي  $K_{\alpha}$  X-rays، ولأشعة السينية التي يتم إنتاجها خلال الانتقال من مدار M أي ( $n = 3$ ) بالأشعة السينية  $K_{\beta}$  أي  $K_{\beta}$  X-rays، وكما تُسمى الأشعة السينية التي تصدر عن الانتقال من المدار N أي ( $n = 4$ ) بالأشعة السينية  $K_{\gamma}$  أي  $K_{\gamma}$  X-rays، وهكذا دواليك. الانتقالات من المدارات العالية إلى المدارات L و M تكون بشكل مشابه. يتم تمثيل هذه التحولات بواسطة مخطط السويات الطاقة المبين في الشكل 22.8.



**الشكل 22.8** مخطط إنتقالات الأشعة السينية في الذرة.

يوضح **الشكل 23.8** توزيع أطوال أمواج الأشعة السينية الناتجة عن صدم المعدن بجزمة من الإلكترونات. تظهر انتقالات الأشعة السينية في معدن الهدف على أنها قمم عند أعلى منحني إشعاع الكبح. وتسمى ترددات الفوتونات المقابلة للقمم في توزيع الأشعة السينية بالترددات المميزة، وذلك نظراً لإمكانية استخدامها في تحديد نوع المعدن المستهدف. يتوافق الطول الموجي الحاد (أقل بقليل من القمة  $K_\gamma$ ) مع الإلكترون الذي يفقد طاقته بالكامل على فوتون واحد. تكون الإشعاعات للأطوال الموجية القصيرة محظورة بسبب الحفاظ الطاقة.



**الشكل 23.8** طيف الأشعة السينية الناتج عن هدف من الفضة. تتوافق القمم مع الترددات المميزة للأشعة السينية الصادرة عن الفضة عندما تصطدم بحزمة إلكترونية.

### مثال 7.8

#### أشعة سينية من الألمنيوم

حساب الطاقة المميزة وتردد الأشعة السينية  $K_\alpha$  للألمنيوم ( $Z = 13$ ).

#### خطة الحل

يتم إنتاج X-ray  $K_\alpha$  بواسطة انتقال الإلكترون من المدار L أي ( $n = 2$ ) إلى المدار K أي ( $n = 1$ ). يرى إلكترون في المدار L يحمل الشحنة  $Z = 13 - 1 = 12$ ، لأن إلكترون واحد في المدار K يقي شحنة النواة. (تذكر أنه لا يوجد إلكترونان في المدار K لأن حالة الإلكترون الآخر شاغرة). يمكن حساب تردد الفوتون الصادر من فرق الطاقة بين المدارين L و K.

#### الحل

يبلغ الفرق الطاقي بين المدارين L و K في ذرة الهيدروجين هو 10.2 eV. على افتراض أن إلكترونات أخرى في المدار L أو في مدارات أعلى طاقة لا تقي من شحنة النواة، فإن فرق الطاقة بين المدارين L و K في الذرة مع  $Z = 13$  هو تقريباً:

$$\Delta E_{L \rightarrow K} \approx (Z - 1)^2 (10.2 \text{ eV}) = (13 - 1)^2 (10.2 \text{ eV}) = 1.47 \times 10^3 \text{ eV} \quad (8.39)$$

بناءً على العلاقة  $f = (\Delta E_{L \rightarrow K}) / h$  يكون تردد الأشعة السينية:

$$f = \frac{1.47 \times 10^3 \text{ eV}}{4.14 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}} = 3.55 \times 10^{17} \text{ Hz}$$

#### ملاحظة

يكون طول الموجة النموذجي للأشعة السينية في المجال: 0.1-10 nm، وبالتالي يكون طول الموجة:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3.0 \times 10^8 \text{ m/s}}{3.55 \times 10^{17} \text{ Hz}} = 8.5 \times 10^{-10} = 0.85 \text{ nm.}$$

وبالتالي ينتج عن الانتقال  $L \rightarrow K$  في الألمنيوم أشعة سينية.

يوفر توليد الأشعة السينية اختباراً مهماً لميكانيك الكم. وفقاً لنموذج بور تعتمد طاقة الأشعة السينية  $K_\alpha$  على شحنة النواة أو العدد الذري  $Z$ . إذا كانت  $Z$  كبيرة، فإن قوى كولون في الذرة كبيرة، وتكون الفروق الطاقية ( $\Delta E$ ) كبيرة، وبالتالي، فإن طاقة الفوتونات الصادرة كبيرة. للتوضيح، فكر في إلكترون واحد في ذرة متعددة الإلكترونات. بإهمال التفاعلات بين الإلكترونات، فإن السويات الطاقية المسموح بها هي:

$$E_n = -\frac{z^2 (13.6 \text{ eV})}{n^2} \quad (8.40)$$

حيث:  $n = 1, 2, \dots$  و  $Z$  هو العدد الذري للنواة. ومع ذلك، فإن الإلكترون الموجود في المدار  $L$  أي ( $n = 2$ ) "يرى" الشحنة  $Z - 1$ ، لأن إلكترون واحد في المدار  $K$  يبق من شحنة النواة. (تذكر أن هناك إلكترونات واحداً فقط في المدار  $K$ ، لأن الإلكترون الآخر "تمت إزالته"). لذلك، فإن الطاقة التقريبية للإلكترون في المدارين  $L$  و  $K$  هي:

$$E_L \approx -\frac{(Z-1)^2 (13.6 \text{ eV})}{2^2}$$

$$E_K \approx -\frac{(Z-1)^2 (13.6 \text{ eV})}{1^2}$$

وتكون الطاقة التي يحملها الفوتون عند الانتقال من المدار  $L$  الى المدار  $K$ :

$$\begin{aligned} \Delta E_{L \rightarrow K} &= (Z-1)^2 (13.6 \text{ eV}) \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right) \\ &= (Z-1)^2 (10.2 \text{ eV}) \end{aligned}$$

حيث  $Z$  العدد الذري. بشكل عام، تكون طاقة فوتون الأشعة السينية من أجل الانتقال من مدار خارجي إلى المدار  $K$ :

$$\Delta E_{L \rightarrow K} = h.f = \text{const} \times (Z-1)^2$$


أو بشكل اخر:

$$(Z-1) = \text{const} \sqrt{f} \quad (8.41)$$

حيث  $f$  التردد الموافق للأشعة  $K_\alpha$  X-ray. هذه المعادلة هي قانون موزلي (Moseley's law). من أجل قيم كبيرة للعدد الذري  $Z$ ، يكون لدينا تقريباً:

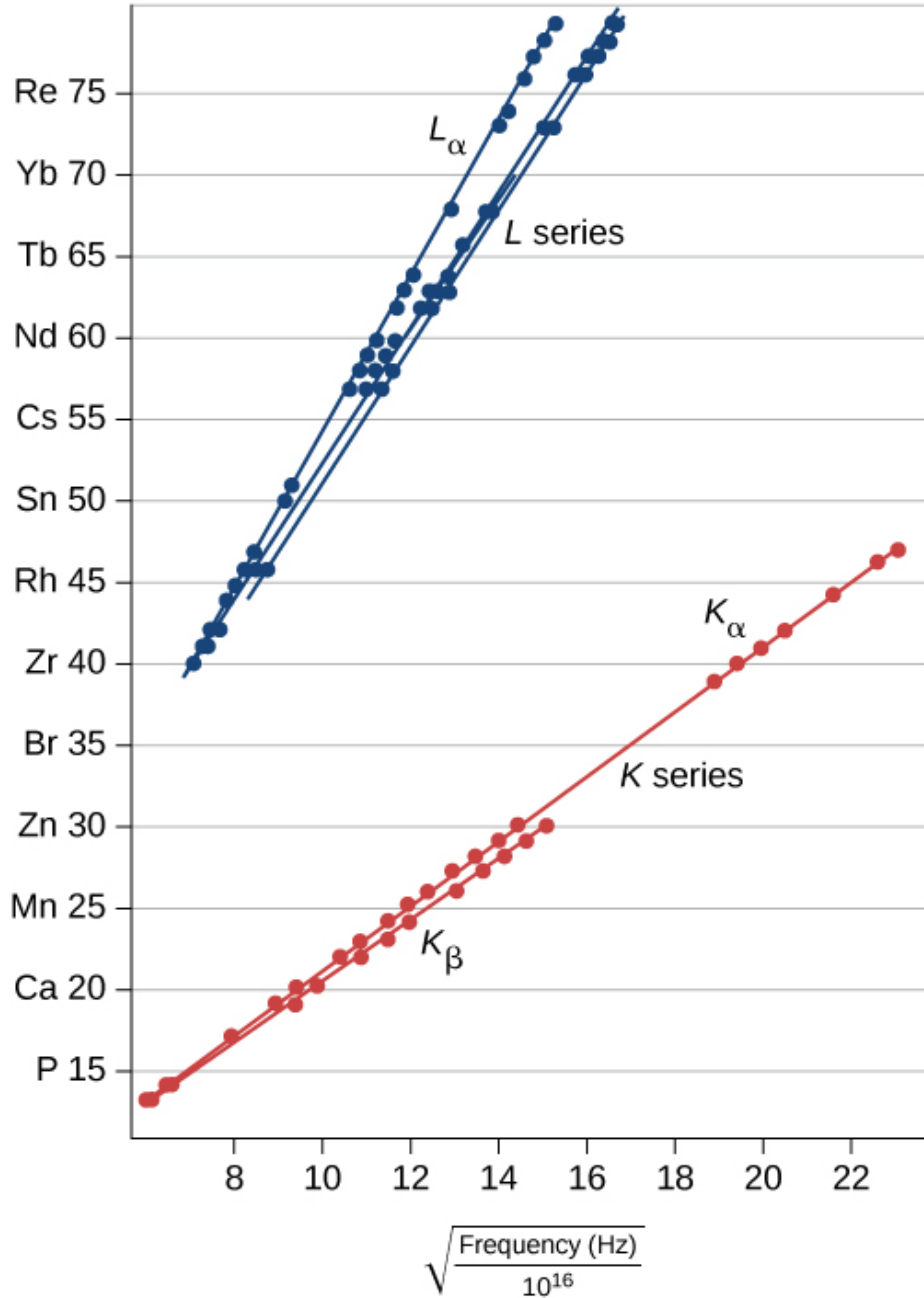
$$Z \approx \text{const} \sqrt{f}$$

يمكن التحقق من هذا التنبؤ عن طريق قياس  $f$  لمجموعة متنوعة من الأهداف المعدنية. يتم دعم هذا النموذج إذا كانت تابعة  $Z$  للمتحول  $\sqrt{f}$  خطية، ويُسمى منحنى Moseley. يظهر الشكل 24.8 مقارنة بين تنبؤات النموذج والنتائج التجريبية لكل من سلسلة  $K$  و  $L$ . تدعم المعطيات النموذج الذي ينص على إصدار الأشعة السينية عندما يهبط إلكترون المدار الخارجي لملء شاغر في الغلاف الداخلي.

 **3.8 تحقق من فهمك:** يتم إنتاج الأشعة السينية عن طريق قذف هدف معدني بإلكترونات عالية الطاقة. إذا تم استبدال الهدف بأخر له رقم أكبر مرتين، فما الذي يحدث لتردد الأشعة السينية؟



## Moseley Plot of Characteristic X-Rays



**الشكل 24.8** مخطط موزلي (Moseley plot). تم أخذ هذه المنحنيات البيانية من منحنيات البيانية الأصلية لموزلي.

(H. G. J. Moseley, Philos. Mag. (6) 77:703, 1914)

### مثال 8.8

#### طاقة الأشعة السينية المميزة

حساب الطاقة التقريبية للأشعة السينية  $K_{\alpha}$  من مصعد تنغستن في أنبوب الأشعة السينية.

#### خطة الحل

يمثل زوج من إلكترونات المدار K. عند حدوث فراغ (شاغر) في هذا المدار، وبالتالي سوف يغادر إلكترون واحد. ولذلك فإن الشحنة الفعالة للإلكترون في المدار L هي  $Z - 1$  بدلاً من  $Z$ . وتكون الشحنة الفعالة في حالة التنغستن ( $Z=74$ ) مساوية 73.

يمكن استخدام هذا الرقم لحساب الفرق الطاقي بين المدارين L و K، وبالتالي الطاقة التي يحملها فوتون بعد الانتقال  $L \rightarrow K$ .

### الحل

القيمة الفعالة للشحنة Z هي 73، وبالتالي تعطى طاقة  $K_{\alpha}$  X-ray كمايلي:

$$E_{K_{\alpha}} = \Delta E = E_i - E_f = E_2 - E_1$$

حيث:

$$E_1 = -\frac{Z^2}{1^2} E_0 = -\frac{73^2}{1} (13.6 \text{ eV}) = -72.5 \text{ keV}$$

ولدينا ايضاً:

$$E_2 = -\frac{Z^2}{2^2} E_0 = -\frac{73^2}{4} (13.6 \text{ eV}) = -18.1 \text{ keV}$$

وبالتالي:

$$E_{K_{\alpha}} = -18.1 \text{ keV} - (-72.5 \text{ keV}) = 54.4 \text{ keV}$$

### ملاحظة:

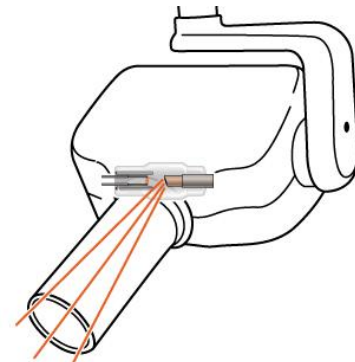
إن طاقة الفوتونات الكبيرة هذه نموذجية للأشعة السينية. وتصبح طاقة الأشعة السينية أكبر بشكل تدريجي بالنسبة للعناصر الثقيلة لأن طاقتها تزيد تقريباً كتابع للمتحول  $Z^2$ . يلزم تطبيق كمون تسريع يزيد على 50 000 V لاقتلاع إلكترون داخلي من ذرة التنغستين.

### تقنية الأشعة السينية

للأشعة السينية العديد من التطبيقات، كما هو الحال في التشخيص الطبي (**الشكل 25.8**)، أيضاً فحص الأمتعة في المطارات (**الشكل 26.8**)، حتى الكشف عن الشقوق في المكونات الأساسية للطائرة. تنتج صور الأشعة السينية بسبب الظلال. نظراً لأن فوتونات الأشعة السينية لديها طاقة عالية، فإنها تخترق المواد غير الشفافة للضوء المرئي. كلما زادت طاقة فوتون الأشعة السينية، زاد عدد المواد التي يخترقها. ويرتبط عمق الاختراق بكثافة المادة، وكذلك بطاقة الفوتون. كلما كانت المادة أكثر كثافة، قل عدد فوتونات الأشعة السينية وظهر الظل أعمق. إن الأشعة السينية فعالة في تحديد كسور العظام والأورام. ومع ذلك، فإن التعرض المفرط للأشعة السينية يمكن أن يلحق الضرر بالخلايا في الكائنات البيولوجية (الحية).



(a)



(b)

**الشكل 25.8** في الجانب (a) صورة بالأشعة السينية لأسنان شخص. وفي الجانب (b) ينتج جهاز أشعة سينية نموذجي في

مكتب طبيب أسنان إشعاعات منخفضة الطاقة نسبياً للحد من تعرض المريض للإشعاع .

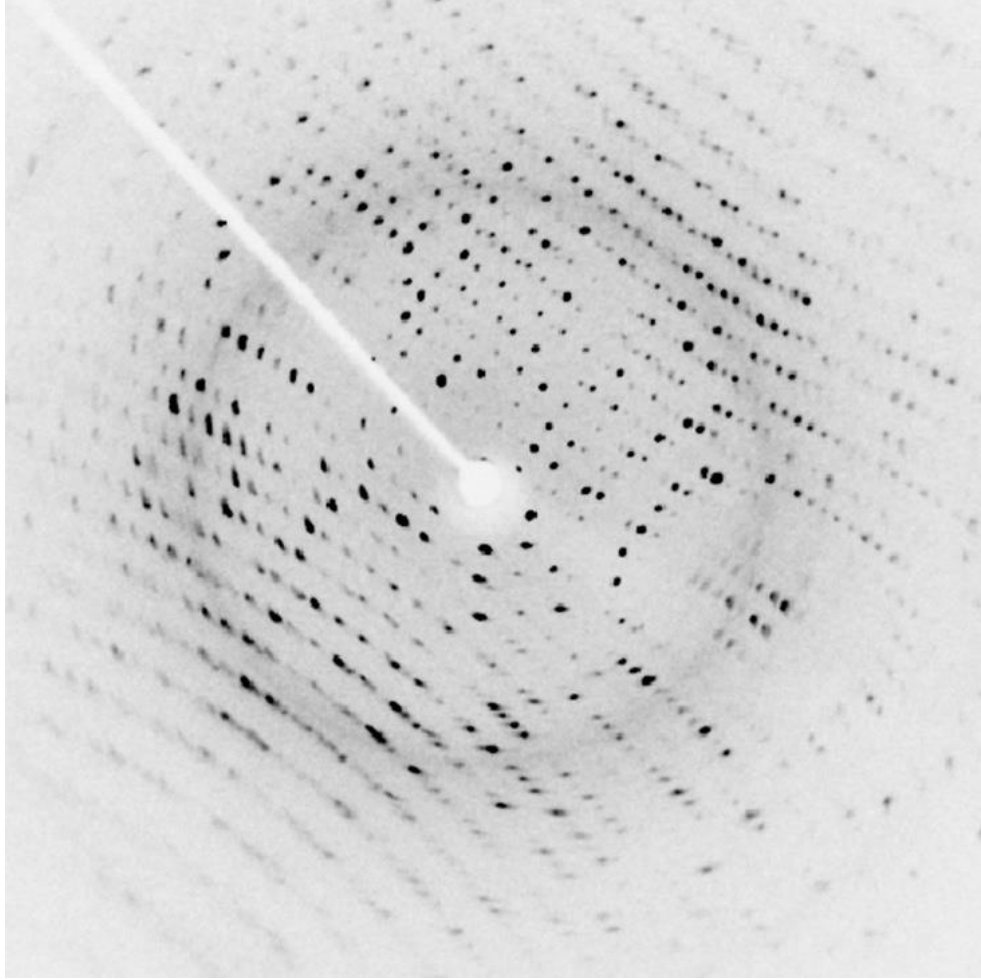
(credit a: modification of work by "Dmitry G"/Wikimedia Commons)



**الشكل 26.8** صورة الأشعة السينية لحقيبة الأمتعة. تعطي المواد الأكثر كثافة ظلاً أكثر غمقاً. تتعلق ألوان الجسم بتركيبه المادي، تظهر الأجسام المعدنية باللون الأزرق في هذه الصورة (credit: "IDuke"/Wikimedia Commons).

تعطي صورة الأشعة السينية صوراً ثنائية الأبعاد للجسم. ومع ذلك، في التطبيقات الطبية، لا توفر هذه الصور في الكثير من الأحيان معلومات كافية لاستخلاص استنتاجات مؤكدة. على سبيل المثال، في صورة الأشعة السينية ثنائية الأبعاد للجسم، يمكن للعظام إخفاء الأنسجة أو الأعضاء الرخوة بسهولة. تعالج المساحة الضوئية CAT (computed axid tomography) (التصوير المقطعي المحوري) هذه المشكلة عن طريق جمع العديد من صور الأشعة السينية في "شرائح" في جميع أنحاء الجسم. يمكن أن تؤدي المعالجة المعقدة لصور الكمبيوتر باستخدام الامتصاص النسي للأشعة السينية في اتجاهات مختلفة إلى إنتاج صورة أشعة سينية ثلاثية الأبعاد مفصلة للجسم.

يمكن أيضاً استخدام الأشعة السينية لاستكشاف بنية الذرات والجزيئات. بالنظر إلى سقوط الأشعة السينية على سطح مادة صلبة بلورية. تنعكس بعض فوتونات الأشعة السينية عن هذا السطح، بينما تنعكس فوتونات أخرى عن "مستوى" الذرات تحت هذا السطح مباشرة. ينتج التداخل بين هذه الفوتونات، بالنسبة لزوايا مختلفة من السقوط، صورة جميلة على الشاشة (**الشكل 27.8**). ويُسمى تفاعل الأشعة السينية مع المادة الصلبة حيود الأشعة السينية. المثال الأكثر شهرة باستخدام حيود الأشعة السينية هو اكتشاف التركيب الحلزوني المزدوج للحمض النووي DNA.



**الشكل 27.8** حيود الأشعة السينية عن بلورات البروتين (لايزومي بيضة دجاجة). تحليل النمط يعطي معلومات حول بنية البروتين (credit: "Del45"/Wikimedia Commons).

## 6.8 | الليزر Lasers

### الأهداف التعليمية

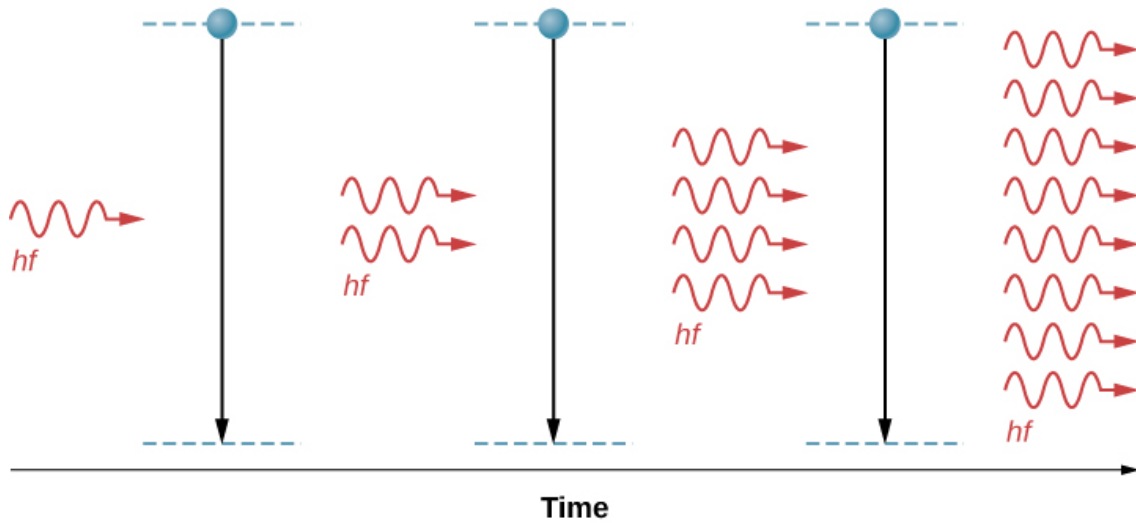
في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- وصف العمليات الفيزيائية اللازمة لإنتاج ضوء الليزر.
- تفسير الفرق بين الضوء المتماسك وغير المتماسك.
- وصف تطبيق الليزر على مشغل الأقراص المدمجة CD ومشغلات Blu-Ray.

الليزر هو جهاز يصدر عنه ضوء متماسك وأحادي اللون. يكون الضوء متماسكاً إذا كانت الفوتونات التي تشكل الضوء في الطور نفسه، وأحادية اللون إذا كان للفوتونات تردد واحد (لون واحد). عندما يمتص غاز الموجود في جهاز الليزر الإشعاعات، تنتقل الإلكترونات إلى مستويات طاقة مختلفة. تعود معظم هذه الإلكترونات على الفور إلى الحالة الأساس، لكن يظل البعض الآخر منها في ما يُسمى بالحالة شبه المستقرة. من الممكن وضع غالبية هذه الذرات في الحالة شبه المستقرة، وهي حالة تُسمى "الإسكان المعكوس population inversion".

عندما يؤثر فوتون على إلكترون موجود في الحالة شبه المستقرة (الشكل 28.8)، ينتقل هذا الإلكترون إلى سوية طاقة أخفض ويصدر فوتوناً إضافياً، وينطلق الفوتونان معاً. وتُسمى هذه العملية بالإصدار المحثوث. يحدث ذلك باحتمال كبير نسبياً عندما تكون طاقة الفوتون الوارد مساوية لفرق الطاقة بين السويتين المستثارة و "غير المستثارة" للإلكترون ( $\Delta E = hf$ ). وبالتالي، يملك الفوتون الوارد والفوتون الصادر بواسطة "إزالة الاثارة" الطاقة نفسها والمساوية إلى  $hf$ . تواجه هذه الفوتونات مزيداً من الإلكترونات في الحالة شبه المستقرة، وتكرر هذه العملية. والنتيجة هي سلسلة أو (شلال) من ردود الفعل أو سلسلة من الإثارات المتماثلة. ضوء الليزر متماسك لأن جميع أمواج الضوء في ضوء الليزر لها التردد نفسه (اللون) والطور نفسه (أي نقطتان على طول خط عمودي على اتجاه الحركة يكون على "الجزء نفسه" من الموجة"). يبين الشكل 29.8 رسماً تخطيطياً لنمط موجة الضوء المتماسك وغير المتماسك.

### Electrons in a metastable state



الشكل 28.8 فيزياء الليزر. يتسبب الفوتون الوارد بتردد  $f$  في توليد سلسلة من الفوتونات تتمتع بالتردد نفسه.



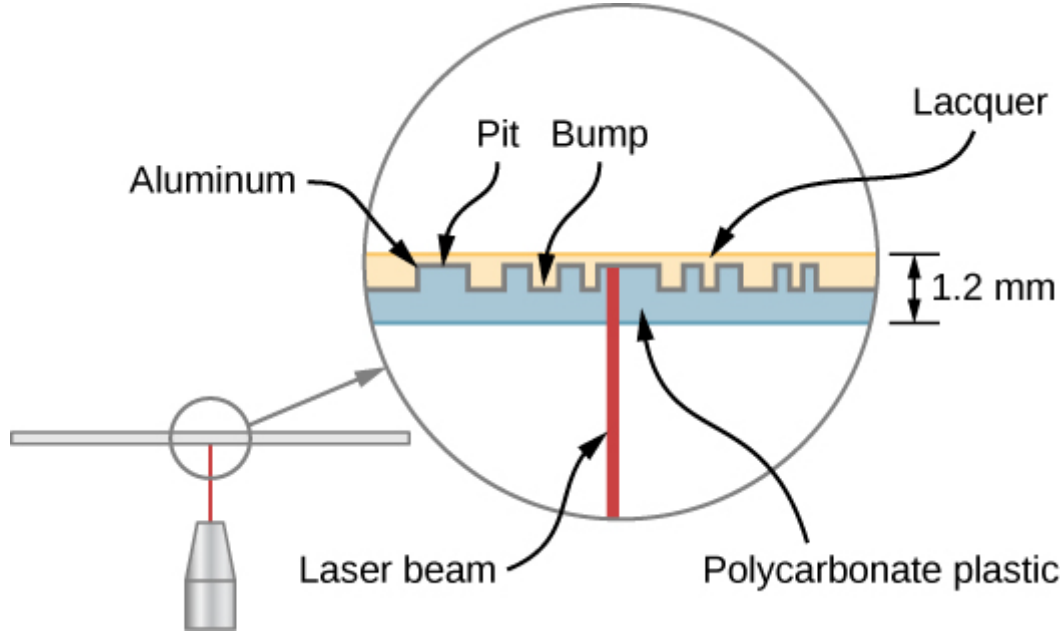
الشكل 29.8 يحتوي نمط موجة الضوء المتماسك على أمواج ضوئية تتمتع بالتردد نفسه للطور، بينما يحتوي نمط موجة الضوء غير المتماسك على أمواج ضوئية بترددات وأطوار مختلفة.

يتم استخدام الليزر في مجموعة واسعة من التطبيقات، مثل الاتصالات (خطوط الهاتف الألياف الضوئية) والترفيه (عروض ضوء الليزر) والطب (إزالة الأورام ومعالجة الأوعية الدموية في شبكية العين) وفي مبيعات التجزئة (قارئات الرموز الشريطية). يمكن أيضاً إنتاج الليزر بواسطة مجموعة كبيرة من المواد، بما في ذلك المواد الصلبة (على سبيل المثال، بلورات الياقوت) أو الغازات (خليط غاز الهليوم-نيون) والسوائل (الأصباغ العضوية). تم في الآونة الأخيرة إنشاء ليزر باستخدام الجيلاتين - ليزر صالح للأكل! ناقش أدناه تطبيقين عمليين بالتفصيل: مشغلات الأقراص المدججة CD ومشغلات Blu-Ray.

### مشغل الأقراص CD player

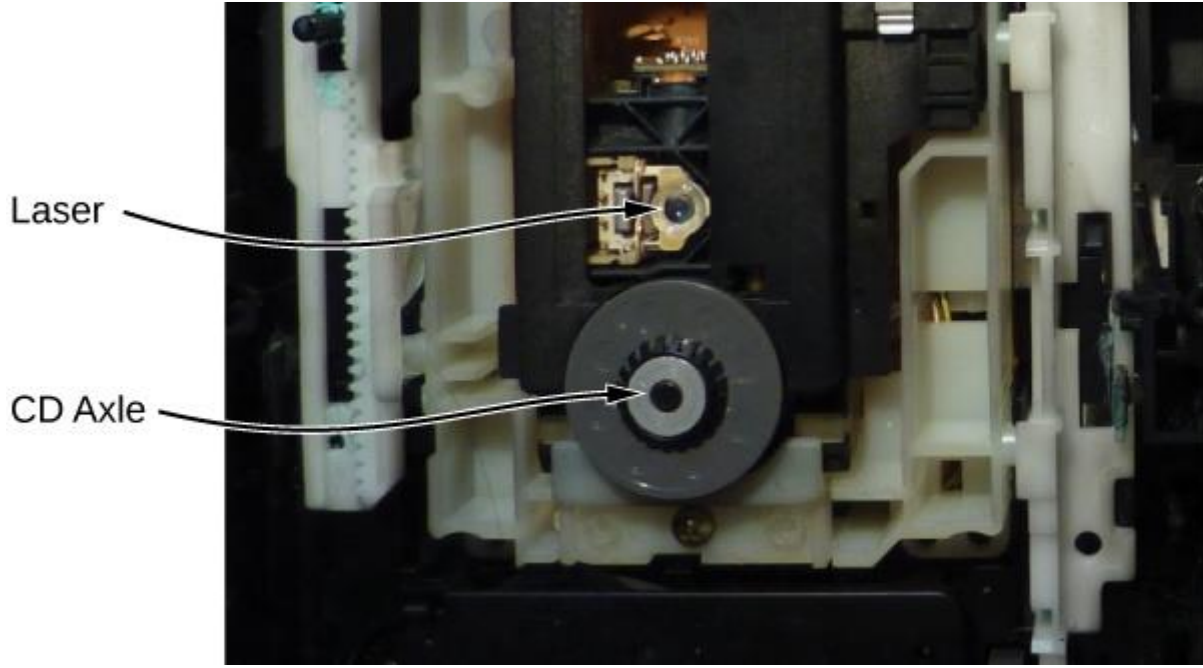
يقرأ مشغل الأقراص المدججة المعلومات الرقمية المخزنة على قرص مضغوط (CD). القرص المضغوط هو قرص قطره 6 بوصات

مصنوع من البلاستيك يحتوي على "نتوءات" صغيرة و "حفر" بالقرب من سطحه لتشفير البيانات الرقمية أو الثنائية (الشكل 30.8). تظهر المطبات (النتوءات) والحفر على طول مسار رقيق للغاية يدور إلى الخارج من مركز القرص. عرض المسار أصغر من 1/20 من عرض شعرة الإنسان، وارتفاع المطبات (النتوءات) أصغر.



**الشكل 30.8** القرص المضغوط هو قرص بلاستيكي يستخدم النتوءات بالقرب من سطحه لتشفير المعلومات الرقمية. يحتوي سطح القرص على طبقات متعددة، بما في ذلك طبقة من الألومنيوم وواحدة من البولي كربونات.

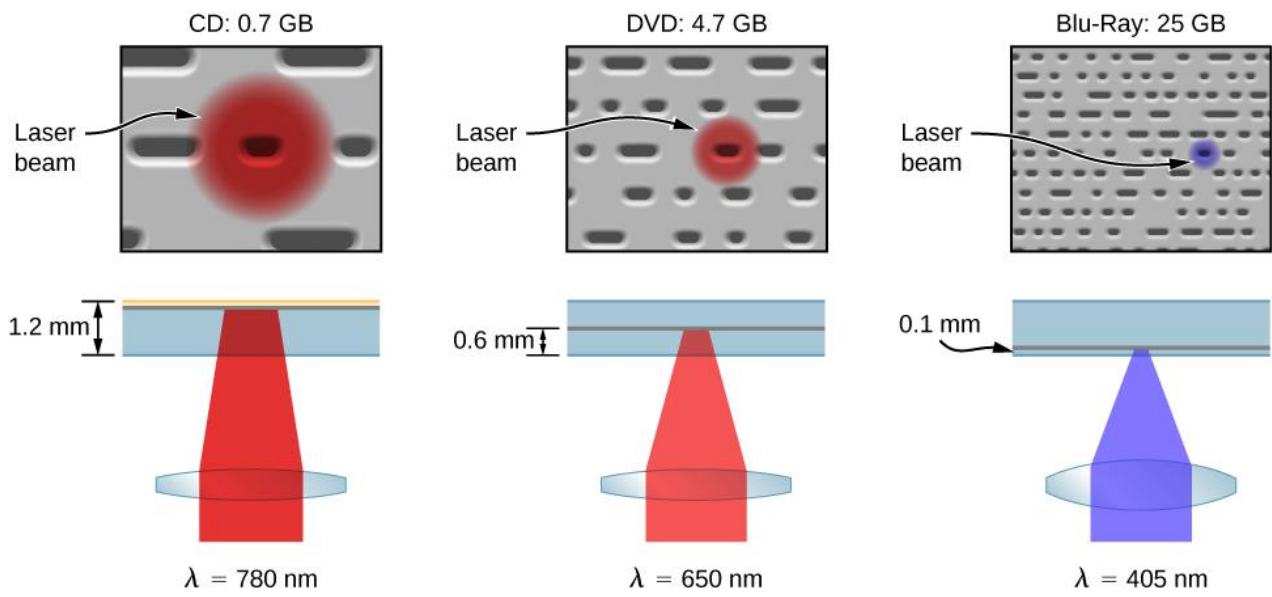
يستخدم مشغل الأقراص المدججة ليزراً لقراءة هذه المعلومات الرقمية. ضوء الليزر مناسب لهذا الغرض، لأنه يمكن تركيز الضوء المتناسك على بقعة صغيرة بشكل لا يصدق، وبالتالي التمييز بين النتوءات والحفر في القرص المضغوط. بعد المعالجة بواسطة مكونات المشغل (مثل شبكة الحيود والمستقطب ومجمع حزمة الأشعة)، يتم تركيز ضوء الليزر بواسطة عدسة على سطح القرص المضغوط. ينعكس الضوء الذي يصيب النتوء فقط، يتداخل الضوء الذي يصدم "الحفرة" بشكل هدام، لذلك لا يعكس الضوء (تفاصيل هذه العملية ليست مهمة هنا). يتم تفسير الضوء المنعكس على أنه "1"، ويتم تفسير الضوء غير المنعكس على أنه "0". يتم تحويل الإشارة الرقمية الناتجة إلى إشارة تمثيلية، ويتم تغذية هذه الإشارة في مكبر للصوت يعمل على تشغيل جهاز مثل زوج من سماعات الرأس. يظهر نظام الليزر لمشغل الأقراص المدججة في **الشكل 31.8**.



**الشكل 31.8** مشغل الأقراص CD ومكونات الليزر.

### المشغل Blu-Ray

مثل مشغل الأقراص المدججة، يقوم مشغل Blu-Ray بقراءة المعلومات الرقمية (الفيديو أو الصوت) المخزنة على القرص، ويتم استخدام الليزر لتسجيل هذه المعلومات. تعد الحفر الموجودة على قرص Blu-Ray أصغر بكثير وتكتظ فيما بينها بشكل أكبر من الأقراص المضغوطة، ويمكن تخزين المزيد من المعلومات. نتيجةً لذلك، يجب أن تكون قوة التحليل للليزر أكبر. يتم تحقيق ذلك باستخدام ضوء الليزر الأزرق ذي الطول الموجي ( $\lambda = 405$  نانومتر)، ومن هنا جاء اسم "Blu-Ray". (تستخدم الأقراص المضغوطة وأقراص DVD ضوء الليزر الأحمر). يظهر **الشكل 32.8** مقاس الحفر وتكوينات أجهزة المشغل الخاصة بأقراص CD و DVD ومشغل Blu-Ray. إن مقاس أحجام الحفر على قرص Blu-Ray أصغر بمرتين من الحفر الموجودة على قرص DVD أو القرص المضغوط CD. بخلاف القرص المضغوط، يقوم قرص Blu-Ray بتخزين البيانات على طبقة البولي كربونات، مما يجعل البيانات أقرب إلى العدسة وتجنب مشاكل قابلية القراءة. يتم استخدام الطلاء الصلب لحماية البيانات لأنه قريب جداً من السطح.



**الشكل 32.8** مقارنة بين مقدرة الفصل الليزر في مشغل CD و DVD ومشغل Blu-Ray.



## مراجعة الفصل الثامن:

### الكلمات المفتاحية:

العدد الكمي للعزم الزاوي الدوراني ( $l$ ): الرقم الكمي المترافق مع قوة العزم الزاوي المداري للإلكترون في ذرة هيدروجين.  
العدد الكمي لمسقط العزم الزاوي ( $m$ ): الرقم الكمي المترافق مع المركبة  $z$  لقوة العزم الزاوي المداري للإلكترون ذرة هيدروجين.  
المدار الذري: منطقة في الفراغ تحصر نسبة معينة (عادةً 90%) لاحتتمالية وجود الإلكترون.  
مغنيطون بور: عزم مغناطيسي للإلكترون يساوي:

$$9.3 \times 10^{-24} \text{J/T or } 5.8 \times 10^{-5} \text{eV/T}$$

إشعاع الكبح: إشعاع صادر عن استهداف معدن بشعاع ذي طاقة عالية من الإلكترونات (أو الإشعاع الناتج عن التسارع لأي جسيم مشحون في مادة)

المجموعة الكيميائية: مجموعة من العناصر في العنصر نفسه من الجدول الدوري للعناصر، والتي تتمتع بالخواص الكيميائية نفسها.

الضوء المتناسك: ضوء يتكون من فوتونات تتمتع بالتواتر والطور نفسيهما.

الرابعة التساهمية: رابطة كيميائية تتشكل من خلال تشارك إلكترونات بين ذرتين.

التشكيل الإلكتروني: تمثيل لحالة الإلكترون في الذرة، مثل  $1s^2 2s^1$  لمعدن الليثيوم.

البنية الدقيقة: بنية مفصلة للطيف الذري الصادر عن الترابط المداري السبيني.

الفلورة: الإشعاع الناتج عن إثارة إلكترون في ذرة ونزع الإثارة تدريجياً.

البنية عالية الدقة: بنية مفصلة للطيف الذري عن الترابط المداري السبيني.

الرابعة الأيونية: رابطة كيميائية تتشكل من التجاذب الكهربائي بين أيونين يتمتعان بشحنتين متعاكستين.

الليزر: ضوء متناسك ناتج عن نزع إثارة تسلسلية للإلكترونات.

العدد الكمي المداري المغناطيسي مصطلح آخر للعدد الكمي لمسقط العزم الزاوي.

الماغنيتوغرام: تمثيل تصويري، أو خريطة للنشاط المغناطيسي على سطح الشمس.

الحالة شبه المستقرة: الحالة التي يبقى فيها الإلكترون في حالة إثارة.

أحادي اللون: الضوء الذي يتكون من فوتونات تتمتع بالتواتر نفسه.

تمثيل موسلي البياني: تمثيل بياني للعدد الذري مقابل الجذر التربيعي لتواتر الأشعة السينية.

قانون موسلي: علاقة بين العدد الذري وتواتر فوتون الأشعة السينية لإنتاج الأشعة السينية.

العزم المداري المغناطيسي ثنائي القطب: قياس لقوة الحقل المغناطيسي الناتج عن العزم الزاوي المداري للإلكترون.

مبدأ باولي: لا يمكن للإلكترونين في الذرة نفسها أن يتمتعوا بالقيم نفسها للأعداد الكمية الأربعة ( $n, l, m, m_s$ )

الإسكان المعكوس: سوية (حالة) تحتوي فيها معظم الذرات على إلكترونات شبه مستقرة.

العدد الكمي الرئيس ( $n$ ): عدد كمي مترافق مع الطاقة الكلية للإلكترون لذرة هيدروجين.

تابع الكثافة الاحتمالية الإشعاعية: تابع يستخدم لتحديد احتمال وجود إلكترون في فاصل فراغي نصف قطره  $r$ .

قواعد الاصطفاء: قواعد تحدد ما إذا كانت الانتقالات الذرية ممكنة أو ممنوعة (محظورة).

العدد الكمي لمسقط السبين ( $m_s$ ): عدد كمي مترافق مع المركبة  $z$  للعزم الزاوي لسبين الإلكترون.

العدد الكمي للسبين ( $s$ ): عدد كمي مترافق مع العزم الزاوي لسبين الإلكترون.

انتقالات السبين - المدار: انتقالات ذرية بين حالات مجموعة لإلكترون- بروتون التي تكون العزوم المغناطيسية فيها مصطفة وغير مصطفة.

تزاوج السبين - الدوران: تفاعل بين عزم مغناطيسي لإلكترون والحقل المغناطيسي الناتج عن العزم الزاوي المداري في الإلكترون. الإصدارات المحثثة: عندما يمتص فوتون طاقي إلكترونات في الحالة شبه المستقرة ليهبط إلى سوية طاقة أخفض مصدراً فوتوناً آخر. معدن انتقالي: عنصر موجود في الفراغ بين أول عمودين وآخر ستة أعمدة في الجدول الدوري للعناصر الذي يحتوي على إلكترونات تملأ السوية الطاقة الفرعية d.

إلكترون التكافؤ: إلكترون في المدار الخارجي لذرة يشارك في الترابط الكيميائي. أثر زيمان: تقسيم السويات الطاقة بحقل مغناطيسي خارجي.

### المعادلات المفتاحية:

- العزم الزاوي المداري  $L = \sqrt{l(l+1)} \hbar$
- المركبة z للعزم الزاوي المداري  $L_z = m \hbar$
- تابع الكثافة الاحتمالية للشعاع  $P(r)dr = |\psi_{n00}|^2 4\pi r^2 dr$
- العزم الزاوي للسبين  $S = \sqrt{s(s+1)} \hbar$
- المركبة z للعزم الزاوي للسبين  $S_z = m_s \hbar$
- العزم المغناطيسي لسبين الإلكترون  $\vec{\mu}_s = \left(\frac{e}{2me}\right) \vec{S}$
- العزم المداري المغناطيسي ثنائي القطب للإلكترون  $\vec{\mu}_l = -\left(\frac{e}{2me}\right) \vec{L}$
- الطاقة الكامنة المترافقة مع التفاعل المغناطيسي بين العزم المداري المغناطيسي ثنائي القطب والحقل المغناطيسي الخارجي  $\vec{B}$ :  
 $U(\theta) = -\mu_z B = m \mu_B B$
- العدد الأعظم للإلكترونات في السوية الطاقة الفرعية لذرة هيدروجين:  $N = 4l + 2$
- قاعدة الاصطفاء للانتقالات الذرية في ذرة مماثلة للهيدروجين:  $\Delta l = \pm 1$
- قانون موسلي لإنتاج الأشعة السينية  $(Z-1) = \text{constant} \sqrt{f}$

### ملخص الفصل:

#### 1.8 ذرة الهيدروجين:

- يمكن أن توصف ذرة الهيدروجين بتابعها الموجي أو الكثافة الاحتمالية أو الطاقة الكلية أو العزم الزاوي المداري.
- تتحدد حالة إلكترون في ذرة هيدروجين بأعدادها الكمية  $(n, l, m)$ .
- على عكس نموذج بور للذرة، يقوم نموذج شرودنغر بعمل تنبؤات مبنية على البيانات الاحتمالية.
- يمكن أن تستعمل الأعداد الكمية لذرة هيدروجين لحساب معلومات مهمة عن الذرة.

#### 2.8 العزم المداري المغناطيسي ثنائي القطب للإلكترون.

- تتمتع ذرة الهيدروجين بخواص مغناطيسية لأن حركة الإلكترون فيها تعمل كحلقة تيار.
- تنقسم سويات الطاقة لذرة هيدروجين، المترافقة مع العزم الزاوي المداري، تحت تأثير حقل مغناطيسي خارجي نتيجة لتفاعل العزم المداري الزاوي المغناطيسي مع هذا الحقل المغناطيسي.

- يمكن أن تستخدم الأعداد الكمية لإلكترون في ذرة هيدروجين لحساب مقدار العزم المداري المغناطيسي ثنائي القطب للذرة واتجاهه.

### 3.8 سبين الإلكترون

- يمكن أن يُعبّر عن حالة إلكترون في ذرة هيدروجين من خلال الأعداد الكمية الخمسة.
- يساوي العدد الكمي الزاوي لسبين الإلكترون  $1/2 +$  أو  $1/2 -$ .
- العدد الكمي لمسقط العزم الزاوي للسبين هو  $ms = 1/2 +$  أو  $1/2 -$  (سبين للأعلى أو سبين للأسفل).
- تُفسّر البنية الدقيقة أو البنية عالية الدقة للطيف الهيدروجيني من خلال التفاعلات المغناطيسية ضمن الذرة.

### 4.8 مبدأ الاستبعاد والجدول الدوري

- ينص مبدأ باولي على أنه لا يمكن لإلكترونين في ذرة أن يحملوا جميع الأعداد الكمية نفسها.
- يمكن أن تُفسّر بنية الجدول الدوري للعناصر من خلال الطاقة الكلية أو العزم المداري الزاوي أو سبين الإلكترون في الذرة.
- يمكن أن يُعبّر عن حالة الذرة بأشكال إلكتروناتها الفراغية، والتي تصف مستويات الطاقة وسويات الطاقة الفرعية المملوءة في الذرة.

### 5.8 الطيف الذري والأشعة السينية

- يُمتص الإشعاع ويصدر بواسطة انتقالات سويات الطاقة الذرية.
- يمكن استخدام الأعداد الكمية لتوقع كل من الطاقة والتواتر وطول الموجة للفوتونات الناتجة عن الانتقالات الذرية.
- تحدث الفلورة الذرية عندما يُثار إلكترون في ذرة عدة خطوات فوق الحالة الأساسية بامتصاص فوتونات عالية الطاقة (فوق البنفسجية).
- تصدر فوتونات الأشعة السينية عندما يمتلئ فراغ في سوية طاقة داخلية لذرة بإلكترون من سوية طاقة خارجية للذرة.
- يتعلق تواتر إشعاع الأشعة السينية بالعدد الذري  $Z$  للذرة.

### 6.8 الليزر

- ضوء الليزر متماسك: ضوء (أحادي اللون و "مرتبط بالطور").
- ينتج ضوء الليزر عن الاسكان المعكوس ونزع الإثارة اللاحق للإلكترونات في مادة (صلبة أو سائلة أو غازية).
- يُستخدم الليزر في مشغل القرص CD وأقراص Blu-Ray لقراءة المعلومات الرقمية المحفوظة على هذه الأقراص.

### أسئلة نظرية:

#### 1.8 ذرة الهيدروجين

1. عرّف الأهمية الفيزيائية لكل من الأعداد الكمية في ذرة الهيدروجين.
2. وضح الحالة الأساسية للهيدروجين من حيث التابع الموجي والكثافة الاحتمالية والمدارات الذرية.
3. ميز بين نموذجي بور وشروندغر لذرة الهيدروجين، بالتحديد قارن بين الطاقة والعزم الزاوي المداري للحالة الأساسية.

#### 2.8 العزم المداري المغناطيسي ثنائي القطب للإلكترون

4. فسّر لماذا الخطوط الطيفية لذرة الهيدروجين تنقسم بحقل مغناطيسي خارجي. وما الذي يحدد العدد والفروق بين هذه الخطوط.
5. توضع ذرة الهيدروجين في حقل مغناطيسي. أي من هذه الكميات التالية تتأثر؟ a- الطاقة الكلية، b- العزم الزاوي، c- المركبة  $z$  للعزم الزاوي، d- الزاوية القطبية.

6. على أي من العوامل يعتمد العزم المداري المغناطيسي ثنائي القطب؟

### 3.8 سبين الإلكترون

7. فسّر كيف أن ذرة الهيدروجين في الحالة الرئيسية ( $l=0$ ) يمكن أن تتفاعل مغناطيسياً مع حقل مغناطيسي خارجي.

8. قارن بين العزم الزاوي المداري والعزم الزاوي السبيني للإلكترون في ذرة الهيدروجين.

9. عدد جميع القيم الممكنة للعدد الكمي  $s$  و  $m_s$  للإلكترون. هل يوجد جسيمات تكون هذه القيم لها مختلفة؟

10. هل من الضروري أن تكون أشعة العزم الزاوي متحاذية؟

11. ما هو ترابط السبين-الدوران؟

### 4.8 مبدأ الاستبعاد والجدول الدوري

12. ما هو مبدأ باولي للاستبعاد؟ اشرح أهمية هذا المبدأ من أجل فهم البنية الذرية والترابط الجزيئي.

13. قارن بين الأشكال الفراغية للإلكترون للعناصر من العمود نفسه في الجدول الدوري.

14. قارن بين الأشكال الفراغية للإلكترون للعناصر التي تنتمي للسطر نفسه في الجدول الدوري للعناصر.

### 5.8 الطيف الذري والأشعة السينية

15. الطيف الذري والجزيئي مكمان. ماذا يعني مكمان، وكيف تتعلق الأطياف المكمنة بتكمية الطاقة ومدارات الإلكترونات في الذرات والجزيئات؟

16. ناقش عملية امتصاص الضوء من قبل المادة من حيث البنية الذرية ووسط الامتصاص.

17. NGC1763 هو سديم انبعاث في سحابة ماجلان الضخمة خارج مجرة درب التبانة. يُؤنّن الضوء فوق البنفسجي من النجوم عالية الحرارة ذرات الهيدروجين في السديم، في حين تتحد الإلكترونات والبروتونات من جديد، ويصدر الضوء في المجال المرئي. قارن بين طاقات الفوتونات المعنّبة بهذين الانتقالين.

18. لم تصدر الأشعة السينية فقط عند انتقال الإلكترون إلى سويات طاقة داخلية؟ ما نوع الفوتون الصادر في الانتقالات بين سويات الطاقة الخارجية؟

19. كيف تختلف المدارات المسموح بها للإلكترونات في الذرات عن المدارات المسموح بها للكواكب حول الشمس؟

### 6.8 الليزر

20. ميّز بين الضوء المتماسك والضوء أحادي اللون.

21. لم الحالة شبه المستقرة ضرورية لإنتاج ضوء الليزر.

22. كيف يختلف الضوء من مصباح متوهج عن ضوء الليزر؟

23. كيف يستطيع قارئ أقراص Blu-Ray قراءة معلومات أكثر من قارئ أقراص CD؟

24. ما هي التشابهات والاختلافات بين قارئ أقراص Blu-Ray و قارئ أقراص CD؟

### مسائل

#### 1.8 ذرة الهيدروجين

25. التابع الموجي مُقوّم ضمن إحداثيات متعامدة  $(x, y, z) = (1, 1, 2)$  في وحدات تقريبية. ما هي الإحداثيات الكروية لهذا الموضع؟

26. إذا كان للذرة إلكترون في الحالة  $n=5$  مع  $m=3$ ، ما هي القيم المحتملة للعدد  $l$ ؟

27. ما هي القيم المحتملة ل  $m$  لإلكترون في الحالة  $n = 4$ ؟
28. ماذا لو أي من القيود كان يحمل القيمة  $m = 1$ . أدخل الأعداد الكمية الأخرى لإلكترون هذه الذرة؟
29. ما هي القيم المحتملة للعدد  $m$  لإلكترون في الحالة  $n = 4$ ؟
30. أ- كم زاوية يمكن للعدد  $L$  أن يصنع مع المحور  $z$  من أجل إلكترون  $l = 2$ ؟ ب- احسب قيمة أصغر زاوية.
31. القوة على إلكترون هي "التدرج السالب لتابع الطاقة الكامنة" استخدم هذه المعلومة والمعادلة 1.8 لتبين أن القوة على إلكترون لذرة هيدروجين تُعطى بقانون قوة كولون.
32. ما هو عدد الحالات الكلي مع العزم الزاوي المداري  $l = 0$ ؟ (أهل سبعين الإلكترون).
33. التوابع الموجية مقومة بإحداثيات كروية  $(r, \theta, \phi) = (45^\circ, \sqrt{3}, 45^\circ)$ ، حيث قيم الإحداثيات الشعاعية معطاة بوحدات تقريبية. ما هي الإحداثيات المتعامدة لهذا الموضع؟
34. ينص قانون كولون للقوة على أن القوة بين جسيمين مشحونين هي:  $F = k \frac{qq}{r^2}$ . استخدم هذه العلاقة لتحديد تابع الطاقة الكامنة.
35. اكتب تعبيراً عن العدد الكلي للحالات مع العزم الزاوي المداري  $l$ .
36. اعتبر أن الهدروجين في الحالة الأساسية  $\psi_{100}$  أ- استخدم المشتق لتحديد الموضع الشعاعي الذي تكون فيه الكثافة الاحتمالية  $P(r)$  عظمية.
- ب- استخدم المفهوم المتكامل لتحديد الموضع الشعاعي الوسطي. (تسمى هذه القيمة المتوقعة لموضع الإلكترون الشعاعي). عبّر عن إجاباتك من حيث نصف قطر بور  $a_0$ . مساعدة: القيمة المتوقعة هي فقط قيمة وسطية.
- ج- لما تختلف هاتان القيمتان؟
37. ما هو احتمال أن يوجد الإلكترون  $1s$  لذرة هيدروجين في نصف قطر بور؟
38. كم عدد الزوايا القطبية الممكنة لإلكترون في الحالة  $l = 5$ ؟
39. ما هو العدد الأعظم لحالات العزم الزاوي المداري لإلكترون في السوية الطاقية  $n = 2$  لذرة هيدروجين؟ (أهل سبعين الإلكترون)
40. ما هو العدد الأعظم لحالات العزم الزاوي المداري لإلكترون في السوية الطاقية  $n = 3$  لذرة هيدروجين؟ (أهل سبعين الإلكترون)
- 2.8 العزم المداري المغناطيسي ثنائي القطب لإلكترون**
41. أوجد مقدار العزم المغناطيسي المداري ثنائي القطب في الحالة  $3p$  (عبر عن إجابتك من حيث  $\mu_B$ ).
42. يمر تيار  $I = 2A$  عبر سلك بشكل مربع بأطوال  $2\text{ cm}$  للأضلاع. ما هو العزم المغناطيسي للسلك؟
43. قدّر نسبة العزم المغناطيسي للإلكترون إلى عزم ميون المغناطيسي للحالة نفسها للعزم المداري الزاوي. (مساعدة:  $m_\mu = 105.7\text{MeV}/c^2$ )
44. أوجد مقدار العزم المغناطيسي المداري ثنائي القطب في الحالة  $4d$  (عبر عن إجابتك من حيث  $\mu_B$ ).
45. من أجل إلكترون  $3d$  في حقل مغناطيسي خارجي  $2.5 \times 10^{-3}\text{T}$ ، أوجد: أ- التيار المرافق للعزم الزاوي المداري، و ب- عزم الدوران الأعظم.
46. لإلكترون في ذرة هيدروجين في الحالة  $n = 5, l = 4$ . أوجد أصغر زاوية يصنعها العزم المغناطيسي مع المحور  $z$  (عبر عن إجابتك من حيث  $\mu_B$ ).
47. أوجد مقدار عزم الدوران الأصغري  $\vec{\tau}$  الذي يؤثر على العزم المغناطيسي المداري ثنائي القطب لإلكترون  $3p$  في حقل مغناطيسي خارجي  $2.5 \times 10^{-3}\text{T}$ .

48. إلكترون في ذرة هيدروجين في حالة 3p. أوجد أصغر زاوية يصنعها العزم المغناطيسي مع المحور z (عبر عن إجابتك من حيث  $\mu_B$ ).

49. أثبت أن  $U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$ . (مساعدة: تُنجز قيمة عمل متناهية في الصغر من أجل محاذاة العزم المغناطيسي مع الحقل الخارجي. يُدور هذا العمل متجه العزم المغناطيسي زاوية  $d\theta$  - (بالإتجاه الموجب للمحور z), حيث:  $d\theta$  هو تغير زاوية إيجابي).

### 3.8 سبين الإلكترون

50. ما هو مقدار عزم السبين للإلكترون (عبر عن إجابتك من حيث h).
51. ما هي التوجهات القطبية المحتملة لمتجه عزم سبين للإلكترون.
52. من أجل  $n = 1$  اكتب كل مجموعات الأعداد الكمية الممكنة  $(n, l, m, m_s)$ .
53. توضع ذرة هيدروجين في حقل مغناطيسي خارجي منتظم ( $B = 200T$ ). احسب طول موجة الضوء الناتج عند الانتقال من حالة سبين للأعلى إلى سبين للأسفل.
54. إذا أصبح الحقل المغناطيسي في المسألة السابقة 4 أضعاف، فماذا يحدث لطول موجة الضوء الناتج في انتقال من حالة سبين للأعلى إلى سبين للأسفل.
55. إذا أصبح العزم المغناطيسي في المسألة السابقة ضعفين، فماذا يحدث لتواتر الضوء الناتج عند الانتقال من حالة سبين للأعلى إلى سبين للأسفل.
56. من أجل  $n = 2$  اكتب جميع مجموعات الأعداد الكمية الممكنة  $(n, l, m, m_s)$ .

### 4.8 مبدأ الاستبعاد والجدول الدوري

57. أ- كم عدد الإلكترونات التي يمكن أن توجد في السوية الطاقةية  $n = 4$ ؟  
ب- ما هي سويات طاقتها البديلة، وكم عدد الإلكترونات الممكن أن تكون في كل واحدة؟
58. أ- ما هي أصغر قيمة للمدار  $l$  من أجل سوية طاقةية بديلة تحتوي على 11 إلكترونًا؟  
ب- إذا كانت السوية الطاقةية البديلة في السوية الطاقةية  $n = 5$ ، ما هو الترميز الطيفي لهذه الذرة.
59. نتيجة غير منطقية. أي من الترميزات الطيفية التالية غير مسموح؟ ( $a- 5s^1, b- 1d^1, c- 4s^3, d- 3p^7, e- 5g^{15}$ ) بيّن أي قاعدة غير محققة من أجل كل ترميز غير مسموح.
60. اكتب التشكيل الإلكتروني للبيوتاسيوم.
61. اكتب التشكيل الإلكتروني للحديد.
62. إلكترون التكافؤ للبيوتاسيوم مثار للحالة 5d, أ- ما قيمة العزم الزاوي المداري للإلكترون؟ ب- كم هي عدد الحالات الممكنة المخاذبة لاتجاه محدد؟
63. أ- إذا كانت سوية طاقةية فرعية لذرة تحوي على 9 إلكترونات، فما هي القيمة الصغرى للمدار  $l$ ؟ ب- ما هي الترميزات الطيفية لهذه الذرة، إذا كانت السوية الطاقةية الفرعية هذه جزءاً من السوية الطاقةية  $n = 3$ ؟
64. اكتب التشكيل الإلكتروني للمغنيزيوم.
65. اكتب التشكيل الإلكتروني للكربون.
66. قوّم السبين الناتجة لإلكترونات العناصر B و Ne في الحالة الأساسية هي على التوالي:  
 $0\sqrt{3} \& \sqrt{3} \hbar / 2, \sqrt{2} \hbar, \sqrt{15} \hbar / 2, \sqrt{2} \hbar, \sqrt{3} \hbar / 2$   
ناقش أن قيم السبين هذه توافق قاعدة هوند.

## 5.8 الطيف الذري والأشعة السينية

67. ما هو التواتر الأدنى لفوتون لازم للتأين: أ- أيون  $\text{He}^+$  في حالته الأساسية؟  
ب- أيون  $\text{Li}^+$  في الحالة المثارة؟
68. يقوم الأيون  $\text{Li}^{2+}$  بانتقال ذري من الحالة  $n = 4$  إلى الحالة  $n = 2$ . أ- ما هي الطاقة التي يبعثها الفوتون خلال هذا الانتقال؟  
ب- ما هو طول موجة الفوتون؟
69. يتمتع الضوء الأحمر الصادر من الليزر الياقوتي بطول موجة  $694.3\text{nm}$ . ما هو الفرق في الطاقة بين الحالة الابتدائية والنهائية الموافق لانبعث الضوء.
70. ينتج الضوء الأصفر من مصباح الشارع (بخار الصوديوم) بانتقال لذرات الصوديوم من الحالة  $3p$  إلى الحالة  $3s$ . إذا كان الفرق الطاقي بين هاتين الحالتين هو  $2.10\text{ eV}$ , ما هو طول موجة الضوء الأصفر؟
71. قدر طول موجة شعاع سيني  $K\alpha$  من الكالسيوم.
72. قدر تواتر شعاع سيني  $K\alpha$  من السيزيوم.
73. تصدر أشعة سينية من خلال قذف هدف مجزعة من الإلكترونات. يتم تسريع الإلكترونات قبيل قذفها بمقل كهربائي عبر فرق طاقة محتمل  $\Delta U = -e\Delta V$ ، حيث:  $e$  هي شحنة إلكترون و  $\Delta V$  هو فرق الكمون. فإذا كانت:  $\Delta V = 15.000\text{V}$ ، ما هو طول الموجة الأصغري للإشعاع الصادر؟
74. للمسألة السابقة، ماذا يحدث لطول الموجة الأصغري إذا تضاعف الكمون عبر أنبوب أشعة سينية؟
75. افترض أن التجربة في المسألة السابقة أجريت بجسيمات مون. ماذا يحدث لطول الموجة الأصغري؟
76. يُسرّع أنبوب أشعة سينية إلكتروناتاً بكمون مطبق بقيمة  $50\text{ kV}$  باتجاه هدف معدني  
أ- ما هو أقصر طول موجة لإشعاع أشعة سينية المتولد على الهدف؟  
ب- احسب طاقة الفوتون بوحدة  $\text{eV}$ .  
ج- فسّر العلاقة بين طاقة الفوتون والكمون المطبق.
77. يصدر أنبوب تلفاز ملون بعض الأشعة السينية عندما تصدم حزمة إلكترونية بالشاشة. ما هو أقصر طول موجة للأشعة السينية هذه إذا استخدمنا  $30.0\text{ kV}$  محتملة لتسريع الإلكترونات؟ (ملاحظة، يحتوي التلفاز على حماية من أجل منع تعرض المشاهدين للأشعة السينية).
78. أنبوب أشعة سينية له كمون مطبق  $100\text{ kV}$  أ- ما هو فوتون الشعاع السيني ذي الطاقة الأكبر الممكن إنتاجه؟ بين إجابتك بوحدة الإلكترون فولت والجول. ب- أوجد طول موجة الشعاع السيني السابق.
79. تأتي أكبر طاقة مميزة لفوتون شعاع سيني من إنقراض إلكترون حر في خلاء في السوية الطاقية  $K$ . ما هي طاقة الفوتون بوحدة  $\text{keV}$  للتغصنين باعتبار أن الإلكترون الحر ليس له طاقة حركية ابتدائية؟
80. الطاقات التقريبية للأشعة السينية  $K\alpha$  و  $K\beta$  للنحاس هي على التوالي:  $E_{K\alpha} = 8.00\text{ keV}$  و  $E_{K\beta} = 9.48\text{ keV}$   
حدد نسبة تواترات الأشعة السينية للذهب إلى النحاس، ثم استخدم هذه القيمة لتقدير الطاقات المناظرة للأشعة السينية  $K\alpha$  و  $K\beta$  للذهب.

## 6.8 الليزرات

83. يُستخدم ليزر ثنائي أكسيد الكربون في الجراحة ويصدر إشعاعاً (تحت الأحمر) بطول موجة  $10.6 \mu\text{m}$  في  $1.00 \text{ ms}$ ، رفع هذا الليزر درجة حرارة  $1.00 \text{ cm}^3$  من اللحم  $100^\circ\text{C}$  وبخّرها. أ- كم من الفوتونات كان مطلوباً؟ يمكنك أن تفترض أن اللحم له حرارة التبخر نفسها للماء.

ب- ماذا كان مردود الطاقة الأدنى أثناء الومضة؟

84. ليزر فوق بنفسجي يستخدم لتصحيح الرؤية يُصدر إشعاعاً فوق بنفسجي بطول موجة  $193 \text{ nm}$ .

أ- احسب طاقة الفوتون مقدرة بوحدة  $\text{eV}$ .

ب- تُستخدم هذه الفوتونات لتبخير النسيج القرني المشابه إلى حد كبير للماء في خواصه. احسب كمية الطاقة المحتاجة لكل جزيء من الماء لإحداث التغيير الطوري من السائل إلى غاز. ومن ثمّ قسّم حرارة التبخر مقدرة بوحدة  $\text{kJ/kg}$  على عدد جزيئات الماء في الكيلوغرام.

ج- حول هذا إلى  $\text{eV}$  وقارن مع طاقة الفوتون. ناقش هذه النتائج.

## مسائل للتحدي

85. لذرة هيدروجين في حالة مثارة بعدد كمي رئيس  $n$ ، أظهر أن الزاوية الصغرى التي يصنعها متجه العزم الزاوي المداري فيما يتعلق

$$\text{بالمحور } z \text{ هي: } \theta = \cos^{-1} \left( \sqrt{\frac{n-1}{n}} \right)$$

86. ما هو احتمال أن إلكترون  $1 \text{ s}$  لذرة هيدروجين أن يوجد بين  $r=0$  و  $r=\infty$ ؟

87. ارسم تابع الطاقة الكامنة للإلكترون في ذرة هيدروجين. أ- ما هي قيمة هذا التابع عند  $r=0$ ؟ في الحد  $r=\infty$ ؟

ب- ما هو غير المنطقي أو المتناقض في الإجابة السابقة؟

88. أوجد قيمة  $l$  عدد العزم الزاوي المداري الكمي للقمر والأرض.

89. بيّن أن عدد حالات العزم الزاوي المداري للإلكترون في السوية الطاقية ذات الرقم  $n$  لذرة هو  $n^2$ . (أهمل سبين الإلكترون)

(مساعدة: اصنع جدولاً لعدد حالات العزم الزاوي المداري الكلي لكل سوية طاقية وأوجد النموذج).

90. ما هو مقدار العزم المغناطيسي للإلكترون؟

91. ما هو عدد حالات الإلكترون العظمى في السوية الطاقية  $n=5$ ؟

92. ذرة هيدروجين في الحالة الأساسية موضوعة في حقل مغناطيسي منتظم، وتصدر فوتوناً عند الانتقال من حالة سبين- أعلى إلى

سبين- أسفل. طول الموجة للفوتون هو  $168 \mu\text{m}$ . ما هي قوة الحقل المغناطيسي؟

93. بيّن أن العدد الأعظم لحالات الإلكترون في السوية الطاقية ذات الرقم  $n$  لذرة هو  $2n^2$ .

94. يُثار إلكترون التكافؤ للكحلور إلى الحالة  $3p$ . أ- ما هو مقدار العزم الزاوي المداري؟ ب- ما هي القيم الممكنة للمركبة  $z$  للقياس

الزاوي؟

95. يقوم الأيون  $\text{Be}^{3+}$  بانتقال ذري من الحالة  $n=3$  إلى  $n=2$ . أ- ما هي طاقة الفوتون الصادر خلال هذا الانتقال؟ ب- ما هو

طول موجة الفوتون؟

97. تأتي طاقة فوتون شعاع سبيني المميزة العظمى من التقاط إلكترون حر في فراغ السوية الطاقية  $k$ . ما هو تواتر هذا الفوتون

للتنغستن باعتبار أن الإلكترون الحر لا يتمتع بطاقة حركية ابتدائية.

98. استخراج تعبيراً عن النسبة بين تواتر فوتون شعاع سبيني لعنصرين لهما الأرقام الذرية  $Z_1$  و  $Z_2$ .



99. قارن بين طول موجة فوتون شعاع سيني لكلٍ من النحاس والفضة.

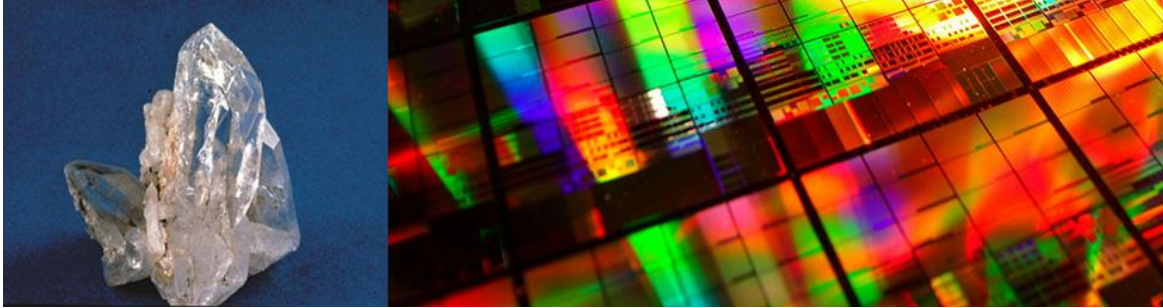
100. أ- ما هو الكمون اللازم تطبيقه على أنبوب شعاع سيني لتحصل على أشعة سينية بطول موجة-  $0.0100 \text{ fm}$  - للاستخدام

في البحث في تفاصيل النواة؟ ب- ما هو غير المنطقي في هذه النتيجة؟ ج- ما هي الفرضيات غير المنطقية أو المتناقضة؟

101. تلميذة في مختبر فيزياء تعين طيف الهدروجين بشبكة الحيود من أجل قياس أطوال الأمواج للاشعاع الصادر. في الطيف،

تلاحظ خطأً أصفر وتجد أن طول موجته  $589 \text{ nm}$ . أ- باعتبار أن هذا جزء من سلسلة بالمر، حدد  $n_i$  والعدد الكمي الأساس للحالة

الابتدائية. ب- ما هو غير المنطقي في هذه النتيجة؟ ج- ما هي الفرضيات غير المنطقية أو المتناقضة؟



**الشكل 1.9** تسمح البنية البلورية للكوارتز بلفقها cleave إلى مستويات ناعمة تعكس الضوء. مما يجعله مناسباً للمجوهرات. السليكون، العنصر الرئيس في الكوارتز. ويشكل أيضاً بلورات بشكله النقي، وهذه البلورات هي الأساس لصناعة الإلكترونيات نصف الناقلية حول العالم.

### مخطط الفصل

1.9 أنواع الروابط الجزيئية

2.9 الطيف الجزيئي

3.9 الروابط في المواد الصلبة البلورية

4.9 نموذج الإلكترون الحر في المعادن

5.9 نظرية عصابات الطاقة في المواد الصلبة

6.9 أنصاف النواقل والإشابة

7.9 أجهزة أنصاف النواقل

8.9 الناقلية الفائقة

### مقدمة:

سنقوم في هذا الفصل، بمعاينة تطبيقات ميكانيك الكم لجمال أكثر تعقيداً مثل الجزيئات والمعادن وأنصاف النواقل والنواقل الفائقة. سنراجع ونطور مفاهيم من الفصل السابق، منها التوابع الموجية والمدارات والحالات الكمومية. وسنقدم أيضاً مفاهيم عديدة جديدة، منها الروابط التساهمية، وسويات الطاقة الدورانية وطاقة فيرمي وطاقة الروابط والإشابة وأزواج كوبر.

الموضوع الرئيس في هذا الفصل هو البنية البلورية للمواد الصلبة. لقرون مضت، كان للمواد الصلبة البلورية قيمة بسبب جمالها ولاسيما المجوهرات كالألماس والزمرد، وأيضاً البلورات الجيولوجية مثل الكوارتز والفلزات المعدنية. ومكنت البنية البلورية لأنصاف النواقل مثل السليكون من تحقيق نجاحات في الصناعات الإلكترونية. في هذا الفصل سندرس كيف أن بنية المواد الصلبة تكسبها الخصائص المختلفة مثل المتانة والشفافية والناقلية الكهربائية وغيرها.

## 1.9 | أنواع الروابط الجزيئية Types of Molecular bonds

### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- التمييز بين أنواع الروابط الجزيئية.
- تحديد طاقة التفكك لجزيء باستخدام مفاهيم طاقة التأين والألفة الإلكترونية وقوة كولون.
- وصف الرابطة التساهمية من حيث تناظر التبادل.
- تفسير البنية الفيزيائية لجزيء ما باستخدام مفهوم التهجين.

نبح ميكانيك الكم بشكل كبير في شرح البنية والروابط بين الجزيئات، وكان الأساس للكيمياء ككل. تشرح الكيمياء الكمومية، كما تدعى عادةً، تساؤلات أساسية مثل: لماذا جزيء الماء  $H_2O$  موجود ولماذا زاوية الترابط بين ذرات الهيدروجين في هذا الجزيء هي بالتحديد  $104.5^\circ$ ، ولماذا تتحد هذه الجزيئات مع بعضها لتشكل الماء السائل عند درجة حرارة الغرفة. إن تطبيق ميكانيك الكم على الجزيئات قد يكون صعباً للغاية من الناحية الرياضية، لهذا نقاشنا سيكون كيفياً فقط.

سنستخدم خلال دراستنا للجزيئات ومن ثم المواد الصلبة، نماذج علمية مختلفة. سننظر في بعض الحالات، إلى الجزيء أو البلورة كمجموعة نوى نقطية مع إلكترونات تدور حولها وفق مسارات محددة-بدقة، كما في نموذج بور. وفي حالات أخرى، سوف نوظف معرفتنا في ميكانيك الكم لدراسة هذه الجمل باستخدام الدالات الموجية ومفهوم سبين الإلكترون. من الضروري تذكر أننا ندرس الفيزياء الحديثة بنماذج مختلفة، وهذه النماذج المختلفة مفيدة في أغراض مختلفة. نحن لا نستخدم دائماً النموذج الأقوى، عندما يكون النموذج الأقل قوة والأسهل للاستخدام وافيّاً للغرض.

### أنواع الروابط:

تشكل الوحدات الكيميائية من عدة أنواع من الروابط الكيميائية. تشكل الرابطة الأيونية عندما ينتقل إلكترونات من ذرة إلى أخرى. تحدث الرابطة التساهمية عندما تتشارك ذرتان أو أكثر بالإلكترونات. تحدث رابطة فان دير فالس بسبب انجذاب جزيئات مستقطبة-الشحنة وهي إلى حد كبير أضعف من الروابط الأيونية والتساهمية. وتوجد أنواع متعددة أخرى من الروابط أيضاً. عادةً يتم الترابط عبر أكثر من آلية واحدة. سيركز هذا القسم على الرابطة الأيونية والتساهمية.

### الروابط الأيونية:

تعد الرابطة الأيونية من أسهل أنواع الروابط للفهم. إنها تفسر تشكّل مركبات الملح مثل كلور الصوديوم  $NaCl$ . ذرة الصوديوم (رمزها  $Na$ ) لها نفس الترتيب الإلكتروني لذرة النيون مع إضافة الإلكترون  $3s$ . ويلزم فقط  $5.14 \text{ eV}$  من الطاقة لإزالة هذا الإلكترون من ذرة الصوديوم. وبذلك يمكن للصوديوم يمكنه بسهولة أن يتخلى عن هذا الإلكترون لذرة مجاورة. مكتسباً ترتيباً أكثر ثباتاً للإلكترونات. ويحتاج الكلور ( $Cl$ ) فقط إلى إلكترون ليكمل سويته الطاقة التكافؤية، لهذا يقبل بسرعة هذا الإلكترون إذا كان بالقرب من ذرة الصوديوم. وبهذا نقول إن لكلور إلفة إلكترونية كبيرة، تبلغ الطاقة المعطاة من قبل ذرة الكلور في هذه العملية نحو  $3.62 \text{ eV}$ . بعد أن ينتقل الإلكترون من ذرة الصوديوم إلى ذرة الكلور، تصبح ذرة الصوديوم أيوناً موجباً وذرة الكلور تصبح أيوناً سالباً. تعطى الطاقة الكلية اللازمة لهذا الانتقال كمايلي:

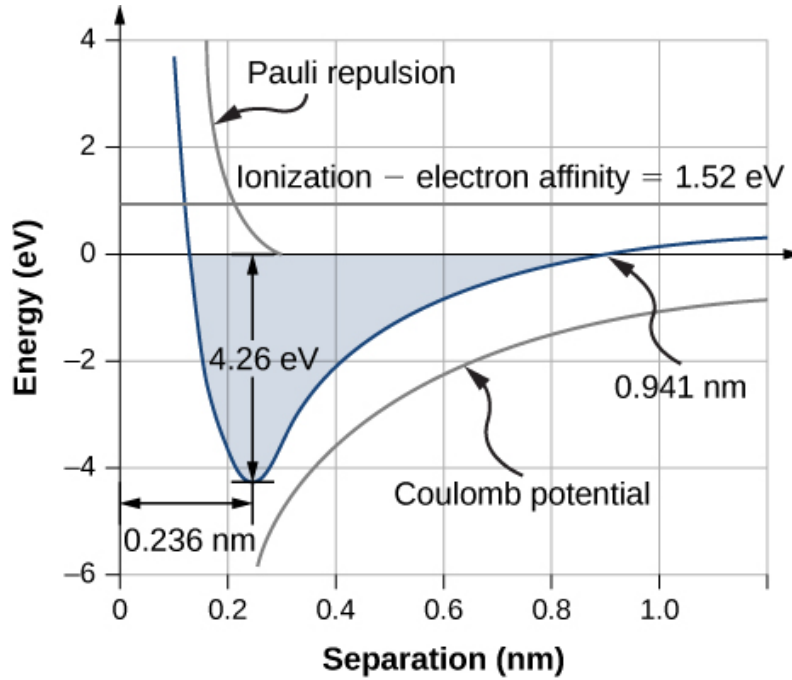
$$E_{\text{transfer}} = 5.14 \text{ eV} - 3.62 \text{ eV} = 1.52 \text{ eV}.$$

يخضع أيون الصوديوم الموجب وأيون الكلور السالب لقوة تجاذب كولون. تعطى الطاقة الكامنة المرافقة لهذه القوة كما يلي:

$$U_{\text{coul}} = -\frac{Ke^2}{r_0} \quad 9.1$$

حيث:  $Ke^2 = 1.440 \text{ eV}\cdot\text{nm}$  و  $r_0$  هو البعد بين الأيونين.

بينما يتحرك أيونا الكلور والصوديوم معاً (ينزلا حاجز الطاقة الكامنة)، تصبح قوة التجاذب بين الأيونات أكبر. ومع ذلك إذا أصبحت الأيونات قريبة جداً من بعضها تبدأ التتابع الموجية للإلكترونات بالتراكب (overlap). بالنظر إلى مبدأ الاستبعاد، يرفع هذا الفعل الإلكترونات وكل الجزئيء إلى سوية طاقة أعلى. تتحقق مسافة الفصل التوازن equilibrium separation distance (أو طول الرابطة) بين الأيونين عندما يكون الجزئيء في طاقته الأخفض (الدنيا). في حالة NaCl ثنائي الذرة، تبلغ هذه المسافة نحو  $0.236 \text{ nm}$ . يوضح الشكل 2.9 الطاقة الكلية للجزئيء NaCl كتابع المسافة بين الأيونين.



**الشكل 2.9** تابعة الطاقة للمسافة بين الأيونين في حالة كلور الصوديوم. تتحقق مسافة الفصل التوازني عندما تكون الطاقة الكلية أصغرية ( $-4.26 \text{ eV}$ ).

الطاقة الكلية اللازمة لتشكيل جزئيء ملح وحيد هي:

$$U_{\text{form}} = E_{\text{transfer}} + U_{\text{coul}} + U_{\text{ex}} \quad 9.2$$

حيث:  $U_{\text{ex}}$  هي الطاقة المرافقة للتنافر بين الإلكترونات المركزية بسبب مبدأ باولي للاستبعاد. يجب أن تكون قيمة  $U_{\text{form}}$  سالبة لكي تتشكل الرابطة تلقائياً. تحدد **طاقة التفكك** بالطاقة اللازمة لفصل الجزئيء إلى أيوناته الأساسية، وتكتب كما يلي:

$$U_{\text{diss}} = -U_{\text{form}} \quad 9.3$$

لكل جزئيء ثنائي الذرة طاقة تفكك مميزة ومسافة الفصل التوازني (طول الرابطة)، يبين **الجدول 1.9** قيمها النموذجية.

## الجدول 1.9 قيم طول الرابطة لبعض المركبات.

مسافة الفصل التوازني (طول الرابطة) nm	طاقة التفكك eV	الجزء
0.236	4.26	NaCl
0.193	4.99	NaF
0.250	3.80	NaBr
0.271	3.10	NaI
0.189	2.08	NaH
0.202	4.86	LiCl
0.239	2.47	LiH
0.238	3.67	LiI
0.267	4.43	KCl
0.282	3.97	KBr
0.227	5.12	RbF
0.279	4.64	RbCl
0.337	3.57	CsI
0.075	4.5	H-H
0.11	9.8	N-N
0.12	5.2	O-O
0.14	1.6	F-F
0.20	2.5	Cl-Cl

### مثال 1.9

#### طاقة الملح

ما هي طاقة تفكك جزيئة الملح (NaCl)؟

#### خطة الحل:

كلور الصوديوم (NaCl) هو ملح يتشكل من رابطة أيونية. يعتمد تغير الطاقة المرافق لهذه الرابطة على ثلاثة عمليات: تأين الصوديوم وقبول إلكترون ذرة صوديوم من قبل ذرة الكلور، وتجاذب كولون للأيونات الناتجة ( $Cl^-$ ,  $Na^+$ ). إذا اقتربت الأيونات كثيراً فإنها تتنافر بحسب مبدأ الاستبعاد (0.32 eV). تبلغ المسافة الفصل التوازنية نحو  $r_0 = 0.236 \text{ nm}$ .

#### الحل:

تغير الطاقة المرافق لانتقال إلكترون من Na إلى Cl هو 1.52 eV وكما ناقشناه سابقاً في هذه الفقرة. تكون الذرات عند مسافة الفصل التوازنية مبتعدة بمسافة  $r_0 = 0.236 \text{ nm}$ . تبلغ الطاقة الكامنة الكهروستاتيكية للذرات نحو:

$$U_{\text{coul}} = -\frac{Ke^2}{r_0} = -\frac{1.44 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{0.236 \text{ nm}} = -6.10 \text{ eV}.$$

الفرق الطاقي الكلي المترفق مع تشكل جزيئة NaCl هو:


$$E_{\text{form}} = E_{\text{transfer}} + U_{\text{coul}} + U_{\text{ex}} = 1.52 \text{ eV} + (-6.10 \text{ eV}) + 0.32 \text{ eV} = -4.26 \text{ eV}$$

وبالتالي، طاقة التفكك الجزيئية NaCl نحو 4.62 eV.

#### ملاحظة:

إن تشكل جزيئة NaCl برابطة أيونية مناسب من الناحية الطاقية. طاقة التفكك أو الطاقة اللازمة لفصل جزيئة NaCl إلى أيون

$Na^+$  و  $Cl^-$  هي 4.62 eV، وهي موافقة مع الشكل 2.9.

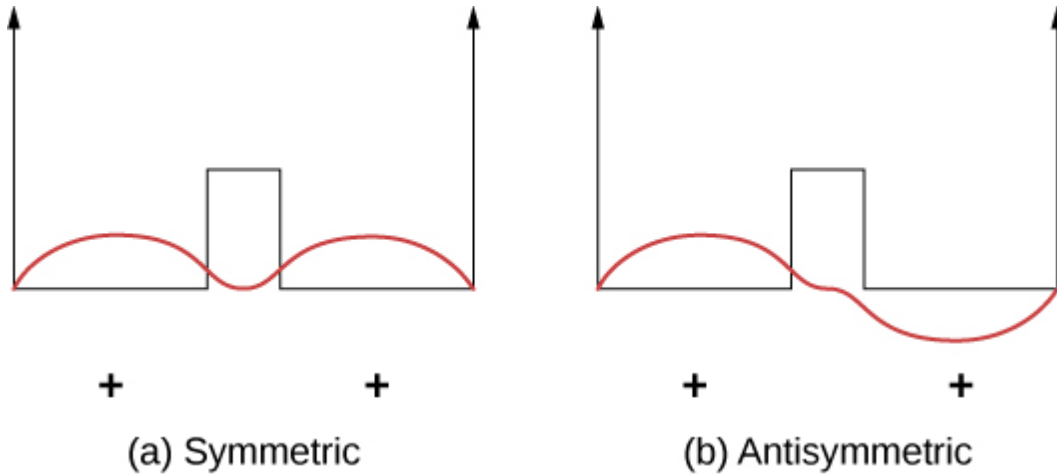
1.9 تحقق من فهمك: لماذا الطاقة الكامنة المترافقة مع مبدأ الاستبعاد لباولي موجبة في المثال 1.9؟ 

من أجل أيون الصوديوم في بلورة NaCl يلزم تعديل الطاقة الكامنة الكولونية  $U_{\text{coul}}$  بمعامل يُعرف بثابت مادلونغ. يأخذ هذا المعامل بالحساب التفاعل بين أيون الصوديوم مع كل من أيونات الكلور والصوديوم القريبة. تبلغ قيمة ثابت مادلونغ لبلورة NaCl نحو 1.75. تدل هذه القيمة على المسافة الفاصلة المتوازنة بين أيوني  $\text{Na}^+$  و  $\text{Cl}^-$  وتبلغ نحو 0.280 nm وهي أكبر بقليل من حالة الجزيء ثنائي الذرة NaCl. سنعود إلى هذه النقطة لاحقاً.

### الروابط التساهمية

ينتقل في الرابطة الأيونية الإلكترون من ذرة إلى أخرى. بينما في الرابطة التساهمية يتم تشارك إلكترون بين ذرتين. آلية الرابطة الأيونية لا يمكنها تفسير وجود جزيئات مثل  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$  و  $\text{CO}_2$ , حيث لا توجد مسافة فاصلة تكون فيها الطاقة الكامنة السالبة للتجاذب أكبر بالمطال من الطاقة اللازمة لتشكيل الأيونات. يعتمد الفهم الدقيق لكيفية ترابط هذه الجزيئات برابطة تساهمية على فهم أعمق لميكانيك الكم والذي يتخطى ما يعطيه هذا الكتاب ولكننا نوعاً ما سننصف الآليات في القسم التالي.

يمكن فهم الروابط التساهمية باستخدام المثال البسيط لجزيء  $\text{H}_2^+$  والذي يتضمن إلكترونات واحداً في الحقل الكهربائي لبروتونين. هذا النظام يمكن نمذجته بالإلكترون في بئر مربع مزدوج (الشكل 3.9). من الممكن أن يوجد هذا الإلكترون في كلا البئرين بشكل متساوٍ، لذلك قد يكون التابع الموجي متناظراً أو غير متناظر في نقطة عند منتصف المسافة بين البئرين.



**الشكل 3.9** نموذج بئر واحد للرابطة التساهمية في جزيئة  $\text{H}_2^+$ . -a- التابع الموجي المتناظر لإلكترون مشترك من قبل البروتونين موجبي الشحنة. (الممثل بالبئرين المربعين المحدودين). -b- التابع الموجي غير المتناظر.

الآن تخيل أن البئرين متباعداً بمسافة كبيرة. في الحالة الأساسية، يكون التابع الموجي في حالة من الحالتين الممكنتين التاليتين: إما قمة موجبة وحيدة (تابع يشبه الجيب "حدبة") في كلا البئرين (حالة التناظر)، أو قمة موجبة في بئر وقمة سالبة في الآخر (حالة عدم تناظر). لهاتين الحالتين نفس الطاقة. ولكن عندما يقترب البئران يصبح التابع الموجي متناظر هو الحالة الأساسية والحالة غير المتناظرة تصبح الحالة المثارة الأولى - بمعنى آخر تنقسم السوية الطاقية للإلكترون. تصبح الحالة المتناظرة مكانياً هي الحالة الملائمة من الناحية الطاقية (الطاقة الأقل).

التحليل نفسه مناسب للإلكترون مشترك بين ذرتي الهيدروجين. في هذه الحالة يكون للتتابع الموجية للحالة الأساسية الشكل  $e^{-r/a_0}$  أو  $e^{-(|x|/a_0)}$  في بعد واحد. والأكثر ملاءمة من الناحية الطاقية للحالة المتناظرة مكانياً والتي تؤكد على وجود كثافة بشحنة عالية في المنتصف بين البروتونين حيث سيحذب الإلكترونان على الأغلب البروتونين موجبي الشحنة لبعضهما البعض.

إذا أضيف إلكترون ثانٍ لهذه الجلملة لتشكيل جزيء  $H_2$ ، التابع الموجي فيجب أن يصف كلا الجسيمين متضمناً علاقتهما المكانية والسبين النسبي. ويجب أيضاً أن يراعي هذا التابع الموجي عدم القدرة على التمييز بين الإلكترونات. ("إذا رأيت إلكترونًا واحدًا، فقد رأيتها كلها"). بالأخص، يجب أن لا ينتج عن تبادل الإلكترونات أي تأثير ملحوظ، وتدعى هذه الخاصية تناظر التبادل. يمكن أن يكون تناظر التبادل متناظرًا، بحيث لا ينتج أي تغيير في التابع الموجي أو غير متناظر، حيث ينتج تغيير كلي في إشارة التابع الموجي - وكلاهما غير قابل للملاحظة.

كما سنناقش لاحقاً، يجب أن يكون التابع الموجي الكلي للإلكترونات غير متناظر عند التبادل. على سبيل المثال، إلكترونان مرتبطان بجزيء الهيدروجين يمكن أن يكونا في حالة متناظرة المكان ومع سبينين متوازنين متعاكسين (↑↓) أو غير متناظرة المكان مع سبينين متوازنين (↑↑). تكون حالة السبينين المتوازنين والمتعاكسين هي الملائمة من الناحية الطاقية وهي المستخدمة في الترابط التساهمي. إذا اقترب البوتونان من بعضهما بشكل كبير، في هذه الحالة يصبح التنافر بين البروتونين مهماً. (في جزيئات أخرى يخضع هذا التأثير لمبدأ الاستبعاد). وكنتيحة  $H_2$  يصل إلى مسافة التوازن التي تبلغ نحو  $0.074 \text{ nm}$  بطاقة ربط مساوية  $4.52 \text{ eV}$ .



تفضل زيارة هذا البرنامج التعليمي والمحاكاة التفاعلية:

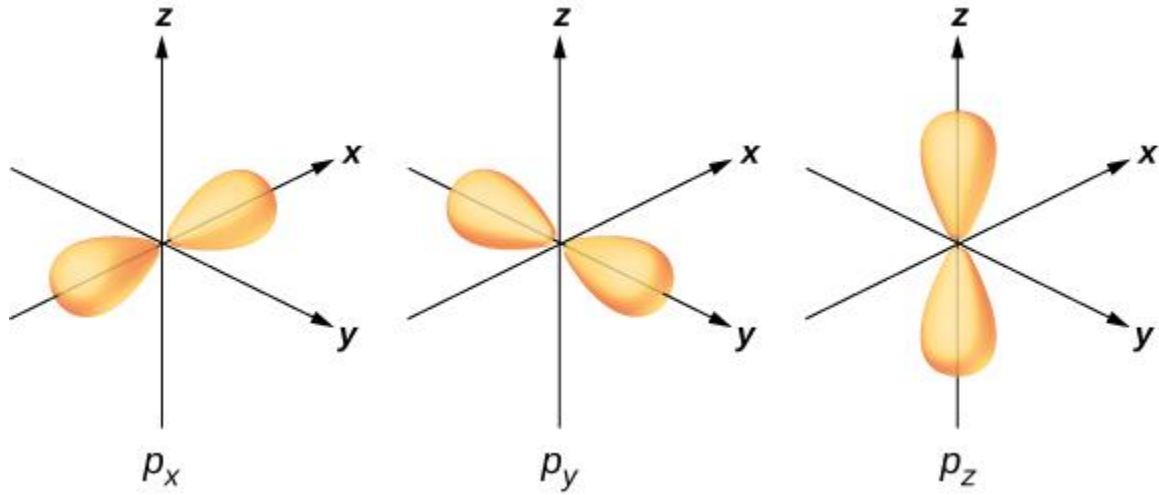
**PBS Learning Media tutorial and interactive simulation (<https://openstaxcollege.org/l/21covalentbond>)**

لاستكشاف قوى التجاذب والتنافر التي تعمل على الجزيئات والروابط التساهمية في جزيء  $H_2$ .

يستبعد ميكانيك الكم العديد من أنواع الجزيئات. على سبيل المثال، لا يتشكل الجزيء  $H_3$ ، لأنه إذا اقترب  $H$  من هيدروجين ثنائي الذرة، فإن التابع الموجي للإلكترون في هذه الذرة سيتراكب مع الإلكترونين في الذرتين الأخريين. إذا كانت الإلكترونات الثلاثة في الحالة الأساسية للذرات الخاصة بها، يتشارك زوج من هذه الإلكترونات بجميع الأرقام الكمية، والذي هو مرفوض بحسب مبدأ الاستبعاد. بدلاً من ذلك يُجبر واحد من الإلكترونات على أن يصحح في سوية طاقية أعلى. لا توجد مسافة فصل بين هذه البروتونات الثلاثة يكون عندها التغير الكلي في الطاقة لهذه العملية سالب - حيث يحدث عنده الترابط التلقائي. بشكل مشابه، ليس مرتبط تساهمياً تحت شروط عادية، لأن هذه الذرة لا تملك إلكترونات تكافؤ لتشاركها. عندما تقترب الذرات من بعضها، تتشابك التوابع الموجية للإلكترونات الداخلية، وبحسب مبدأ الاستبعاد، تجبر الإلكترونات على الانتقال إلى سوية طاقية أعلى. لا توجد مسافة يكون عندها مثل هذا الجزيء مفضلاً من الناحية الطاقية.

### الترابط في الجزيئات متعددة الذرات

يتكون الجزيء متعدد الذرات من أكثر من ذرتين. الأمثلة تمتد من جزيء الماء البسيط إلى جزيء البروتين المعقد. يمكن أن تفهم بنية هذه الجزيئات من خلال الروابط التساهمية والتهجين. التهجين هو تغيير في البنية الطاقية للذرة بحيث تساهم سويات متباينة (سويات يمكن كتابتها كتوابع خطي مع أخرى) في الترابط الذري. لتوضيح التهجين، نأخذ بالحسبان الترابط في جزيء الماء  $H_2O$ . إن التشكيل الإلكتروني للأكسجين هو  $1s^2 2s^2 2p^4$ . تكون الإلكترونات  $1s$  و  $2s$  في سويات طاقية مغلقة و لا تشارك في الترابط الذري. وتعد الإلكترونات الأربعة المتبقية إلكترونات تكافؤ. يمكن لهذه الإلكترونات أن تملأ ست سويات (سبين للأعلى وللأسفل،  $m = 0, \pm 1$ ). تكون طاقات هذه السويات متماثلة، لذا يمكن لذرة الأكسجين أن تساهم في أي تركيب خطي لهذه السويات خلال الترابط مع ذرتي الهيدروجين. تدعى هذه التراكيب الخطية (التي درستها في فصل البنية الذرية) مدارات ذرية، ويرمز لها:  $p_x$ ,  $p_y$  و  $p_z$ . يبين الشكل 4.9 توزيع شحنة الإلكترون لهذه المدارات.



**الشكل 4.9** للأوكسجين أربعة إلكترونات تكافؤ. في حالة جزيء الماء يملأ إلكترونات التكافؤ المدار  $p_z$ ، ويملاً إلكترون واحد كلاً من المدارين  $p_x$  و  $p_y$ . يسهم المداران  $p_x$  و  $p_y$  في الترابط بين ذرتي الهيدروجين لتشكيل  $H_2O$ . دون تتافر ذرتي الهيدروجين، تكون زاوية الترابط بين ذرتي الهيدروجين  $90^\circ$  درجة.

يعد تحويل توزيع التابع الموجي الإلكتروني للأوكسجين إلى المدارات  $p_x$ ،  $p_y$  و  $p_z$  بوجود ذرات الهيدروجين مثلاً على التهجين. يوجد إلكترونان في المدار  $p_z$  مع زوج من السبينات ( $\uparrow\downarrow$ ). ويتواجد إلكترون في كل من المدارين  $p_x$  و  $p_y$ ، مع سبين فردي. يشارك المداران الأخيران في الترابط مع ذرة الهيدروجين. بالاعتماد على **الشكل 4.9**، نتوقع أن تكون زاوية الترابط H-O-H نحو  $90^\circ$ . ولكن، إذا أدخلنا تأثير التنافر بين الذرات فتصبح زاوية الترابط نحو  $104.5^\circ$ . يمكن أن تستخدم نفس هذه المناقشة لفهم الشكل رباعي الوجوه للميثان ( $CH_4$ ) وجزيئات أخرى.

## 2.9 | الطيف الجزيئي Molecular spectra

### الأهداف التعليمية

- في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:
- استخدام مفاهيم الطاقة الاهتزازية والدورانية لوصف الانتقالات الطاقية في جزيء ثنائي الذرة.
- شرح الملامح الرئيسية لطيف طاقة الدوران الاهتزازي لجزيء ثنائي الذرة.
- تقدير الطاقات المسموح بها لجزيء دوراني.
- تحديد مسافة الفصل التوازنية بين الذرات في جزيء ثنائي الذرة من طيف الامتصاص الدوراني - الاهتزازي.

تعد السويات الطاقية الجزيئية أكثر تعقيداً من السويات الطاقية الذرية، نظراً لأن الجزيئات يمكن لها أيضاً أن تهتز وتدور. وتكمن الطاقات المرتبطة بهذه الحركات في مجالات مختلفة، وبالتالي يمكن دراستها بشكل منفصل. تبلغ مرتبة الانتقالات الإلكترونية بالترتيب  $1\text{ eV}$ ، والتحويلات الاهتزازية بالترتيب  $10^{-2}\text{ eV}$ ، والانتقالات الدورانية بالترتيب  $10^{-3}\text{ eV}$ . يصعب بالنسبة للجزيئات المعقدة، وصف هذه التغييرات في الطاقة، لذلك سنبدأ بالحالة البسيطة لجزيء ثنائي الذرة. تعطى وفقاً للميكانيك الكلاسيكي، طاقة دوران جزيء ثنائي الذرة بالعلاقة:

$$E_r = \frac{L^2}{2I} \quad (9.4)$$



حيث  $I$  هو عزم العطالة و  $L$  هو العزم الزاوي. وفقاً لميكانيك الكم ، يكون العزم الزاوي الدوراني مكمم:

$$L = \sqrt{l(l+1)} h \quad (l = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (9.5)$$

حيث  $l$  هو العدد الكمي للعزم الزاوي المداري. والسوية الطاقية المسموح بها لجزيء ثنائي الذرة هي:

$$E_r = l(l+1) \frac{h^2}{2I} = l(l+1) E_{0r} \quad (l = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (9.6)$$

حيث يتم تعريف الطاقة الدورانية المميزة لجزيء ما بالعلاقة:

$$E_{0r} = \frac{h^2}{2I} \quad (9.7)$$

من أجل جزيء ثنائي الذرة، يعبر عن عزم العطالة مع الكتلة المختزلة  $\mu$  هو بالعلاقة:

$$I = \mu r_0^2 \quad (9.8)$$

حيث  $r_0$  هو المسافة الكلية بين الذرتين. ويعبر في هذه الحالة عن الفرق في الطاقة بين السويات الدورانية بالعلاقة:

$$\Delta E_r = E_{l+1} - E_l = 2(l+1) E_{0r} \quad (9.9)$$

تتطلب الدراسة المفصلة للانتقالات بين سويات الطاقة الدورانية الناتجة عن امتصاص أو إصدار الإشعاع (ما يُسمى بالانتقال ثنائي القطب الكهربائي) أن يكون:

$$\Delta l = \pm 1 \quad (9.10)$$

تُعرف هذه القاعدة باسم قاعدة الاصطفاء، والتي تحد من الانتقالات الممكنة من حالة كمومية إلى أخرى. تعد المعادلة 9.10 قاعدة الاصطفاء للانتقالات الطاقة الدورانية. وتطبق فقط على الجزيئات ثنائية الذرة التي لها عزم ثنائي قطب كهربائي. لهذا السبب، لا تواجه الجزيئات المتناظرة مثل  $N_2$  و  $H_2$  انتقالات في الطاقة الدورانية بسبب امتصاص أو إصدار الإشعاع الكهرومغناطيسي.

## مثال 8.2

### طاقة الدوران لجزيء HCl

حدد أدنى ثلاث سويات طاقة دورانية لجزيء كلور الهيدروجين (HCl).

#### خطة الحل:

إن كلور الهيدروجين (HCl) هو جزيء ثنائي الذرة يتميز بمسافة فصل توازنية تبلغ نحو  $0.127 \text{ nm}$ . تعتمد سويات الطاقة الدورانية فقط على عزم العطالة  $I$  والعدد الكمي للعزم الزاوي  $l$  (في هذه الحالة  $l = 0, 1, 2$ ). يعتمد عزم العطالة، بدوره، على مسافة الفصل التوازنية (المعطاة) والكتلة المختزلة، والتي تعتمد على كتل الذرتين  $H$  و  $Cl$ .

#### الحل:

أولاً، نحسب الكتلة المختزلة. إذاً الجسيم 1 هو الهيدروجين والجسيم 2 هو الكلور، فلدينا:

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} = \frac{(1.0u)(35.4u)}{1.0u + 35.4u} = 0.97u = 0.97u \left( \frac{931.5 \frac{McV}{2}}{1u} \right) = 906 \frac{McV}{c^2}$$

وتبلغ طاقة الكتلة المقابلة السكونية:

$$\mu c^2 = 9.06 \times 10^8 \text{ eV.}$$

هذا يسمح لنا بحساب الطاقة المميزة:

$$E_{0r} = \frac{h^2}{2I} = \frac{h^2}{2(\mu r_0^2)} = \frac{(\hbar c)^2}{2(\mu c^2) r_0^2} = \frac{(197.3 \text{ eV}\cdot\text{nm})^2}{2(9.06 \times 10^8 \text{ eV})(0.127 \text{ nm})^2} = 1.33 \times 10^{-3} \text{ eV.}$$

(لاحظ كيف كُتبت هذه العلاقة بدلالة طاقة الكتلة السكونية. هذه التقنية شائعة في حسابات الفيزياء الحديثة). يُعبر عن سويات

الطاقة الدورانية بالعلاقة:

$$E_r = l(l+1) \frac{h^2}{2I} = l(l+1) E_{0r}$$

حيث  $l$  هو العدد الكمي للعزم الزاوي المداري. لذا تكون أخفض ثلاث سويات الطاقة لجزيء HCl هي:

$$\begin{aligned} l=0; E_r &= 0 \text{ eV (no rotation)} \\ l=1; E_r &= 2E_{0r} = 2.66 \times 10^{-3} \text{ eV,} \\ l=2; E_r &= 6 E_{0r} = 7.99 \times 10^{-3} \text{ eV.} \end{aligned}$$

### ملاحظة:

يرتبط الطيف الدوراني بالتحويلات الضعيفة (1/1000 إلى 1/100 eV). علماً أن طاقة الإلكترون في حالة الهدروجين الأساسية هي 13.6 eV.

**2.9 تحقق من فهمك:** على ماذا يدل الفرق الطاقى بين خطوط الامتصاص في الطيف الدوراني لجزيء ثنائي الذرة؟

**السوية الطاقية الاهتزازية:** هي سوية طاقية مرتبطة بالطاقة الاهتزازية لجزيء ما وتقديرها صعب مقارنةً بالسوية الطاقية الدورانية. ومع ذلك، يمكننا تقدير هذه السويات بافتراض أن الذرتين في الجزيء ثنائي الذرة متصلتان بنابض مثالي له ثابت القوة  $k$  يعبر عن الطاقة الكامنة في جملة نابض كما يلي:

$$U_{osc} = \frac{1}{2}k\Delta r^2 \quad (9.11)$$

حيث  $\Delta r$  هو تغيير في "الطول الطبيعي" للجزيء على طول الخط الذي يربط بين الذرتين. يعطي حل معادلة شرودنغر لهذه الطاقة الكامنة:

$$E_n = (n + \frac{1}{2}) \hbar \omega \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (9.12)$$

حيث  $\omega$  هو التردد الزاوي الطبيعي للاهتزاز و  $n$  هو الرقم الكمي الاهتزازي. إن التنبؤ بأن سويات الطاقة الاهتزازية متباعدة بشكل متساو ( $E = \hbar \omega$ ) أظهر أنها جيدة في حالة الطاقات الصغيرة.

تتطلب الدراسة المفصلة للانتقالات بين السويات الطاقية الاهتزازية الناتجة عن امتصاص أو إصدار الإشعاع (وما يُسمى بالتحديد انتقال ثنائي القطب الكهربائي) أن يكون:

$$\Delta n = \pm 1 \quad (9.13)$$

تمثل **المعادلة 9.13** قاعدة الاصطفاء للانتقالات الطاقية الاهتزازية. وكما ذكرنا من قبل، تنطبق هذه القاعدة فقط على الجزيئات ثنائية الذرة التي لها عزم ثنائي قطب كهربائي. لا تواجه الجزيئات المتناظرة مثل هذه الانتقالات. بسبب قواعد الاصطفاء يتضمن امتصاص أو إصدار الإشعاع من قبل جزيء ثنائي الذرة، انتقال في الحالات الاهتزازية والدورانية. على وجه التحديد، إذا تغير رقم الكم الاهتزازي ( $n$ ) بوحدة واحدة، فسيغير رقم الكم الدوراني بوحدة واحدة. يبين الشكل 5.9 مخطط السويات الطاقية للانتقالات المحتملة.

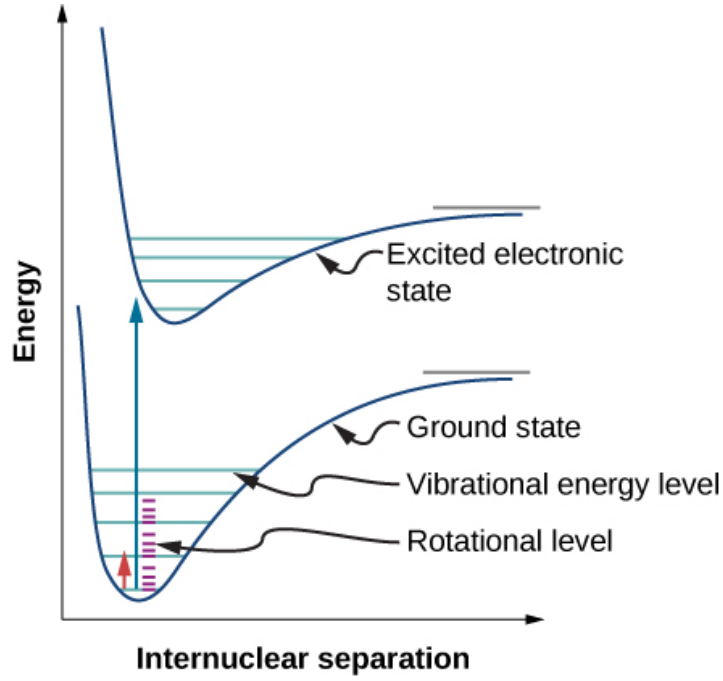
يبين **الشكل 6.9** طيف الامتصاص لمثل هذه الانتقالات في جزيء حمض كلور الماء (HCl).

تنتج قمم الامتصاص ناتجة عن الانتقالات من السويات الاهتزازية  $n=0$  إلى  $n=1$ . يعبر عن الفروق الطاقية في عصابة القمم عند اليسار واليمين، على التوالي كما يلي:

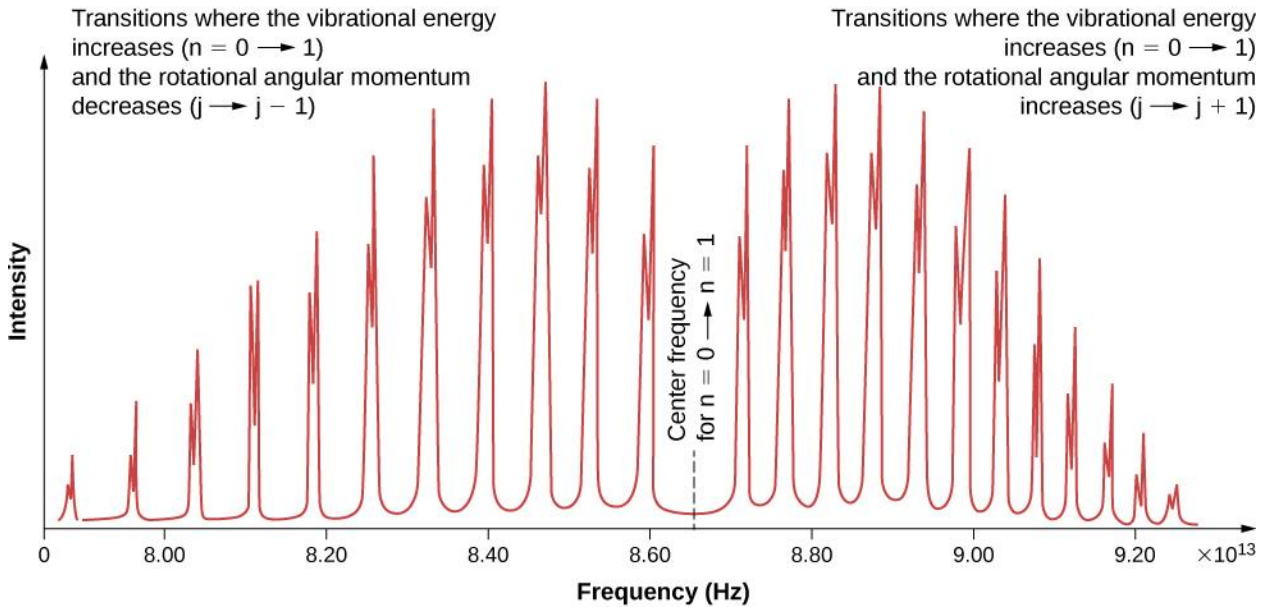
$$\Delta E_{l \rightarrow l+1} = \hbar\omega + 2(l+1)E_{0r} = \hbar\omega + 2E_{0r}, \hbar\omega + 4E_{0r}, \hbar\omega + 6E_{0r}, \dots \text{(العصابة اليمينية)}$$

$$\Delta E_{l \rightarrow l-1} = \hbar\omega - 2lE_{0r} = \hbar\omega - 2E_{0r}, \hbar\omega - 4E_{0r}, \hbar\omega - 6E_{0r}, \dots \text{(العصابة اليسرى)}$$

وبعد ذلك يمكن تحديد عزم العطالة من التباعد الطاقى بين القمم الفردية ( $2E_{0r}$ ) أو من الفجوة بين العصابتين اليمينية واليسرى ( $4E_{0r}$ ). التردد في وسط هذه الفجوة هو تردد الاهتزاز.



**الشكل 5.9** ثلاثة أنواع من مستويات الطاقة في جزيء ثنائي الذرة: إلكترونية واهتزازية ودورانية. إذا تغير رقم الكم الاهتزازي ( $n$ ) بوحدة واحدة، فإن رقم الكم ( $l$ ) الدوراني تغير بوحدة واحدة.



**الشكل 6.9** الطيف امتصاص جزيء كلور الهيدروجين (HCl) من مستويات الطاقة من  $n = 0$  إلى  $n = 1$ . تشير القمم المنفصلة إلى تكميم العزم الزاوي للجزيء. تشير العصابات الموجودة على اليسار إلى انخفاض في العزم الزاوي، بينما تشير العصابات الموجودة على اليمين إلى زيادة في العزم الزاوي.

### 3.9 | الترابط في المواد الصلبة البلورية Bonding in Crystalline Solids

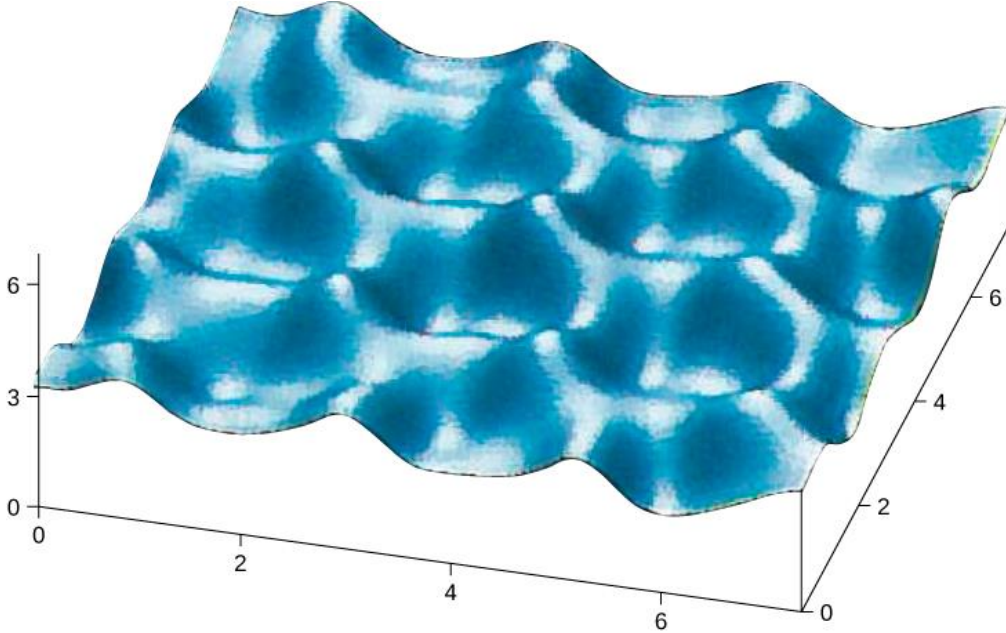
#### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- وصف البنية المترابطة في المواد الصلبة الشائعة.
- توضيح الفرق بين الترابط في مادة صلبة وفي جزيء.
- تحديد مسافة الفصل التوازنية والتي تعطي خواص البلورة.
- تحديد طاقة تفكك الملح التي تعطي خواص البلورة.

سندرس في بداية من هذا القسم المواد الصلبة البلورية، التي تتكون من ذرات مرتبة وفق نمط منتظم ممتد يُسمى الشبكة البلورية. تُصنف المواد الصلبة التي لا تشكل أو لا تتمكن من تشكيل بلورات كمادة صلبة غير متبلورة. على الرغم من أن المواد الصلبة غير المتبلورة (مثل الزجاج) لديها مجموعة متنوعة من التطبيقات التكنولوجية المثيرة للاهتمام، فإن تركيز هذا الفصل سيكون على المواد الصلبة البلورية.

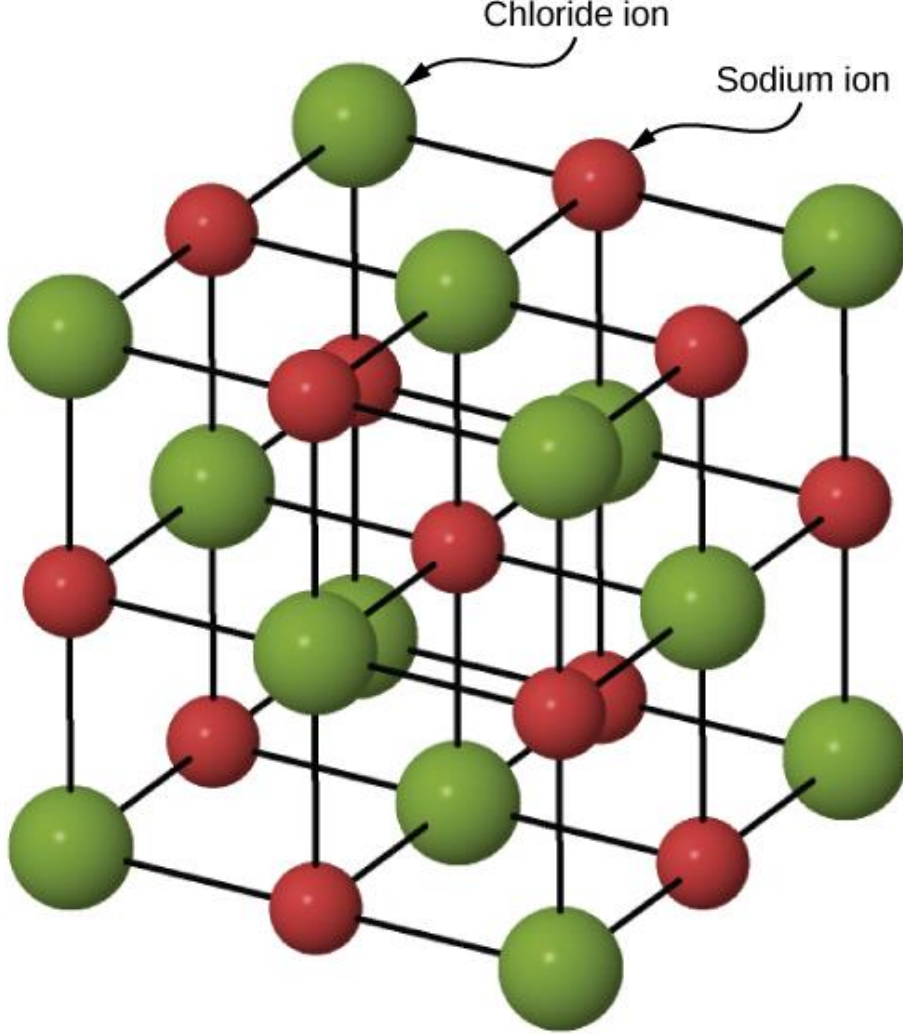
تقوم الذرات بترتيب نفسها ضمن شبكة لتشكيل بلورة بسبب قوى الجذب الصافية بين إلكتروناتها ونواها الذرية. تنتمي البلورات المتكونة من ترابط الذرات إلى واحدة من ثلاث فئات، مصنفة حسب نوع روابطها: الأيوني والتساهمي والمعدني. يمكن أن تتراخ الجزيئات معاً لتشكيل بلورات؛ هذه الروابط، التي لم تناقش هنا، تصنف على أنها جزيئية. في أوائل القرن العشرين، كان النموذج الذري للمادة الصلبة متضارباً. لدينا الآن دليل مباشر على وجود الذرات في المواد الصلبة (الشكل 7.9).



**الشكل 7.9** صورة مأخوذة بواسطة مجهر المسح النفقي STM لسطح الغرافيت. تمثل القمم الذرات، المرتبة وفق على شكل مسدّس. المقياس هو بوحدة الانجستروم.

## الترايب الأيوني في المواد الصلبة

يشكل العديد من المواد الصلبة عن طريق الترايب الأيوني. مثال نموذجي هو بلورة كلور الصوديوم، كما ناقشنا سابقاً. تتقل الإلكترونات من ذرات الصوديوم إلى ذرات الكلور المجاورة، نظراً لأن إلكترونات التكافؤ الموجودة في الصوديوم مرتبطة بشكل فضفاض وأن الكلور لديه إلفة إلكترونية كبيرة. تنتظم أيونات الصوديوم المشحونة إيجابياً وأيونات الكلور المشحونة سالباً في مجموعة منتظمة من الذرات (الشكل 8.9).



**الشكل 8.9** بنية بلورة كلور الصوديوم. يتم ترتيب أيونات الصوديوم والكلوريد في بنية مكعبة مركزية الوجوه (FCC).

تكون توزيعات الشحنة لأيونات الصوديوم والكلور متناظرة كروياً، يبلغ قطر أيون الكلور ضعف قطر أيون الصوديوم. يُسمى أخفض ترتيب للطاقة لهذه الأيونات ببنية **المكعب مركزي الوجوه FCC**. يكون في هذه البنية، كل أيون أقرب إلى ست أيونات من النوع الآخر. إن خلية الوحدة هي عبارة عن مكعب - تشغل الذرة مركزه وزوايا كل "وجه" من هذا المكعب. يعبر عن الطاقة الكامنة الجاذبة لأيون  $Na^+$  نظراً لحقول هذه الأيونات الستة من  $Cl^-$  بالشكل التالي:

$$U_1 = -6 \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (9.14)$$

حيث تشير الإشارة السالبة إلى كمون الجذب (والمحدد  $k = 1 / 4\pi\epsilon_0$ ). يوجد عند المسافة  $r\sqrt{2}$  أقرب جيرانها: اثنا عشر أيون  $Na^+$  بنفس الشحنة. يعبر عن طاقة التنافر الكامنة الكلية المرتبطة بهذه الأيونات بالعلاقة:

$$U_2 = 12 \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \sqrt{2}r} \quad (9.15)$$

ثم ثمانية أيونات  $Cl^-$  عند المسافة  $r\sqrt{3}$  من أيون  $Na^+$ . تعطى الطاقة الكامنة للأيون  $Na^+$  في حقل هذه الأيونات الثمانية بالعلاقة:

$$U_3 = -8 \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\sqrt{3}r} \quad (9.16)$$

بالاستمرار بنفس الطريقة مع مجموعات بديلة من أيونات  $Cl^-$  و  $Na^+$ ، نجد أنه يمكن كتابة الطاقة الكامنة الصافية الجاذبة  $U_A$  لأيون  $Na^+$  منفرد كمايلي:

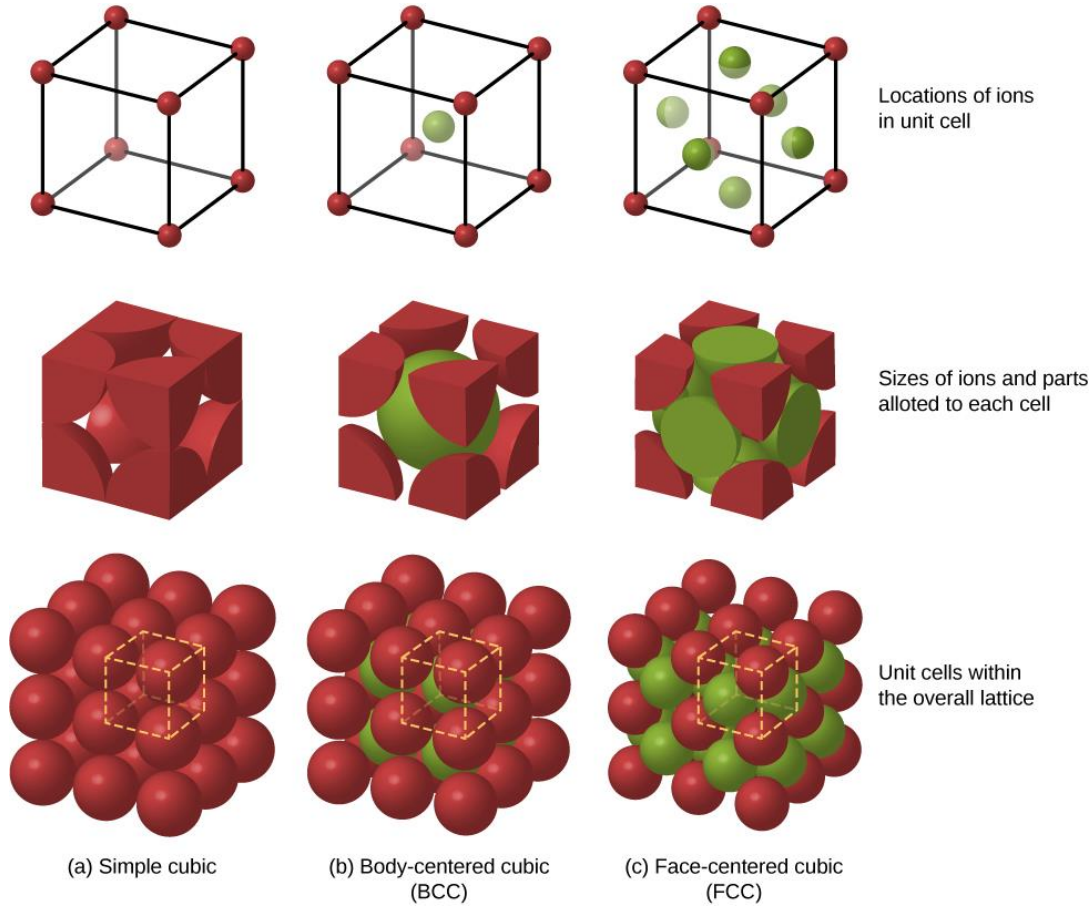
$$U_{coul} = -\alpha \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (9.17)$$

حيث  $\alpha$  هو ثابت مادلونج، دُكر سابقاً. يمكننا من هذا التحليل، أن نرى أن هذا الثابت هو المجموع المتقارب اللانهائي التالي:

$$\alpha = 6 - \frac{12}{\sqrt{2}} + \frac{8}{\sqrt{3}} + \dots \quad (9.18)$$

تقدم الأيونات البعيدة مساهمة كبيرة في هذا المجموع، لذلك يتقارب ببطء، ويجب استخدام العديد من الحدود لحساب  $\alpha$  بدقة. تبلغ  $\alpha$  من أجل جميع المواد الصلبة الأيونية من النوع FCC، نحو 1.75.

تشتمل ترتيبات التراص الأخرى المحتملة للذرات في المواد الصلبة على مكعب بسيط (SC) ومكعب مركزي الجسم (BCC). يبين الشكل 9.9 مقارنة بين البنى المتراسة للمواد الصلبة المختلفة.. يمثل الصف الأول موقع الأيونات وليس مقاسها؛ يشير الصف الثاني إلى خلايا الوحدة لكل بنية أو تشابك؛ ويمثل الصف الثالث موقع وحجم الأيونات. تحتوي البنية BCC على ثمانية من أقرب الجيران، مع ثابت مادلونج نحو 1.76 - والتي تختلف فقط قليلاً عن البنية FCC. إن تحديد ثابت مادلونج لمواد صلبة محددة هو عمل صعب وهو موضوع البحث الحالي.



الشكل 9.9 البنى المتراسة للمواد الصلبة من اليسار إلى اليمين: (a) مكعب بسيط، (b) مكعب مركزي الجسم (BCC)، (c) مكعب مركزي الوجوه (FCC). تقلل كل بنية بلورية من طاقة الجملة.

لا تُعزى طاقة أيونات الصوديوم كلياً إلى قوى الجذب بين أيونات متعاكسة الشحنة. إذا تم تقريب هذه الأيونات إلى بعضها بشكل كبير، تتراكب التتابع الموجية للإلكترونات الداخلية للأيونات وتتبعاد الإلكترونات بسبب مبدأ الاستبعاد. وبالتالي فإن الطاقة الكامنة الكلية لأيون  $\text{Na}^+$  هي مجموع قوة كولون الكامنة الجاذبة ( $U_{\text{coul}}$ ) وكمون التنافر المرتبط بمبدأ الاستبعاد ( $U_{\text{ex}}$ ). يتطلب حساب كمون التنافر أجهزة كمبيوتر قوية. لحسن الحظ، ومع ذلك يمكن تقدير هذه الطاقة بدقة باستخدام صيغة بسيطة تحتوي على وسائط قابلة للتعديل:

$$U_{\text{ex}} = \frac{A}{r^n} \quad (9.19)$$

حيث يتم اختيار الوسيطين  $A$  و  $n$  للحصول على قيم متوافقة مع البيانات التجريبية. يشار إلى المتغير  $n$  في المسألة المعروضة في نهاية هذا الفصل على أنه ثابت التنافر. وبالتالي يعبر عن الطاقة الكامنة الكلية لأيون  $\text{Na}^+$  بالعلاقة:

$$U = -\alpha \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} + \frac{A}{r^n} \quad (9.20)$$

عند التوازن، لا يوجد قوة صافية على الأيون، لذا تبلغ المسافة بين  $\text{Na}^+$  و  $\text{Cl}^-$  المتجاورين  $r_0$  والتي عندها تكون  $U$  أصغرية. بفرض أن:  $\frac{dU}{dr} = 0$  يكون لدينا:

$$0 = \frac{\alpha e^2}{4\pi\epsilon_0 r_0^2} - \frac{nA}{r_0^{n+1}} \quad (9.21)$$

ومنه

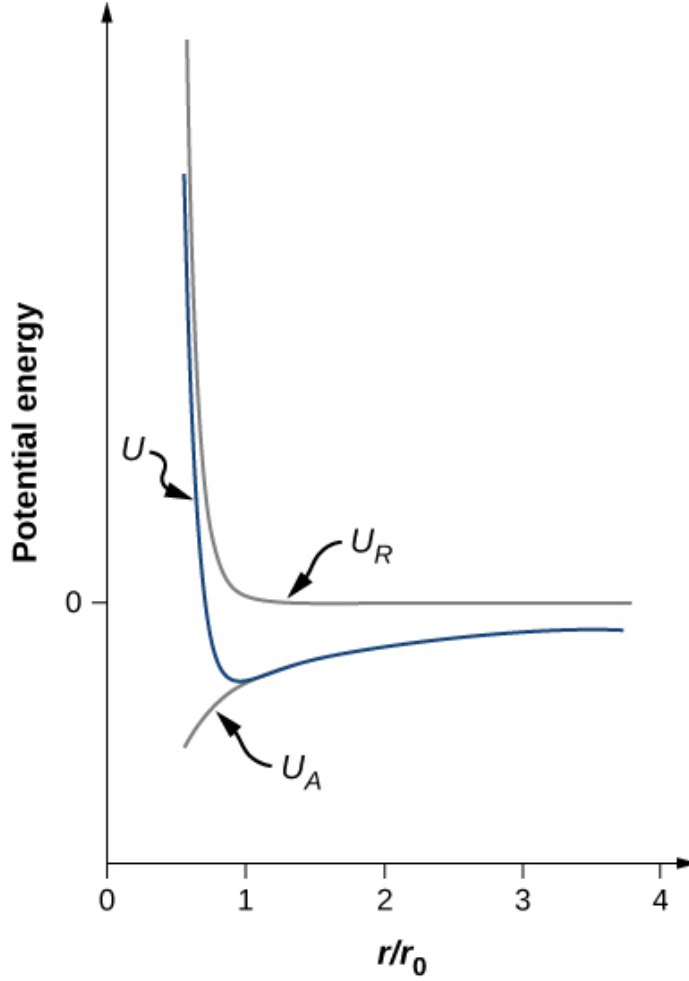
$$A = \frac{\alpha e^2 r_0^{n-1}}{4\pi\epsilon_0 n} \quad (9.22)$$

بإدخال هذا المقدار في علاقة الطاقة الكامنة الكلية، يكون لدينا:

$$U = \frac{\alpha e^2}{4\pi\epsilon_0 r_0} \left[ \frac{r_0}{r} - \frac{1}{n} \left( \frac{r_0}{r} \right)^n \right] \quad (9.23)$$

لاحظ أنه للطاقة الكامنة الكلية الآن وسيط واحد  $n$  قابل للتعديل. تم استبدال الوسيط  $A$  بتابع يتضمن  $r_0$ ، مسافة الفصل التوازنية، والتي يمكن قياسها من خلال تجربة الحيود (درست الحيود في فصل سابق). يبين الشكل 10.9 منحنى تابعة الطاقة الكامنة من أجل

$n = 8$ ، وهي القيمة التقريبية للوسيط  $n$  في جزيء  $\text{NaCl}$ .



**الشكل 10.9** منحنى الطاقة الكامنة الكلية لأيون الصوديوم في بلورة كلور الصوديوم من أجل  $n = 8$ . يكون طول الرابطة التوازني عندما تصبح الطاقة عند أقل قيمة لها (أصغرية).

لما كان  $n < 1$ ، يكون للمنحنى  $U$  نفس الشكل العام: تقترب  $U$  من اللانهاية عند  $r \rightarrow 0$  وتقترب  $U$  من الصفر عندما  $r \rightarrow \infty$ . ويعبر عن القيمة الدنيا للطاقة الكامنة بالعلاقة:

$$U \min(r=r_0) = -\alpha \frac{ke^2}{r_0} \left(1 - \frac{1}{n}\right) \quad (9.24)$$

يعبر عن الطاقة اللازمة لفصل البلورة إلى زوج أيوني بالعلاقة:

$$U_{\text{diss}} = \alpha \frac{ke^2}{r_0} \left(1 - \frac{1}{n}\right) \quad (9.25)$$

هذه هي **طاقة تفكك** المادة الصلبة. يمكن أيضاً استخدام طاقة التفكك لوصف الطاقة الكلية اللازمة لكسر جزيء (مول) من المادة الصلبة إلى مكوناتها الأيونية، والتي يعبر عنها غالباً بوحدة KJ/mole. يمكن تحديد طاقة التفكك تجريبياً باستخدام الحرارة الكامنة للتبخير. يبين الجدول 2.9 طاقة الشبكة لهاليدات المعادن القلوية.

#### الجدول 2.9 طاقة الشبكة لهاليدات المعادن القلوية.

	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	I <sup>-</sup>
Li <sup>+</sup>	1036	853	807	757
Na <sup>+</sup>	923	787	747	704
K <sup>+</sup>	821	715	682	649
Rb <sup>+</sup>	785	689	660	630
Cs <sup>+</sup>	740	659	631	604



وبالتالي، يمكننا تحديد ثابت مادلونغ من البنية البلورية و  $n$  من طاقة الشبكة. بالنسبة إلى كلور الصوديوم، لدينا  $r_0 = 2.81 \text{ \AA}$ ،  $n \approx 8$ ، زوج أيوني  $U_{\text{diss}} = 7.84 \text{ eV}$ . إن طاقة هذا التفكك كبيرة نسبياً. الفوتون ذو الطاقة الأكبر من الطيف المرئي، على سبيل المثال، لديه طاقة تساوي تقريباً:

$$hf = (4.14 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s})(7.5 \times 10^{14} \text{ Hz}) = 3.1 \text{ eV}$$

لأن الأيونات في البلورات مرتبطة بشدة، فإن البلورات الأيونية لها الخصائص العامة التالية:

1. إنها صلبة وثابتة إلى حد ما.
2. إنها تتبخر عند درجات حرارة عالية نسبياً (من 1000 إلى 2000 K).
3. تكون شفافة للإشعاع المرئي، لأن الفوتونات الموجودة في الجزء المرئي من الطيف ليست نشطة طاقياً بما يكفي لإثارة الإلكترونات حالته الأرضية إلى الحالة المثارة.
4. إنها نواقل كهربائية ضعيفة، لأنها لا تحتوي على إلكترونات حرة بشكل فعال.
5. عادةً ما تكون قابلة للذوبان في الماء، لأن جزيء الماء لديه عزم ثنائي قطب كبير وحقله الكهربائي قوي بما فيه الكفاية لكسر الروابط الكهروساكنة بين الأيونات.

### مثال 3.9

#### طاقة تفكك الملح

حدد طاقة تفكك جزيء كلور الصوديوم (NaCl) بالوحدة  $\text{kJ/mol}$ . (تلميح: يبلغ ثابت التنافر  $n$  لكلور الصوديوم هو نحو 8).

#### خطة الحل:

تبلغ المسافة التوازنية تبلغ لكلور الصوديوم نحو  $0.282 \text{ nm}$ . (قارن هذه القيمة بالقيمة  $0.236 \text{ nm}$  بجزيء ثنائي الذرة حر من كلور الصوديوم) تعتمد طاقة التفكك على مسافة الفصل وثابت التنافر وثابتة مادلونغ للبنية FCC. تعتمد مسافة الفصل بدورها على الكتلة المولية والكثافة المقاسة. يمكننا تحديد مسافة الفصل ومن ثم استخدام هذه القيمة لتحديد طاقة التفكك لمول من هذه المادة الصلبة.

#### الحل

تبلغ الكتلة الذرية لكل من Na و  $23.0 \text{ u}$  و  $58.4 \text{ u}$  وبالتالي فإن الكتلة المولية للجزيء NaCl هي  $58.4 \text{ g/mol}$ . تبلغ كثافة كلور الصوديوم  $2.16 \text{ g/cm}^3$ . والعلاقة بين هذه الكميات هي:

$$\rho = M / V = \frac{M}{2N_A r_0^3}$$

حيث:  $M$  هي كتلة المول الواحد من الملح،  $N_A$  هو عدد أفوغادرو، و  $r_0$  هي مسافة الفصل التوازنية. العامل 2 ضروري لأن كلاً من أيون الصوديوم والكلور يمثلان حجماً مكعباً  $r_0^3$ . بالحل للمسافة، نحصل على:

$$r_0^3 = \frac{M}{2N_A \rho} = \frac{58.4 \text{ g/mol}}{2(6.03 \times 10^{23})(2.160 \text{ g/cm}^3)} = 2.23 \times 10^{-23} \text{ cm}^3$$

أو

$$r_0 = 2.80 \times 10^{-8} \text{ cm} = 0.280 \text{ nm}.$$

الطاقة الكامنة من أجل زوج من الأيونات ( $\text{Na}^+ \text{Cl}^-$ ) هي:

$$U = -\alpha \frac{ke^2}{r_0} \left(1 - \frac{1}{n}\right)$$

حيث:  $\alpha$  هو ثابت مادلونج،  $r_0$  هو مسافة الفصل التوازنية، و  $n$  هو ثابت التنافر. إن بنية الجزيء NaCl هي FCC، ولها ثابت مادلونج  $\alpha = 1.7476$ . بتعويض هذه القيمة نحصل على:


$$U = -1.75 \frac{1.44 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{0.280 \text{ nm}} \left(1 - \frac{1}{8}\right) = -7.88 \frac{\text{eV}}{\text{ion pair}}$$

تبلغ طاقة تفكك مول واحد من كلور الصوديوم نحو:

$$D = \left(\frac{7.88 \text{ eV}}{\text{ion pair}}\right) \left(\frac{23.052 \text{ kcal}}{\frac{1 \text{ mol}}{1 \text{ eV}}}\right) = 182 \text{ kcal/mol} = 760 \text{ kJ/mol}.$$

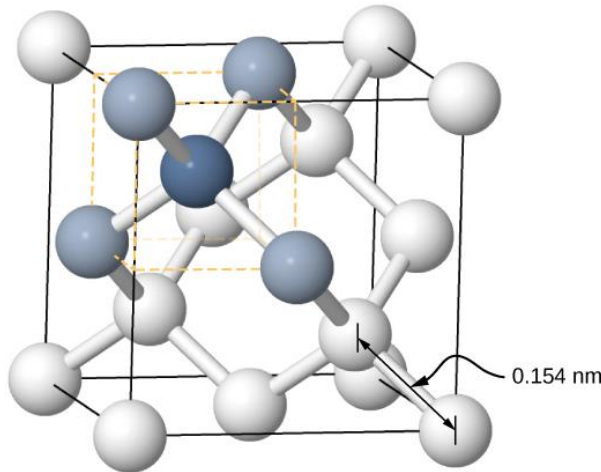
### ملاحظة:

هذه القيمة النظرية لطاقة التفكك 766 kJ/mol قريبة من القيمة التجريبية المقبولة 787 kJ/mol. لاحظ أنه أجل قيم كثافة أكبر، تكون مسافة الفصل التوازنية بين الأزواج الأيونية أصغر، كما هو متوقع. تزيد هذه المسافة الفاصلة الصغيرة من القوة بين الأيونات وبالتالي طاقة التفكك. في نهاية المعادلة استخدمنا عامل التحويل (1 kJ = 0.239 kcal).

**3.9 تحقق من فهمك** : إذا كانت طاقة تفكك المادة أكبر، هل سيكون كسر هذه المادة صلبة أصعب أم أسهل؟ 

### الترابط التساهمي في المواد الصلبة

يمكن أيضاً تشكيل البلورات عن طريق الترابط التساهمي. على سبيل المثال، تكون الروابط التساهمية مسؤولة عن تجميع ذرات الكربون معاً في بلورات الألماس. يكون التشكيل الإلكتروني لذرة الكربون هو  $1s^2 2s^2 2p^2$ ، وهو يشبه نواة He مع إضافة أربعة إلكترونات تكافؤ. هذا التشكيل الإلكتروني هو أربع إلكترونات وهو لا يملأ المدار كاملاً، لذلك تشارك هذه الإلكترونات الأربعة مع ذرات الكربون الأخرى بروابط تساهمية، عندئذ تملئ جميع المدارات الطاقية لذرات الكربون. للألماس بنية أكثر تعقيداً من معظم البلورات الأيونية (**الشكل 11.9**). تعد ذرة الكربون مركزاً لرباعي وجوه منتظم tetrahedron، وتكون الزاوية بين الروابط 110 درجة. هذه الزاوية هي نتيجة مباشرة لتجاهية المدارات p لذرة الكربون.



(a)



(b)

**الشكل 11.9** بنية بلورة الألماس. (a) ذرة كربون واحدة ممثلة بكرة زرقاء غامقة مرتبطة تساهمياً بأربعة ذرات كربون ممثلة بالكرات الزرقاء الفاتحة. (b) يمكن فلق الألماس الذي له جودة الأحجار الكريمة وفق أسطح ملساء، مما يعطي عدداً كبيراً من الزوايا التي تسبب انعكاساً داخلياً كاملاً للضوء الوارد، مما يعطي الألماس تألقه الثمين.

ليست البلورات المرتبطة تساهمياً منتظمة مثل البلورات الأيونية ولكنها صلبة بدرجة معقولة وصعبة الانصهار وغير قابلة للذوبان في الماء. على سبيل المثال، يتميز الألماس بدرجة حرارة انصهار عالية للغاية (4000 K) وهو شفاف للضوء المرئي. وبالمقابل فإن القصدير المرتبط تساهمياً (والمعروف أيضاً باسم القصدير - ألفا، وهو غير معدني) طري نسبياً ويزوب عند 600K ويعكس الضوء المرئي. وهناك مثالان مهمان على البلورات المرتبطة تساهمياً هما السليكون والجرمانيوم. يتم استخدام كل من هذه المواد الصلبة على نطاق واسع في تصنيع العناصر الإلكترونية مثل الثنائيات (الديودات)، والترانزستورات والدارات المتكاملة. سوف نعود إلى هذه المواد لاحقاً في مناقشتنا لأنصاف النواقل.

### الترابط المعدني في المواد الصلبة

كما يوحي الاسم، الرابطة المعدنية هي المسؤولة عن تشكيل البلورات المعدنية. تعد إلكترونات التكافؤ حرة بشكل أساسي في الذرات وقادرة على التحرك بسهولة نسبية في جميع أنحاء البلورة المعدنية. يعزى هذا الترابط إلى القوى الجاذبة بين الأيونات الموجبة وإلكترونات الناقلية. تعد الروابط المعدنية أضعف من الروابط الأيونية أو التساهمية، مع طاقة تفكك في المجال: 1 - 3 eV.

## 4.9 | نموذج الإلكترون الحر من المعادن free electron model of metal

### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- وصف نموذج الإلكترون الحر الكلاسيكي في المعادن من حيث مفهوم كثافة عدد الإلكترونات.
- شرح نموذج الإلكترون الحر الكمي في المعادن وفقاً للمبدأ الاستبعاد لباولي
- حساب السويات الطاقية وتباعد السويات الطاقية للإلكترون الحر في معدن.

تجتمع ذرات المعادن، مثل النحاس والألومنيوم بعضها مع البعض الآخر بروابط مختلفة تماماً عن تلك الموجودة في الجزيئات. بدلاً من تشارك وتبادل الإلكترونات، فيتم تجميع ذرات المعادن بشكل أساسي معاً بالإلكترونات الحرة التي تتجول في جميع أنحاء المادة الصلبة المعدنية. أبسط نموذج للمعدن هو نموذج الإلكترون الحر. يعتبر هذا النموذج الإلكترونات على أنها غاز. نعتبر حالة أحادية البعد تتحرك فيها الإلكترونات بحرية على طول خط، مثل قضيب معدني رفيع جداً. تابع الكمون  $U(x)$  في هذه الحالة هو بئر مربعي وأحادي البعد وبلا نهاية حيث تتوافق جدران هذا البئر مع حواف القضيب. يتجاهل هذا النموذج التفاعلات بين الإلكترونات ولكنه يأخذ بالحسبان مبدأ الاستبعاد. من أجل حالة خاصة  $T = 0K$ ، تملأ الإلكترونات  $N$  السويات الطاقية، من الأدنى نحو الأعلى، اثنان في كل مرة (سبين للأعلى وسبين للأسفل)، حتى يتم ملء السويات الطاقية العليا. تُسمى أعلى طاقة مملوءة طاقة فيرمي. يمكن تطوير نموذج الإلكترون الحر أحادي الأبعاد من خلال أخذ بعين الاعتبار الحالة ثلاثية الأبعاد: الإلكترونات تتحرك بحرية في كتلة معدنية ثلاثية الأبعاد. هذه الجملة معممة على شكل بئر مربع ثلاثي الأبعاد لا نهاية له. يتطلب تحديد السويات الطاقية المسموح بها حل معادلة شرودنغر المستقلة عن الزمن:

$$-\frac{\hbar^2}{2me} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \Psi(x, y, z) = E \Psi(x, y, z) \quad (9.26)$$

حيث نفترض أن الطاقة الكامنة داخل الصندوق هي صفر ولا نهائية في خارجه. يمكن كتابة التوابع الموجية المسموح بها والتي تصف السويات الكمومية الإلكترونية كمايلي:

$$\Psi(x, y, z) = \left( \sqrt{\frac{2}{L_x}} \sin \frac{n_x \pi x}{L_x} \right) \left( \sqrt{\frac{2}{L_y}} \sin \frac{n_y \pi y}{L_y} \right) \sqrt{\frac{2}{L_z}} \sin \frac{n_z \pi z}{L_z} \quad (9.27)$$

حيث  $n_x$  و  $n_y$  و  $n_z$  عبارة عن أعداد صحيحة موجبة تمثل الأرقام الكمية الموافقة للحركة في الاتجاهات  $x$  و  $y$  و  $z$  ، على التوالي و  $L_x$  و  $L_y$  و  $L_z$  هي أبعاد المربع في تلك الاتجاهات. المعادلة 9.27 هي ببساطة جداء ثلاثة توابع موجية أحادية البعد. الطاقات المسموح بها للإلكترون في مكعب ( $L = L_x = L_y = L_z$ ) هي:

$$E = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} (n_1^2 + n_2^2 + n_3^2) \quad (9.28)$$

ترتبط كل مجموعة من الأرقام الكمية ( $n_x, n_y, n_z$ ) بحالتين كميتين ، سبين للأعلى وسبين للأسفل. يكون في المادة الحقيقية، عدد السويات المملوءة هائلاً. على سبيل المثال، يكون هذا الرقم في سنتيمتر مكعب من معدن، بحدود  $10^{22}$ . عملية عد عدد الجسيمات في أي سوية هو عمل صعب، الأمر الذي يتطلب في كثير من الأحيان الاستغاثة بجهاز كمبيوتر قوي. يستحق العناء هذا الجهد، لأن هذه المعلومات غالباً ما تكون وسيلة فعالة للتحقق من هذا النموذج.

## مثال 4.9

### طاقة مكعب معدني

بفرض أنه لدينا مكعب معدني صلب بطول حافة 2.0cm. (a) ما هو أدنى سوية طاقة للإلكترون داخل هذا المعدن؟ (b) ما هو التباعد بين هذه السوية الطاقة هذا والتي تليها؟

### خطة الحل:

يمكن نمذجة الإلكترون الموجود في المعدن كموجة. تقابل أدنى طاقة أكبر طول موجي وأصغر رقم كمومي ( $n_x, n_y, n_z = 1, 1, 1$ ). توفر المعادلة 9.28 قيمة الطاقة "الحالة الأساسية". نظراً لأن طاقة الإلكترون تزداد مع العدد الكمي، تتضمن السوية العليا التالية أصغر زيادة في أعداد الكم:  $(n_x, n_y, n_z) = (2, 1, 1), (1, 2, 1), (1, 1, 2)$ .

### الحل:

تتوافق السوية الطاقة الأدنى مع أرقام الكم التالية  $n_x = n_y = n_z = 1$ . من المعادلة 9.28 ، فإن طاقة هذه السوية هي:

$$E(1,1,1) = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m_e L^2} (1^2 + 1^2 + 1^2) = \frac{3\pi^2 (1.05 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s})^2}{2 (9.11 \times 10^{-31} \text{kg}) (2.00 \times 10^{-2} \text{m})^2} = 4.48 \times 10^{-34} \text{J} = 2.80 \times 10^{-15} \text{eV}.$$

يتم الوصول إلى السوية الطاقة التالية من خلال زيادة أي واحد من الأرقام الكمية الثلاثة بمقدار 1. وبالتالي هناك في الواقع ثلاث سويات كمية بنفس الطاقة. لنفترض أننا نزيد  $n_x$  بمقدار 1. تصبح الطاقة حينها:


$$E(2,1,1) = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m_e L^2} (2^2 + 1^2 + 1^2) = \frac{6\pi^2 (1.05 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s})^2}{2 (9.11 \times 10^{-31} \text{kg}) (2.00 \times 10^{-2} \text{m})^2} = 8.96 \times 10^{-34} \text{J} = 5.60 \times 10^{-15} \text{eV}.$$

وبالتالي، فإن تباعد الطاقة (الفرق في الطاقة) بين أدنى سوية طاقة والسوية الطاقة التالية هو:

$$E(2, 1, 1) - E(1, 1, 1) = 2.80 \times 10^{-15} \text{eV}.$$

### ملاحظة

هذا الفرق في الطاقة صغير جداً. قارن هذه القيمة بمتوسط الطاقة الحركية لجسيم ما  $k_B T$  ، حيث  $k_B$  هو ثابت بولتزمان و  $T$  هي درجة الحرارة. الناتج  $k_B T$  هو نحو 1000 مرة أكبر من الفرق في الطاقة.

 **4.9 تحقق من فهمك** ماذا يحصل لحالة الطاقة الأرضية للإلكترون إذا زادت أبعاد المادة الصلبة؟

في كثير من الأحيان، نحن لسنا مهتمين بالعدد الكلي للجزيئات في جميع السويات، بل بالأحرى نهتم بعدد الجسيمات  $dN$  مع طاقة في مجال طاقي ضيق. يمكن التعبير عن هذه القيمة بالعلاقة التالية:

$$dN = n(E) dE = g(E) dE \cdot F$$

حيث  $n(E)$  هي كثافة عدد الإلكترونات أو عدد الإلكترونات في وحدة الحجم؛  $g(E)$  هي كثافة السويات، أو عدد السويات الكمومية المسموح بها في وحدة الطاقة؛  $dE$  هو مقدار التغير في الطاقة؛ و  $F$  هو عامل فيرمي. عامل فيرمي هو احتمال أن تملأ السوية. على سبيل المثال، إذا كانت  $g(E) dE$  هي 100 سوية متوافرة، لكن  $F$  هو 0.5 فقط، يكون عدد الجسيمات في هذا المجال الضيق من الطاقة خمسة فقط. ويتطلب إيجاد  $g(E)$  حل معادلة شرودنجر (بثلاثة أبعاد) للسويات الطاقية المسموح بها. يشمل الحساب حتى بالنسبة للنموذج الخام، ولكن النتيجة بسيطة وهي:

$$G(E) = \frac{\pi V}{2} \left( \frac{8m_e}{h^2} \right)^{3/2} E^{1/2} \quad (9.29)$$

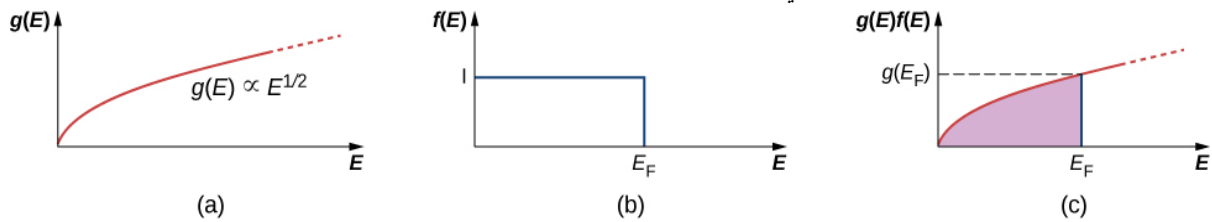
حيث  $V$  هو حجم المادة الصلبة، و  $m_e$  كتلة الإلكترون، و  $E$  هي طاقة السوية. لاحظ أن كثافة السويات تزداد مع الجذر التربيعي للطاقة. يتوفر المزيد من السويات عند الطاقات العليا أكثر من حالة الطاقات المنخفضة. لا توفر هذه العلاقة معلومات عن كثافة الإلكترونات في الفضاء الفيزيائي، بل عن كثافة السويات الطاقية في "فضاء الطاقة". على سبيل المثال، في دراستنا للبنية الذرية، علمنا أن السويات الطاقية لذرة الهيدروجين تكون متباعدة أكثر لقيم من أجل طاقة الصغيرة (بالقرب من الحالة الأرضية) بالمقارنة مع القيم الأكبر.

تخبرنا هذه المعادلة عن عدد السويات الإلكترونية المتوفرة في مادة صلبة ثلاثية الأبعاد. ومع ذلك، فإنها لا تخبرنا كيف سيتم ملء هذه السويات. وبالتالي، نحن بحاجة إلى تحديد عامل فيرمي  $F$ . لنأخذ الحالة البسيطة  $T = 0K$ . من الفيزياء الكلاسيكية، نتوقع أن تشغل جميع الإلكترونات ( $10^{22} / \text{cm}^3$ ) ببساطة الحالة الأرضية لتحقيق أدنى طاقة ممكنة. ومع ذلك، فإن هذا يناقض مبدأ الاستبعاد الباولي، الذي ينص على أنه لا يوجد إلكترونان في نفس السوية الكمومية. وبالتالي، عندما نبدأ في ملء السويات بالإلكترونات، تصبح السويات ذات الطاقة الأقل مملوئة أولاً، ثم المستويات ذات الطاقة الأعلى تدريجياً. ويملك الإلكترون الأخير الذي وضعناه عند أعلى طاقة. هذه الطاقة هي  $E_F$  طاقة فيرمي للغاز الإلكتروني الحر. تُشغل سويات ذات طاقة  $E_F > E$  بواسطة إلكترون واحد، والسوية ذات الطاقة  $E_F < E$  غير مشغولة. ولوصف هذا باستخدام احتمال  $F(E)$  إنشغال السوية الطاقية  $E$ ، نكتب  $T = 0K$  من أجل:

$$F(E) = 1 \quad (E < E_F)$$

$$F(E) = 0 \quad (E > E_F)$$

يبين الشكل 12.9 كثافة السويات وعامل فيرمي وتابعة كثافة عدد الإلكترون للطاقة.



الشكل 12.9 (a) كثافة السويات للغاز الإلكتروني الحر، (b) احتمالية أن تكون السوية مشغولة عند  $T = 0K$  كثافة السويات المشغولة عند  $T = 0K$

تنخفض كثافة عدد الإلكترونات (الصف الأخير) التوزيع بحدّة عند طاقة فيرمي. وفقاً للنظري تعطى هذه الطاقة بالعلاقة:

$$E_F = \frac{h^2}{8m_e} \left( \frac{3N}{\pi V} \right)^{2/3} \quad (9.31)$$

يبين **الجدول التالي 3.9** طاقة فيرمي لبعض المواد.

**الجدول 3.9 كثافة إلكترونات الناقلية وطاقة فيرمي لبعض المعادن.**

العنصر	إلكترونات عصابة الناقلية ( $10^{28}m^{-3}$ )	طاقة فيرمي لنموذج الإلكترون الحر eV
Al	18.1	11.7
Ba	3.15	3.64
Cu	8.47	7.00
Au	5.9	5.53
Fe	17.0	11.1
Ag	5.86	5.49

لاحظ أيضاً أن المنحني البياني في الجزء (c) من **الشكل 12.9**، والذي يجب على السؤال، "كم عدد الجزئيات الموجودة في المجال الطاقى؟ يتم فحصه بالتجربة. درجة حرارة فيرمي أو "درجة الحرارة" الفعالة للإلكترون عند طاقة فيرمي هي:

$$T_F = \frac{E_F}{K_B}$$

### مثال 5.9

#### طاقة فيرمي للفضة

إن الفضة المعدنية هي ناقل ممتاز. لديها  $10^{28} \times 5.86$  إلكترون نقل لكل متر مكعب. (a) احسب طاقة فيرمي. (b) قارن قيمة هذه الطاقة بالطاقة الحرارية  $k_B T$  للإلكترونات عند درجة حرارة الغرفة 300K.

#### الحل

a- من المعادلة 9.31، تعطى طاقة فيرمي كمايلي:

$$E_F = \frac{h^2}{2m_e} (3\pi^2 n_e)^{2/3} = \frac{(1.05 \times 10^{-34} J \cdot s)^2}{2(9.11 \times 10^{-31} kg)} \times [(3\pi^2 (5.86 \times 10^{28} m^{-3}))^2]^{2/3} = 8.79 \times 10^{-19} J = 5.49 eV.$$

هذه هي القيمة النموذجية لطاقة فيرمي للمعادن، كما يتضح من الجدول 3.9.

b- يمكننا ربط درجة حرارة فيرمي  $T_F$  مع طاقة فيرمي بالعلاقة التالية:  $k_B T_F = E_F$ . ثم نجد درجة حرارة فيرمي:

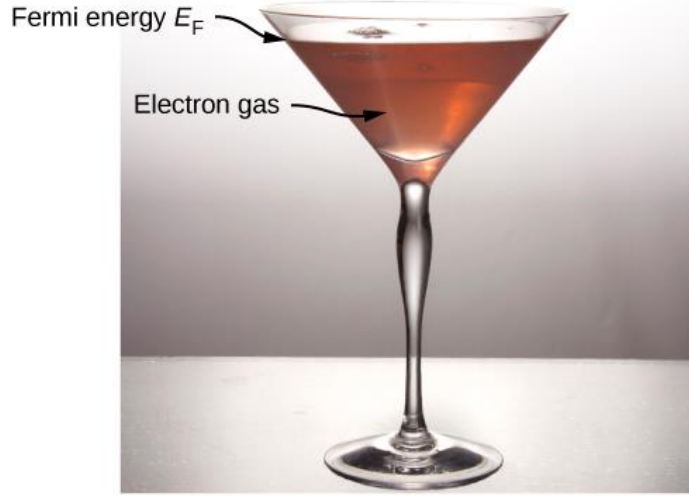
$$T_F = \frac{8.79 \times 10^{-19} J}{1.38 \times 10^{-23} J/K} = 6.37 \times 10^4 K$$

التي تكون أعلى بكثير من درجة حرارة الغرفة ودرجة حرارة الانصهار النموذجية ( $\sim 10^3 K$ ) لمعدن.

نسبة طاقة فيرمي للفضة إلى الطاقة الحرارية عند درجة حرارة الغرفة هي:

$$\frac{E_F}{k_B T} = \frac{T_F}{T} \approx 210.$$

لتصور كيفية ملء السويات الكمومية، قد نتخيل صب الماء ببطء في كوب زجاجي، كما في **الشكل 13.9**. تحتل أول قطرات الماء (الإلكترونات) قاع الكوب (السويات ذات الطاقة الأقل). ومع ارتفاع المستوى، يتم إشغال السويات الطاقية الأعلى فالأعلى. علاوة على ذلك، لما كان للكوب الزجاجي فتحة عريضة وذراع ضيقة، فإن الماء سيشغل الجزء العلوي من الكوب الزجاجي أكثر من جزئه السفلي. ويعكس هذا حقيقة تناسب كثافة السويات  $g(E)$  مع  $E^{1/2}$ ، لذلك هناك عدد كبير نسبياً من الإلكترونات ذات الطاقة الأعلى في الغاز الإلكتروني الحر. أخيراً، يتوافق مستوى ملء الكوب الزجاجي مع طاقة فيرمي.



**الشكل 13.9** تشبيه لكيفية ملء الإلكترونات للسويات الطاقية في معدن. بينما تملأ الإلكترونات السويات الطاقية، من الأقل إلى الأعلى ويزداد عدد السويات المتاحة. أعلى سوية طاقية (المقابلة لخط المياه) هي طاقة فيرمي. بفرض أنه عند  $T=0K$ , عدد إلكترونات الناقلية في واحدة الحجم في نموذجنا هو  $n_e$ . في حين أنه تحوي كل سوية على إلكترون واحد، فإن عدد السويات الممتلئة في واحدة الحجم يساوي عدد الإلكترونات في واحدة الحجم.

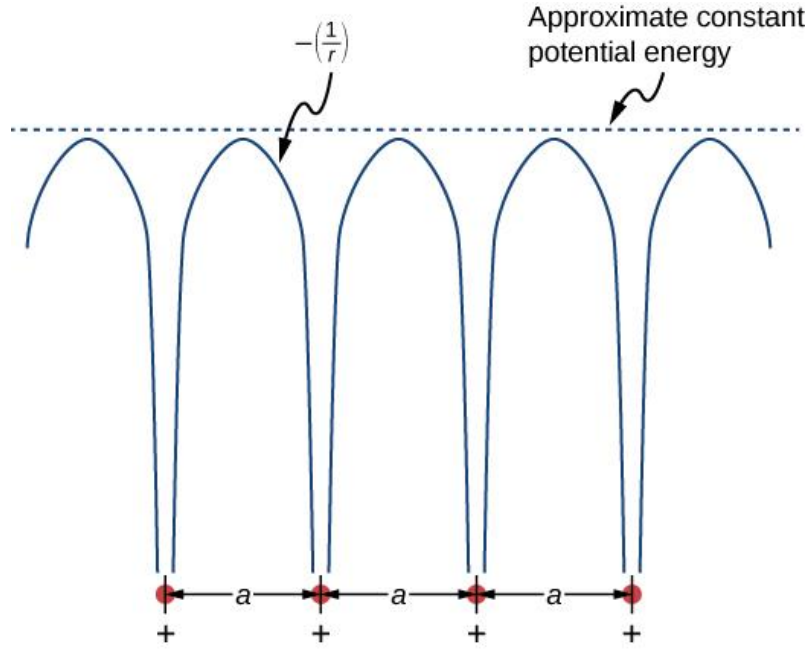
## 5.9 | نظرية عصابات الطاقة في المواد الصلبة Band Theory of Solids

### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- وصف طريقتين رئيسيتين لتحديد سويات الطاقة للإلكترون في البلورة.
- شرح وجود عصابات الطاقة والفجوات gaps في البنية الطاقية في البلورة.
- توضيح سبب كون بعض المواد عبارة عن نواقل جيدة والبعض الآخر عبارة عن عوازل جيدة.
- التفريق بين العازل والنصف ناقل.

يفسر نموذج الإلكترون الحر العديد من الخصائص المهمة للنواقل ولكنه ضعيف في ناحيتين على الأقل. الأولى، يفترض وجود طاقة كامنة ثابتة داخل المادة الصلبة. (تذكر أن الطاقة الكامنة الثابتة ترتبط بعدم وجود قوى). يقارن **الشكل 14.9** افتراض وجود طاقة كامنة ثابتة (الخط المنقط) مع قوة كولون الكامنة الدورية، التي تتناقص وفقاً  $-1/r$  عند كل نقطة في الشبكة، حيث  $r$  هي المسافة من مركز أيون (الخط المتواصل) الثانية، يفترض نموذج الإلكترون الحر حاجزاً لا يمكن اختراقه على السطح. هذا الافتراض غير صالح، لأنه في ظل ظروف معينة، يمكن للإلكترونات الهروب من السطح - كما هو الحال في المفعول الكهروضوئي. بالإضافة إلى هذه الافتراضات، لا يفسر نموذج الإلكترون الحر الاختلافات الكبيرة في الخواص الإلكترونية للنواقل وأنصاف النواقل والعوازل. وبالتالي، هناك حاجة إلى نموذج أكثر اكتمالاً.



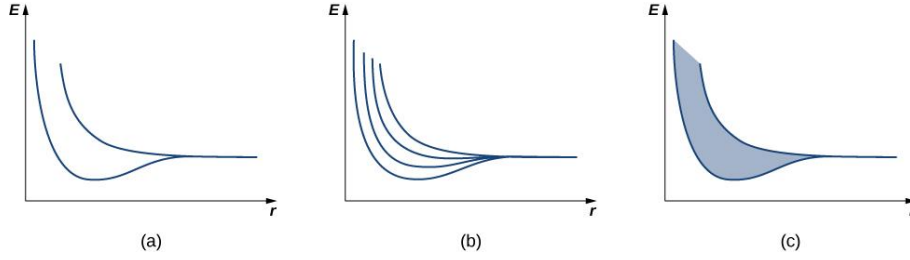
**الشكل 14.9** الكمون الدوري المستخدم في نموذج الإلكترونات في النواقل. كل أيون في المادة الصلبة هو مصدر لقوة كولون الكامنة. لاحظ أن نموذج الإلكترون الحر فعال لأن متوسط هذا الحقل ثابت تقريباً.

يمكننا إعداد نموذج محسّن عن طريق حل معادلة شرودنغر للكمونات الدورية الموضحة في **الشكل 14.9**. ومع ذلك، فإن الحل يتطلب رياضيات تقنية أبعد من مجال هذا الكتاب. نسعى مرة أخرى إلى حجة كيفية تستند إلى ميكانيك الكم لإيجاد الطريق للمضي قدماً. نقوم أولاً بمراجعة الحجة المستخدمة لشرح البنية الطاقية في الرابطة التساهمية. لنأخذ ذرتين من الهيدروجين متطابقتين وليس هناك أي تفاعل بينهما على الإطلاق. ولنفترض أيضاً أن الإلكترون الموجود في كل ذرة منهما في نفس الحالة الأرضية: إلكترون واحد بطاقة 13.6 eV (تجاهل السبين). عندما يتم تقريب ذرتي الهيدروجين معاً، تتراكب التوابع الموجية الذاتية للإلكترونين، وفقاً لمبدأ الاستبعاد، لم تعد في الحالة الكمومية نفسها، التي تقسم السويات الطاقية المكافئة الأصلية إلى سويتين مختلفتين للطاقة. تعتمد طاقة هذه السويتين على المسافة الفاصلة بين الذرتين،  $\alpha$  (**الشكل 15.9**).

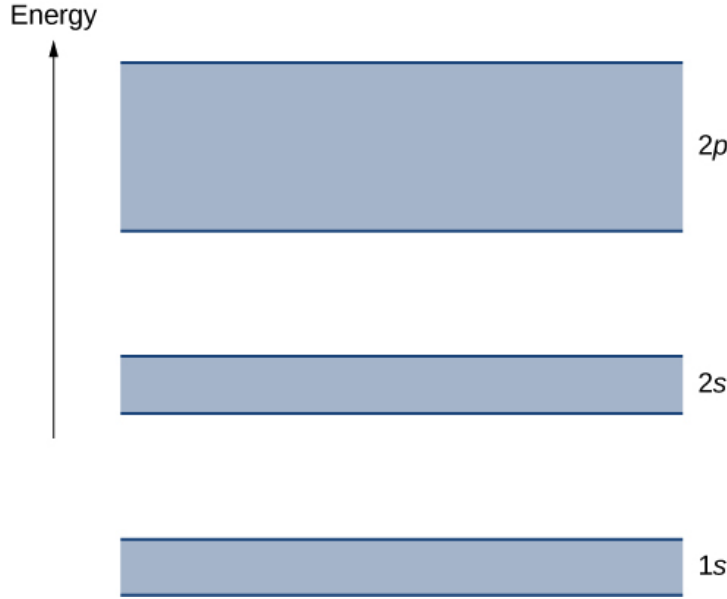
إذا تم تجميع أربع ذرات هيدروجين معاً، تتشكل أربعة مستويات من التناظرات الأربعة المحتملة - موجة جيبية أحادية "حدبة" في كل بئر، بالتناوب للأعلى وللأسفل، وهكذا. في حدود عدد كبير جداً من الذرات  $N$ ، نتوقع انتشاراً لعصابات متواصلة تقريباً من السويات الطاقية الإلكترونية في المادة الصلبة (انظر **الشكل 15.9** (C)). يُعرف كل من هذه النطاقات باسم **عصابة الطاقة**. (لا تزال السويات الطاقية المسموح بها ورقم الموجة مكتمة، لكن بالنسبة لأعداد كبيرة من الذرات، تكون هذه الحالات قريبة من بعضها البعض بحيث تعتبر مستمرة أو "متصلة").

تختلف عصابات الطاقة في عدد إلكتروناتها. يشغل في عصابتي الطاقة  $1s$  و  $2s$ ، كل سوية طاقية فيها إلكترونين (سبين أعلى وسبين أسفل)، وبالتالي فإن لهذه العصابة أقصى انشغال بالإلكترونات هو  $(2N)$ . في عصابة الطاقة  $2p$ ، كل سوية طاقية فيها تُشغل بستة إلكترونات، لذلك يبلغ الحد الأقصى لشغل هذه العصابة هو  $6N$  إلكترون (الشكل 16.9).





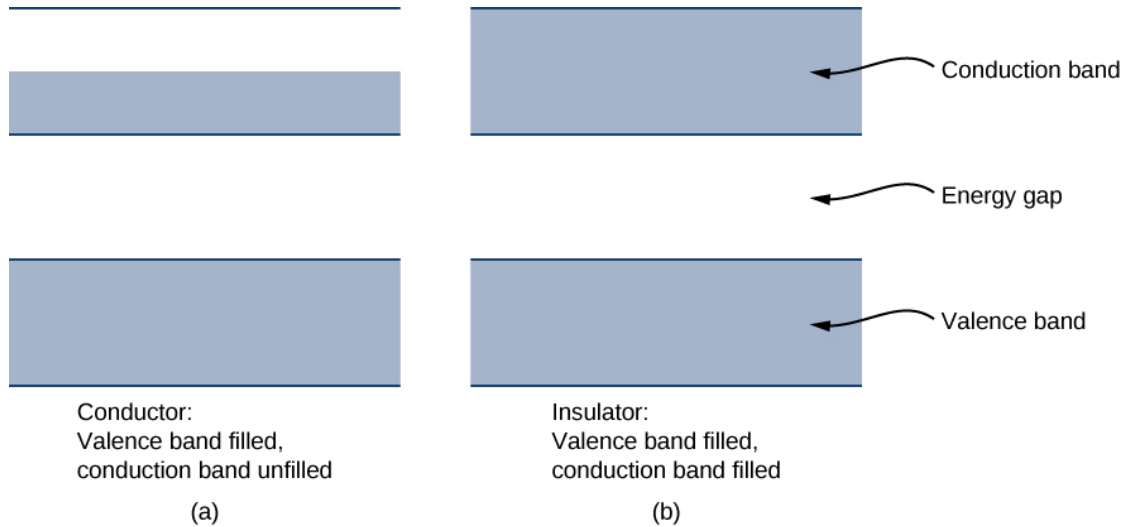
**الشكل 15.9** تابعة تقسيم السوية الطاقية لمتوسط المسافة بين (a) ذرتين، (b) أربع ذرات، و (c) عدد كبير من الذرات. في حال عدد كبير من الإلكترونات، يكون لدينا عصابة مستمرة من الطاقات.



**الشكل 16.9** تمثيل بسيط للبنية الطاقية لمادة صلبة. تنتمي الإلكترونات إلى عصابات طاقية مفصولة بفجوات طاقة.

تفصل كل عصابة طاقية عن الأخرى **بفجوة طاقة**. يمكن فهم الخواص الكهربائية للنواقل والعوازل من خلال عصابات الطاقة والفجوات الطاقية. تُعرف أعلى عصابة طاقة مملوءة باسم **عصابة الناقل**. تُعرف العصابة التالية المتاحة في البنية الطاقية باسم **عصابة الناقلية**. في الناقل، يتم ملء عصابة الطاقة العليا بالإلكترونات جزئياً، بينما في العازل، يتم ملء أعلى عصابة الطاقة بالإلكترونات تماماً. يوضح **الشكل 17.9** الفرق بين الناقل والعازل.

يختلف الناقل عن العازل في كيفية استجابة إلكتروناته لحقل كهربائي مطبق. إذا تحرك عدد كبير من إلكترونات مادة بتأثير، فإن هذه المادة هي ناقل. ووفقاً لنموذج العصابات، تكتسب الإلكترونات الموجودة في عصابة الناقلية والمملوءة جزئياً طاقة حركية من الحقل الكهربائي المطبق عبر ملء سويات الطاقة الأعلى في عصابة الناقلية. على خلاف ذلك، تنتمي الإلكترونات في العازل إلى عصابات ممتلئة تماماً. وعند تطبيق الحقل، لا يمكن للإلكترونات إجراء مثل هذه الانتقالات (أي اكتساب طاقة حركية من الحقل الكهربائي المطبق) وفقاً لمبدأ الاستبعاد. والنتيجة أن هذه المواد لا توصل الكهرباء.



**الشكل 17.9** مقارنة بين عازل وناقل. تُملأ العصابة ذات الطاقة الأعلى جزئياً في الناقل وكلياً في العازل.

تفضل زيارة هذه **المحاكاة** (<https://openstaxcollege.org/l/21bandstructure>) للتعرف على أصل عصابات الطاقة في البلورات وكيف تحدد بنية هذه العصابات وكيفية توصيل المادة للكهرباء. اكتشف كيف تنشئ بنية العصابة شبكة شعرية من العديد من الآبار.

تحتوي **أنصاف النواقل** على بنية طاقة مشابهة للعازل، إلا أنها تحتوي على فجوة طاقة صغيرة نسبياً بين أدنى عصابة ممتلئة تماماً والعصابة التالية غير الممتلئة. يشكل هذا النوع من المواد أساس الإلكترونيات الحديثة.

عند الدرجة  $T = 0 \text{ K}$  تكون العصابات في كل من نصف الناقل والعازل مملوءة بالكامل. والاختلاف الوحيد بينهما هو في مقدار الفجوة الطاقية (أو فجوة العصابة)  $E_g$  بين أعلى عصابة طاقة مملوءة (عصابة التكافؤ) العصابة الفارغة العليا التالية (عصابة الناقلية). تكون في أنصاف النواقل، هذه الفجوة صغيرة بما فيه الكفاية بحيث يتم إثارة عدد كبير من الإلكترونات من عصابة التكافؤ حرارياً إلى عصابة الناقلية عند درجة حرارة الغرفة. وهذه الإلكترونات موجودة في عصابة فارغة تقريباً ويمكنها الاستجابة لحقل مطبق. وكقاعدة عامة فإن قيمة الفجوة الطاقية لأنصاف النواقل هي نحو  $1 \text{ eV}$ ، (انظر الجدول 4.9 للسليكون). تعتبر المادة التي لها فجوة طاقة تزيد عن  $1 \text{ eV}$  تقريباً بمنزلة العازل. للمقارنة، فجوة الطاقة في الألماس (عازل) هي عدة  $\text{eV}$ .

#### الجدول 4.9 الفجوة الطاقية لمواد مختلفة عند درجة الحرارة $300 \text{ K}$ .

ملاحظة: عدا الألماس فإن المواد المذكورة كلها أنصاف نواقل.

المادة	فجوة الطاقة $E_g$ (eV)
Si	1.14
Ge	0.67
GaAs	1.43
GaP	2.26
GaSb	0.69
InAs	0.35
InP	1.35
InSb	0.16
C(الألماس)	5.48

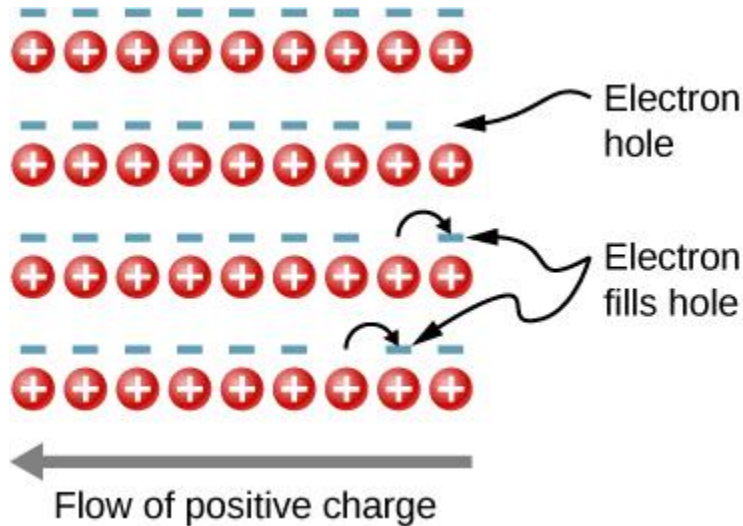
## 6.9 | أنصاف النواقل و الإشابة semi conductors and doping

### الأهداف التعليمية

- في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:
- وصف التغيرات الحاصلة في البنية الطاقية لنصف الناقل عند إشابته.
- التمييز بين أنصاف النواقل من النوع-n والنوع-p.
- وصف مفعول هول وتوضيح أهميته.
- حساب الشحنة وسرعة الانسياب وكثافة عدد حوامل الشحنة في نصف الناقل باستخدام معلومات من تجربة مفعول هول.

درسنا في الجزء السابق من هذا الفصل مساهمة إشغال الإلكترونات للسويات في عصابة الناقلية في التيار الكهربائي. ومع ذلك، فإن انتقال إلكترون من عصابة التكافؤ إلى عصابة الناقلية يترك حالة غير مشغولة أو ثقباً (hole) في بنية الطاقة في عصابة التكافؤ، والذي يمكن للإلكترون القريب منه الانتقال إليه. عندما يتم ملء هذه الثقوب بإلكترونات الأخرى، تتشكل ثقوب جديدة. يمكن النظر إلى التيار الكهربائي المرتبط بهذه التبعئة كحركة جماعية للعديد من الإلكترونات سالبة الشحنة أو حركة الثقوب الإلكترونية موجبة الشحنة.

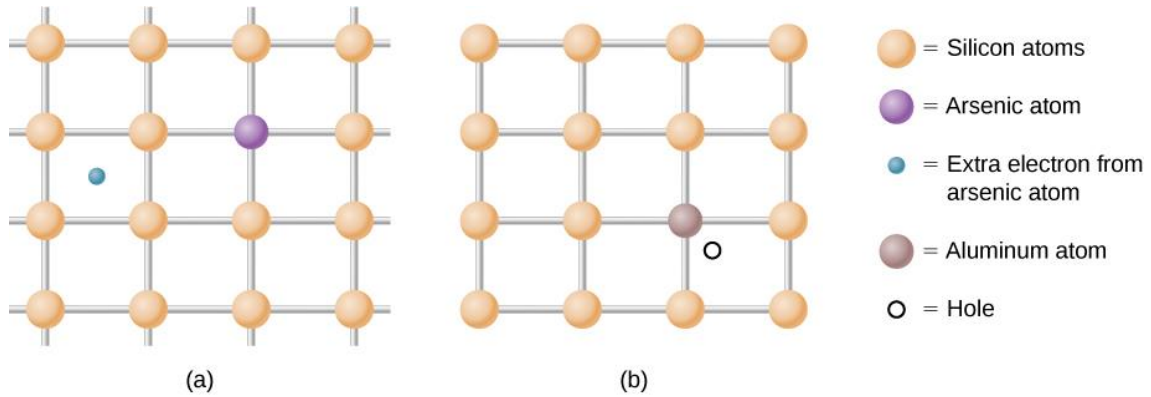
للتوضيح، نأخذ بعين الاعتبار شبكة أحادية البعد كما في الشكل 18.9. تسهم كل ذرة من هذه الشبكة بإلكترون واحد في التيار. عند ملء الثقب الموجود على اليمين، سينتقل هذا الثقب إلى اليسار. يمكن تفسير التيار على أنه تدفق الشحنات الموجبة إلى اليسار. يشار إلى كثافة الثقوب، أو عدد الثقوب في واحدة الحجم، بالرمز  $p$ . يترك كل إلكترون ينتقل إلى عصابة الناقلية، وراءه ثقباً. إذا كانت عصابة الناقلية فارغة في الأصل، تكون كثافة الإلكترونات الناقلية ( $n$ ) مساوية لكثافة الثقوب، أي  $n = p$ .



**الشكل 18.9** حركة الثقوب في الشبكة البلورية. مع انتقال الإلكترون إلى اليمين، ينتقل ثقب إلكتروني إلى اليسار.

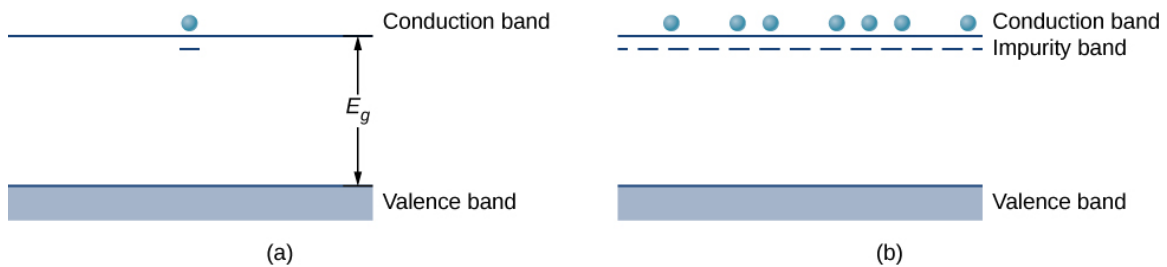
كما ذكرنا، فإن نصف الناقل هو عبارة عن مادة لها عصابة تكافؤ مملوءة، وعصابة ناقلية فارغة، وفجوة طاقية صغيرة نسبياً بين هاتين العصابتين. يمكن إدخال إلكترونات أو ثقوب زائدة في هذه المادة عن طريق الاستبدال في الشبكة البلورية بذرة شائبة، والتي

هي ذرة ذات رقم تكافؤ مختلف قليلاً عن ذرات الشبكة. وتُعرف هذه العملية بأسم الإضاءة. على سبيل المثال، لنفترض أننا نضيف ذرة زرنيخ إلى بلورة السليكون (الشكل 19.9 (a)).



**الشكل 19.9** (a) الشائبة المانحة و (b) الشائبة الآخذة. يؤدي إدخال هذه الشوائب في أنصاف النواقل إلى تغيير كبير بخصائصها الإلكترونية.

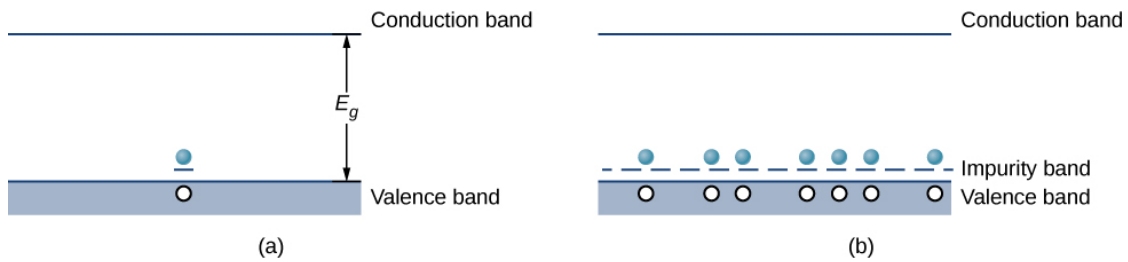
يحتوي الزرنيخ على خمس إلكترونات تكافؤ، بينما يحتوي السليكون على أربعة فقط. لذلك يجب أن يذهب هذا الإلكترون الإضافي إلى عصابة الناقلية، حيث لا يوجد أي فراغ في عصابة التكافؤ. بالتالي يحتوي أيون الزرنيخ على شحنة موجبة صافية ترتبط مع الإلكترون المفصول بشكل ضعيف. وهذا الرابط ضعيف لأن الشبكة الذرية المحيطة به تحمي الحقل الكهربائي للأيونات. ونتيجة لذلك، فإن طاقة الربط للإلكترون الإضافي تبلغ نحو 0.02 eV فقط. بمعنى آخر، فإن السوية الطاقية للإلكترون الشائب تقع في الفجوة الطاقية أسفل عصابة الناقلية بمقدار 0.02 eV، وهي قيمة أقل بكثير من طاقة الفجوة (1.14 eV). عند درجة حرارة الغرفة، تتم إثارة هذا الإلكترون بسهولة وينتقل إلى عصابة الناقلية، وبالتالي يسهم في الناقلية (الشكل 20.9 (a)). تُعرف الشائبة ذات الإلكترون الإضافي باسم **الشائبة المانحة**، ويُسمى نصف الناقل المشاب بنصف ناقل من النوع n لأن ناقلات الشحنة الرئيسية (الإلكترونات) هي سالبة.



**الشكل 20.9** (a) إثارة الإلكترون الإضافي من الشائبة المانحة إلى عصابة الناقلية؛ (b) تشكيل عصابة الشائبة في نصف الناقل من النوع n.

بإضافة المزيد من الشوائب المانحة، يمكننا إنشاء **عصابة الإضاءة**، وتشكل عصابة طاقة جديدة نتيجة لإضاءة نصف الناقل، كما هو مبين في **الشكل 20.9 (b)**. وتكون سوية فيرمي بين هذا العصابة وعصابة الناقلية. عند درجة حرارة الغرفة، يمكن إثارة العديد من إلكترونات الإضاءة حرارياً إلى عصابة الناقلية وتسهم في الناقلية. يمكن أن تحدث الناقلية أيضاً في عصابة الإضاءة حيث تتشكل عندها الثقوب. لاحظ أن التغيرات في طاقة الإلكترون تتوافق مع التغير في حركة (السرعة أو الطاقة الحركية) حوامل الشحنات في نصف الناقل، ولكن ليس بمحمل الحركة لنصف الناقل نفسه.

يمكن أيضاً تحقيق الإشابة باستخدام ذرات الإشابة التي تحتوي عادةً على إلكترون واحد أقل من ذرات نصف الناقل. على سبيل المثال، يمكن استبدال AI الذي يحتوي على ثلاث إلكترونات تكافؤ عرضاً عن ذرات Si، كما هو موضح في **الشكل 19.9 (b)**. تُعرف هذه الشائبة بأنها شائبة آخذة، ويُسمى نصف الناقل المشاب بنصف ناقل من النوع p، لأن الحاملات الرئيسة للشحنات (ثقوب) إيجابية. إذا تم التعامل مع الثقب باعتباره جسيماً إيجابياً يرتبط ارتباطاً ضعيفاً بموقع الشوائب، عندئذٍ تتشكل سوية إلكترونية فارغة في الفجوة الكامنة أعلى من عصابة التكافؤ مباشرةً. عندما يتم ملء هذا المستوى بالإلكترون مثار حرارياً من عصابة التكافؤ (**الشكل 21.9 (a)**)، يتم إنشاء ثقب متنقل في عصابة التكافؤ. بإضافة المزيد من الشوائب الآخذة، يمكننا إنشاء عصابة الإشابة، كما هو مبين في **الشكل 21.9 (b)**.



**الشكل 21.9 (a)** يتم إثارة إلكترون من عصابة الناقلية إلى السوية الفارغة الناتجة عن الشوائب الآخذة؛ **(b)** تشكيل عصابة الإشابة في نصف ناقل من النوع p.

يمكن أن يكون التيار الكهربائي في أنصاف النواقل المشابة ناتجاً عن حركة حوامل الشحنة الأغلبية، حيث تُسهم الثقوب من الذرات الشائبة، أو بسبب حوامل الشحنة الأقلية، حيث تُسهم الثقوب عن طريق الإثارة الحرارية للإلكترونات إلى الفجوة الطاقية. في أنصاف النواقل من النوع n، تكون غالبية حوامل الشحنة من الإلكترونات الحرة الناتجة عن ذرات الشوائب، حوامل الشحنة الأقلية عبارة عن الإلكترونات الحرة الناتجة عن الإثارة الحرارية من عصابة التكافؤ إلى عصابة الناقلية. في أنصاف النواقل من النوع p، تكون حوامل الشحنة الأغلبية عبارة عن ثقوب حرة تسهم بها الذرات الشائبة، وحوامل الشحنة الأقلية عبارة عن ثقوب حرة يتركها ملء السويات الإلكترونية بسبب الإثارة الحرارية للإلكترونات عبر الفجوة. بشكل عام، يتجاوز عدد حاملات الشحنة الأغلبية عدد حاملات الشحنة الأقلية بكثير. سيتم استخدام مفهوم حاملات الشحنة الأغلبية والأقلية في القسم التالي لشرح تشغيل الصمامات الثنائية والتوازنات.

عند دراسة الإشابة من النوع n و p، من الطبيعي أن نتساءل: "هل الثقوب الإلكترونية" تعمل فعلاً مثل الجسيمات؟ يتضح مفعول هول من وجود الثقوب في أنصاف النواقل من النوع p المشاب. مفعول هول هو إنتاج فرق كمون بسبب حركة الناقل ضمن حقل مغناطيسي خارجي (انظر <http://cnx.org/content/m58744/latest/>) **The Hall Effect**

يبين **الشكل 22.9 (a)** الشكل التخطيطي لمفعول هول. يوضع شريط من نصف ناقل في حقل مغناطيسي منتظم. عندما تتحرك الثقوب الإلكترونية من اليسار إلى اليمين عبر نصف الناقل، تدفع قوة لورنتز هذه الشحنات نحو الطرف العلوي من الشريط. (تذكر أن حركة حوامل الشحنة الموجبة تحدها قاعدة اليد اليمنى). تستمر الشحنات الموجبة في التجمع عند الحافة العلوية من الشريط حتى توازن القوة المرتبطة بالحقل الكهربائي الهابط بين الحافتين العلوية والسفلية للشريط ( $F_E = E_q$ )، القوة المغناطيسية الصاعدة ( $F_B = qvB$ ). بمساواة هاتين القوتين مع بعضهما فتكون لدينا  $E = vB$ . الكمون الذي يظهر عبر الشريط هو بالتالي:

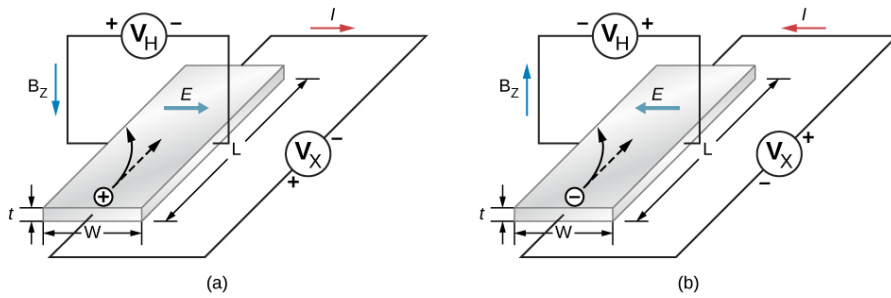
$$V_H = vBW \quad (9.33)$$

حيث:  $V_H$  هو كمون هول؛  $v$  هي سرعة انسياق الثقب، أو متوسط سرعة الجسيم الذي يتحرك بطريقة عشوائية جزئياً؛  $B$  هي شدة الحقل المغناطيسي؛ و  $w$  هو عرض الشريط. لاحظ أن كمون هول هو معترض للكمون الذي ينتج التيار في البداية من خلال

المادة. يؤكد قياس إشارة هذا الكمون (أو فرق الكمون) تجمع الثقوب في الجانب العلوي من الشريط. يعطي مطال كمون هول سرعة الانسياب ( $v$ ) لحوامل الشحنة الأغلبية. يمكن أيضاً الحصول على معلومات إضافية من كمون هول. لاحظ أن كثافة التيار الإلكتروني (مقدار التيار في واحدة مساحة مقطع الشريط نصف ناقل) هي:

$$j = nqv \quad (9.34)$$

حيث  $q$  هي مقدار الشحنة،  $n$  هو عدد حوامل الشحنة في واحدة الحجم، و  $v$  هي سرعة الانسياب. يتم تحديد كثافة التيار بسهولة عن طريق قسمة التيار الكلي على مساحة المقطع الشريط،  $q$  هي شحنة الثقب (شحنة إلكترون واحد)، ويتم تحديد  $u$  بواسطة معادلة مفعول هول رقم 9.34. وبالتالي، تعطي العلاقة المذكورة أعلاه لكثافة التيار الإلكتروني عدد حاملات الشحنة في واحدة الحجم  $n$ . يمكن إجراء تحليل مماثل لحوامل الشحنة السالبة في المادة من النوع  $n$  (انظر الشكل 22.9).



**الشكل 22.9** مفعول هول. (a) يتم سحب الثقوب الإلكترونية المشحونة إيجابياً إلى اليسار بواسطة حقل مغناطيسي منتظم مُشار إليه للأسفل. يتولد حقل كهربائي يتجه إلى نحو اليمين. (b) يتم جرّ الإلكترونات السالبة إلى اليسار بواسطة حقل مغناطيسي مُشار إليه للأعلى. يتولد حقل كهربائي يتجه نحو اليسار.

## 7.9 | أجهزة أنصاف النواقل semi conductor devices

### الأهداف التعليمية

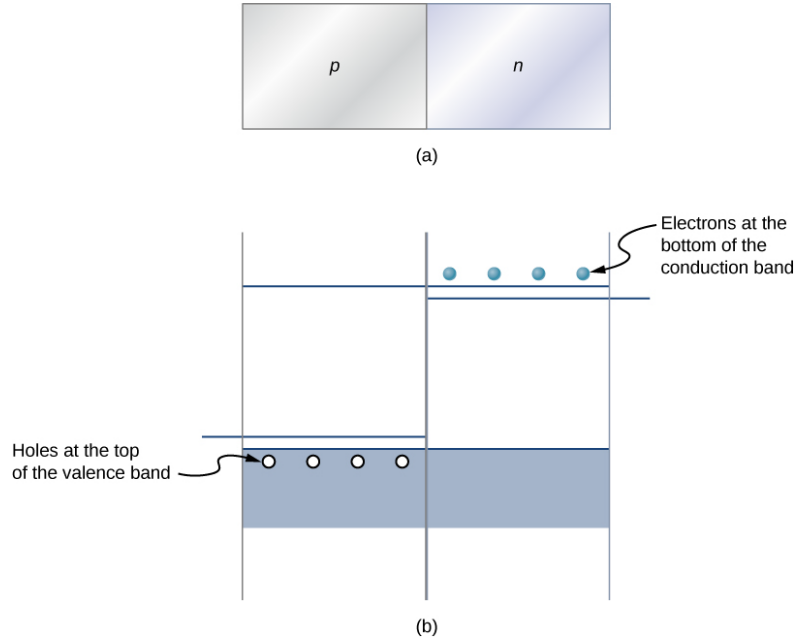
في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- وصف ما يحدث عندما يتم ضم مادتين من النوع  $n$  و  $p$  معاً باستخدام مفهوم الانتشار و تيار الانسياب (كمون صفري مطبق).
- تفسير استجابة الوصلة  $p-n$  لكمون انحياز أمامي أو خلفي.
- وصف وظيفة الترانزستور في دائرة كهربائية.
- استخدام مفهوم الوصلة  $p-n$  لشرح تطبيقاتها في مكبرات الصوت وأجهزة الكمبيوتر.

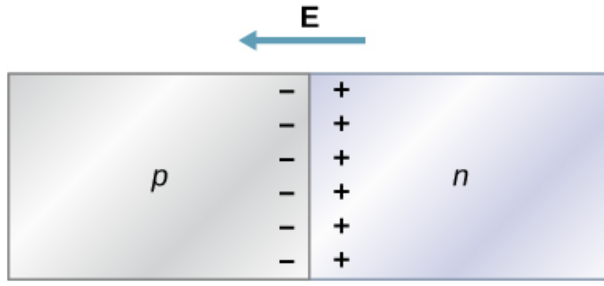
أنصاف النواقل العديد من التطبيقات في مجال الاللكترونيات الحديثة. وصفنا بعض أجهزة أنصاف النواقل الأساسية في هذا القسم. من المزايا الكبيرة لاستخدام أنصاف النواقل في عناصر الدارات هو أنه يمكن دمج عدة آلاف أو ملايين من العناصر نصف الناقلة على نفس قطعة صغيرة من السليكون ومتصلة بمسارات نقل. وتُسمى البنية الناتجة بالدارة المتكاملة (ic)، ورفائق ic هي أساس العديد من الأجهزة الحديثة، من أجهزة الكمبيوتر والهواتف الذكية إلى الإنترنت وشبكات الاتصالات العالمية.

## الثنائيات (الديودات)

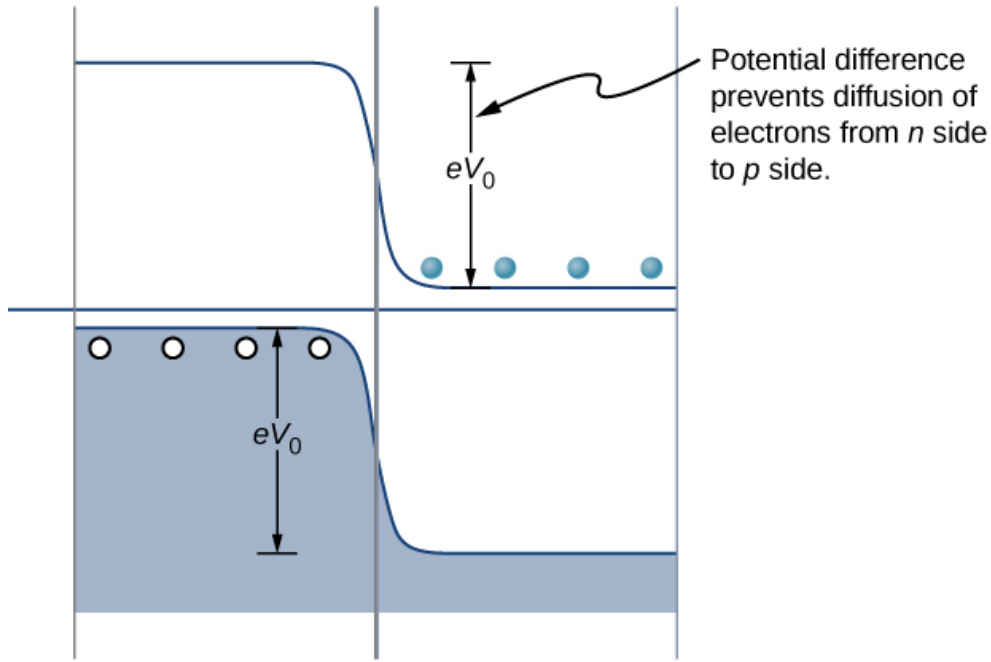
ولعل أبسط جهاز يمكن إنشاؤه باستخدام أنصاف النواقل هو الثنائي. الثنائي هو عنصر دائرة يسمح للتيار الكهربائي بالتدفق في اتجاه واحد فقط، مثل الصمام أحادي الاتجاه ((انظر نموذج الناقلية في المعادن (<http://cnx.org/content/m58730/latest>)). يتم إنشاء الثنائي من خلال ربط نصف ناقل من النوع p مع نصف ناقل من النوع n (الشكل 23.9). يُطلق على الوصلة بين هاتين المادتين بالوصلة p-n. يوضح الشكل 23.9 (b) مقارنة بين عصابات الطاقة في الثنائي القائم على السليكوني. تكون مواضع عصابتي التكافؤ والناقلية متماثلة ولكن سوية الشائبة مختلفة تماماً. عندما يتم تشكيل الوصلة p-n، تنتشر الإلكترونات من عصابة الناقلية للمواد من النوع n إلى الجانب p، حيث تتحد مع الثقوب في عصابة التكافؤ. تؤدي هذه الهجرة للشحنة إلى ترك أيونات الجهة المانحة المتأينة موجبة عند الجانب n وأيونات الجهة الأخذة المتأينة سلبية عند الجانب p، مما ينتج طبقة مزدوجة ضيقة من الشحنات عند الوصلة p-n تُسمى الطبقة الناضبة depletion layer. يمنع الحقل الكهربائي المرتبط مع الطبقة الناضبة، متابعة هذا الانتشار. يبين الشكل 24.9 الطاقة الكامنة للإلكترونات عبر الوصلة p-n.



الشكل 23.9 (a) تمثيل الوصلة p-n. (b) مقارنة بين عصابات الطاقة في ثنائي السليكوني من النوع p والسليكوني من النوع n قبل التوازن.



(a)



(b)

**الشكل 24.9** عند التوازن (a) تقع الشحنة الزائدة بالقرب من منطقة الاتصال p-n والتيار الصافي صفر (b) يمنع فرق الطاقة الكامنة للإلكترونات (باللون الأزرق الفاتح) من زيادة انتشار الإلكترونات في الجانب p.

يمكن الآن فهم سلوك الشوائب نصف الناقل (الديود). إذا كان القطب الموجب للبطارية متصلاً بمادة من النوع n، فإن الطبقة الناضبة تتسع، ويزداد فرق الطاقة الكامنة عبر الوصلة p-n. لا يملك القليل من الإلكترونات (الفجوات) الطاقة الكافية لتسلق الحاجز الكموني، وبالتالي ينخفض التيار بشكل كبير. وهذا ما يُسمى بالانحياز العكسي للشوائب. من ناحية أخرى، إذا كان القطب الموجب للبطارية متصلاً بمادة من النوع p، تكون الطبقة الناضبة ضيقة، وينخفض فرق الكمون الطاقوي عبر الوصلة p-n، وتتدفق الإلكترونات (الثقوب) بسهولة. وهذا ما يُسمى بالانحياز الأمامي للشوائب. باختصار، يسمح الشوائب بتدفق التيار بحرية في اتجاه واحد ولكنه يمنع تدفق التيار في الاتجاه المعاكس. وبالتالي فإن الشوائب نصف الناقل هو صمام أحادي الاتجاه.

يمكننا إيجاد العلاقة الرياضية بين التيار والكمون في الشوائب باستخدام مفهوم الكمون الكهربائي. ليكن لدينا N من حوامل الشحنة الأغلبية سالبة الشحنة (الإلكترونات التي قدمتها الذرات الشائبة) في المادة من النوع n والحاجز الكموني V عبر الوصلة p-n. وفقاً لتوزيع ماكسويل - بولتزمان، فإن جزء الإلكترونات التي لديها الطاقة الكافية للانتشار عبر هذا الحاجز الكموني هو  $Ne^{-eV/kBT}$



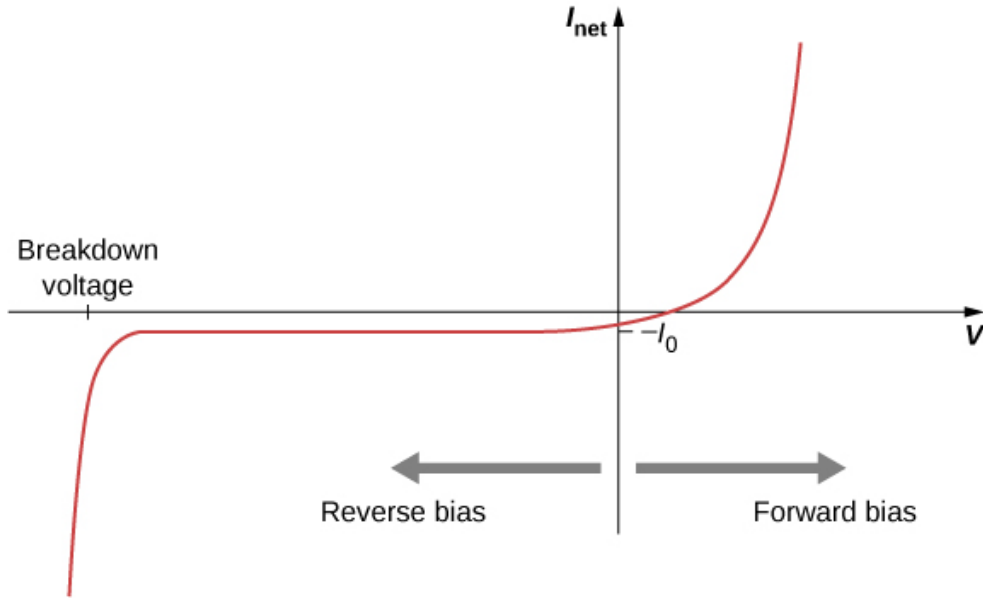
على كلِّ إذا تم تطبيق كمون بطارية  $V_b$  بانحياز أمامي فهذا الجزء يزيد إلى:  $Ne^{-e(V-V_b)/k_B T}$ . ويكون التيار الكهربائي الناتج عن حوامل الشحنة الأغلبية من الجانب n إلى الجانب p هو:

$$I = Ne^{-eV/k_B T} Ne^{eV_b/k_B T} = I_0 e^{eV_b/k_B T} \quad (9.35)$$

حيث  $I_0$  هو التيار في غياب الكمون المطبق و  $T$  هي درجة الحرارة. يكون التيار الناتج عن حوامل الشحنة الأقلية (الإثارة الحرارية للإلكترونات من عصابة التكافؤ إلى عصابة الناقلية على الجانب p والجذب اللاحق إلى الجانب n) هو  $-I_0$ ، وهو مستقل عن كمون الانحياز. وبالتالي فإن التيار الصافي هو:

$$I_{net} = I_0(e^{eV_b/k_B T} - 1). \quad (9.36)$$

يبين الشكل 25.9 رسماً بيانياً لتابعة التيار لكمون الانحياز. في حالة الانحياز الأمامي، تؤدي التغييرات الصغيرة في كمون الانحياز إلى تغييرات كبيرة في التيار. وفي حالة الانحياز العكسي، يكون التيار هو  $I_{net} \approx -I_0$ . بالنسبة للقيم القصوى للانحياز العكسي، يتم تأين الذرات الموجودة في المادة مما يؤدي إلى حدوث انهيار للتيار. وتحدث هذه الحالة عند كمون الانهيار.



الشكل 25.9 تابعة التيار لكمون الانحياز عبر وصلة p-n (الثنائي). في حالة الانحياز الأمامي، يتدفق التيار الكهربائي بسهولة. ومع ذلك، وفي حالة الانحياز العكسي، يتدفق التيار الكهربائي بشكل صغير جداً.

## مثال 6.9

### تيار الثنائي

عند وصل القطب الموجب لبطارية إلى الجانب p والقطب السالب إلى الجانب n من ثنائي نصف ناقل، ينتج تيار شدته  $4.5 \times 10^{-1} \text{ A}$ . تيار الإشباع العكسي نحو  $2.2 \times 10^{-8} \text{ A}$  (تيار الإشباع العكسي هو تيار الثنائي في حال الانحياز العكسي كما هو الحال هنا). يبلغ كمون البطارية هو  $0.12 \text{ V}$  ما هي درجة حرارة الثنائي؟

### خطة الحل:

الترتيب الأول هو انحياز أمامي والثاني هو انحياز عكسي. في كلتا هاتين الحالتين، يعبر عن التيار باستخدام المعادلة 9.36.

### الحل:

التيار في حالة الانحياز الأمامي والعكسي يُعطى بالعلاقة (9.36):

$$I_{net} = I_0(e^{eV_b/k_B T} - 1)$$

تبلغ شدة التيار من دون تطبيق انحياز وهي تيار الإشباع العكسي:

$$I_0 \approx -I_{\text{sat}} = 2.2 \times 10^{-8} \text{ A}$$

ومنه

$$\frac{I_{\text{net}}}{I_0} = \frac{4.5 \times 10^{-1} \text{ A}}{2.2 \times 10^{-8} \text{ A}} = 2.0 \times 10^8.$$

يمكن أن تكتب **المعادلة 9.36** بالشكل التالي:

$$\frac{I_{\text{net}}}{I_0} + 1 = e^{eV_b/k_B T}$$

هذه النسبة أكبر بكثير من الواحد، لذا الحد الثاني على الجانب الأيسر من المعادلة يختفي. بأخذ اللوغارتم الطبيعي لكلا الطرفين يكون لدينا:


$$\frac{eV_b}{k_B T} = 19$$


وبالتالي تكون درجة الحرارة:

$$T = 73 \text{ K} = \frac{eV_b}{k_B} \left( \frac{1}{19} \right) = \frac{e(0.12 \text{ V})}{8.617 \times \frac{10^{-5} \text{ eV}}{\text{K}}} \left( \frac{1}{19} \right)$$

**ملاحظة:**

يكون التيار الذي يجري في الثنائي في حالة الانحياز الأمامي والعكسي، حساساً لدرجة حرارة الثنائي. إذا كانت الطاقة الكامنة المعطاة من البطارية كبيرة بالمقارنة مع الطاقة الحرارية لمحيط الثنائي  $k_B T$ ، يكون في هذه الحالة تيار الانحياز الأمامي كبيراً جداً بالمقارنة مع تيار الإشباع العكسي.

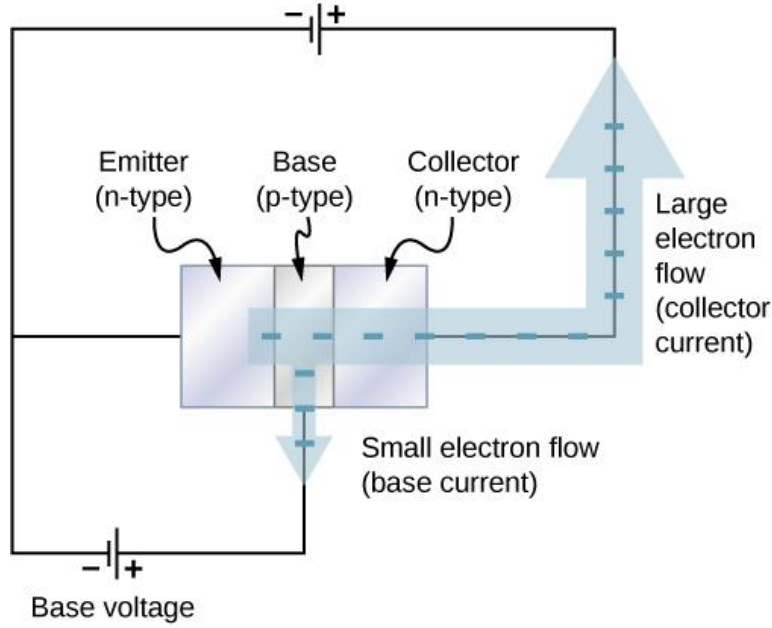
 **5.9 تحقق من فهمك:** كيف تكون شدة تيار الانحياز الأمامي بالمقارنة مع تيار الانحياز العكسي؟

 قم بإنشاء الوصلة p-n ولاحظ سلوك دائرة بسيطة لكمون الانحياز للأمامي والعكس. قم بزيارة هذا **الموقع** (<https://openstaxcollege.org/l/21semiconductor>) لمعرفة المزيد حول الثنائية نصف الناقلية.

## ترانزستور الوصلة

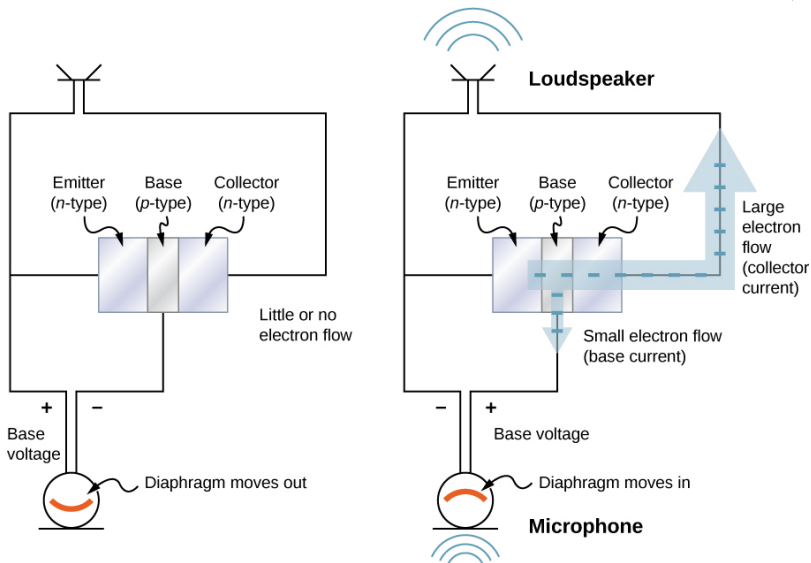
إذا كانت الثنائية عبارة عن صمام بجهة واحدة، فإن الترانزستورات هي أيضاً صمامات بجهة واحدة ولكن من الممكن فتحها وإغلاقها بمجرد للتحكم بالتيار. هناك نوع مميز جداً من الترانزستورات هو **ترانزستور الوصلة**. يملك ترانزستور الوصلة ثلاثة أجزاء: يتضمن نصف ناقل من النوع n ويطلق عليه بالباعث ونصف ناقل رقيق من النوع p الذي يُدعى بالقاعدة ونصف ناقل آخر من النوع n يُدعى بالمجمع. كما هو مبين في **الشكل 26.9**. عند توصيل قطب موجب المحطة بالطبقة من النوع p (القاعدة)، يتدفق تيار صغير من الإلكترونات، يُسمى  $I_B$  **بتيار القاعدة** ويتدفق إلى المحطة. يؤدي هذا إلى تدفق تيار كبير  $I_c$  عبر **تيار المجمع**. يمكن ضبط تيار القاعدة للتحكم في تيار المجمع الكبير. يعبر عن **الكسب** في التيار هو كما يلي:

$$I_c = \beta I_B \quad (9.37)$$



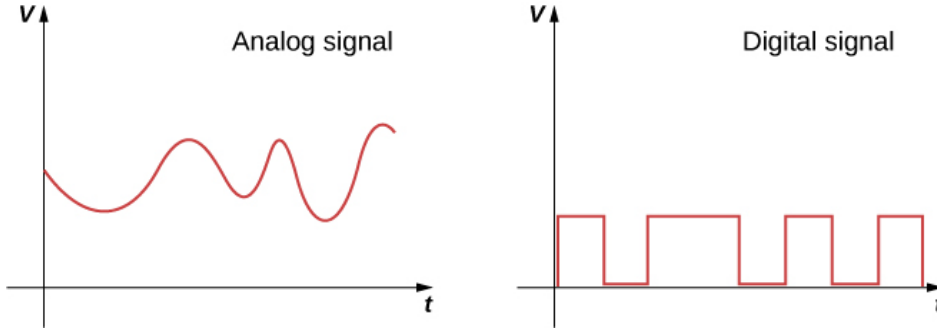
**الشكل 26.9** يتكون ترانزستور الوصلة من ثلاثة أجزاء: باعث وقاعدة ومُجمع يعمل الكمون المطبق على القاعدة كصمام للتحكم في التيار الكهربائي من الباعث إلى المُجمع.

يمكن استخدام ترانزستور الوصلة لتضخيم الكمون من ميكروفون لتشغيل مكبر صوت عالٍ. في هذا التطبيق، تتسبب الموجات الصوتية في حدوث غشاء داخل الميكروفون للدخول والخروج بسرعة (**الشكل 27.9**). عندما يكون الغشاء في وضع "الدخول in"، يتم تطبيق كمون إيجابي صغير على قاعدة الترانزستور. هذا يفتح "صمام" الترانزستور ويسمح بتدفق تيار كهربائي كبير إلى مكبر الصوت. عندما يكون الغشاء في وضع "الخروج out"، يتم تطبيق كمون كهربائي سلبى صغير على قاعدة الترانزستور، الذي يغلق صمام الترانزستور بحيث لا يتدفق التيار إلى مكبر الصوت. يعمل هذا على إيقاف تشغيل "صمام" الترانزستور بحيث لا يتدفق التيار إلى مكبر الصوت العالي. يتم بهذه الطريقة التحكم في التيار إلى السماعَة بواسطة الموجات الصوتية، ويتم تضخيم الصوت. يُسمى أي جهاز كهربائي يضخم الإشارة بمكبر للصوت.



**الشكل 27.9** مضخم صوتي قائم على ترانزستور الوصلة. يعمل التوتّر المطبق على القاعدة بواسطة ميكروفون كصمام للتحكم في التيار الكهربائي الأكبر الذي يمر عبر مكبر الصوت.

يتم في الأجهزة الإلكترونية الحديثة، استخدام الإشارات الرقمية مع الثنائيات والترانزستورات للقيام بمهام مثل معالجة البيانات. تحمل الدارات الكهربائية نوعين من الإشارات الكهربائية: التماثلية والرقمية (الشكل 28.9). تتغير الإشارة التماثلية بشكل مستمر، في حين أن الإشارة الرقمية تنتقل بين قيمتين للكمنون الثابت، مثل زائد 1V و 0V. في الدوائر الرقمية مثل تلك الموجودة في أجهزة الكمبيوتر، يعمل الترانزستور كمفتاح تشغيل-إطفاء. ويكون الترانزستور إما في وضع التشغيل، مما يعني أن الصمام مفتوح تماماً، أو أنه مطفأ، مما يعني أن الصمام مغلق تماماً. تحتوي الدارات المتكاملة على مجموعات واسعة من الترانزستورات ضمن قطعة واحدة من السليكون. وهي مصممة للتعامل مع الإشارات الرقمية التي تمثل تلك الواحدات والأصفار، والتي تعرف أيضاً باسم الكود الثنائي. ساعد اختراع ic في إطلاق ثورة الكمبيوتر الحديثة.



**الشكل 28.9** غالباً ما تكون البيانات في العالم الحقيقي تماثلية، مما يعني أن البيانات يمكن أن تتغير باستمرار. عادةً ما تكون شدة الصوت أو الصور المرئية تماثلية. يتم تحويل هذه البيانات إلى إشارات رقمية للمعالجة الإلكترونية في أجهزة التسجيل أو أجهزة الكمبيوتر. يتم إنشاء الإشارة الرقمية من الإشارة التماثلية عن طريق قطع الكمنون الكهربائي.

## 8.9 | الناقلية الفائقة super conductivity

### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- وصف السمات الرئيسية للناقل الفائق.
- وصف نظرية BCS في الناقلية الفائقة.
- تحديد الحقل المغناطيسي الحرج من أجل  $T = 0 \text{ K}$  من بيانات الحقل المغناطيسي.
- حساب الحد الأقصى emf أو التيار المار في سلك للحفاظ على الناقلية الفائقة.

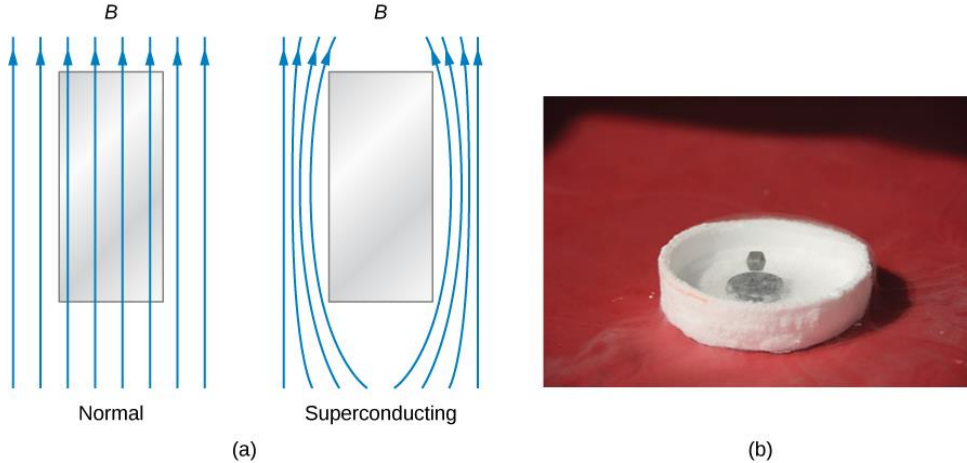
يمكن اعتبار المقاومة الكهربائية كمقياس لقوة الاحتكاك في تدفق التيار الكهربائي. وبالتالي، فإن المقاومة الكهربائية هي المصدر الرئيسي لتبديد الطاقة في الأنظمة الكهربائية مثل المغناطيسية والمحركات الكهربائية وخطوط النقل. يشجع استخدام الأسلاك النحاسية في الأسلاك الكهربائية لأنها تحتوي على واحدة من أصغر المقاومات الكهربائية في درجة حرارة الغرفة بين النواقل الشائعة. (في الواقع، تتمتع الفضة بمقاومة أقل من النحاس، ولكن التكلفة العالية والوفرة المحدودة للفضة تفوق حفظها للطاقة على النحاس). على الرغم من أن مناقشتنا للناقلية تشير إلى أن جميع المواد يجب أن يكون لها مقاومة كهربائية، فإننا نعرف أن هذا ليس هو الحال. عندما تنخفض درجة الحرارة عن القيمة الحرجة للعديد من المواد، تنخفض مقاومتها الكهربائية إلى الصفر، وتصبح المواد نواقل فائقة.

(شاهد النواقل الفائقة (<http://cnx.org/content/m58735/latest/>)).



## خواص النواقل الفائقة

بالإضافة إلى المقاومة الكهربائية الصفرية، تتمتع النواقل الفائقة أيضاً بمغناطيسية معاكسة مثالية. بعبارة أخرى، يكون في وجود حقل مغناطيسي مطبق، الحقل المغناطيسي الصافي داخل الناقل الفائق صفراً (الشكل 29.9). لذلك، يتم طرد أي خطوط للحقل المغناطيسي خارج عينة ناقلة فائقة. هذه هي مظاهر تأثير مايسنر، والتي تعلمت عنها في فصل التيار والمقاومة.



**الشكل 29.9 (a)** في تأثير مايسنر ، يتم طرد الحقل المغناطيسي من مادة ما عندما تصبح ناقلاً فائقاً. **(b)** يمكن للمغناطيس أن يطوف فوق مادة فائقة النقل، مدعوماً بقوة طرد الحقل المغناطيسي.

ومن المثير للاهتمام، أن تأثير مايسنر ليس نتيجةً لكون المقاومة صفراً. ولمعرفة السبب، افترض أن العينة الموضوعة في حقل مغناطيسي تمر بمرحلة انتقالية تنخفض فيها مقاومتها إلى الصفر. من قانون أوم، ترتبط الكثافة الحالية،  $j$ ، في العينة بالحقل الكهربائي الداخلي الصافي،  $E$ ، والمقاومة  $\rho$  بواسطة  $j = E / \rho$ . إذا كانت  $\rho$  تساوي الصفر، يجب أن تكون  $E$  أيضاً تساوي الصفر، بحيث تبقى  $j$  منتهية. وترتبط  $E$  والتدفق المغناطيسي  $\Phi_m$  من خلال العينة بقانون فاراداي كما يلي:

$$\oint E dl = - \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (9.38)$$

إذا كانت  $E$  تساوي صفر، فإن  $d\Phi_m/dt$  تساوي الصفر، وهذا يعني أن التدفق المغناطيسي خلال العينة لا يمكن أن يتغير. لذلك لا ينبغي طرد خطوط الحقل المغناطيسي داخل العينة عند حدوث الانتقال. وبالتالي، فإنه لا يتبع أن المواد التي تصبح مقاومتها صفر يجب أن تظهر تأثير مايسنر. بدلاً من ذلك، فإن تأثير مايسنر هو ميزة خاصة للنواقل الفائقة.

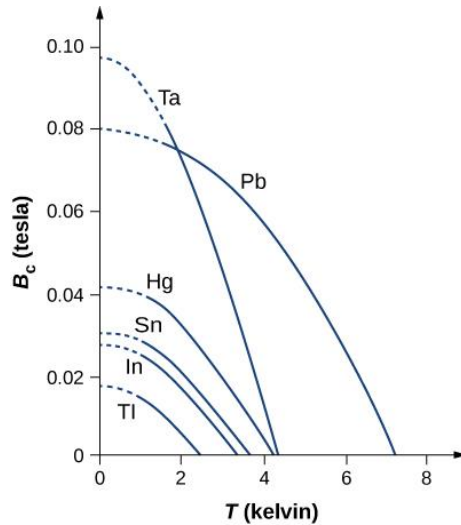
ميزة أخرى مهمة للمادة فائقة النقل هي **درجة الحرارة الحرجة**  $T_c$ ، وهي درجة الحرارة التي تكون المادة الناقلة عندها أو أقل منها فائقة. يتراوح المجال المعروف لدرجات الحرارة الحرجة من جزء يساوي 1k إلى ما يزيد قليلاً على 100k. والنواقل الفائقة ذات درجات الحرارة الحرجة بالقرب من هذا الحد الأعلى تُعرف عادة باسم النواقل الفائقة "ذات درجة الحرارة العالية". من وجهة نظر عملية، تعد النواقل الفائقة التي تكون  $T_c \gg 77K$  ذات أهمية كبيرة. في الوقت الحاضر، لا تزال التطبيقات التي تشتمل على النواقل الفائقة، تتطلب غمر المواد فائقة الناقلة في الهليوم السائل (4.2k) لإبقائها تحت درجة حرارتها الحرجة. يجب تجديد حمامات الهليوم السائلة باستمرار بسبب التبخر، ويمكن أن تفوق تكاليف التبريد التوفير المتوقع من استخدام الناقل الفائق. ومع ذلك، فإن 77k هي درجة حرارة النيتروجين السائل، والذي هو أكثر وفرة وأقل كلفة من الهليوم السائل. سيكون من الأكثر فاعلية من حيث التكلفة إذا استطعنا بسهولة تصنيع واستخدام نواقل فائقة عالية الحرارة التي تحتاج فقط إلى الاحتفاظ بها عند النيتروجين السائل للحفاظ على الناقلة الفائقة.

تستخدم المواد فائقة النقل عالية الحرارة في الوقت الحالي في تطبيقات مختلفة. مثال على ذلك هو إنتاج الحقول المغناطيسية في بعض مسرعات الجسيمات. الهدف النهائي هو اكتشاف مواد فائقة الناقلية عند درجة حرارة الغرفة. دون أي متطلبات تبريد، يمكن أن يكون الجزء الأكبر من المكونات الإلكترونية وخطوط النقل فائق الناقلية، مما يؤدي إلى زيادات هائلة وغير مسبوق في الكفاءة والأداء.

هناك ميزة مهمة أخرى للمادة فائقة النقل وهي **الحقل المغناطيسي الحرج**  $B_c(T)$ ، وهو الحد الأقصى للحقل المغناطيسي المطبق عند درجة حرارة  $T$  الذي يسمح للمواد بأن تظل ناقلة فائقة. إذا كان هناك حقل مطبق أكبر من الحقل الحرج سوف يدمر الناقلية الفائقة. الحقل الحرج هو صفر عند درجة الحرارة الحرجة ويزداد مع انخفاض درجة الحرارة. يبين **الشكل 30.9** مخططات تابعة الحقل الحرج لدرجة الحرارة للعديد من المواد فائقة النقل. يمكن تبيان تبعية الحقل الحرج للحرارة تقريباً من خلال العلاقة التالية:

$$B_c(T) = B_c(0) \left[ 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (9.39)$$

حيث  $B_c(0)$  هو الحقل الحرج عند درجة حرارة الصفر المطلق. يبين **الجدول 5.9** درجات الحرارة والحقول الحرجة لفتنتين من النواقل الفائقة: النوع I من النواقل الفائقة والنوع II من النواقل الفائقة. بشكل عام، تعتبر النواقل الفائقة من النوع I، مثل الألمنيوم والزنك. وهي مواد ذات مغناطيسية معاكسة تماماً تحت الحقل الحرج  $B_c(T)$ ، ويدخلون في الحالة الطبيعية غير الناقلة الفائقة بمجرد تجاوز هذا الحقل. الحقول الحرجة للنوع II من النواقل الفائقة منخفضة بشكل عام (أقل بكثير من واحد تيسلا). لهذا السبب، لا يمكن استخدامها في التطبيقات التي تتطلب إنتاج حقول مغناطيسية عالية، والتي سوف تكسر (تحطم) حالة الناقلية الفائقة.

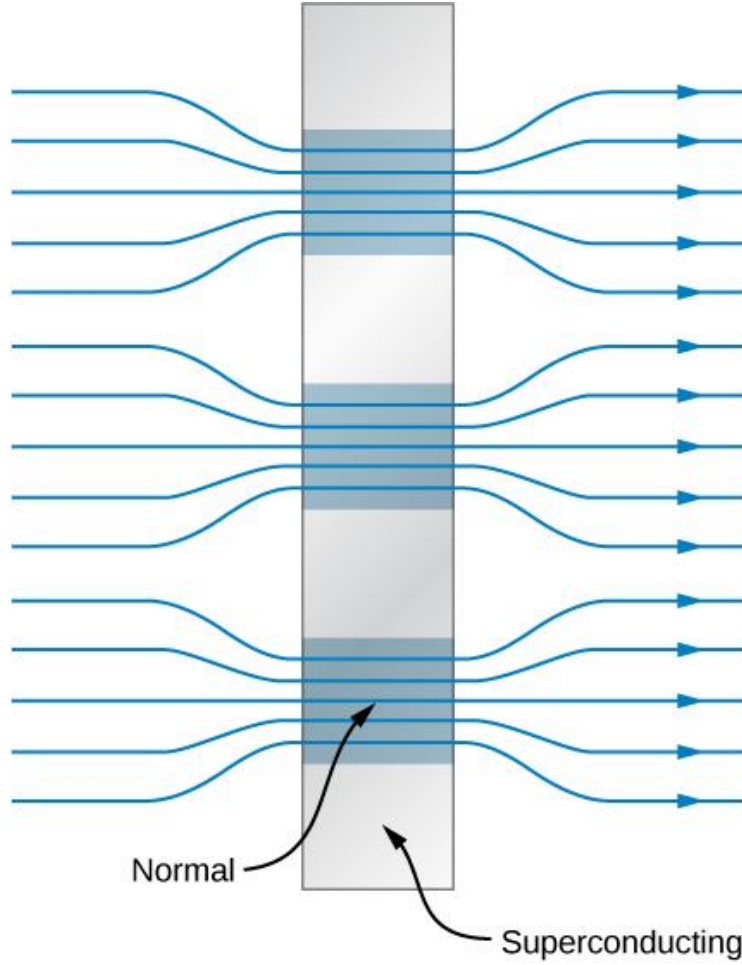


**الشكل 30.9** تابعة الحقل الحرج لدرجة الحرارة لعدة نواقل فائقة. تحدث الناقلية الفائقة للحقول المغناطيسية ودرجات الحرارة تحت هذه المنحنيات.

**الجدول 5.9 درجات الحرارة الحرجة والحقول المغناطيسية الحرجة عند  $T = 0 \text{ K}$  لعدة نواقل فائقة.**

المادة	درجة الحرارة الحرجة (K)	الحقل المغناطيسي الحرج (T)
النوع I:		
Al	1.2	0.011
Ga	1.1	0.0051
Hg( $\alpha$ )	4.2	0.041
In	3.4	0.029
Nb	9.3	0.20
Pb	7.2	0.080
Sn	3.7	0.031
Th	1.4	0.00016
Zn	0.87	0.0053
النوع II:		
Nb <sub>3</sub> Al	18	32
Nb <sub>3</sub> Ge	23	38
Nb <sub>3</sub> Sn	18	25
NbTi	9.3	15
YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7</sub>	92	>100

النوع II من النواقل الفائقة عبارة عن مركبات أو سبائك تشتمل على معادن انتقالية أو عناصر من سلسلة الأكتينيدات. تقريباً جميع النواقل الفائقة ذات درجات حرارة حرجة عالية نسبياً هي من النوع II. لديهم حقلان حرجان ممثلان بالرمزين:  $B_{c1}(T)$  و  $B_{c2}(T)$ . عندما يكون الحقل أقل من  $B_{c1}(T)$ ، فإن النواقل الفائقة من النوع II تكون مغناطيسية معاكسة تماماً، ولا يمكن حدوث تغلغل مغناطيسي في هذه المادة. من أجل حقل يتجاوز  $B_{c2}(T)$ ، يتم نقلها إلى حالتها الطبيعية. عندما يكون الحقل أكبر من  $B_{c1}(T)$  ولكن أقل من  $B_{c2}(T)$ ، يُقال إن النواقل الفائقة من النوع II في حالة مختلطة. على الرغم من وجود بعض التغلغل للتدفق المغناطيسي في الحالة المختلطة، فإن مقاومة هذه المادة هي صفر. داخل النواقل الفائقة، توجد مناطق تشبه الشعيرات لها خواص كهربائية ومغناطيسية طبيعية تتخللها مناطق ذات ناقلية فائقة مع مغناطيسية معاكسة كاملة. كما هو مبين في **الشكل 31.9**. يتم طرد الحقل المغناطيسي من المناطق فائقة الناقلية ولكنه موجود في المناطق الطبيعية. بشكل عام،  $B_{c2}(T)$  كبير جداً مقارنة بالحقول الحرجة للنواقل الفائقة من النوع I، لذلك فإن الأسلاك المصنوعة من مادة فائقة النقل من النوع II مناسبة لصنع اللفات ذات الحقول المغناطيسية العالية.



**الشكل 31.9** تمثيل تخطيطي للحالة المختلطة للناقل الفائق من النوع II. النواقل الفائقة (المربعات الرمادية) تطرد الحقول المغناطيسية في المناطق المجاورة لها.

## مثال 7.9

### سلك نيوبيوم

في تجربة، يتم غمر سلك نيوبيوم (Nb) له نصف قطر 0.25mm في الهليوم السائل ( $T = 4.2 \text{ K}$ ) ويمر تيار شدته 300A. هل لا يزال السلك ناقلاً فائقاً؟

### خطة الحل:

يمكن تحديد الحقل المغناطيسي المطبق من نصف قطر السلك والتيار. يمكن تحديد الحقل المغناطيسي الحرج من المعادلة 9.39، خواص الناقل الفائق، ودرجة الحرارة. إذا كان الحقل المغناطيسي المطبق أكبر من الحقل الحرج، فسوف يتم تحطيم الناقلية الفائقة في السلك Nb.

### الحل:

عند  $T = 4.2\text{K}$  يبلغ الحقل الحرج Nb هو، من المعادلة 9.39 والجدول 5.9:

$$B_c(4.2\text{K}) = B_c(0) \left[ 1 - \left( \frac{4.2\text{K}}{9.3\text{K}} \right)^2 \right] = (0.20\text{T})(0.80) = 0.16\text{T}$$

في فصل سابق، تعلمنا أن الحقل المغناطيسي داخل سلك يجري فيه تيار له نصف قطر  $a$  يُعطى بالعلاقة:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$$




حيث  $r$  هي المسافة من المحور المركزي للسلك. وبالتالي، فإن الحقل على سطح السلك هو  $\frac{\mu_0 I r}{2\pi a}$  لسلك النيوبيوم، هذا المجال هو

$$B = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ T m/A})(300\text{A})}{2\pi \cdot 2.5 \times 10^{-4} \text{ m}} = 0.24\text{T}.$$

نظراً لأن هذا يتجاوز 0.16T الحرج، فإن السلك لا يظل فائق الناقلية.

### ملاحظة

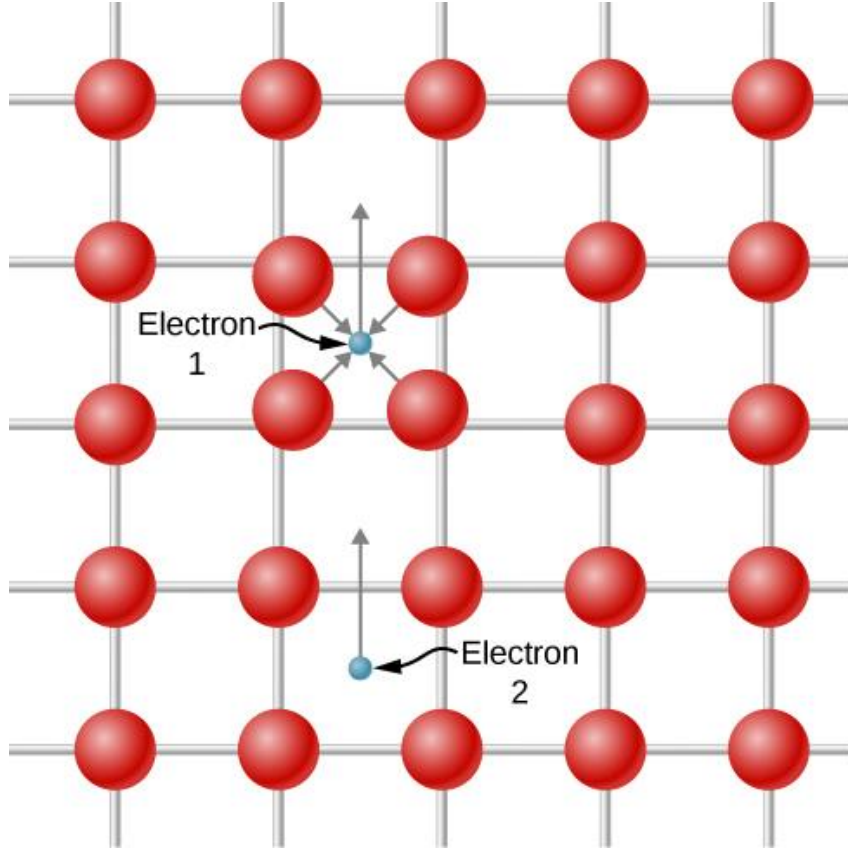
تتطلب الناقلية الفائقة درجات حرارة منخفضة وحقول مغناطيسية منخفضة. تحقيق هذه الشروط المتزامنة يكون أقل سهولةً للنيوبيوم بالمقارنة مع العديد من المعادن الأخرى. على سبيل المثال، النواقل الفائقة المصنوعة من الألمنيوم عند درجات حرارة أقل بمقدار 7 مرات والحقول المغناطيسية أقل بمقدار 18 مرة.

 **6.9 تحقق من فهمك :** ما هي الشروط الضرورية لتحقيق الناقلية الفائقة؟

### نظرية النواقل الفائقة

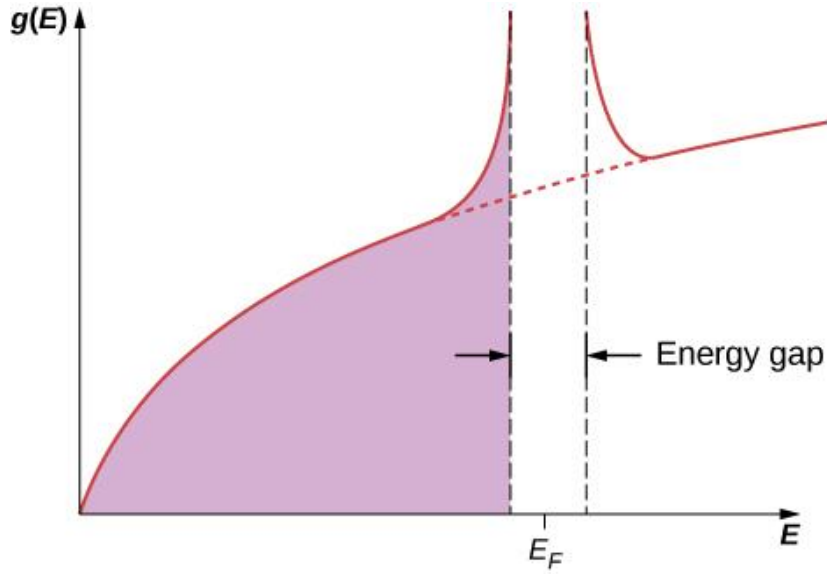
تم تطوير نظرية الناقلية الفائقة في عام 1950 من قبل جون باردين وليون كوبر وجي روبرت شريفير، وحصلوا على جائزة نوبل في عام 1972. وتُعرف هذه النظرية باسم نظرية BCS. نظرية BCS معقدة، لذلك نلخصها نوعياً فيما يلي. تعود الخواص الكهربائية في الناقل الطبيعي إلى الإلكترونات الأكثر نشاطاً بالقرب من طاقة فيرمي. في عام 1956، أظهر كوبر أنه إذا كان هناك أي تفاعل جاذب بين إلكترونين على مستوى فيرمي، يمكن لهذين الإلكترونين أن تشكل حالة مقيدة تكون فيها الطاقة الكلية أقل من  $2E_F$ . يُعرف هكذا إلكترونين باسم زوج كوبر.

من الصعب أن نتخيل إلكترونين يجذب الواحد الآخر، لأن لهما نفس الشحنة ويجب أن يتنافرا. ومع ذلك، فإن التفاعل المقترح يحدث فقط في سياق الشبكة الذرية. ويبين **الشكل 32.9** وصف لعملية الجذب. يزيح الإلكترون 1 النواة الذرية المشحونة إيجابياً قليلاً تجاه نفسه أثناء انتقاله بسبب قوة جذب كولون. يرى "الإلكترون 2" منطقة ذات كثافة أعلى من الشحنة الموجبة بالنسبة إلى البيئة المحيطة، وبالتالي ينجذب إلى هذه المنطقة، وبالتالي بشكل غير مباشر، إلى الإلكترون 1. نظراً لمبدأ الاستبعاد، يجب أن يكون للإلكترونين في زوج كوبر سبين معاكس.



**الشكل 32.9** يمكن أن يتشكل زوج كوبر نتيجة لإزاحة النواة الإيجابية. يزيح الإلكترون 1 النواة الذرية المشحونة إيجابياً قليلاً تجاه نفسه أثناء انتقاله بسبب التجاذب الكولوني. الإلكترون 2 "يرى" منطقة ذات كثافة أعلى من الشحنة الإيجابية بالنسبة إلى البيئة المحيطة وبالتالي يجذب إلى هذه المنطقة.

تقوم نظرية BCS بتوسيع أفكار كوبر، والتي تخص زوجاً واحداً من الإلكترونات، إلى غاز إلكتروني حر بأكمله. عند حدوث الانتقال إلى حالة الناقل الفائق، تتزوج جميع الإلكترونات لتشكيل أزواج كوبر. على مقياس ذري، تكون المسافة بين الإلكترونين المكونين لزوج كوبر كبيرة للغاية ويوجد بين هذه الإلكترونات عادةً نحو  $10^6$  إلكترون آخر، يتزوج كل منها أيضاً مع إلكترون بعيد. وبالتالي، هناك تراكم كبير بين التوابع الموجية لأزواج كوبر الفردية، مما يؤدي إلى وجود علاقة قوية بين حركات الأزواج. ينتقلون جميعاً معاً "في الخطوة"، مثل أعضاء فرقة المسير. في الانتقال الفائق النقل، تتغير كثافة الحالات بشكل كبير بالقرب من سوية فيرمي. يبين الشكل 33.9 فجوة في الطاقة حول  $E_F$  لأن مجموعة أزواج كوبر لديها طاقة حالة أساسية أصغر من غاز فيرمي للإلكترونات غير المتفاعلة. يميز مظهر هذه الفجوة حالة الناقل الفائق. إذا تم كسر هذه الحالة، فإن الفجوة تختفي، وتعود كثافة الحالات إلى كثافة غاز الإلكترون الحر.



**الشكل 33.9** تتشكل فجوة طاقة كبيرة نسبياً حول طاقة فيرمي عندما تصبح مادة ناقل فائق. إذا تم كسر هذه الحالة، فإن الفجوة تختفي، وتعود كثافة الحالات إلى كثافة غاز الإلكترون الحر.

إن نظرية BCS قادرة على التنبؤ بالعديد من الخصائص التي لوحظت في النواقل الفائقة. تتضمن الأمثلة تأثير مايسنر ودرجة الحرارة الحرجة والحقل الحرج، وربما الأهم من ذلك، أن تصبح المقاومة صفراً عند درجة الحرارة الحرجة. يمكننا التفكير في هذه الظاهرة الأخيرة نوعياً على النحو التالي. في الناقل الطبيعي، تنتج المقاومة من تفاعل إلكترونات الناقلية مع الشبكة. في هذا التفاعل، تكون الطاقة المتبادلة بناءً على  $k_B T$ ، الطاقة الحرارية. أما في الناقل الفائق، فيتم حمل التيار الكهربائي بواسطة أزواج كوبر. الطريقة الوحيدة لشبكة شعرية لتشثيت زوج كوبر هي كسره. تدمير زوج واحد ثم يدمر الحركة الجماعية لجميع الأزواج. يتطلب هذا التدمير طاقة من رتبة  $10^{-3} \text{eV}$ ، وهو مقدار الفجوة الطاقية. تحت درجة الحرارة الحرجة، لا تتوفر طاقة حرارية كافية لهذه العملية، وبالتالي فإن أزواج كوبر تنتقل دون عوائق في جميع أنحاء الناقل الفائق.

أخيراً، من المثير للاهتمام ملاحظة أنه لم يتم العثور على أي دليل على الناقلية الفائقة في أفضل النواقل الطبيعية، مثل النحاس والفضة. هذا ليس غير متوقع، بالنظر إلى نظرية BCS. أساس تكوين حالة الناقلية الفائقة هو التفاعل بين الإلكترونات والشبكة. في أفضل النواقل، يكون تفاعل الشبكة الإلكترونية أضعف، كما يتضح من الحد الأدنى من المقاومة. قد نتوقع إذن أن يكون التفاعل في هذه المواد ضعيفاً للغاية بحيث لا يمكن تشكيل أزواج كوبر، وبالتالي فإن الناقلية الفائقة تُستبعد.

## مراجعة الفصل التاسع

### الكلمات المفتاحية

- الشائبة الآخذة:** ذرة مستبدلة بأخرى في نصف ناقل ينتج عنها إلكترون حر.
- مكبر:** جهاز كهربائي يكبر إشارة كهربائية.
- تيار القاعدة:** تيار قادم من القاعدة من النوع n في الترانزستور.
- نظرية BCS:** نظرية للناقلية الفائقة مبنية على التفاعل إلكترون-شبكة-إلكترون.
- مكعب مركزي الجسم (BCC):** شبكة بلورية يحاط الأيون فيها بثمانية من أقرب المجاورات التي تقع في زوايا خلية وحدة.
- كمون الانهيار:** في الثنائي، انحياز التوتر العكسي المطلوب لإحداث الانهيار في التيار.
- تيار المُجمع:** تيار قادم من المجمع من المادة من النوع p.
- عصابة الناقلية:** فوق عصابة التكافؤ، العصابة المتاحة التالية في بنية الطاقة للبلورة.
- زوج كوبر:** زوج إلكتروني مرتبط في ناقل فائق.
- رابطة تساهمية:** رابطة متشكلة بتشارك إلكترون أو أكثر بين ذرتين.
- الحقل المغناطيسي الحرج:** الحقل الأعظمي المطلوب لإنتاج حالة الناقلية الفائقة.
- درجة الحرارة الحرجة:** الحرارة العظمى المطلوبة لإنتاج حالة الناقلية الفائقة.
- كثافة السويات:** عدد السويات الكمومية المسموحة لوحدة الطاقة.
- طبقة النضوب:** منطقة قرب الوصلة p - n تنتج تياراً كهربائياً.
- طاقة التفكك:** مقدار الطاقة المطلوبة لتفكيك الجزيء إلى ذرات وأيضاً الطاقة الكلية لزوج أيوني لتفكيك البلورة إلى أيونات مفردة.
- الشائبة المانحة:** ذرة مستبدلة بأخرى في ناقل فائق ينتج عنها فجوة إلكترون حرة.
- الإشابة:** تغيير في نصف ناقل بتبديل نوع ذرة بآخر.
- سرعة الانسياب:** السرعة الوسطية لجسيم يتحرك بشكل عشوائي.
- الانتقال الكهربائي ثنائي القطب:** انتقال بين سويات طاقة حاصل بسبب امتصاص أو إصدار للإشعاع.
- انجذاب الإلكترون:** طاقة مترافقة مع إلكترون مقيد تم استقباله.
- كثافة عدد الإلكترون:** عدد الإلكترونات في وحدة الحجم.
- عصابة الطاقة:** نطاق مستمرة نوعاً ما لمستويات طاقة كهربائية في مادة صلبة.
- فجوة طاقة:** فجوة بين عصابة طاقة في مادة صلبة.
- مسافة الفصل التوازنية:** المسافة بين الذرات في جزيء.
- تناظر التبادل:** كيف تتبدل كامل التابع الموجي عند حدوث تبادل إلكترونين.
- مكعب مركزي الوجوه:** بنية بلورية يكون فيها الأيون محاط بستة مجاورات الأقرب الواقعة على الوجوه لخلية وحدة.
- طاقة فيرمي:** أكبر طاقة مملووة من قبل الإلكترونات في معدن  $T = 0 \text{ K}$ .
- عامل فيرمي:** عدد يعبر عن احتمالية أن يكون مستوى بطاقة معطاة ممتلئاً.
- درجة حرارة فيرمي:** حرارة فعالة للإلكترونات لها طاقة فيرمي.

**الانحياز الأمامي:** تطبيق كمون على ثنائي ينتج عنه تيار عالٍ.

**نموذج الإلكترون الحر:** نموذج لمعدن يظهر الإلكترونات على أنها غاز.

**فجوة:** سوياي غير مملوءة في عصابة الطاقة.

**تهجين:** التغيير في بنية الطاقة للذرة التي تشارك فيها حالات مختلطة موالية بالترابط.

**ذرة إشابة:** ذرة إشابة مانحة أو آخذة.

**عصابة الإشابة:** عصابة طاقة جديدة تتشكل بإشابة نصف الناقل.

**رابطة أيونية:** رابطة متشكلة بسبب قوة جذب كولون للأيونات السالبة والموجبة.

**ترانزستور الوصلة:** صمام كهربي ميني على الوصلة من الشكل p-n-p.

**شبكة:** مصفوفة منتظمة أو تنظيم للذرات في شكل بنية بلورية.

**ثابت مادلونغ:** ثابت يعتمد على هندسة البلورة يستخدم لتحديد الطاقة الكلية الكامنة لأيون في بلورة.

**حوامل الشحنة الأغلبية:** إلكترون حر (أو فجوة) مقدّمة من ذرات إشابة.

**حوامل الشحنة الأقلية:** إلكترون حر (أو فجوة) مقدّمة من إثارة حرارية عبر فجوة الطاقة.

**نصف ناقل من النوع n:** نصف ناقل مشاب ينقل الإلكترونات.

**وصلة p-n:** وصلة متشكلة من تجميع نصفي نواقل من النوع n و p.

**نصف ناقل من النوع p:** نصف ناقل مشاب يقوم بنقل الفجوات.

**جزيء متعدد الذرات:** جزيء مكوّن من أكثر من ذرة.

**ثابت التنافر:** ثابت تجريبي مرتبط بقوة تنافرية بين أيونات متقاربة لدرجة أن مبدأ الاستبعاد مهم.

**انحياز عكسي:** تطبيق كمون على ثنائي ينتج عنه تيار منخفض.

**مستوى الطاقة الدورانية:** سوية طاقة متعلقة بالطاقة الدورانية لجزيء.

**مبدأ الاصطفاء:** مبدأ يقوم بتحديد الانتقالات الممكنة من حالة كمومية لأخرى.

**نصف ناقل:** مادة صلبة لها فجوة طاقة صغيرة نسبياً في الطاقة بين أحفص عصابة ممثلة تماماً والعصابة التالية غير المعبئة.

**مكعبي بسيط:** بنية بلورية رئيسة يقع فيها كل أيون على العقد في شبكة ثلاثية الأبعاد.

**ناقل فائق من النوع I:** عنصر فائق الناقلية، مثل الألمنيوم أو الزئبق.

**ناقل فائق من النوع II:** مركب أو سبيكة فائقة النقل، مثل معدن إنتقالي أو عنصر من سلسلة الأكتينيدات.

**عصابة التكافؤ:** أعلى نطاق طاقة ممتلئ في البنية الطاقية لبلورة.

**رابطة فان دير فالس:** رابطة متشكلة بسبب الجذاب جزئيين مستقطبين كهربائياً.

**سوية الطاقة الاهتزازية:** سوية طاقة مرتبط بالطاقة الاهتزازية لجزيء.

## معادلات مفتاحية

الطاقة الكهروساكنة لمسافة فصل التوازن بين الذرات

$$U_{\text{coul}} = \frac{-ke^2}{r_0}$$

تغير الطاقة المرافق للترابط الأيوني

$$U_{\text{form}} = E_{\text{transfer}} + U_{\text{coul}} + U_{\text{ex}}$$

الحقل المغناطيسي الحرج للناقل الفائق:

$$B_c(T) = B_c(0) \left[1 - \frac{T}{T_c}\right]^2$$

الطاقة الدورانية لجزيء ثنائي الذرة:

$$E_r = l(l+1) \frac{h^2}{2I}$$

الطاقة الدورانية المميزة لجزيء

$$E_{0r} = \frac{h^2}{2I}$$

الطاقة الكامنة المترافقة مع مبدأ الاستبعاد

$$U_{\text{ex}} = \frac{A}{r_n}$$

طاقة التفكك لمادة صلبة

$$U_{\text{diss}} = \alpha \frac{ke^2}{r_0} \left(1 - \frac{1}{n}\right)$$

عزم العطالة لجزيء ثنائي الذرة مع كتلة مختزلة  $\mu$

$$I = \mu r_0^2$$

طاقة إلكترون في معدن

$$E = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} = \left(n \frac{1}{2} + n \frac{2}{2} + n \frac{3}{2}\right)$$

كثافة إلكترونات للسويات في معدن

$$g(E) = \frac{\pi V}{2} \left(\frac{8m_e}{h^2}\right)^{3/2} E^{1/2}$$

طاقة فيرمي

$$E_F = \frac{h^2}{8m_e} \left(\frac{3N}{\pi V}\right)^{2/3}$$

درجة حرارة فيرمي

$$T_F = \frac{E_F}{k_B}$$

مفعول هول

$$V_H = uBw$$

التيار مقابل كمون الانحياز عبر للوصلة p-n

$$I_{\text{net}} = I_0 (e^{eV_b/k_B T} - 1)$$

كسب التيار

$$I_c = \beta I_B$$

مبدأ الاصطفاء لانتقالات الطاقة الدورانية

$$\Delta l = \pm 1$$

مبدأ الاصطفاء لانتقالات الطاقة الاهتزازية

$$\Delta n = \pm 1$$

## خلاصة

### 1.9 أنواع الروابط الجزيئية

- تتشكل الجزيئات بنوعين رئيسيين من الروابط: الرابطة الأيونية والرابطة التساهمية. تقوم الرابطة الأيونية بنقل الإلكترون من ذرة إلى أخرى، الروابط التساهمية تشارك الإلكترونات.
- يعتمد تغيير الطاقة المرتبط بالتربط الأيوني على ثلاث عمليات رئيسية هي: تأين إلكترون من ذرة واحدة، وقبول الإلكترون من قبل الذرة الثانية، وجذب كولون للأيون الناتج.
- تتضمن الروابط التساهمية توابع موجية متناظرة في الفضاء.
- تستخدم الذرات مجموعة خطية من التوابع الموجية في الترابط مع جزيئات أخرى (التهجين).

### 2.9 الطيف الجزيئي

- تمتلك الجزيئات طاقة اهتزازية ودورانية.
- الاختلافات في الطاقة بين سويات الطاقة الاهتزازية المجاورة أكبر من تلك الموجودة بين سويات الطاقة الدورانية.
- الفصل بين القمم في طيف الامتصاص مرتبط عكسياً بعزم العطالة.
- الانتقالات بين سويات الطاقة الاهتزازية والدورانية تتبع لقواعد الاصطفاء.

### 3.9 الترابط في المواد الصلبة البلورية

- تشمل البنية المترابطة للأملاح الأيونية الشائعة FCC و BCC.
- ترتبط كثافة البلورة عكسياً بثابت التوازن.
- تكون طاقة تفكك الملح كبيرة عندما تكون مسافة الفصل التوازنية صغيرة.
- تكون الكثافات وأنصاف القطر التوازنية للأملاح الشائعة (FCC) متماثلة تقريباً.

### 4.9 نموذج الإلكترون الحر في المعادن

- تقوم المعادن بنقل الكهرياء، وتتكون الكهرياء من أعداد كبيرة من الإلكترونات الحرة تقريباً والمتصادمة عشوائياً.
- يتم تقدير كميات الطاقة المسموح بها للإلكترون. يظهر هذا التقدير في شكل طاقات إلكترونية كبيرة جداً، حتى عند  $T = 0K$ .
- تعتمد الطاقات المسموح بها للإلكترونات الحرة في المعدن على كتلة الإلكترون وعلى كثافة الإلكترونات في المعدن.
- تزداد كثافة سويات الإلكترون في المعدن مع الطاقة، لأن هناك طرقاتاً أكثر للإلكترون ملء سوية الطاقة العليا من سوية الطاقة المنخفضة.
- ينص مبدأ الاستبعاد الذي قام به باولي على أن إلكترونين فقط (سبين للأعلى وسبين للأسفل) يمكن أن يشغلوا نفس الطاقة.
- لذلك، عند ملء سويات الطاقة هذه (من الأدنى إلى الأعلى عند  $T = 0K$ )، يُطلق على آخر وأعلى سوية طاقة يتم انشغالها اسم طاقة فيرمي.

### 5.9 نظرية عصابات الطاقة في المواد الصلبة

- يمكن تحديد سويات الطاقة للإلكترون في البلورة عن طريق حل معادلة شرودنغر من أجل كمونات دورية ودراسة التغييرات في بنية طاقة الإلكترون حيث يتم دفع الذرات معاً عن بُعد.
- تتميز البنية الطاقية في البلورة بعصابات طاقة مستمرة وفجوات في الطاقة.
- تعتمد قدرة المادة الصلبة على نقل الكهرياء على البنية الطاقية مادة الصلبة.

## 6.9 أنصاف النواقل والإشابة

- يمكن تغيير البنية الطاقية لأنصاف النواقل عن طريق استبدال نوع من الذرات بنوع آخر (إشابة).
- الشوائب من النوع n في أنصاف النواقل تخلق وتملأ سويات طاقة جديدة أسفل عصابة الناقلية مباشرة.
- الشوائب من نوع p في أنصاف النواقل تُنشأ سويات طاقة جديدة أعلى عصابة التكافؤ.
- يمكن استخدام مفعول هول لتحديد الشحنة، وسرعة الانسياب، وكثافة رقم حامل الشحنة لأنصاف النواقل.

## 7.9 أجهزة أنصاف النواقل

- يتم إنتاج الثنائي بواسطة الوصلة n-p. يسمح الثنائي للتيار بالتحرك في اتجاه واحد فقط. في حالة الانحياز الأمامي في الثنائي، يزيد التيار بشكل كبير مع الكمون.
- يتم إنتاج الترانزستور بواسطة الوصلة n-p-n. الترانزستور هو صمام كهربائي يتحكم في التيار في الدارة.
- الترانزستور هو مكون رئيسي في مكبرات الصوت وأجهزة الكمبيوتر والعديد من الأجهزة الأخرى

## 8.9 الناقلية الفائقة

- يتميز الناقل الفائقة بميزتين: نقل الإلكترونات بمقاومة كهربائية صفرية وطرده خطوط الحقل المغناطيسي.
- الحد الأدنى من درجة الحرارة المطلوبة لحدوث الناقلية الفائقة.
- يحطم الحقل المغناطيسي القوي الناقلية الفائقة.
- الناقلية الفائقة يمكن تفسيرها من خلال أزواج كوبر.

## أسئلة نظرية

### 1.9 أنواع الروابط الجزيئية

1. ما هو الفرق الرئيس بين الرابطة الأيونية والرابطة التساهمية ورابطة فان دير فالس؟
2. للحالات التالية، ما هو نوع الترابط المتوقع؟ (a) جزيء KCl؛ (b) جزيء N<sub>2</sub>.
3. صف ثلاث خطوات للترابط الأيوني.
4. ما الذي يمنع أن يكون لأيون موجب وأيون سالب فاصل صفري؟
5. بالنسبة لجزيء H<sub>2</sub>، لماذا يجب أن يكون سبين الإلكترون عكسي التوازي؟

### 2.9 الطيف الجزيئي

6. هل يعتمد طيف الامتصاص الخاص بالجزيء ثنائي الذرة HCl على نظير الكلور الموجود في الجزيء؟ اشرح تفسيرك.
7. صُنّف تباعد الطاقة ( $\Delta E$ ) بين الانتقالات التالية من الأقل إلى الأعظم: انتقال طاقة الإلكترون في ذرة (طاقة ذرية)، أو الطاقة الدورانية لجزيء أو الطاقة الاهتزازية لجزيء؟
8. اشرح الملامح الرئيسة لطيف طاقة الدوران الاهتزازي لجزيء ثنائي الذرة.

### 3.9 الترابط في المواد الصلبة البلورية

9. لماذا تختلف مسافة فصل التوازن بين  $K^+$  و  $Cl^-$  بالنسبة لجزيء ثنائي الذرة عن الجزيئات KCl الصلبة؟
10. صف الفرق بين البنية المكعبية مركزية الوجوه (FCC) والبنية المكعبة مركزية الجسم (BCC).
11. في كلور الصوديوم، كم هي ذرات  $Cl^-$  "أقرب الجيران" من  $Na^+$ ؟ كم عدد ذرات  $Na^+$  "أقرب جيران" لكلور  $Cl^-$ ؟
12. في يوديد السيزيوم، كم عدد ذرات  $Cl^-$  "أقرب جيران"  $Cs^+$ ؟ كم عدد ذرات  $Cs^+$  هي "أقرب جيران" لكلور  $Cl^-$ ؟



13. التركيب البلوري لكلور الصوديوم هو FCC. تباعد التوازن هو  $r_0 = 0.282\text{nm}$ . إذا كان كل أيون يشغل حجماً مكعباً بقيمة  $r_0^3$ ، فقم بتقدير المسافة بين "أقرب جار" أيونات  $\text{Na}^+$  (من المركز إلى المركز)؟

### 4.9 نموذج الإلكترون الحر في المعادن

14. لماذا تزداد طاقة فيرمي ( $E_F$ ) مع زيادة عدد الإلكترونات في المعدن؟
15. إذا زادت كثافة رقم الإلكترون ( $N/V$ ) للمعادن بعامل 8، فما الذي يحدث لطاقة فيرمي  $E_F$ ؟
16. لماذا يتوقف الخط الأفقي في الرسم البياني في الشكل 12.9 فجأة عند طاقة فيرمي؟
17. لماذا يزيد الرسم البياني في الشكل 12.9 تدريجياً عن الأصل؟
18. لماذا يتم خفض الانتقالات الحادة في طاقة فيرمي من خلال زيادة درجة الحرارة؟

### 5.9 نظرية النطاقات للمواد الصلبة

19. ما الطريقتان الرئيسيتان المستخدمتان لتحديد سويات الطاقة للإلكترونات في البلورة؟
20. صف سمتين السويات الطاقة للإلكترون في البلورة.
21. كيف يتوافق عدد سويات الطاقة في العصابة مع عدد ذرات  $N$ ؟
22. لماذا بعض المواد الناقلة جيدة جداً وغيرها من النواقل سيئة للغاية؟
23. لماذا بعض المواد أنصاف نواقل؟
24. لماذا تقل مقاومة أنصاف النواقل مع ارتفاع درجة الحرارة؟

### 6.9 أنصاف النواقل والإشابة

25. ما هو نوع أنصاف النواقل التي يتم إنتاجها إذا تم إشابة الجرمانيوم مع (a) الزرنيخ، و (b) الغاليوم؟
26. ما هو نوع نصف الناقل الذي يتم إنتاجه إذا تم إشابة السيليكون بـ (a) الفسفور، و (b) الإنديوم؟
27. ما هو مفعول هول ولم يستخدم؟
28. بالنسبة لأنصاف النواقل من النوع  $n$ ، كيف تغير ذرات الإشابة البنية الطاقية للمادة الصلبة؟
29. بالنسبة لأنصاف النواقل من النوع  $p$ ، كيف تغير ذرات الإشابة البنية الطاقية للمادة الصلبة؟

### 7.9 أجهزة أنصاف النواقل

30. عندما يتم ربط المواد من النوع  $p$  و  $n$ ، لماذا يتم إنشاء مجال كهربائي موحد بالقرب من الوصلة؟
31. عندما يتم جمع مادتين من النوع  $n$  والنوع  $p$ ، لماذا لا تنمو طبقة النضوب إلى أجل غير مسمى؟
32. كيف يمكنك معرفة ما إذا كان الشئ في بلانكيز أمامي؟
33. لماذا يؤدي الانحياز العكسي إلى توليد تيار صغير جداً؟
34. ماذا يحدث في الحالة القصوى التي تكون فيها المواد  $n$  و  $p$  مشابهة بشدة؟
35. اشرح كيف يعمل مضخم الصوت، باستخدام مفهوم الترانزستور.

### 8.9 الناقلية الفائقة

36. صف سمتين رئيسيتين الناقل الفائقة.
37. كيف تفسر نظرية BCS للناقلية الفائقة؟
38. ما هو تأثير مايسنر؟
39. ما هو تأثير الحقل المغناطيسي المتزايد على درجة الحرارة الحرجة لأنصاف النواقل؟

## مسائل

### 1.9 أنواع الروابط الجزيئية

40. التشكيل الإلكتروني للكربون هو  $1s^2 2s^2 2p^2$ . بالنظر إلى هذا التشكيل الإلكتروني، ما العنصر الآخر الذي يمكن أن يحمل نفس نوع التهجين الموجود في الكربون؟
- 41 - كلور البوتاسيوم (KCl) هو جزيء يتكون من رابطة أيونية. عند مسافة فصل توازني، تكون الذرات متباعدة بمسافة  $r_0 = 0.279$  nm. حدد الطاقة الكهرساكنة الكامنة للذرات.
42. انجذاب الإلكترون في Cl هو  $3.89$  eV و طاقة التأين ل K هي  $4.34$  eV. استخدم المسألة السابقة لإيجاد طاقة التفكك (أهمل طاقة التنافر).
- 43- تبلغ طاقة الانفصال المقاسة للجزيء KCl  $4.43$  eV. استخدم نتائج المسألة السابقة لتحديد طاقة تنافر الأيونات من حيث مبدأ الاستبعاد.

### 2.9 الطيف الجزيئي

44. في مختبر الفيزياء، يمكنك قياس الطيف الاهتزازي الدوراني للجزيء HCl. الفاصل المقدر بين قمم الامتصاص هو  $5.5 \times 10^{11} \approx$  Hz  $\Delta f$  التردد المركزي للنطاق هو  $f_0 = 9.0 \times 10^{13}$  Hz. (a) ما هو عزم العطالة (I)؟ (b) ما هي طاقة الاهتزاز للجزيء؟
45. بالنسبة للمسألة السابقة، ابحث عن مسافة الفصل التوازني بين ذرات H و Cl. قارن هذا بالقيمة الفعلية.
46. يبلغ الفصل بين ذرات الأكسجين في جزيء  $O_2$  نحو  $0.121$  nm. حدد الطاقة المميزة للدوران في واحدة eV.
47. الطاقة المميزة لجزيء  $N_2$  هي  $2.48 \times 10^{-4}$  eV. حدد المسافة الفاصلة بين ذرات النيتروجين
48. الطاقة المميزة ل KCl هي  $1.4 \times 10^{-5}$  eV. (a) حدد  $\mu$  للجزيء KCl. (b) أوجد مسافة الفصل بين ذرات K و Cl.
49. يوجد جزيء  $F_2$  ثنائي الذرة في الحالة  $L = 1$ . (a) ما هي طاقة الجزيء؟ (b) ما مقدار الطاقة المشعة في الانتقال من الحالة  $L = 2$  إلى الحالة  $L = 1$ ؟
50. في مختبر الفيزياء، يمكنك قياس الطيف الاهتزازي الدوراني لبرومييد البوتاسيوم (KBr). الفاصل المقدر بين قمم الامتصاص هو  $5.35 \times 10^{10} \approx \Delta f$ . التردد المركزي للنطاق هو  $f_0 = 8.75 \times 10^{12}$  Hz. (أ) ما هو عزم العطالة (I)؟ (ب) ما هي طاقة الاهتزاز للجزيء؟

### 3.9 الترابط في المواد الصلبة البلورية

51. التركيب البلوري للجزيء CsI هو BCC. التباعد التوازني هو نحو  $r_0 = 0.46$  nm. إذا احتل أيون  $Cs^+$  حجماً مكعباً بقيمة  $r_0^3$ ، فما هي المسافة بين هذا الأيون و أيون  $I^+$  المجاور الأقرب؟
52. الطاقة الكامنة لبلورة هي  $-8.10$  eV على زوج أيوني. أوجد طاقة التفكك لأربعة مولات من البلورة.
53. تبلغ الكثافة المقاسة لبلورة NaF  $2.558$  g/cm<sup>3</sup>. ما هي مسافة الفصل التوازني بين أيونات  $Na^+$  و  $F^-$ ؟
54. ما هي قيمة ثابت التنافر، n، الذي يعطي طاقة التفكك المقاسة البالغة  $221$  kcal/mole للجزيء NaF؟
55. حدد طاقة تفكك 12 مول من كلور الصوديوم (NaCl). (تلميح: ثابت التنافر n هو نحو 8)
56. الكثافة المقاسة لبلورة KCl هي  $1.984$  g/cm<sup>3</sup>. ما هي المسافة الفاصلة للتوازن بين  $K^+$  و  $Cl^-$ ؟
57. ما هي قيمة ثابت التنافر، n، الذي يعطي طاقة التفكك المقاسة البالغة  $171$  kcal / mole للجزيء KCl؟
- 58- تبلغ الكثافة المقاسة لبلورة CsCl  $3.988$  g/cm<sup>3</sup>. ما هي مسافة الفصل التوازني بين أيونات  $Cs^+$  و  $Cl^-$ ؟

## 4.9 نموذج الإلكترون الحر في المعادن

59. ما هو الفرق في الطاقة بين السوية  $n_x = n_y = n_z = 4$  والسوية ذات الطاقة الأعلى التالية؟ ما هي النسبة المئوية للتغير في الطاقة بين الحالة  $n_x = n_y = n_z = 4$  والسوية ذات الطاقة الأعلى التالية؟ (b) قارن هذه بالفرق في الطاقة والنسبة المئوية للتغير في الطاقة بين السوية  $n_x = n_y = n_z = 400$  والسوية ذات الطاقة الأعلى التالية.

60. يحجز إلكترون في مكعب معدني له طول  $l = 0.8 \text{ cm}$  على كل جانب. حدد كثافة السويات عند (a)  $E = 0.80 \text{ eV}$ ؛ (b)  $E = 2.2 \text{ eV}$ ؛ و (c)  $E = 5.0 \text{ eV}$ .

61. ما هي قيمة الطاقة التي تتوافق مع كثافة المستويات التي تبلغ  $1.10 \times 10^{24} \text{ eV}^{-1}$ ؟

62. قارن كثافة السويات عند  $2.5 \text{ eV}$  و  $0.25 \text{ eV}$ ؟

63. افترض مكعباً من النحاس مع حواف بطول  $1.50 \text{ mm}$ . قَدِّر عدد السويات الكمومية الإلكترونية في هذا المكعب التي تتراوح طاقتها بين  $3.75 \text{ eV}$  و  $3.77 \text{ eV}$ .

64. إذا كان هناك إلكترون حر لكل ذرة من النحاس، فما هي كثافة عدد الإلكترونات في هذا المعدن؟

65. حدد طاقة فيرمي ودرجة حرارة النحاس عند  $T = 0 \text{ K}$ .

## 5.9 نظرية العصابات الطاقية في المواد الصلبة

66. اكتب ثابت الشبكة (a) لبلورة ذات بعد واحد من حيث الطول الموجي للإلكترون.

67. ما هو الفرق الرئيس بين العازل ونصف الناقل؟

68. ما هو أطول طول موجة لفوتون يمكن أن يثير إلكترون التكافؤ في عصابة الناقلية عبر فجوة طاقة تبلغ  $0.80 \text{ eV}$ ؟

69. يمتص إلكترون التكافؤ في بلورة فوتون له الطول الموجي،  $\lambda = 0.300 \text{ nm}$ . هذه طاقة كافية للسماح للإلكترون بالانتقال من عصابة التكافؤ إلى عصابة الناقلية ما هو مقدار فجوة الطاقة؟

## 6.9 أنصاف النواقل والإشابة

70. يتم إجراء تجربة لإظهار مفعول هول. يتم توصيل شريط رفيع مستطيل من نصف ناقل بعرض  $10 \text{ cm}$  وطول  $30 \text{ cm}$  بالبطارية ويغطس في حقل  $1.50 \text{ T}$  عمودياً على سطحه. وهذا ما ينتج كمون هول يبلغ  $12 \text{ V}$ . ما هي سرعة الانسياب لحوامل الشحنة؟

71. لنفترض أن مساحة المقطع العرضي للشريط (مساحة الوجه المتعامد مع التيار الكهربائي) المقدمة في المسألة السابقة هي  $1 \text{ mm}^2$  والتيار يقاس بشكل مستقل ليكون  $2 \text{ mA}$ . ما هي كثافة عدد لحوامل الشحنة؟

72. سلك نحاسي حامل للتيار له مقطع عرضي  $\sigma = 2 \text{ mm}^2$  له سرعة انسياب تبلغ  $0.02 \text{ cm/s}$ . أوجد التيار الكلي الذي يمر عبر هذا السلك.

73. يظهر مفعول هول في المختبر. يتم توصيل شريط رفيع مستطيل من نصف ناقل بعرض  $5 \text{ cm}$  مساحة مقطع عرضي  $2 \text{ mm}^2$  بالبطارية ويغطس في حقل عمودي على سطحه. يُقرأ توتر هول بقيمة  $12.5 \text{ V}$  وسرعة الانسياب المقاسة  $50 \text{ m/s}$  ما هو الحقل المغناطيسي؟

## 7.9 الأجهزة نصف الناقلة

74. أظهر أنه من أجل  $V$  أقل من الصفر تكون  $I_{\text{net}} \approx -I_0$ .

75. ثنائي p-n له تيار اشباع عكسي  $1.44 \times 10^{-8} \text{ A}$ . وهو منحاز للأمام بحيث يكون لديه تيار يبلغ  $6.78 \times 10^{-1} \text{ A}$  يتحرك فيه. ما هو توتر الانحياز الذي يتم تطبيقه إذا كانت درجة الحرارة  $300 \text{ K}$ ؟

76. يبلغ تيار مجمع الترانزستور  $3.4 \text{ A}$  لتيار القاعدة البالغ  $4.2 \text{ mA}$ . ما هو كسب التيار؟

77. عند تطبيق القطب الموجب لبطارية على الجانب p والقطب السالب على الجانب n من الوصلة pn، فإن التيار المقاس هو  $8.76 \times 10^{-1} \text{A}$ . يعطي عكس هذا القطبية تيار إشباع عكسياً قدره  $4.41 \times 10^{-8} \text{A}$ . ما هي درجة الحرارة إذا كان كمون الانحياز  $1.2 \text{V}$ ؟

78. تيار القاعدة للترانزستور هو  $4.4 \text{ A}$ ، وكسب تياره  $1126$ . ما هو تيار المجمع؟

### 8.9 الناقلية الفائقة

79. عند أي درجة حرارة، من حيث  $T_c$ ، يكون الحقل الحرج للناقل الفائق له نصف القيمة عند  $T = 0 \text{K}$ ؟

80. ما هو المجال المغناطيسي الحرج للخصائص عند  $T = 2.8 \text{K}$ ؟

81. يتم تبريد سلك Pb ملفوف على شكل وشيعة محكمة يبلغ قطره  $4.0 \text{ mm}$  إلى درجة حرارة  $5.0 \text{K}$ . يتم توصيل هذا السلك على التسلسل مع مقاومة  $50 \Omega$  ومصدر متغير للقوة المحركة الكهربائية. مع زيادة هذه القوة المحركة الكهربائية، ما القيمة اللازم تطبيقها ليتم تحطيم الناقلية الفائقة في هذا السلك؟

82. يبلغ طول وشيعة  $50 \text{cm}$  عند الدرجة  $4.0 \text{ K}$  وهو مصنوع من سلك Nb نصف قطره  $1.5 \text{mm}$  ما أقصى تيار يمكن أن تحمله هذه الوشيعة إذا كان السلك سيظل فائق النقل؟

### مسائل إضافية

83 - فلور البوتاسيوم (KF) هو جزيء يتكون من رابطة أيونية. عند مسافة الفصل التوازني، تكون الذرات على مسافة  $r_0 = 0.255 \text{nm}$ . حدد الطاقة الكهروساكنة الكامنة للذرات. الألفة الإلكترونية للفلور F هي  $3.40 \text{eV}$  وطاقة التأين البوتاسيوم K هي  $4.34 \text{eV}$ . حدد طاقة التفكك. (أهمل طاقة التنافر).

84. بالنسبة للمسألة السابقة، قم برسم الطاقة الكامنة كتابع للمسافة الفصل بين أيونات  $K^+$  و  $F^-$ . (a) قم بتسمية الطاقة المطلوبة لنقل إلكترون من K إلى F على الرسم البياني. (b) قم بتسمية طاقة التفكك على الرسم البياني.

85. تبلغ مسافة الفصل بين ذرات الهيدروجين في جزيء  $\text{H}_2$  نحو  $0.075 \text{ nm}$ . حدد الطاقة المميزة الدورانية بوحدة  $\text{eV}$ .

86. الطاقة المميزة لجزيء  $\text{Cl}_2$  هي  $2.95 \times 10^{-5} \text{eV}$ . حدد المسافة الفاصلة بين ذرات النيتروجين.

87. حدد أدنى ثلاث سويات طاقة دورانية في  $\text{H}_2$ .

88. يمكن تهجين ذرة الكربون في التكوين  $sp^2$ . (أ) ما هي الزاوية بين المدارات المهجنة؟

89. اذكر خمس خصائص رئيسة للبلورات الأيونية الناتجة عن طاقة تفككها العالية.

90. لماذا الترابط في  $\text{H}_2^+$  موافق؟ عبّر عن إجابتك من ناحية تناظر التابع الموجي للإلكترون.

91. يدعي علماء الفلك أنهم عثروا على دليل على  $\text{He}_2$  من الأطياف الضوئية للنجم البعيد. هل تصدقهم؟

92. تبين أن عزم العطالة في جزيء ثنائي الذرة هي  $I = \mu r_0^2$ ، حيث  $\mu$  هي الكتلة المختزلة، و  $r_0$  هي المسافة بين الكتل.

93. أظهر أن متوسط طاقة الإلكترون في المعدن أحادي البعد يرتبط بطاقة فيرمي من خلال  $E_f = \frac{1}{2} E_f$ .

94. ترد أدناه قياسات الحقل المغناطيسي الحرج لناقل فائق (بوحدة T) عند درجات حرارة مختلفة (بوحدة K). استخدم السطر الأنسب لتحديد  $B_c(0)$ . افترض أن  $T_c = 9.3 \text{K}$ .

T (K)	B <sub>c</sub> (T)
3.0	0.18
4.0	0.16
5.0	0.14
6.0	0.12
7.0	0.09
8.0	0.05
9.0	0.01

95. قم بتقدير جزء ذرات Si الذي يجب استبداله بذرات As من أجل تشكيل عصابة الإشابة.
96. لوحظ تحول في طيف الدوران عند درجة حرارة الغرفة العادية ( $T = 300\text{K}$ ). وفقًا لشريك المختبر الخاص بك، تتوافق ذروة الطيف مع الانتقال من الحالة  $l=4$  إلى الحالة  $l=1$ . هل هذا ممكن؟ إذا كان الأمر كذلك، حدد اندفاع العطالة للجزيء.
97. حدد طاقات فيرمي: (أ) Mg ، (ب) Na ، و (ج) Zn.
98. أوجد متوسط الطاقة للإلكترون في سلك Zn.
99. ما هي قيمة ثابت التنافر،  $n$  ، الذي يعطي طاقة انفصال مقاسة  $158 \text{ kcal/mol}$  للجزيء CsCl؟
100. نموذج مادّي للألماس يقترح بنية تعبئة BCC. لماذا هذا الشيء غير ممكن؟

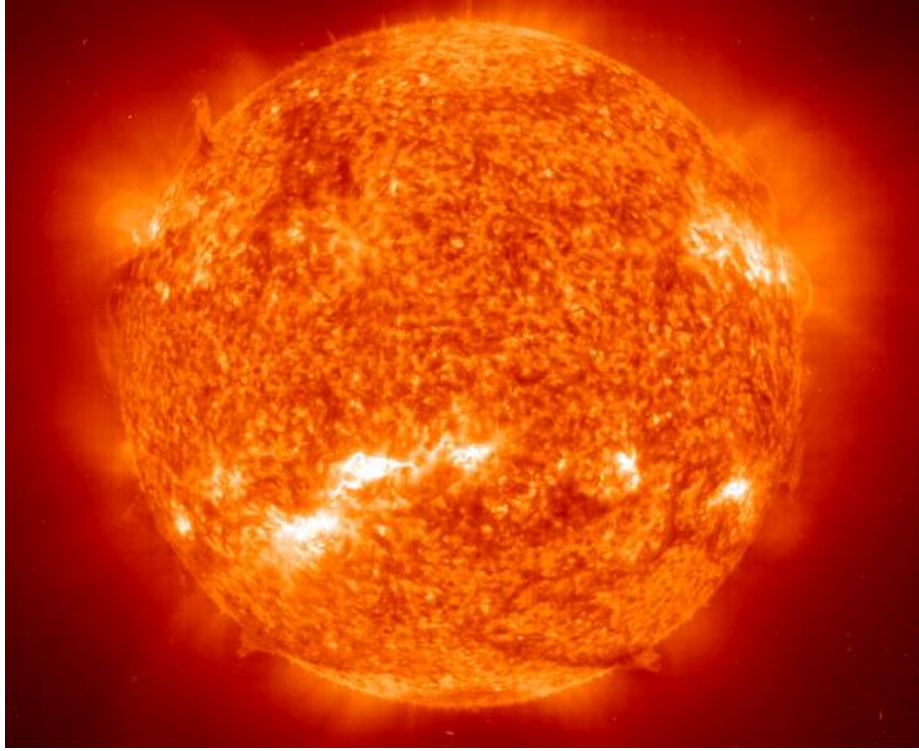
### مسائل للتحدي

101. لإلكترون في معدن ثلاثي الأبعاد بيّن أن الطاقة الوسطى تعطى بالعلاقة التالية:

$$\bar{E} = \frac{1}{N} \int_0^{E_F} E g(E) dE = \frac{3}{5} E_F$$

حيث  $N$  هو العدد الكلي للإلكترونات في المعدن.

## الفصل العاشر | الفيزياء النووية NUCLEAR PHYSICS



**الشكل 1.10** تستمد الشمس طاقتها عن طريق الاندماج النووي الذي يحدث في نواتها. حيث تقوم النواة بتحويل ما يقارب من  $10^{38}$  بروتون/ثانية إلى هليوم عند درجة حرارة 14 مليون كلفن. تطلق هذه العملية طاقة على شكل فوتونات ونيوترونات وجزيئات أخرى.

### مخطط الفصل

1.10 خصائص النوى

2.10 طاقة الترابط النووي

3.10 التحلل الإشعاعي

4.10 التفاعلات النووية

5.10 الانشطار النووي

6.10 الاندماج النووي

7.10 التطبيقات الطبية والآثار البيولوجية للإشعاع النووي

### المقدمة

سوف ندرس في هذا الفصل تكوين النواة الذرية وخصائصها. تقع النواة في وسط الذرة وتتكون من البروتونات والنيوترونات. وقد أدى الفهم العميق للنواة إلى إنتاج العديد من التقنيات القيّمة، بما في ذلك الأجهزة التي ساعدت في اكتشاف تاريخ الصخور القديمة، ورسم خريطة لأذرع مجرة درب التبانة، وتوليد الطاقة الكهربائية.

إن الشمس هي المصدر الرئيس للطاقة في المجموعة الشمسية. يبلغ قطر الشمس 109 أضعاف قطر الأرض، وتمثل كتلة الشمس أكثر من 99٪ من إجمالي كتلة المجموعة الشمسية. تشع الشمس عن طريق دمج نوى الهيدروجين (البروتونات) في نواتها. بمجرد نفاذ هذا الوقود، ستقوم الشمس بحرق الهليوم، وفي وقت لاحق ستحرق النوى الأخرى. سنناقش الاندماج النووي الحاصل في الشمس في نهاية هذا الفصل. وسنقوم الآن بدراسة الخصائص النووية، التي تحكم جميع العمليات النووية، بما في ذلك الاندماج النووي.

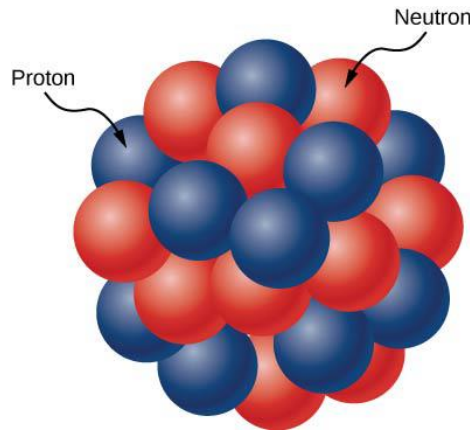
## 1.10 | خصائص النوى Properties of Nuclei

### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- وصف تركيب النوى الذرية وحجمها.
- استخدام الرموز النووية للتعبير عن تركيب النوى الذرية.
- تفسير لماذا يكون عدد النوترونات أكبر من عدد البروتونات في النوى الثقيلة.
- حساب الكتلة الذرية لعنصر ما من خلال معرفة نظائره.

تتكون نواة الذرة من البروتونات والنوترونات (**الشكل 2.10**). تتمتع البروتونات والنوترونات بالكتلة نفس تقريباً، لكن البروتونات تحمل وحدة واحدة من الشحنة الموجبة (+e)، بينما لا تحمل النوترونات أية شحنة. يتم تراص هذه الجسيمات معاً في مساحة صغيرة جداً في وسط الذرة. تبين، ووفقاً لتجارب التبعثر، أن النواة كروية أو بيضوية الشكل، ويبلغ حجمها نحو 1/100000 من حجم ذرة الهيدروجين. أي أنه إذا كانت الذرة بحجم ملعب كرة القدم، فإن النواة ستكون بحجم كرة القدم تقريباً. وتسمى البروتونات والنوترونات داخل النواة بالنكليونات nucleons.



**الشكل 2.10** تتكون النواة الذرية من البروتونات والنوترونات. حيث تظهر البروتونات باللون الأزرق، وتظهر النوترونات باللون الأحمر.

### عدد النكليونات

يمثل العدد الذري  $Z$  عدد البروتونات في النواة. بينما يمثل  $N$  عدد النوترونات في النواة. ويكون إجمالي عدد النكليونات هو  $A$  رقم الكتلة. وبالتالي، فإن هذه الأرقام مرتبطة ببعضها البعض وفق العلاقة التالية:

$$A = Z + N. \quad (10.1)$$

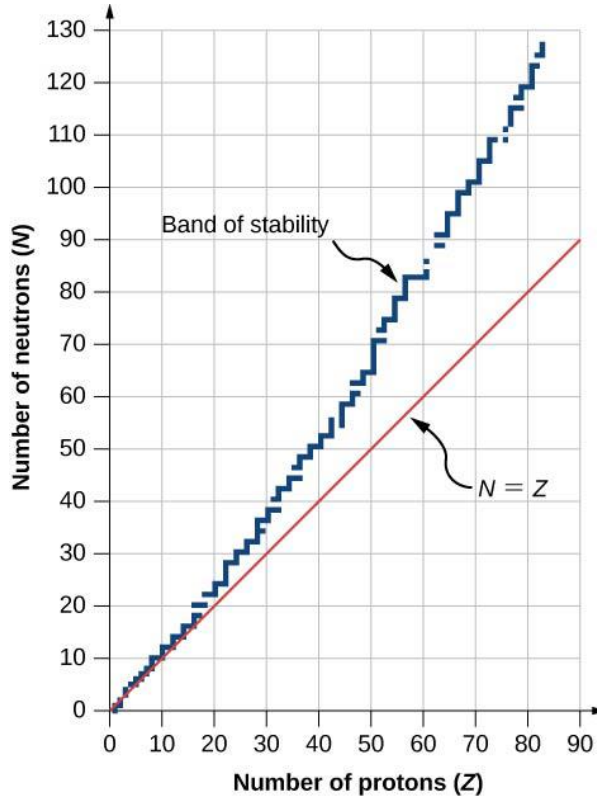
ويتم تمثيل النواة رمزياً بالشكل التالي:



(10.2)

حيث إن: X تمثل العنصر الكيميائي و A هو رقم الكتلة و Z هو العدد الذري. وعلى سبيل المثال، فإن الرمز  ${}^{12}_6C$  يمثل نواة كربون فيها 6 بروتونات و 6 نوترونات (أو 12 نكلون).

يظهر **الشكل 3.10** رسماً بيانياً لعدد النوترونات N مقابل عدد البروتونات Z لمجموعة من النوى المستقرة (النكليدات). ومن أجل قيمة معينة للعدد الذري Z، فإن N (الممثلة بالنقاط الزرقاء) يمكن أن تأخذ عدة قيم. عندما تكون Z ذات قيم صغيرة، فإن عدد النوترونات يساوي عدد البروتونات ( $N = P$ )، وتقع البيانات على الخط الأحمر. أما بالنسبة للقيم الكبيرة للعدد الذري Z، فيكون عدد النوترونات أكبر من عدد البروتونات ( $N > P$ )، وتقع نقاط البيانات فوق الخط الأحمر. وبشكلٍ عام فإن عدد النوترونات أكبر من عدد البروتونات من أجل قيم  $Z > 15$ .



**الشكل 3.10** يمثل هذا الرسم البياني تابعة عدد النوترونات N لعدد البروتونات Z للنوى الذرية المستقرة. تحتوي النواة الأكبر على نوترونات أكثر من البروتونات.

يبين **الشكل 4.10** مخططاً بيانياً للنكليدات، ويعطي معلومات أكثر تفصيلاً عن كل نواة. يُسمى هذا المخطط بمخطط النكليدات **chart of the nuclides**. ذلك لأن كل خلية أو مربع تمثل نواة منفصلة. ويتم ترتيب النوى بحسب القيمة التصاعديّة للعدد الذري Z (في الاتجاه الأفقي) والقيمة التصاعديّة لعدد النوترونات N (في الاتجاه العمودي).



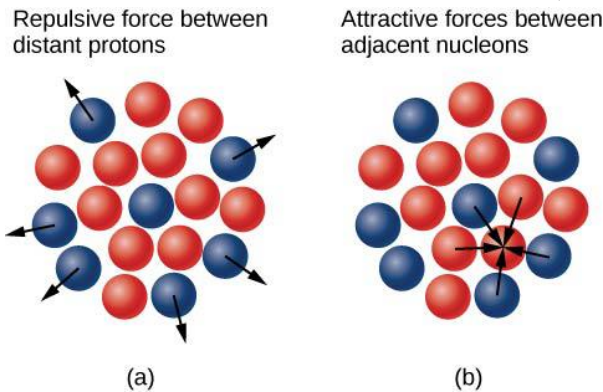


**الجدول 1.10 النظائر الشائعة:** \* لا يوجد إدخال إذا كان أقل من 0.001 (كمية الأثر).  
\*\* مستقرة إذا كان عمر النصف أكبر من 10 ثوانٍ.

العنصر	الرمز	رقم الكتلة	الكتلة (واحدة الكتلة الذرية)	الوفرة المئوية	عمر النصف
الهيدروجين	H	1	1.0078	99.99	مستقر
	D أو <sup>2</sup> H	2	2.0141	0.01	مستقر
	<sup>3</sup> H	3	3.0160	-	12.32 y
الكربون	<sup>12</sup> C	12	12.0000	98.91	مستقر
	<sup>13</sup> C	13	13.0034	1.1	مستقر
	<sup>14</sup> C	14	14.0032	-	5730 y
النيتروجين	<sup>14</sup> N	14	14.0031	99.6	مستقر
	<sup>15</sup> N	15	15.0001	0.4	مستقر
	<sup>16</sup> N	16	16.0061	-	7.13 s
الأكسجين	<sup>16</sup> O	16	15.9949	99.76	مستقر
	<sup>17</sup> O	17	16.9991	0.04	مستقر
	<sup>18</sup> O	18	17.9992	0.20	مستقر
		19	19.0035	-	26.46 s

لماذا يفوق عدد النيوترونات على عدد البروتونات في النوى الأثقل (الشكل 5.10)؟ تتطلب الإجابة عن هذا السؤال فهم القوى داخل النواة. حيث يوجد نوعان من القوى: (1) القوة الكهروساكنة طويلة المدى (قوة كولون)، والتي تجعل البروتونات المشحونة إيجابياً تتنافر فيما بينها؛ و(2) القوة النووية القوية قصيرة المدى، والتي تجعل جميع النكليونات الموجودة في النواة تتجاذب فيما بينها. ربما تكون قد سمعت بوجود قوة نووية "ضعيفة". هذه القوة مسؤولة عن بعض التحلل النووي، ولكن كما يوحي الاسم، فإنها لا تؤدي دوراً في استقرار النواة ضد قوة كولون أو قوة التنافر القوية التي تعاني منها. وسنناقش القوة النووية القوية بمزيد من التفصيل في الفصل التالي عندما نغطي فيزياء الجسيمات. يحدث الاستقرار النووي عندما تعوض قوى الجذب بين النكليونات القوى الكهروساكنة التنافرية طويلة المدى بين جميع البروتونات في النواة. بالنسبة للنواة الثقيلة ( $Z > 15$ )، تعد النيوترونات الزائدة ضرورية

لمنع التفاعلات الكهروساكنة من تحطيم النواة، كما هو مبين في الشكل 3.10.



**الشكل 5.10 (a)** القوة الكهروساكنة التنافرية بعيدة المدى. تمثل الأسهم الخارجية المؤثرة على البروتونات الواقعة على سطح النواة (الممثلة باللون الأزرق) والناشئة عن بروتون (ممثل باللون الأزرق أيضاً) موجود في مركز النواة. (b) القوة النووية القوية، التي تظهر بين النكليونات المتجاورة. تمثل الأسهم قوى الجذب، التي يؤثر بها النيوترون (الممثل باللون الأحمر) على أقرب جيرانه.

نظراً لوجود نظائر مستقرة، فإنه يجب الانتباه عند اقتباس كتلة العنصر. على سبيل المثال، لدى النحاس (Cu) نظيران مستقران:

${}^{63}_{29}\text{Cu}$  (62.929595 g/mol) ومتوفر بنسبة 69.09%

${}^{65}_{29}\text{Cu}$  (64.927786 g/mol) ومتوفر بنسبة 30.91%

بالنظر إلى هذين النظيرين للنحاس Cu، ما هي كتلة هذا العنصر؟ تُعرّف الكتلة الذرية لعنصر ما بأنها المتوسط المرجح لكتل نظائره. وهكذا، تكون الكتلة الذرية للنحاس Cu هي:

$m_{\text{Cu}} = (62.929595)(0.6909) + (64.927786)(0.3091) = 63.55 \text{ g/mol}$ . غالباً ما يتم التعبير عن كتلة النواة الفردية بواحدات الكتلة الذرية (u)، حيث:  $1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$ . (يتم تعريف وحدة الكتلة الذرية على أنها 1/12 من كتلة النواة  ${}^{12}\text{C}$ ). في وحدات الكتلة الذرية، تبلغ كتلة نواة الهليوم ( $A = 4$ ) نحو  $4 \text{ u}$ . كما تُسمى نواة الهليوم بجسيم ألفا ( $\alpha$ ).

### حجم النواة

أبسط نموذج للنواة هو كرة متراسة من النكلونات. وبالتالي، يتناسب حجم النواة  $V$  مع عدد النكلونات  $A$ ، ويُعبّر عنه بالعلاقة:

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 = kA,$$

حيث:  $r$  هو نصف قطر النواة و  $k$  ثابت لواحدة الحجم. وبجمل هذه العلاقة من أجل  $r$  يكون لدينا:

$$r = r_0 A^{1/3} \quad (10.3)$$

حيث:  $r_0$  ثابت. بالنسبة للهيدروجين ( $A = 1$ )، فإن  $r_0$  توافق نصف قطر بروتون واحد. تؤيد تجارب التبعثر صحة هذه العلاقة العامة لمجموعة واسعة من النوى، وهي تعني أن النوتونات لها نفس نصف قطر البروتونات تقريباً. تبلغ القيمة المقاسة تجريبياً لنصف القطر  $r_0$  نحو  $1.2 \text{ fm}$  (حيث أن:  $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ ).

### المثال 1.10

#### نواة الحديد

أوجد نصف القطر ( $r$ ) والكثافة التقريبية ( $\rho$ ) لنواة الحديد Fe-56. بفرض أن كتلة نواة Fe-56 تبلغ  $56 \text{ u}$  تقريباً.

#### خطة الحل:

(a) يتم حساب نصف قطر Fe-56 من خلال التطبيق المباشر للعلاقة  $r = r_0 A^{1/3}$ ، وبتعويض قيمة  $A = 56$ . (b) لإيجاد الكثافة التقريبية لهذه النواة، افترض أن النواة كروية، وقم بحساب حجمها باستخدام نصف القطر المحسوب في الجزء (a)، ثم أوجد كثافتها من العلاقة:  $\rho = m/V$ .

#### الحل:

(a) يُعطى نصف قطر النواة بالعلاقة:

$$r = r_0 A^{1/3}$$

بإستبدال القيم المعطاة لكلٍ من  $r_0$  و  $A$  نجد:

$$r = (1.2 \text{ fm})(56)^{1/3} = (1.2 \text{ fm})(3.83) \\ = 4.6 \text{ fm}.$$

(b) تُعطى الكثافة بالعلاقة:  $\rho = m/V$ ، وبالتالي من أجل كرة نصف قطرها  $r_0$ :

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{(4/3)\pi r^3}.$$

وبإستبدال القيم المعلومة نحصل على:

$$\rho = \frac{56 \text{ u}}{(1.33)(3.14)(4.6 \text{ fm})^3} = 0.138 \text{ u/fm}^3.$$

وبتحويل الوحدات إلى  $\text{kg/m}^3$ ، نجد:

$$\rho = (0.138 \text{ u/fm}^3)(1.66 \times 10^{-27} \text{ kg/u}) \left( \frac{1 \text{ fm}}{10^{-15} \text{ m}} \right)^3 = 2.3 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3.$$

### ملاحظة

1. تبين أن نصف قطر نواة Fe-56 يبلغ نحو 5 fm، وبالتالي فإن قطرها نحو 10 fm، أو  $10^{-14} \text{ m}$ . في المناقشات السابقة لتجارب تبشر رذرفورد، تم تقدير قطر النواة الخفيفة بقيمة  $10^{-15} \text{ m}$ . لذلك، فإن هذه النتيجة، التي تظهر للنواة متوسطة الحجم، معقولة.
2. قد تبدو الكثافة المحسوبة هنا غير معقولة. ومع ذلك، فإنها تتماشى مع ما قيل سابقاً حول النواة، التي تحتوي على كامل كتلة الذرة تقريباً ضمن منطقة صغيرة من الفراغ. متر مكعب واحد من المواد النووية له نفس كتلة مكعب من الماء طول ضلعه يساوي 61 km.

1.10 تحقق من فهمك: نواة X أكبر مرتين من النواة Y. ما هي نسبة كتلتها الذرية؟



## 2.10 | طاقة الترابط النووي Nuclear Binding Energy

### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- حساب النقص الكتلي وطاقة الترابط لمجموعة واسعة من النوى.
- استخدام المنحني البياني لطاقة الترابط لكل نكلون (BEN) مقابل رقم الكتلة (A) لتقييم الاستقرار النسبي للنواة.
- مقارنة طاقة ترابط النكلون في النواة بطاقة تأين الإلكترون في الذرة.

إن القوى التي تربط النكلونات معاً في نواة ذرية هي أكبر بكثير من تلك التي تربط الإلكترون بالذرة من خلال قوة الجذب الكهروستاتيكية. ويتضح هذا من خلال الأحجام النسبية للنواة الذرية والذرة ( $10^{-15}$  و  $10^{-10}$  بالترتيب). وبالتالي، فإن الطاقة اللازمة لنزع النكلون من النواة أكبر بكثير من الطاقة اللازمة لإزالة (أو تأين) إلكترون من الذرة. وبشكل عام، تستهلك جميع التغييرات النووية كميات كبيرة من الطاقة لكل جسيم يخضع للتفاعل. وهذا له العديد من التطبيقات العملية.

### النقص الكتلي

وفقاً لتجارب الجسيمات النووية، فإن الكتلة الكلية للنواة ( $m_{\text{nuc}}$ ) هي أقل من مجموع كتل النكلونات المكونة لها (البروتونات والنيوترونات). يُعطى فرق الكتلة، أو **النقص الكتلي**، بالعلاقة:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{nuc}} \quad (10.4)$$

حيث  $Zm_p$  هي الكتلة الكلية للبروتونات،  $(A - Z)m_n$  هي الكتلة الكلية للنيوترونات، و  $m_{\text{nuc}}$  هي كتلة النواة. وفقاً لنظرية النسبية الخاصة لأينشتاين، تعد الكتلة مقياساً للطاقة الكلية للمجموعة ( $E = mc^2$ ).

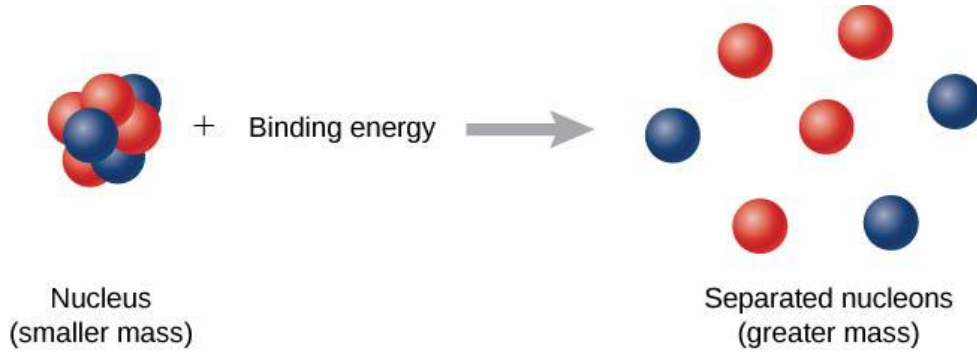
وبالتالي، فإن الطاقة الكلية للنواة أقل من مجموع طاقات النكليونات المكونة لها. وتكوين نواة من جملة من البروتونات والنيوترونات المعزولة هو إذاً تفاعل ناشر للحرارة - بمعنى أنه يُطلق طاقة. والطاقة الصادرة، أو المشعة، في هذه العملية هي  $(\Delta m)c^2$ . الآن تخيل أن هذه العملية تحدث في الاتجاه المعاكس. بدلاً من تكوين النواة، يتم وضع الطاقة في الجملة لتفكيك النواة (الشكل 6.10). وتُسمى كمية الطاقة المطلوبة بطاقة الترابط الكلية (BE)،

### طاقة الترابط

تساوي طاقة الترابط كمية الطاقة المتحررة عند تكوين النواة، وبالتالي تُعطى بالعلاقة:

$$E_b = (\Delta m)c^2. \quad (10.5)$$

وتشير النتائج التجريبية إلى أن طاقة الترابط للنوى ذات الرقم الكتلي  $A > 8$  تتناسب تقريباً مع العدد الكلي للنكليونات في هذه النوى  $A$ . طاقة الترابط لنواة المغنيسيوم ( $^{24}\text{Mg}$ )، على سبيل المثال، تزيد بنحو مرتين على طاقة نواة الكربون ( $^{12}\text{C}$ ).



الشكل 6.10 طاقة الربط هي الطاقة اللازمة لتحطيم النواة إلى البروتونات والنيوترونات المكونة لها. كتلة جملة النكليونات المنفصلة أكبر من كتلة جملة النكليونات المترابطة.

### المثال 2.10

#### النقص الكتلي وطاقة ترابط الديتريوم

احسب النقص الكتلي وطاقة الترابط للديتريوم. إذا علمت أن كتلة الديتريوم هي:  $m_D = 3.34359 \times 10^{-27} \text{ kg}$  أو  $1875.61 \text{ MeV}/c^2$ .

**الحل:**

من المعادلة 10.4، النقص الكتلي للديتريوم هو:

$$\begin{aligned} \Delta m &= m_p + m_n - m_D \\ &= 938.28 \text{ MeV}/c^2 + 939.57 \text{ MeV}/c^2 - 1875.61 \text{ MeV}/c^2 \\ &= 2.24 \text{ MeV}/c^2. \end{aligned}$$

طاقة الترابط للديتريوم هي إذاً:

$$E_b = (\Delta m)c^2 = (2.24 \text{ MeV}/c^2)(c^2) = 2.24 \text{ MeV}.$$

نحن بحاجة إلى أكثر من 2 MeV لتفكيك الديتريوم إلى بروتون ونيوترون. وتشير هذه القيمة الكبيرة جداً إلى المتانة الكبيرة للقوى النووية. وللمقارنة، فإن أكبر كمية من الطاقة اللازمة لتحرير إلكترون مرتبط بذرة الهيدروجين بواسطة قوة كولون الجاذبة (وهي قوة كهربائية) هي نحو 10 eV.

## المنحني البياني لطاقة الترابط لكل نكلون

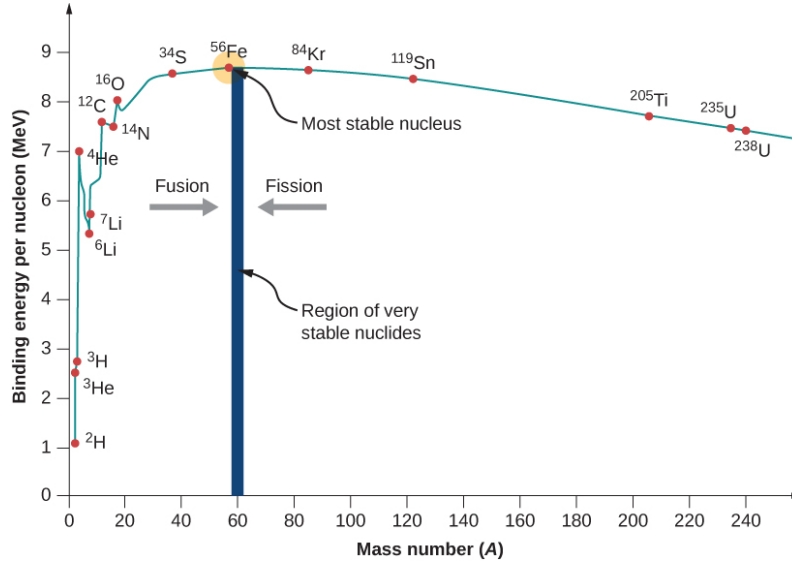
في الفيزياء النووية، واحدة من الكميات التجريبية الأكثر أهمية هي طاقة الترابط لكل نكلون (BEN)، والتي تُحسب من العلاقة:

$$BEN = \frac{E_b}{A} \quad (10.6)$$

هذه الكمية هي متوسط الطاقة اللازمة لإزالة نكلون واحد من النواة - تشبه طاقة تأين الإلكترون في الذرة. إذا كانت BEN كبيرة نسبياً، تكون النواة مستقرة نسبياً. ويتم تقدير قيم BEN من تجارب التبعثر النووي.

يبين **الشكل 7.10** المنحني البياني لطاقة الترابط لكل نكلون مقابل العدد الذري A. يُعد هذا المنحني البياني للعديد من علماء الفيزياء على أنه واحدٌ من الرسوم البيانية الأكثر أهمية في الفيزياء. ملاحظتان بالترتيب. الأولى، تتراوح قيم BEN النموذجية بين 6-10 MeV، بمتوسط قيمة نحو 8 MeV. بمعنى آخر، يتطلب الأمر عدة ملايين من الإلكترون فولت لنزع النكلون من نواة نموذجية، مقارنةً بنحو 13.6 eV فقط لتأين الإلكترون في الحالة الأساسية للهيدروجين. وهذا هو السبب في أن القوى النووية تُسمى بالقوى النووية "القوية".

والثانية، يرتفع المنحني البياني عند القيم المنخفضة لرقم الكتلة A، ويبلغ القمة بالقرب من الحديد حيث (Fe, A = 56)، ثم يتناقص تدريجياً عند القيم المرتفعة لرقم الكتلة A. تشير قيمة الذروة إلى أن نواة الحديد هي النواة الأكثر استقراراً في الطبيعة (وهذا أيضاً هو السبب في أن الاندماج النووي في نوى النجوم ينتهي بإنتاج الحديد Fe). والسبب في أن المنحني البياني يرتفع ثم يبدأ بالانحسار مرتبط بالقوى التنافسة داخل النواة. ذلك أنه عند القيم المنخفضة لرقم الكتلة A، تهيمن القوى النووية الجاذبة بين النكلونات على القوى الكهروستاتيكية التنافسية بين البروتونات. ولكن عند القيم المرتفعة لرقم الكتلة A، تبدأ القوى الكهروستاتيكية التنافسية بالهيمنة، وتميل هذه القوى إلى تفكيك النواة بدلاً من تثبيتها معاً.



**الشكل 7.10** في هذا الرسم البياني لطاقة الترابط لكل نكلون للنوى المستقرة، تكون قيمة BEN هي الأكبر للنواة التي كتلتها قريبة من  $^{56}\text{Fe}$ . لذلك، فإن اندماج النوى ذات الأرقام الكتلية الأقل بكثير من تلك الموجودة في Fe، وانسطار النوى ذات الأرقام الكتلية الأكبر من Fe، هي عمليات ناشرة للحرارة.

كما سنلاحظ، يشير الرسم البياني لطاقة الترابط لكل نكلون مقابل الرقم الكتلي إلى أن النواة سواء كانت منقسمة أو مجتمعة، فإنها تُطلق كمية هائلة من الطاقة. وهذا هو الأساس لمجموعة واسعة من الظواهر، بدءاً من إنتاج الطاقة الكهربائية في محطات الطاقة النووية وصولاً إلى ضوء الشمس.

## تكميد ألفا المترابط بإحكام

احسب طاقة الترابط لكل نكلون في جسيم  ${}^4\text{He}$  (جسيمات ألفا).

## خطة الحل:

احسب طاقة الترابط الكلية (BE) باستخدام العلاقة:  $BE = (\Delta m)c^2$ ، حيث  $\Delta m$  هي النقص الكتلي. وطاقة الترابط لكل نكلون (BEN) هي BE مقسومة على  $A$ .

## الحل:

من أجل  ${}^4\text{He}$ ، لدينا  $Z = N = 2$ . وطاقة الترابط الكلية هي:  $BE = \{[Zm_p + Zm_n] - m(\text{He})\}c^2$ . هذه الكتل هي:  $m({}^4\text{He}) = 4.002602 \text{ u}$ ،  $m_p = 1.007825 \text{ u}$ ، و  $m_n = 1.008665 \text{ u}$ . وبالتالي تكون:

$$BE = (0.030378 \text{ u})c^2.$$

بملاحظة أن:  $1 \text{ u} = 931.5 \text{ MeV}/c^2$ ، نجد:


$$BE = (0.030378) (931.5 \text{ MeV}/c^2) c^2 = 28.3 \text{ MeV}$$

ولما كان:  $A = 4$ ، فإن طاقة الترابط الكلية لكل نكلون هي:

$$BEN = 7.07 \text{ MeV/nucleon}.$$

## ملاحظة:

لاحظ أن طاقة الترابط لكل نكلون في الجسيم  ${}^4\text{He}$  هي أكبر بكثير مما هي عليه لنظائر الهيدروجين ( $\approx 3 \text{ MeV/nucleon}$ ) فقط. ولذلك، لا يمكن لنواة الهليوم تحطيم نظائر الهيدروجين دون إعطاء الطاقة للجملة.

**2.10 تحقق من فهمك:** إذا كانت طاقة الترابط لكل نكلون كبيرة، هل يجعل ذلك من الصعب أم من السهل اقتلاع نكلون من النواة؟ 

## 3.10 | التحلل الإشعاعي Radioactive Decay

## الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- وصف تحلل المادة المشعة بدلالة ثابت تحللها وعمر النصف.
- استخدام قانون التحلل الإشعاعي لتقدير عمر المادة.
- شرح العمليات الطبيعية التي تسمح بتحديد تاريخ الأنسجة الحية باستخدام  ${}^{14}\text{C}$ .

اكتشف أنطوان بيكريل في عام 1896 أن الصخرة الغنية باليورانيوم تصدر أشعة غير مرئية يمكنها تغميق لوحة فوتوغرافية موجودة داخل حاوية مغلقة. وقد قدم العلماء ثلاثة براهين عن الأصل النووي لهذه الأشعة. الأول، أن آثار الإشعاع لا تختلف تبعاً للحالة الكيميائية؛ أي فيما إذا كانت المادة التي ينبعث منها على شكل عنصر أو مركب. والثاني، أن الإشعاع لا يختلف تبعاً للتغيرات في درجة الحرارة أو الضغط فكلاهما عاملان يمكن أن يؤثرتا بدرجة كافية على الإلكترونات في الذرة. والثالث، أن الطاقة الكبيرة جداً للأشعة غير المرئية (والتي تصل حتى مئات الالكترون فولت) لا تنسجم مع انتقالات الإلكترون في الذرة (بضع إلكترون فولت

فقط). ويُفسر هذا الإشعاع اليوم بتحويل الكتلة إلى طاقة في عمق نواة الذرة. ويُطلق على الانبعاثات التلقائية للإشعاعات الصادرة من النوى بالنشاط الإشعاعي النووي (الشكل 8.10).



الشكل 8.10 الرمز الدولي للإشعاعات المؤينة و معترف به عالمياً كرمز تحذير من الإشعاع النووي.

### قانون التحلل الإشعاعي

عندما يتحول النكلون الواحد إلى آخر مع انبعاث الإشعاع، يقال إن النواة تتحلل. يحدث التحلل الإشعاعي لجميع النوى التي تحتوي  $Z > 82$ ، وكذلك بالنسبة لبعض النظائر غير المستقرة التي تحتوي على  $Z < 83$ . يتناسب معدل التحلل مع عدد النوى  $N$  الأصلية (الغير متحللة) في المادة. عدد النوى المفقودة بسبب التحلل،  $-dN$ ، في الفاصل الزمني  $dt$ ، يعطى بالعلاقة:

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (10.7)$$

حيث:  $\lambda$  ثابت التحلل. (تشير الإشارة السالبة إلى أن عدد النوى الأصلية يتناقص بمرور الزمن). وبعبارة أخرى، فإنه كلما كان عدد النوى المتاحة للتحلل أكبر، تحللت أكثر (خلال الزمن  $dt$ ). ويمكن إعادة كتابة هذه المعادلة وفق الشكل التالي:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt. \quad (10.8)$$

بمكاملة طرفي المعادلة، وتحديد  $N_0$  المساوي لعدد النوى عند اللحظة  $t = 0$ ، نحصل على:

$$\int_{N_0}^N \frac{dN'}{N'} = -\int_0^t \lambda dt'. \quad (10.9)$$

هذا يعطينا:

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t. \quad (10.10)$$

بأخذ الطرفين الأيسر والأيمن للمعادلة كقوة للعدد  $e$ ، ينتج لدينا قانون التحلل الإشعاعي.

### قانون التحلل الإشعاعي

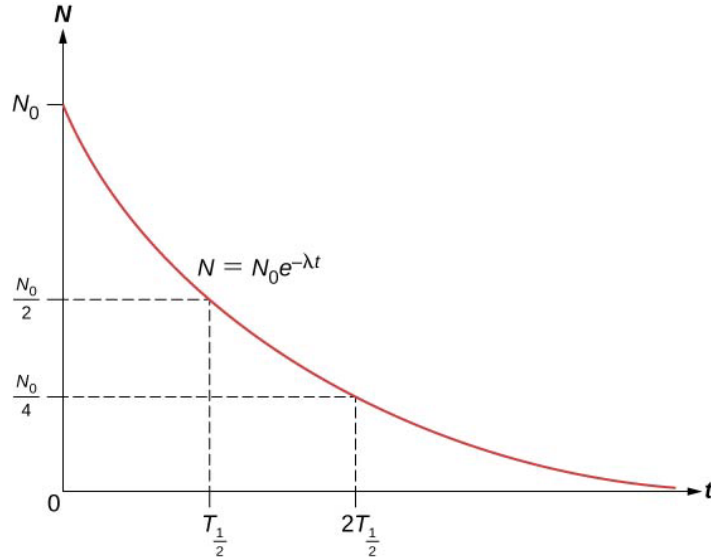
العدد الكلي للنوى المشعة  $N$  المتبقية بعد مرور الزمن  $t$  هو:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (10.11)$$

حيث:  $\lambda$  هو ثابت التحلل لنواة معينة.

ينخفض العدد الكلي للنوى بسرعة كبيرة في البداية، ثم يبطئ أكبر (الشكل 9.10).





**الشكل 9.10** يوضح **منحني** قانون التحلل الإشعاعي أن عدد النوى المتبقية في العينة المتحللة ينخفض بشكل كبير خلال اللحظات الأولى من التحلل.

يُعرّف **عمر النصف** ( $T_{1/2}$ ) للمادة المشعة بأنه زمن تحلل نصف النوى الأصلية (أو الزمن الذي يبقى فيه نصف النواة الأصلية). يظهر عمر النصف للنظائر غير المستقرة في الرسم البياني للنكليات في **الشكل 4.10**. ويبلغ عدد النوى المشعة المتبقية بعد عدد صحيح ( $n$ ) من عمر النصف نحو:

$$N = \frac{N_0}{2^n} \quad (10.12)$$

إذا كان ثابت التحلل ( $\lambda$ ) كبيراً، يكون عمر النصف صغيراً، والعكس صحيح. ولتحديد العلاقة بين هذه الكميات، لاحظ أنه عندما تكون  $t = T_{1/2}$ ، تكون  $N = N_0/2$ . وبالتالي، يمكن إعادة كتابة **المعادلة 10.10** على النحو التالي:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \quad (10.13)$$

بتقسيم كلا الطرفين على  $N_0$  وأخذ اللوغاريتم الطبيعي نجد:

$$\ln \frac{1}{2} = \ln e^{-\lambda T_{1/2}} \quad (10.14)$$

والتي يمكن اختزالها إلى الشكل:

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}} \quad (10.15)$$

وبالتالي، إذا عرفنا عمر النصف  $T_{1/2}$  لمادة مشعة، فإنه يمكننا إيجاد ثابت تحللها. يُعرّف **عمر المادة المشعة**  $\bar{T}$  على أنه متوسط الفترة الزمنية التي تعيشها النواة قبل أن تتحلل. عمر المادة ما هو إلا مقلوب ثابت التحلل، ويكتب ذلك كما يلي:

$$\bar{T} = \frac{1}{\lambda} \quad (10.16)$$

ويعرف **النشاط**  $A$  بأنه قيمة معدل التحلل، أو:

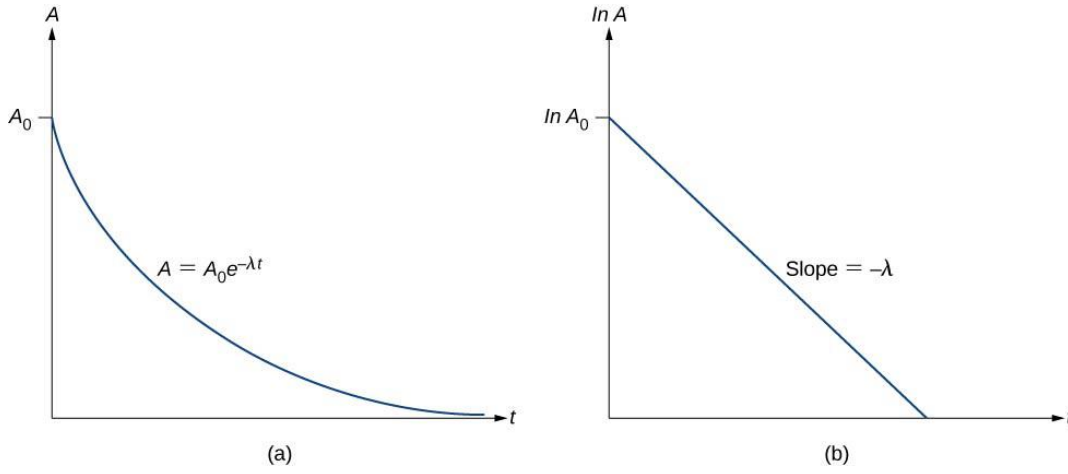
$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \quad (10.17)$$

التغير اللانهاضي  $dN$  في الفاصل الزمني  $dt$  سالب لأن عدد الجسيمات الرئيسية (غير المتحللة) آخذ في التناقص، وبالتالي فإن النشاط ( $A$ ) موجب. وبتحديد النشاط الأولي من المعادلة  $A_0 = \lambda N_0$ ، يصبح لدينا:

$$A = A_0 e^{-\lambda t}.$$

(10.18)

وهكذا، يتناقص نشاط المادة المشعة  $A$  بشكل كبير مع مرور الزمن (الشكل 10.10).



الشكل 10.10 (a) منحنى النشاط كتابع للزمن (b) إذا قمنا بقياس النشاط في أوقات مختلفة، فإنه يمكننا رسم  $\ln A$  بدلالة  $t$ ، والحصول على خط مستقيم.

#### المثال 4.10

#### ثابت التحلل ونشاط السترونسيوم 90

عمر النصف للسترونسيوم  ${}^{90}_{38}\text{Sr}$  هو 28.8 سنة. أوجد (a) ثابت التحلل و (b) النشاط الأولي في 1.00 g من هذه المادة.

#### خطة الحل:

يمكننا أن نجد ثابت التحلل مباشرة من المعادلة 10.15. ولتحديد النشاط، نحتاج أولاً إلى إيجاد عدد النوى الحالية.

#### الحل:

(a) يحسب ثابت التحلل كمايلي:

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}} = \left( \frac{0.693}{T_{1/2}} \right) \left( \frac{1 \text{ yr}}{3.16 \times 10^7 \text{ s}} \right) = 7.61 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}.$$

(b) الكتلة الذرية  ${}^{90}_{38}\text{Sr}$  هي 89.91. وباستخدام رقم أفوغادو  $N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ atoms/mol}$ ، نجد العدد الأولي للنوى في 1.00 g من المادة:

$$N_0 = \frac{1.00 \text{ g}}{89.91 \text{ g}} (N_A) = 6.70 \times 10^{21} \text{ nuclei}.$$

من هنا، نجد أن النشاط  $A_0$  عند  $t = 0$  في 1.00 g من  ${}^{90}_{38}\text{Sr}$  هو:

$$\begin{aligned} A_0 &= \lambda N_0 \\ &= (7.61 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1})(6.70 \times 10^{21} \text{ nuclei}) \\ &= 5.10 \times 10^{12} \text{ decays/s}. \end{aligned}$$

بالتعبير عن  $\lambda$  بدلالة عمر النصف للمادة، نحصل على:

$$A = A_0 e^{-(0.693/T_{1/2})T_{1/2}} = A_0 e^{-0.693} = A_0/2. \quad (10.19)$$

لذلك، يبلغ النشاط نصف قيمته بعد مرور فترة عمر النصف. يمكننا تحديد ثابت التحلل  $\lambda$  عن طريق قياس النشاط كتابع للزمن. وبأخذ اللوغاريتم الطبيعي للطرفين (الأيسر والأيمن) من **المعادلة 10.17**، نحصل على:

$$\ln A = -\lambda t + \ln A_0 \quad (10.20)$$

هذه المعادلة خطية من الشكل  $y = mx + b$ . وإذا قمنا برسم  $\ln A$  بدلالة  $t$ ، فإننا نحصل على خطاً مستقيماً ميله  $-\lambda$  ويتقاطع مع  $y$  في النقطة  $\ln A_0$  (**الشكل 10.10** (b)). يُعبر عن النشاط  $A$  بوحدة تُسمى بيكريل (Bq)، حيث أن 1 بيكريل يساوي تحللاً واحداً في الثانية. كما يعبر عن هذه الكمية بالتحلل في الدقيقة أو بالتحلل السنوي. واحدة من وحدات النشاط الأكثر شيوعاً هي الكوري (Ci)، المعرف بأنه نشاط غرام واحد من  $^{226}\text{Ra}$ . العلاقة بين Bq و Ci هي:

$$1 \text{ Ci} = 3.70 \times 10^{10} \text{ Bq}.$$

### المثال 5.10

#### احسب نشاط الأنسجة الحية الناتج عن $^{14}\text{C}$ ؟

نحو 20٪ من كتلة الجسم البشري هي كربون. احسب النشاط الناتج عن  $^{14}\text{C}$  في 1.00 kg من الكربون الموجود في كائن حي. اكتب النشاط مقدراً بوحدة Bq و Ci.

#### خطة الحل:

يتم تحديد نشاط  $^{14}\text{C}$  باستخدام المعادلة  $A_0 = \lambda N_0$ ، حيث  $\lambda$  هو ثابت التحلل و  $N_0$  هو عدد النوى المشعة. يتم تحديد عدد نوى  $^{14}\text{C}$  في عينة وزنها 1.00 kg في خطوتين. الأولى، نحدد عدد نوى  $^{14}\text{C}$  باستخدام مفهوم المول. الثانية، نضرب هذه القيمة بالمقدار  $1.3 \times 10^{-12}$  (وفرة  $^{14}\text{C}$  في عينة كربون من كائن حي) لتحديد عدد نوى  $^{14}\text{C}$  في الكائن الحي. يتحدد ثابت التحلل من قيمة عمر النصف المعلومة للكربون  $^{14}\text{C}$  (الموجود في **الشكل 4.10**).

#### الحل:

تبلغ كتلة مول واحد من الكربون 12.0 g، حيث أنه  $^{14}\text{C}$  نقي تقريباً. وبالتالي، فإن عدد نوى الكربون في كيلوغرام هو:

$$N(^{12}\text{C}) = \frac{6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}}{12.0 \text{ g/mol}} \times (1000 \text{ g}) = 5.02 \times 10^{25}.$$

وبالتالي فإن عدد نوى  $^{14}\text{C}$  في 1.00 kg من الكربون هو:

$$N(^{14}\text{C}) = (5.02 \times 10^{25})(1.3 \times 10^{-12}) = 6.52 \times 10^{13}.$$

ويمكننا الآن إيجاد النشاط  $A$  باستخدام المعادلة  $A = (0.693 N)/T_{1/2}$ . وبإدخال القيم المعلومة نحصل على:

$$A = \frac{0.693(6.52 \times 10^{13})}{5730 \text{ y}} = 7.89 \times 10^9 \text{ y}^{-1}$$

أو  $7.89 \times 10^9$  تحلل في السنة. ولتحويل هذه القيمة لوحدة Bq، نقوم ببساطة بتحويل السنوات إلى ثوان. فيكون:

$$A = (7.89 \times 10^9 \text{ y}^{-1}) \frac{1.00 \text{ y}}{3.16 \times 10^7 \text{ s}} = 250 \text{ Bq},$$

أو 250 تحلل في الثانية الواحدة. لحساب  $A$  مقدرة بالكوري، نستخدم تعريف الكوري:

$$A = \frac{250 \text{ Bq}}{3.7 \times 10^{10} \text{ Bq/Ci}} = 6.76 \times 10^{-9} \text{ Ci}.$$

وبالتالي:

$$A = 6.76 \text{ nCi}.$$

## ملاحظة:

نحو 20٪ من الجسم البشري من حيث الوزن هو كربون. يحدث المئات من تحلل  $^{14}\text{C}$  في جسم الإنسان في كل ثانية. الكربون  $^{14}\text{C}$  وغيره من المواد المشعة، التي تحدث بشكل طبيعي في الجسم، تشكل خلفية تعرض الشخص للإشعاع النووي. كما سنرى لاحقاً في هذا الفصل، فإن مستوى النشاط هذا أقل بكثير من الحد الأقصى المسموح به من الجرعات.

## التاريخ الإشعاعي (قياس العمر إشعاعياً)

التاريخ الإشعاعي هي تقنية استخدام النشاط الإشعاعي الطبيعي لتحديد عمر المادة، كالصخور أو القطع الأثرية القديمة. الطريقة الأساسية هي تقدير العدد الأصلي للنوى في المادة والعدد الحالي لنوى المادة (بعد التحلل)، ومن ثم استخدام القيمة المعلومة لثابت التحلل  $\lambda$  والمعادلة 10.10 لحساب الزمن الكلي للتحلل  $t$ .

يعد استخدام  $^{14}\text{C}$  لقياس العمر إشعاعياً من أهم الطرق الشائعة للتاريخ الإشعاعي. يتم إنتاج نوى  $^{14}\text{C}$  عندما تصطدم الإشعاعات الشمسية عالية الطاقة بنوى  $^{14}\text{N}$  في الغلاف الجوي العلوي، وتتحلل بعد ذلك بعمر النصف الذي يبلغ 5730 سنة. يحتوي الكربون المشع على نفس كيمياء الكربون المستقر، لذلك يتحد مع المحيط الحيوي ويصبح في النهاية جزءاً من كل كائن حي. تبلغ وفرة  $^{14}\text{C}$  1.3 جزءاً لكل تريليون من الكربون العادي. لذلك، إذا كنت تعرف عدد نوى الكربون في كائن ما، فبإمكانك تحديد عدد نوى  $^{14}\text{C}$  في ذلك الكائن فقط بضرب هذا العدد بالقيمة  $1.3 \times 10^{-12}$ .

عندما يموت الكائن الحي، يتوقف تبادل الكربون مع البيئة، ولا يتم تجديد  $^{14}\text{C}$  لأنه يتحلل. بمقارنة وفرة  $^{14}\text{C}$  في قطعة أثرية، كلفائف المومياء، بالوفرة الطبيعية في الأنسجة الحية، فمن الممكن تحديد عمر المومياء (أو الزمن المنقضي منذ وفاة الشخص). يمكن استخدام تاريخ  $^{14}\text{C}$  للأنسجة البيولوجية التي لا يزيد عمرها عن 50000 عام، ولكنها بشكل عام تكون أكثر دقة للعينات الأصغر سناً، حيث إن وفرة نوى  $^{14}\text{C}$  فيها أكبر. المواد البيولوجية القديمة جداً لا تحتوي على  $^{14}\text{C}$  إطلاقاً. ويمكن التحقق من صلاحية تأريخ الكربون باستخدام وسائل أخرى، كالمعرفة التاريخية أو عدد حلقات الأشجار.

## المثال 6.10

### كهف دفن قديم

في كهف دفن قديم، اكتشف فريق من علماء الآثار أثاثاً خشبياً قديماً. 80٪ فقط من  $^{14}\text{C}$  الأصلي لا يزال في الخشب. كم عمر الأثاث؟

### خطة الحل:

من نص المسألة نجد أن:  $N/N_0 = 0.80$ . ولذلك، يمكن استخدام المعادلة  $N = N_0 e^{-\lambda t}$  لإيجاد قيمة الجداء  $\lambda t$ . نحن نعلم أن عمر النصف للكربون  $^{14}\text{C}$  هو 5730 سنة، لذلك نحن نعلم أيضاً ثابت التحلل، وبالتالي فإن إجمالي فترة التحلل  $t$ .

### الحل:

بحل المعادلة  $N = N_0 e^{-\lambda t}$  من أجل  $N/N_0$  نحصل على:

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}.$$

وبالتالي:

$$0.80 = e^{-\lambda t}.$$

بأخذ اللوغاريتم الطبيعي لكلا طرفي المعادلة نجد:

$$\ln 0.80 = -\lambda t,$$

وبالتالي:

$$-0.223 = -\lambda t.$$

بإعادة ترتيب المعادلة لعزل  $t$  نحصل على:

$$t = \frac{0.223}{\lambda},$$

حيث:


$$\lambda = \frac{0.693}{t_{1/2}} = \frac{0.693}{5730 \text{ y}}.$$

وبجمع هذه المعطيات نجد:

$$t = \frac{0.223}{\left(\frac{0.693}{5730 \text{ y}}\right)} = 1844 \text{ y}.$$

### ملاحظة:

يبلغ عمر الأثاث نحو 2000 سنة، وهو اكتشاف مثير للإعجاب. تبلغ نسبة عدم اليقين النموذجية في التأريخ الإشعاعي باستخدام الكربون  $^{14}\text{C}$  نحو 0.5٪، لذا فإن عمر الأثاث يتراوح بين 1750 و 1950 عاماً. يجب تأكيد نطاق هذا التاريخ بأدلة أخرى، كالسجلات التاريخية.

 **3.10 تحقق من فهمك:** للنكليدات المشعة معدل تحلل مرتفع. ماذا يعني هذا بالنسبة لعمر النصف والنشاط؟

 تفضل بزيارة **لعبة التأريخ الإشعاعي** (<https://openstaxcollege.org/l/21raddatgame>) للتعرف على أنواع التأريخ الإشعاعي وجرب تأريخ بعض الأشياء القديمة.

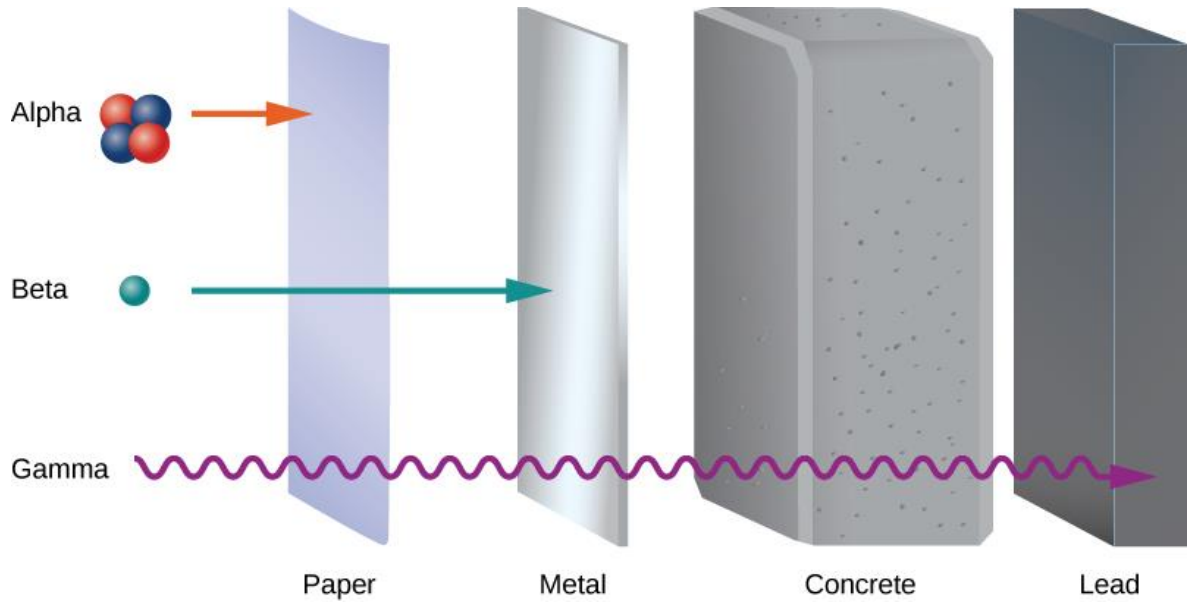
## 4.10 | التفاعلات النووية Nuclear Reactions

### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

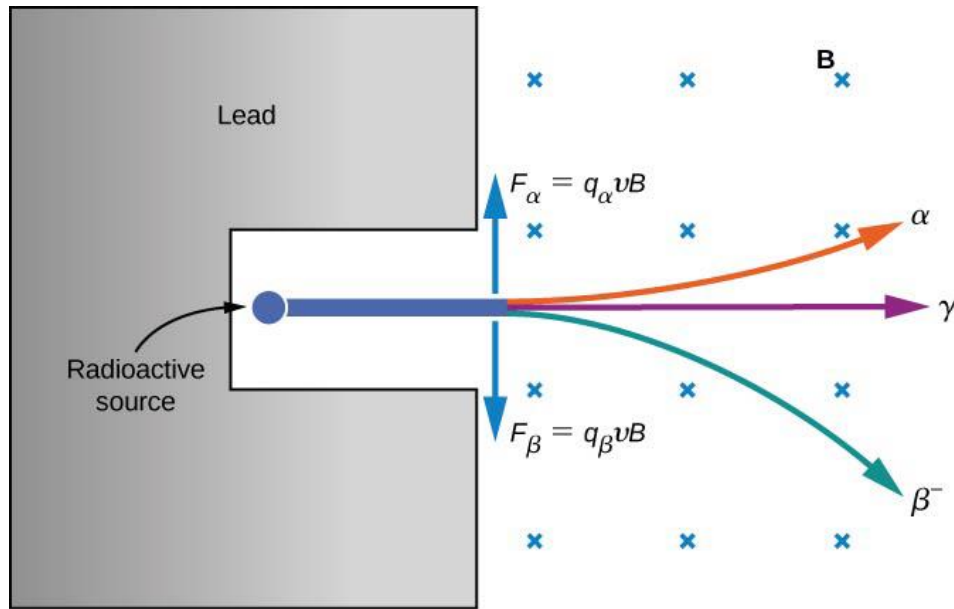
- وصف ومقارنة ثلاثة أنواع من الإشعاع النووي.
- استخدام الرموز النووية لوصف التغيرات التي تحدث أثناء التفاعلات النووية
- وصف العمليات الحاصلة في سلسلة تحلل العناصر الثقيلة.

كشفت التجارب المبكرة عن ثلاثة أنواع من الإشعاع أو الأشعة النووية: أشعة ألفا ( $\alpha$ ) وأشعة بيتا ( $\beta$ ) وأشعة غاما ( $\gamma$ ). يتم التمييز بين هذه الأنواع الثلاثة من الأشعة من خلال قدرتها على اختراق المادة. فأشعة ألفا بصعوبة تستطيع المرور عبر ورقة رقيقة. بينما أشعة بيتا تستطيع اختراق الألومنيوم إلى عمق 3 mm تقريباً، ويمكن لأشعة غاما اختراق الرصاص إلى عمق 2 cm أو أكثر. (الشكل 11.10).



**الشكل 11.10** مقارنة بين عمق اختراق أشعة ألفا ( $\alpha$ ) وبيتا ( $\beta$ ) وغاما ( $\gamma$ ) عبر مواد مختلفة.

تم دراسة الخواص الكهربائية لهذه الأنواع الثلاثة من الإشعاع بتمريرها عبر مجال مغناطيسي موحد، كما هو مبين في **الشكل 12.10**. وفقاً لمعادلة القوة المغناطيسية  $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$ ، فإن الجسيمات الموجبة الشحنة تنحرف للأعلى، بينما الجسيمات سالبة الشحنة إلى الأسفل، والجسيمات التي لا تحمل أي شحنة تمر عبر المجال المغناطيسي دون أن تتأثر. في نهاية المطاف، تم تحديد أشعة ألفا بنوى الهليوم ( ${}^4\text{He}$ )، وأشعة بيتا بالإلكترونات و البوزيترونات (إلكترونات موجبة الشحنة أو مضاد الإلكترون)، وأشعة غاما بالفوتونات عالية الطاقة. نناقش أشعة ألفا وبيتا وغاما بالتفصيل في الجزء المتبقي من هذا الجزء من الفصل.



**الشكل 12.10** تأثير الحقل المغناطيسي على إشعاع ألفا ( $\alpha$ ) وبيتا ( $\beta$ ) وغاما ( $\gamma$ ). هذا الشكل هو رسم تخطيطي فقط. تعتمد المسارات النسبية للجزيئات على كتلتها وطاقتها الحركية الأولية.

## التحلل ألفا

تنبعث أشعة ألفا  $\alpha$  من النوى الثقيلة غير المستقرة. في تحلل جسيمات ألفا (أو تحلل ألفا)، تفقد النواة بروتونين ونيوترونين، وبالتالي ينخفض العدد الذري بمقدار اثنين، في حين أن الرقم الكتلي ينخفض بمقدار أربعة. قبل التحلل، تُسمى النواة بالنواة الأم. بينما يشار إلى النواة أو النوى المنتجة في التحلل باسم النواة الابنة أو النوى الابنة. ويمثل تحلل  $\alpha$  رمزياً بالشكل التالي:

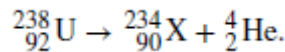


حيث:  ${}^A_Z X$  هي النواة الأم، و  ${}^{A-4}_{Z-2} X$  هي النواة الابنة، و  ${}^4_2 \text{He}$  هو جسيم ألفا. في تحلل ألفا، تتحلل نواة عددها الذري  $Z$  إلى نواة ذات العدد الذري  $Z-2$  والكتلة الذرية  $A-4$ . وما يثير الاهتمام، أن حلم الكيميائيين القدماء بتحويل المعادن الأخرى إلى ذهب هو أمر ممكن من الناحية العلمية من خلال عملية تحلل ألفا. وقد باءت محاولات الكيميائيين بالفشل لأنهم اعتمدوا على التفاعلات الكيميائية بدلاً من التفاعلات النووية.

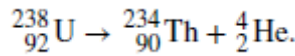
شاهد جسيمات ألفا وهي تنبعث من نواة البولونيوم، مسببة تحلل ألفا المشع. انظر كيف ترتبط أزمنة التحلل العشوائي بعمر النصف. ولمشاهدة محاكاة تحلل ألفا، تفضل زيارة الرابط التالي:

**جسيمات ألفا (https://openstaxcollege.org/l/21alpharvid)**

مثال على تحلل ألفا هو اليورانيوم 238:



انخفض العدد الذري من 92 إلى 90. العنصر الكيميائي الذي له  $Z = 90$  هو الثوريوم. وبالتالي، فقد تحلل اليورانيوم 238 إلى الثوريوم - 234 بسبب انبعاث جسيم ألفا، وتكتب العلاقة كما يلي:



وبعد ذلك، سيتحلل  ${}^{234}_{90} \text{Th}$  عن طريق انبعاثات بيتا، ويكون عمر النصف له 24 يوماً. تأخذ الطاقة المنبعثة من هذا التحلل شكل الطاقة الحركية لنوى الثوريوم والهليوم، على الرغم من أن الطاقة الحركية للثوريوم أصغر من الهليوم بسبب كتلته الأثقل وسرعته الأصغر.

## المثال 7.10

### تحلل ألفا للبلوتونيوم

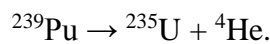
أوجد الطاقة المنبعثة من تحلل ألفا للبلوتونيوم  ${}^{239}\text{Pu}$ .

### خطة الحل:

يمكن حساب الطاقة المنبعثة من تحلل ألفا للبلوتونيوم  ${}^{239}\text{Pu}$  باستخدام المعادلة:  $E = (\Delta m)c^2$ . ولكن يجب علينا أولاً إيجاد  $\Delta m$ ، النقص في الكتلة بين النواة الأم ونواتج التحلل.

### الحل:

معادلة التحلل:



وبالتالي، فإن الكتل ذات الصلة هي كتل  ${}^{239}\text{Pu}$  و  ${}^{235}\text{U}$  وجسيم  $\alpha$  أو  ${}^4\text{He}$ ، وجميعها معلومة. الكتلة الأولية كانت  $m({}^{239}\text{Pu}) = 239.052157 \text{ u}$ . والكتلة النهائية هي المجموع التالي:

$$\begin{aligned} m({}^{235}\text{U}) + m({}^4\text{He}) &= 235.043924 \text{ u} + 4.002602 \text{ u} \\ &= 239.046526 \text{ u}. \end{aligned}$$

وبالتالي:

$$\begin{aligned}\Delta m &= m(^{239}\text{Pu}) - [m(^{235}\text{U}) + m(^4\text{He})] \\ &= 239.052157 \text{ u} - 239.046526 \text{ u} \\ &= 0.0005631 \text{ u}.\end{aligned}$$

ويمكننا الآن أن نجد  $E$  عن طريق إدخال  $\Delta m$  في المعادلة:

$$E = (\Delta m)c^2 = (0.0005631 \text{ u})c^2.$$

نحن نعلم أن:  $1 \text{ u} = 931.5 \text{ MeV}/c^2$ ، وبالتالي:

$$\begin{aligned}E &= (0.0005631)(931.5 \text{ MeV}/c^2)(c^2) \\ &= 5.25 \text{ MeV}.\end{aligned}$$

### ملاحظة:

تقع طاقة أشعة  $\alpha$  المنبعثة عن هذا التحلل في مجال MeV، أي أكبر بعدة مرات من طاقات التفاعل الكيميائي. تصبح معظم هذه الطاقة طاقة حركية لجسيمات ألفا (أو نواة الهليوم  $^4\text{He}$ )، والتي تنطلق مبتعدة بسرعة عالية. الطاقة التي تحملها نواة  $^{235}\text{U}$  هي أصغر بكثير بسبب كتلتها الكبيرة نسبياً. وبالتالي فإن نواة  $^{235}\text{U}$  يمكن أن تبقى في حالة إثارة لتنبعث منها في وقت لاحق الفوتونات (أشعة غاما).

### التحلل بيتا

في معظم حالات تحلل جسيمات  $\beta$  (أو تحلل بيتا)، ينبعث من النواة إما إلكترون ( $\beta^-$ ) أو بوزيترون ( $\beta^+$ ). البوزيترون له نفس كتلة الإلكترون، ولكن شحنته هي  $+e$ . ولهذا السبب، يُطلق على البوزيترون أحياناً اسم مضاد الإلكترون. كيف يحدث تحلل  $\beta$ ؟ التفسير المحتمل هو أن الإلكترون (البوزيترون) ينحصر في النواة قبل التحلل وينبعث بطريقة ما. للحصول على تقدير تقريبي لطاقة الانبعاث، فكر في نموذج مبسط لإلكترون محصور في صندوق (أو في مصطلحات ميكانيك الكم، بئر مربع أحادي البعد) له عرض النواة النموذجية ( $10^{-14} \text{ m}$ ). وفقاً لمبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ في ميكانيك الكم، فإن عدم اليقين لعزم الإلكترون هو:

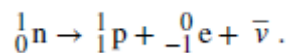
$$\Delta p > \frac{h}{\Delta x} = \frac{6.6 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \cdot \text{kg/s}}{10^{-14} \text{ m}} = 6.6 \times 10^{-20} \text{ kg} \cdot \text{m/s}.$$

مع الأخذ في الحسبان أن قيمة العزم هذه (الأقل من الواقعية) هي "القيمة الحقيقية"، فإن الطاقة الحركية للإلكترون عند الانبعاث تقريباً هي:

$$\frac{(\Delta p)^2}{2m_e} = \frac{(6.6 \times 10^{-20} \text{ kg} \cdot \text{m/s})^2}{2(9.1 \times 10^{-31} \text{ kg})} = 2.0 \times 10^{-9} \text{ J} = 12,400 \text{ MeV}.$$

تجريبياً، وُجد أن الإلكترونات المنبعثة في تحلل  $\beta^-$  لها طاقات حركية من رتبة بضعة إلكترون فولت فقط. وبالتالي نستنتج أنه تم إنتاج الإلكترون بطريقة ما في التحلل بدلاً من الانبعاث من النواة. يوصف إنتاج الجسيمات (الفناء) من خلال النظريات التي تجمع بين ميكانيك الكم والنسبية، وهو موضوع لدورة في الفيزياء أكثر تقدماً.

ينطوي تحلل بيتا النووي على تحويل نكلون إلى آخر. على سبيل المثال، يمكن للنوترون أن يتحلل إلى بروتون بانبعث إلكترون ( $\beta^-$ ) وجسيم بدون كتلة تقريباً يُسمى مضاد النوترون ( $\bar{\nu}$ ):





يستخدم الترميز  ${}_{-1}^0e$  لتعيين الإلكترون. رقم الكتلي هو 0 لأنه ليس نكلون، وعدده الذري هو -1، للدلالة على أن لديه شحنة  $-e$ . يمثل البروتون بالرمز  ${}_{+1}^1P$  لأن رقمه الكتلي وعدده الذري هو 1. وعندما يحدث هذا داخل نواة ذرية، يكون لدينا المعادلة التالية لتحلل بيتا:

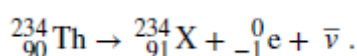


كما نوقش في جزء آخر من هذا الفصل، تحدث هذه العملية بسبب ضعف القوة النووية.

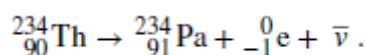
❖ قم بزيارة الرابط التالي وشاهد **تحلل بيتا** يحدث لمجموعة من النوى أو لنواة فردية.

(<https://openstaxcollege.org/l/21betadecayvid>)

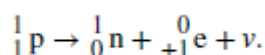
وكمثال على ذلك، فإن النظير  ${}^{234}_{90}\text{Th}$  غير مستقر ويتحلل مصدرًا  $\beta^-$  خلال عمر النصف الذي يبلغ 24 يوماً. يمكن التعبير عن هذا التحلل كما يلي:



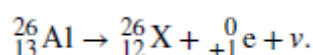
ولما كان العنصر الكيميائي الذي عدده الذري 91 هو البروتكتينيوم (Pa)، يمكن كتابة تحلل  $\beta^-$  للثوريوم بالشكل التالي:



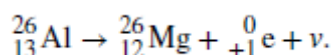
العملية العكسية ممكنة أيضاً: يمكن للبروتون أن يتحلل إلى نوترون بإصدار بوزيترون ( $\beta^+$ ) وجسيم دون كتلة تقريباً يُسمى **نترينو** ( $\nu$ ). ويكتب هذا التفاعل على الشكل:



ينبعث البوزيترون  ${}_{+1}^0e$  مع النترينو، ويبقى النوترون في النواة. (كما هو الحال في تحلل  $\beta^-$  فإن البوزيترون لا يستبق التحلل، ولكن يتم إنتاجه خلال التحلل). بالنسبة للبروتون المعزول، هذه العملية مستحيلة لأن النوترون أثقل من البروتون. ومع ذلك، فإن هذه العملية ممكنة داخل النواة لأن البروتون يمكن أن يستقبل الطاقة من نكلونات أخرى للانتقال. على سبيل المثال، يتحلل نظير الألومنيوم  ${}^{26}_{13}\text{Al}$  بانبعث  $\beta^+$  خلال نصف العمر الذي يبلغ  $7.40 \times 10^5$  سنة. ويعبر عن هذا التفاعل بالعلاقة:



يتوافق العدد الذري 12 مع المغنيسيوم. وبالتالي:



ويمكن كتابة انبعاثات البوزيترون كتفاعل نووي:



لم يتم الكشف عن النترينو في التجارب المبكرة لتحلل  $\beta$ . ومع ذلك، يبدو أن قوانين الطاقة والعزم تتطلب مثل هذه الجسيمات. في وقت لاحق، تم الكشف عن النترينو من خلال تفاعلها مع النواة.

## المثال 8.10

### تحلل ألفا وبيتا للبرزموت

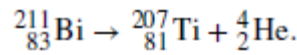
يتعرض البرزموت  ${}^{211}_{83}\text{Bi}$  لتحلل  $\alpha$  و  $\beta$ . ما هي النواة الابنة لكلتا الحالتين؟

## خطة الحل:

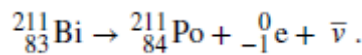
يمكننا استخدام العمليات التي تم وصفها بالمعادلة 10.21 و المعادلة 10.22، وكذلك الجدول الدوري لتحديد العناصر الناتجة عن ذلك.


## الحل:

الرقم الذري ورقم الكتلة لجسيم ألفا هما 2 و 4 على التوالي. وبالتالي، عندما تبعث نواة البزموت-211 جسيم ألفا، فإن النواة الابنة لها رقم ذري يبلغ 81 ورقم كتلة يبلغ 207. والعنصر ذو الرقم الذري 81 هو الثاليوم، لذلك تُعطى معادلة التحلل كما يلي:



عند التحلل  $\beta^-$ ، يزداد الرقم الذري بمقدار 1، في حين يبقى رقم الكتلة كما هو. العنصر ذو العدد الذري 84 هو البولونيوم، لذلك تكتب معادلة التحلل وفق الشكل التالي:



 **4.10 تحقق من فهمك:** عند التحلل الإشعاعي بيتا، هل رقم الكتلة الذرية  $A$ ، يزداد أم يتناقص؟

## التحلل غاما

يمكن للنواة التي تكون في حالة إثارة أن تتحلل إلى حالة المستوى الأدنى من خلال إصدار "أشعة غاما" الفوتون، وهذا هو ما يعرف بتحلل غاما. وهذا مشابه لإثارة الإلكترون الذري. ومثّل تحلل غاما رمزياً كما يلي:

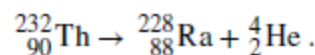


حيث تشير العلامة النجمية (\*) على النواة أمّا في حالة إثارة. في تحلل  $\gamma$ ، لا يتغير العدد الذري أو رقم الكتلة، ولذلك لا يتغير نوع النواة أيضاً.

## سلسلة التحلل الإشعاعي

النوى التي تحتوي على  $Z > 82$  غير مستقرة وتتحلل بشكل طبيعي. العديد من هذه النوى لها عمر قصير للغاية، لذلك لا توجد في الطبيعة. تشمل الاستثناءات البارزة  ${}_{90}^{232}\text{Th}$  أو  $\text{Th-232}$  وعمر النصف له يبلغ  $1.39 \times 10^{10}$  سنة، و  ${}_{92}^{238}\text{U}$  أو  $\text{U-238}$  وعمر النصف له يبلغ  $7.04 \times 10^8$  سنة. عندما تتحلل النواة الثقيلة إلى نواة أخرى أخف وزناً، فإنه يمكن للنواة الابنة الأخف وزناً أن تصبح النواة الأم للتحلل المقبل. وهكذا، يمكن أن تنتج هذه العملية سلسلة طويلة من التحلل النووي تُسمى سلسلة التحلل. وتنتهي السلسلة بنواة مستقرة.

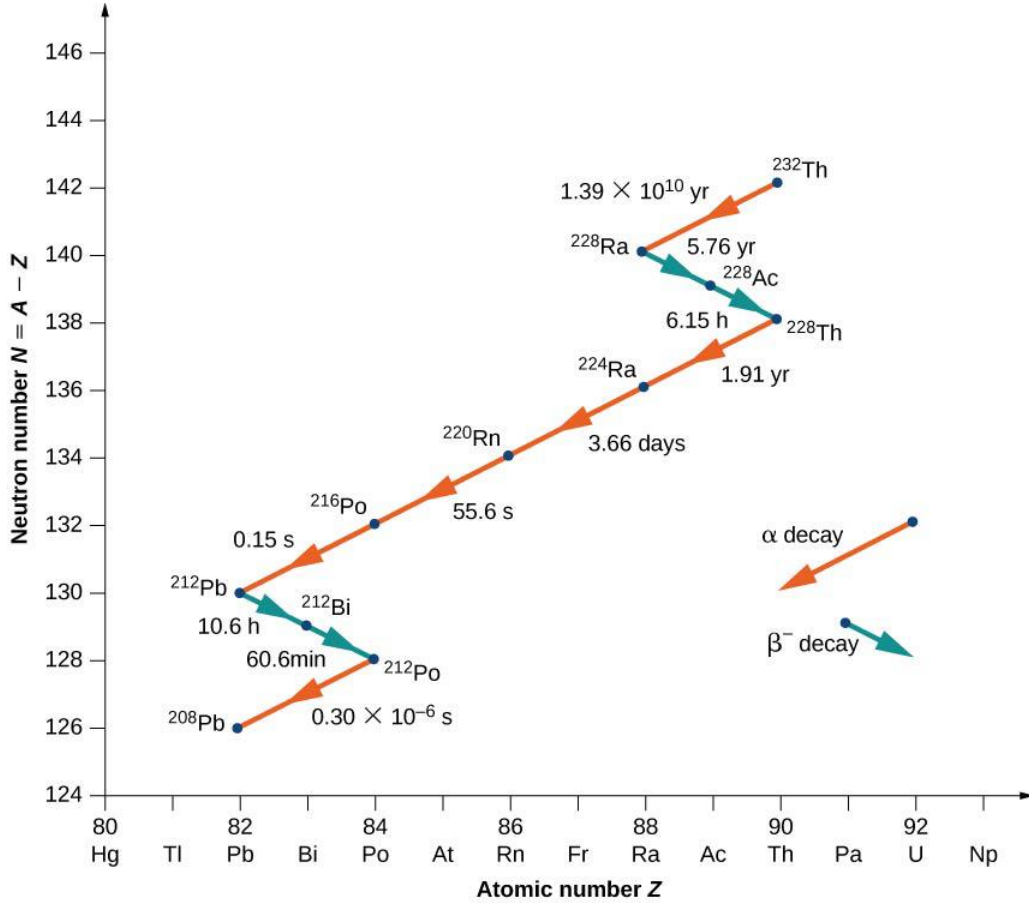
لتوضيح مفهوم سلسلة التحلل، انظر إلى سلسلة التحلل  $\text{Th-232}$  (الشكل 13.10). يوضع رقم النيوترون  $N$ ، على المحور العمودي  $y$ ، بينما الرقم الذري  $Z$ ، يوضع على المحور الأفقي  $x$ ، لذلك يوجد الـ  $\text{Th-232}$  عند الإحداثيات  $(N, Z) = (142, 90)$ . يتحلل  $\text{Th-232}$  بانبعثات  $\alpha$  خلال عمر النصف الذي يبلغ  $1.39 \times 10^{10}$  سنة. حيث يقلل تحلل ألفا من العدد الذري بمقدار 2 والرقم الكتلي بمقدار 4، لذلك يكون لدينا:



عدد النيوترونات Radium-228 هو 140، لذلك يوجد في المخطط عند الإحداثيات  $(N, Z) = (140, 88)$ . يكون Radium-228 غير مستقر ويتحلل أيضاً بانبعثات  $\beta^-$  خلال فترة عمر النصف له، والتي تبلغ 5.76 عاماً إلى Actinium-228. يزداد الرقم الذري بمقدار 1، ويبقى رقم الكتلة كما هو، ويتناقص عدد النيوترونات بمقدار 1. لاحظ أنه في الرسم البياني، يظهر

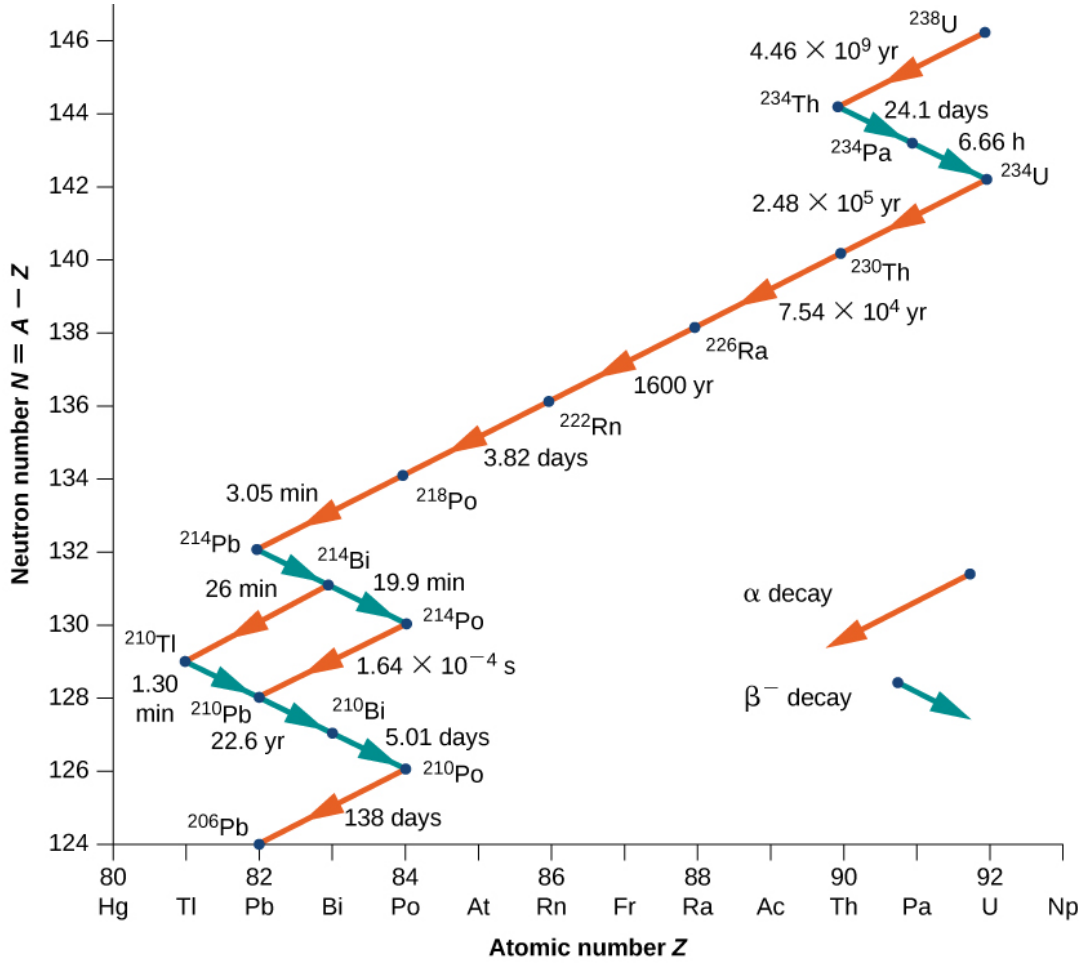
انبعاث ألفا كخط يميل للأسفل إلى جهة اليسار، مع انخفاض كل من  $N$  و  $Z$  بمقدار 2. ومن ناحية أخرى، فإن انبعاث بيتا يظهر كخط يميل للأسفل إلى جهة اليمين مع تناقص  $N$  بمقدار 1، وزيادة  $Z$  بمقدار 1. وبعد عدة تحولات ألفا وبيتا إضافية، تنتهي السلسلة بنواة مستقرة هي  $Pb-208$ .

يعتمد التردد النسبي لأنواع مختلفة من التحلل الإشعاعي (ألفا وبيتا وغاما) على العديد من العوامل، بما في ذلك شدة القوى المشتركة وعدد الطرق التي يمكن أن يحدث بها التفاعل دون انتهاك قانوني مصونية الطاقة ومصونية العزم. يعتمد عدد مرات حدوث التحلل الإشعاعي غالباً على توازن حساس للقوى الكهروستاتيكية والقوية. وتناقش هذه القوى في **فيزياء الجسيمات وعلم الكونيات**.



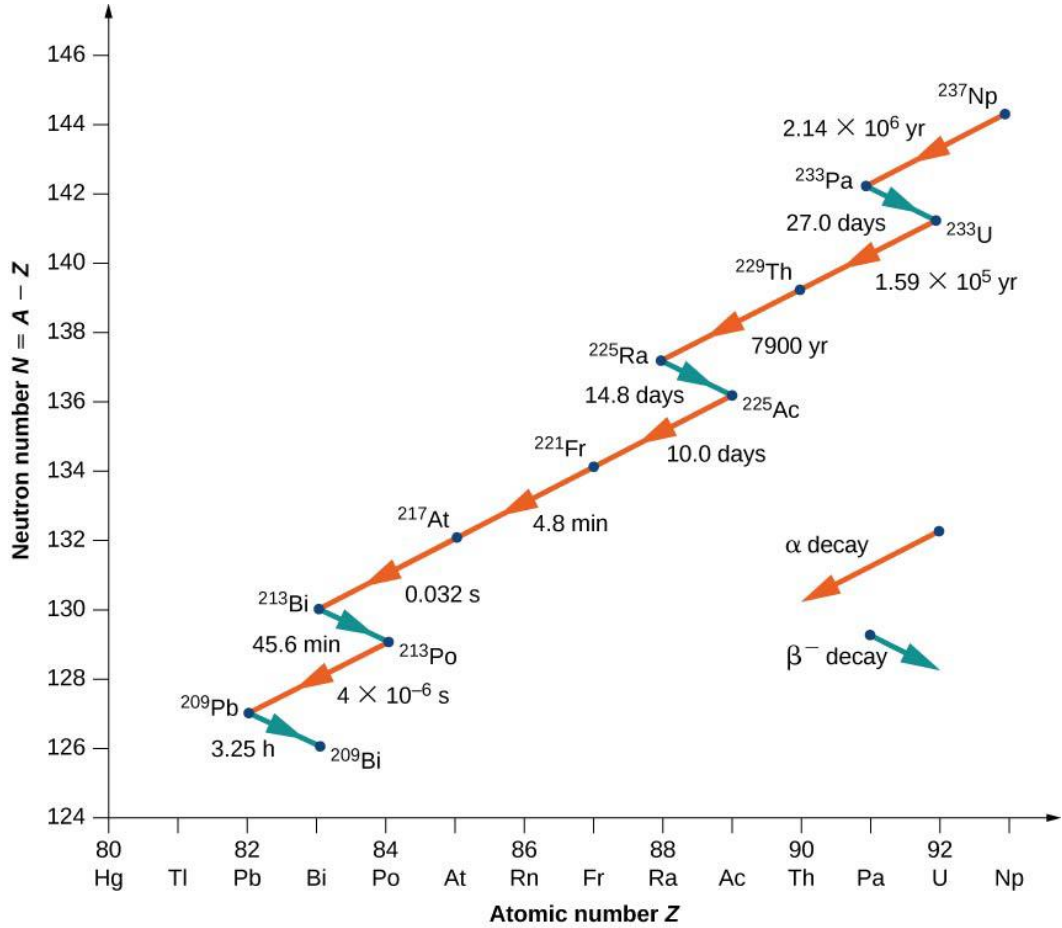
**الشكل 13.10** في سلسلة تحلل الثوريوم  ${}_{90}^{232}\text{Th}$ ، يقلل تحلل ألفا ( $\alpha$ ) من العدد الذري، كما هو موضح بالأسهم الحمراء. ويتسبب تحلل بيتا ( $\beta^-$ ) بزيادة العدد الذري، كما هو موضح بالأسهم الزرقاء. تنتهي السلسلة عند النواة المستقرة  $Pb-208$ .

كمثال آخر على ذلك، انظر إلى سلسلة تحلل U-238 الموضحة في **الشكل 14.10**. بعد العديد من التحولات ألفا وبيتا، تنتهي السلسلة بنواة مستقرة  $Pb-206$ . مثال على التحلل الذي لم تعد نواته الأم موجودة بشكل طبيعي مبين في **الشكل 15.10**. حيث يبدأ بالعنصر Neptunium-237 وينتهي بالنواة المستقرة Bismuth-209. يُطلق على البنتونيوم عنصر عبر اليورانيوم لأنه يقع وراء اليورانيوم في الجدول الدوري. يحتوي اليورانيوم على أعلى عدد ذري ( $Z=92$ ) لأي عنصر موجود في الطبيعة. لا يمكن إنتاج العناصر ذات  $Z > 92$  إلا في المختبر. على الأرجح كانت موجودة أيضاً في الطبيعة في وقت تكوين الأرض، ولكن نظراً لعمرها القصير نسبياً، فقد تحللت تماماً. لا يوجد اختلاف جوهري بين العناصر الطبيعية والعناصر الاصطناعية.



**الشكل 14.10** في سلسلة تحلل اليورانيوم Uranium-238، يقلل تحلل ألفا ( $\alpha$ ) من العدد الذري، كما هو موضح بالأسهم الحمراء. ويتسبب تحلل بيتا ( $\beta^-$ ) بزيادة العدد الذري، كما هو موضح بالأسهم الزرقاء. وتنتهي السلسلة عند النواة المستقرة Pb-206.

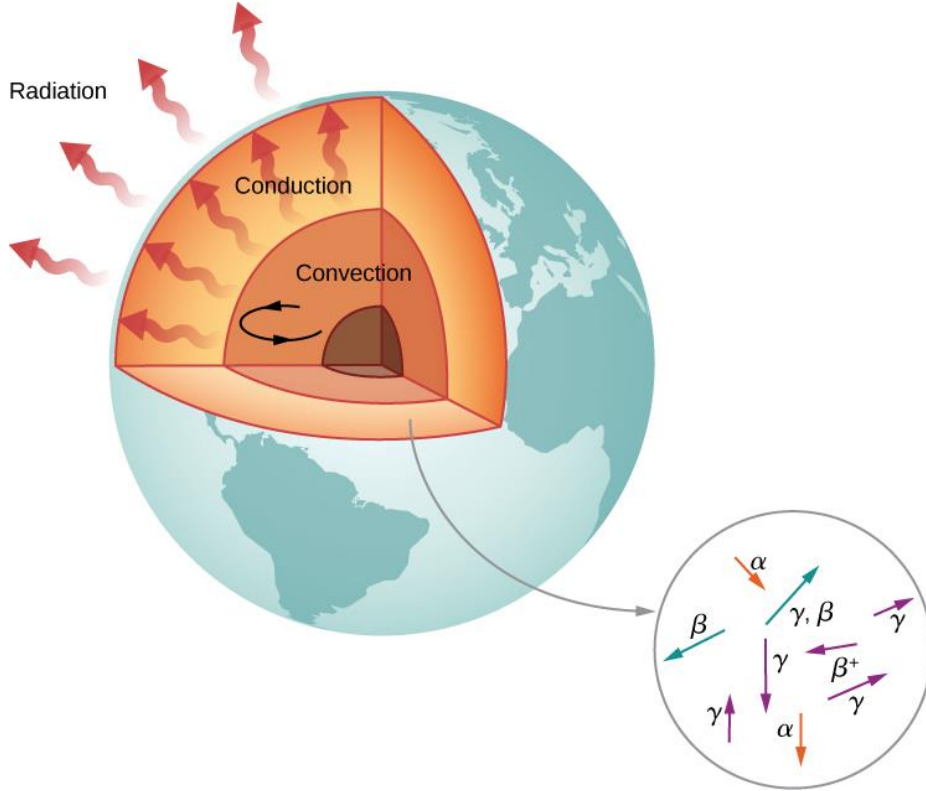
لاحظ أنه بالنسبة للبيزموث Bi، قد يستمر التحلل من خلال تحلل ألفا أو بيتا.



**الشكل 15.10** في سلسلة تحلل Neptunium-237، يقلل تحلل ألفا ( $\alpha$ ) من العدد الذري، كما هو موضح بالأسهم الحمراء. ويتسبب تحلل بيتا ( $\beta^-$ ) بزيادة العدد الذري، كما هو موضح بالأسهم الزرقاء. وتنتهي السلسلة عند النواة المستقرة Bi-209.

### النشاط الإشعاعي في الأرض

وفقاً لعلماء الجيولوجيا، لو لم يكن هناك مصدر للحرارة، كان ينبغي أن تبرد الأرض حتى تصل إلى درجة الحرارة الحالية خلال ما لا يزيد على مليار عام. حتى الآن، يبلغ عمر الأرض أكثر من 4 مليارات سنة. لماذا تبرد الأرض ببطء شديد؟ الجواب هو النشاط الإشعاعي النووي، ذلك أن جزيئات الطاقة العالية المنتجة في التحلل الإشعاعي تسخن الأرض من الداخل (**الشكل 16.10**).



**الشكل 16.10** يتم تسخين الأرض بواسطة التفاعلات النووية (تحلل ألفا وبيتا وغاما). دون هذه التفاعلات، سيكون سطح الأرض أبرد بكثير مما هو عليه الآن.

النواة المرشحة لنموذج التسخين المبين هي  $^{238}\text{U}$  و  $^{40}\text{K}$ ، التي تتمتع بعمر نصف مشابه لعمر الأرض أو أطول منه. الطاقة الناتجة عن هذه التحلل (في الثانية لكل متر مكعب) صغيرة، ولكن الطاقة لا يمكن أن تصدر بسهولة، لذلك تكون نواة الأرض حارة جداً. يتم نقل الطاقة الحرارية من نواة الأرض إلى سطح الأرض وبعيداً عنها من خلال عمليات الحمل الحراري والنقل والإشعاع.

## 5.10 | الانشطار النووي Fission

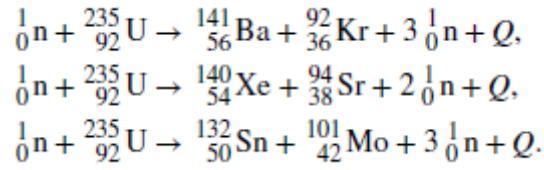
### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- وصف عملية الانشطار النووي من حيث نواتجها والمواد المتفاعلة.
- حساب طاقات الجسيمات الناتجة عن تفاعل الانشطار
- شرح مفهوم الانشطار في سياق القنابل الانشطارية والتفاعلات النووية.

قام انريكو فيرمي في عام 1934، بقصف عناصر كيميائية بالنيوترونات لخلق نظائر للعناصر الأخرى. لقد افترض أن قصف اليورانيوم بالنيوترونات سيجعله غير مستقر وينتج عنصراً جديداً. ولسوء الحظ، لم يتمكن فيرمي من تحديد نواتج التفاعل. بعد عدة سنوات، استنسخ أوتو هان وفريتز ستراسمان هذه التجارب واكتشفوا أن نواتج هذه التفاعلات كانت نوى أصغر. وخلصوا من هذا إلى أن نواة اليورانيوم قد انقسمت إلى نواتين أصغر. ويُسمى تقسيم النواة بالانشطار. ومن المثير للاهتمام أن انشطار  $\text{U-235}$  لا ينتج عنه دائماً الأجزاء نفسها.

تشمل أمثلة تفاعلات الانشطار:

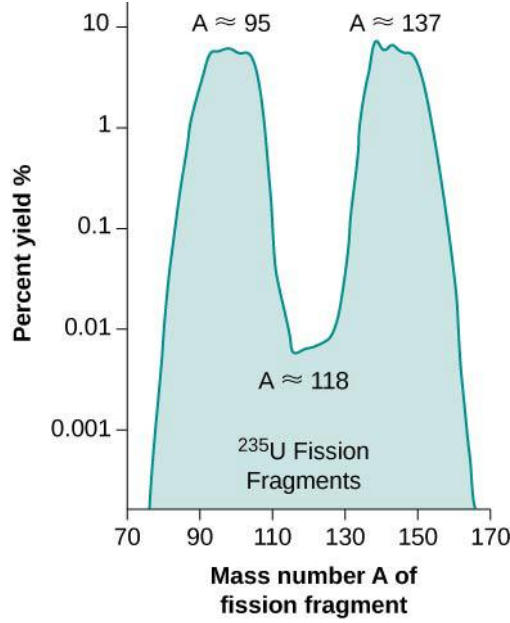


في كل حالة، يكون مجموع كتل نواة الناتج أقل من كتل المواد المتفاعلة، وبالتالي فإن انشطار اليورانيوم عملية ناشرة للحرارة ( $Q > 0$ ). هذه هي الفكرة وراء استخدام مفاعلات الانشطار كمصادر للطاقة (الشكل 17.10).

الطاقة التي يعطيها التفاعل تأخذ شكل جزيئات ذات طاقة حركية. العائد المئوي للشظايا الناتجة عن انشطار نوى اليورانيوم U-235 مبينة في الشكل 18.10.



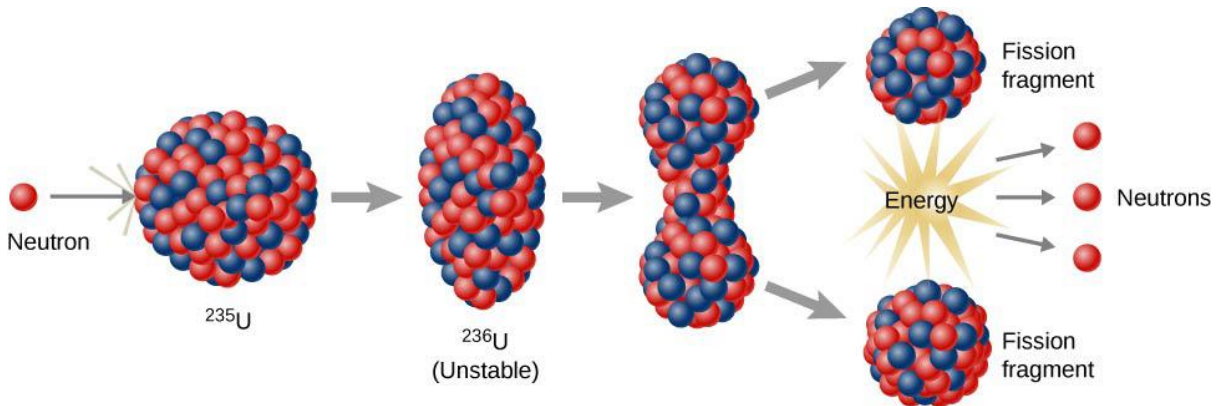
الشكل 17.10 تستخدم محطة فيليبس للطاقة النووية في ألمانيا مفاعلاً انشطاريًا لتوليد الكهرباء.



**الشكل 18.10** في هذا الرسم البياني لشظايا انشطار U-235، تشير القمم في الرسم البياني إلى النوى التي يتم إنتاجها بنسبة أكبر من خلال عملية الانشطار.

يمكن فهم تغيرات الطاقة في تفاعل الانشطار النووي بدلالة منحني طاقة الترابط لكل نكلون (**الشكل 7.10**). تكون قيمة BEN بالنسبة لليورانيوم ( $A = 236$ ) أقل قليلاً من نواتها الابنة، والتي تقع بالقرب من ذروة الحديد (Fe). وهذا يعني أن النكلونات الموجودة في الأجزاء النووية مرتبطة بقوة أكثر من تلك الموجودة في نواة U-235. لذلك، فإن التفاعل الانشطاري يؤدي إلى انخفاض في متوسط طاقة النكلون. وتُحمل هذه الطاقة بعيداً بواسطة نترونات عالية الطاقة.

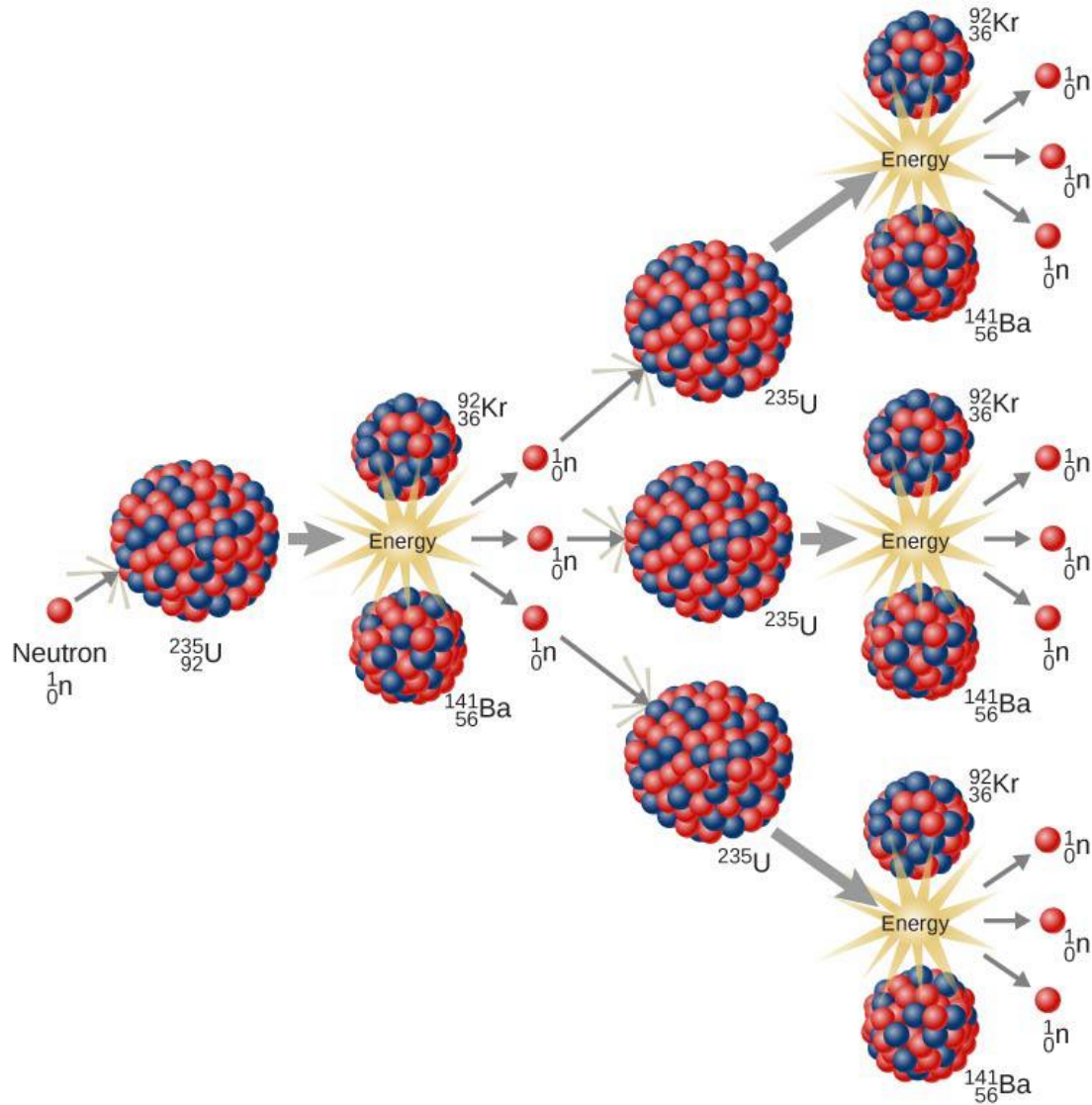
قام نيلز بور وجون ويلر بتطوير نموذج القطرة السائلة لفهم عملية الانشطار. وفقاً لهذا النموذج، فإن إطلاق نترون في نواة يشبه بعثرة قطرة الماء (**الشكل 19.10**). يصلح هذا القياس لأن القوى قصيرة المدى بين النكلونات في النواة تشبه قوى الجذب بين جزيئات الماء في قطرة الماء. وعلى وجه الخصوص، تؤدي القوى بين النكلونات على سطح النواة إلى توتر سطحي مماثل لتوتر قطرة الماء. يمكن للنترون المنطلق إلى نواة اليورانيوم أن يضع هذه النواة في حالة اهتزاز. إذا كان هذا الاهتزاز عنيفاً بما فيه الكفاية، فإن النواة تنقسم إلى نوى أصغر وتصدر أيضاً نترولين فرديين.



**الشكل 19.10** في نموذج القطرة السائلة للانحطار النووي، تنقسم نواة اليورانيوم إلى نواتين أخف بواسطة نترون عالي الطاقة.



يمكن أن ينتج انشطار U-235 تفاعلاً تسلسلياً. في مركب يتكون من عدة نوى U-235، يمكن للنترونات الموجودة في تحلل نواة واحدة من U-235 بدء انشطار نواة U-235 إضافية (الشكل 20.10). يمكن لهذا التفاعل التسلسلي أن يستمر بشكل محكوم، كما هو الحال في المفاعل النووي في محطة توليد الكهرباء، أو يستمر بشكل لا يمكن السيطرة عليه، كما في الانفجار.



**الشكل 20.10** في التفاعل التسلسلي الانشطاري U-235، ينتج عن انشطار نواة اليورانيوم نوترون عالي الطاقة يمضي قدماً لتقسيم المزيد من النوى. ويمكن استخدام الطاقة المنبعثة في هذه العملية لإنتاج الكهرباء.

❖ من خلال الرابط التالي يمكنك استعراض محاكاة **للالانشطار النووي** لبدء تفاعل تسلسلي، أو تقديم نظائر غير مشعة لمنع حدوث ذلك. التحكم في إنتاج الطاقة في مفاعل نووي (<https://openstaxcollege.org/l/21nuclrfissvid>).

### القنبلة الذرية

إمكانية حدوث تفاعل تسلسلي في اليورانيوم، بإطلاقه للطاقة بشكل كبير للغاية، أدت إلى قيام العلماء النوويين بتصنيع قنبلة ذرية. (كانت هذه الاكتشافات تحدث في السنوات التي سبقت الحرب العالمية الثانية مباشرةً، والعديد من علماء الفيزياء الأوروبيين المشاركين في هذه الاكتشافات جاءوا من بلدان تم تجاوزها). يحتوي اليورانيوم الطبيعي على 99.3% من اليورانيوم-238 و 0.7

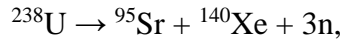
٪ فقط من اليورانيوم -235، ولا ينتج تفاعلاً تسلسلياً. لإنتاج تفاعل تسلسلي متحكم به ومستدام، يجب زيادة نسبة النظير-U-235 إلى نحو 50 ٪. بالإضافة إلى ذلك، يجب أن تكون عينة اليورانيوم ضخمة بما فيه الكفاية بحيث يكون من المرجح أن يؤدي النترون النموذجي إلى الانشطار أكثر من هروبه. الحد الأدنى للكتلة اللازمة لحدوث تفاعل تسلسلي تُسمى **الكتلة الحرجة**. عندما تصل الكتلة الحرجة إلى نقطة يصبح فيها التفاعل التسلسلي مكتفياً ذاتياً، فهذه هي الحالة المعروفة باسم **الحرجية**. يتطلب التصميم الأصلي قطعتين من U-235 كلٌّ منهما أقل من الكتلة الحرجة. عندما يتم إطلاق إحدى القطعتين على شكل رصاصة في القطعة الثانية، يتم تجاوز الكتلة الحرجة ويتم إنتاج تفاعل تسلسلي.

من أهم العقبات أمام قنبلة U-235 هي إنتاج كتلة حرجة من المواد الانشطارية. لذلك، طور العلماء قنبلة بلوتونيوم 239 لأن Pu-239 أكثر انشطارية من اليورانيوم 235 وبالتالي يتطلب كتلة حرجة أصغر. صنعت القنبلة على شكل كرة فيها قطع بلوتونيوم، كل منها أقل من الكتلة الحرجة، عند حافة الكرة. أطلقت سلسلة من الانفجارات الكيميائية قطع البلوتونيوم باتجاه مركز الكرة في وقت واحد. عندما اجتمعت كل هذه القطع من البلوتونيوم، تجاوز مجموعها الكتلة الحرجة وأنتجت تفاعلاً تسلسلياً. تم استخدام كلٍّ من قنابل U-235 والبلوتونيوم 239 في الحرب العالمية الثانية. تطوير واستخدام الأسلحة النووية لا يزالان اثنين من أهم الأسئلة التي تواجهها الحضارة الإنسانية.

## المثال 9.10

### حساب الطاقة الصادرة عن الانشطار

احسب الطاقة المنبعثة في تفاعل الانشطار التلقائي التالي:



الكتل الذرية هي:  $m(^{238}\text{U}) = 238.050784 \text{ u}$  و  $m(^{95}\text{Sr}) = 94.919388 \text{ u}$  و  $m(^{140}\text{Xe}) = 139.921610 \text{ u}$  و  $m(\text{n}) = 1.008665 \text{ u}$

### خطة الحل:

كما هو الحال دائماً، فإن الطاقة المنبعثة تساوي جداء الكتلة المدمرة بمربع سرعة الضوء  $c^2$ ، لذلك يجب أن نجد فرق الكتلة بين  $^{238}\text{U}$  ونواتج الانشطار.

### الحل:

النواتج لها كتلة إجمالية:

$$m_{\text{products}} = 94.919388 \text{ u} + 139.921610 \text{ u} + 3(1.008665 \text{ u}) \\ = 237.866993 \text{ u}.$$

النقص في الكتلة هو كتلة  $^{238}\text{U}$  مطروحاً منه كتلة النواتج:

$$\Delta m = 238.050784 \text{ u} - 237.8669933 \text{ u} = 0.183791 \text{ u}.$$

وبالتالي، فإن الطاقة المنبعثة هي:

$$E = (\Delta m)c^2 = (0.183791 \text{ u}) \frac{931.5 \text{ MeV}/c^2}{\text{u}} c^2 = 171.2 \text{ MeV}.$$

### ملاحظة

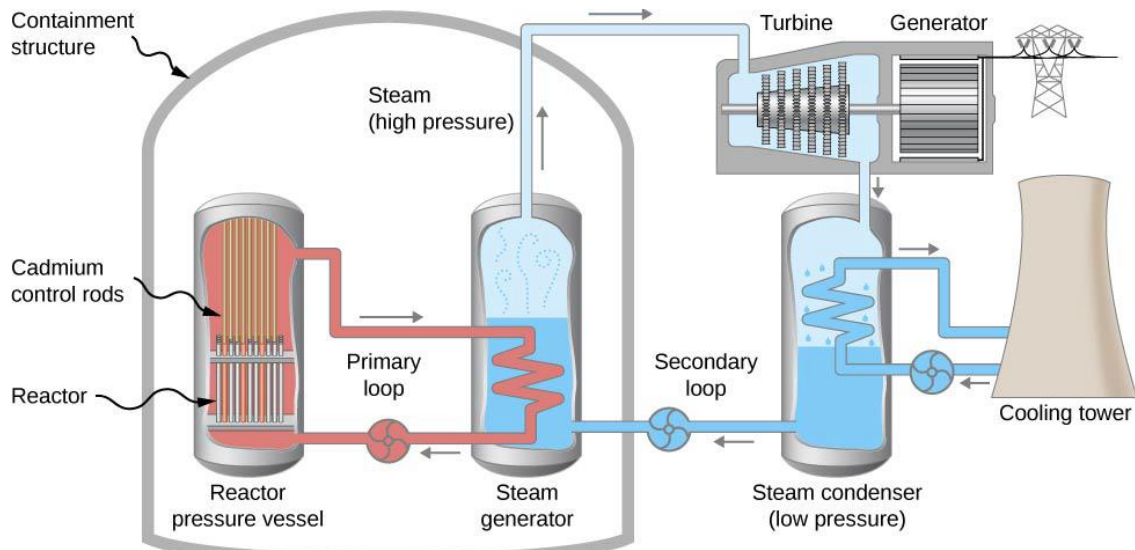
تظهر في هذا المثال العديد من النقاط المهمة. انبعاث الطاقة كبير ولكنه أقل مما سيكون عليه إذا انقسمت النواة إلى جزأين متساويين، حيث يتم نقل الطاقة بواسطة النترونات. ومع ذلك، فإن هذا التفاعل الانشطاري ينتج النترونات ولا يقسم النواة إلى جزأين متساويين. انشطار نكليدات معينة، مثل  $^{238}\text{U}$ ، لا يعط دائماً النواتج نفسها. الانشطار هو عملية إحصائية يتم فيها إنتاج مجموعة

كاملة من النواتج ذات الاحتمالات المختلفة. معظم عمليات الانشطار تنتج النوترونات، على الرغم من أن العدد يختلف. وهذا جانب مهم جداً للانشطار، لأن النوترونات يمكن أن تحفز على مزيد من الانشطار، وتسمح بتفاعل تسلسلي مكتفٍ ذاتياً.

## مفاعلات الانشطار النووي

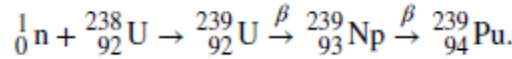
تم بناء أول مفاعل نووي بواسطة انريكو فيرمي في ملعب اسكواش في حرم جامعة شيكاغو في 2 ديسمبر 1942. وكان المفاعل نفسه يحتوي على U-238 مخصب بـ (3.6% U-235). تتحرك النوترونات الناتجة عن التفاعل التسلسلي بسرعة كبيرة لبدء تفاعلات الانشطار. الطريقة الوحيدة لإبطائهم هي غمر المفاعل بأكمله في حمام مائي تحت ضغط مرتفع. تصطدم النوترونات بجزيئات الماء وتتباطأ بما يكفي لاستخدامها في عملية الانشطار. تقوم النوترونات البطيئة بفصل المزيد من نوى اليورانيوم-235 ويحدث التفاعل التسلسلي. يتم التحكم في معدل عائدات التفاعل التسلسلي من خلال سلسلة من قضبان "التحكم" المصنوعة من الكادميوم التي يتم إدخالها في المفاعل. حيث أن الكادميوم قادر على امتصاص كمية كبيرة من النوترونات دون أن يصبح غير مستقر.

يمكن أيضاً استخدام تصميم مفاعل نووي، يُسمى مفاعل الماء المضغوط، لتوليد الكهرباء (الشكل 21.10). تم تصميم مفاعل الماء المضغوط (على اليسار في الشكل) للتحكم بانشطار كميات كبيرة من  $^{235}\text{U}$ . ويتم امتصاص الطاقة المنطلقة في هذه العملية عن طريق المياه التي تتدفق عبر الأنابيب في النظام فينتج عن ذلك ( "الحلقة الأساسية") والبخار. تقوم قضبان التحكم المصنوعة من الكادميوم بضبط التدفق النوتروني (معدل تدفق النوترونات التي تمر عبر النظام)، وبالتالي تتحكم في التفاعل. في حال ارتفاع درجة حرارة المفاعل وجليان الماء، ينتهي التفاعل التسلسلي، لأن الماء يُستخدم لتسخين النوترونات. (يمكن أن تُسحق ميزة الأمان هذه في الظروف القصوى). ثم يمر الماء الساخن ذو الضغط المرتفع عبر أنبوب إلى خزان مياه ثانٍ بضغط طبيعي في مولد البخار. بدلاً من البخار الناتج في أحد طرفي مولد البخار حجرة تحتوي على التوربينات (العنفات). ويكون هذا البخار ذا ضغط عالٍ جداً. وفي الوقت نفسه، يحافظ مكثف البخار المتصل بالجانب الآخر لحجرة التوربينات على البخار عند ضغط منخفض. ويجبر فرق الضغط البخار على الانتقال عبر الحجرة، الأمر الذي يجعل التوربينات تدور. فيعمل التوربين بدوره على تشغيل المولد الكهربائي.



**الشكل 21.10** يستخدم المفاعل النووي الطاقة المنتجة في انشطار U-235 لإنتاج الكهرباء. تنتج الطاقة الناتجة عن تفاعل الانشطار النووي بخاراً ساخناً عالي الضغط يقوم بتدوير التوربين. مع دوران التوربينات، يتم إنتاج الكهرباء.

العيب الرئيسي لمفاعل الانشطار هو النفايات النووية. ينتج انشطار U-235 نوى لها عمر افتراضي طويل  $^{236}\text{U}$  يجب تخزينها. لا يمكن إلقاء هذه المنتجات في المحيطات أو تركها في أي مكان حيث إنها ستلوث البيئة، بما في ذلك التربة أو الهواء أو الماء. يعتقد العديد من العلماء أن أفضل مكان لتخزين النفايات النووية هو أسفل مناجم الملح القديمة أو داخل الجبال المستقرة. كثير من الناس يخشون أن المفاعل النووي قد ينفجر كالمقنبلة الذرية. ومع ذلك، فإن المفاعل النووي لا يحتوي على ما يكفي من اليورانيوم 235 للقيام بذلك. كما أنه، تم تصميم المفاعل النووي بحيث يؤدي فشل أي آلية للمفاعل إلى سقوط قضبان التحكم المصنوعة من الكاديوم بالكامل في المفاعل، مما يوقف عملية الانشطار. كما يتضح من كوارث فوكوشيما وتشرنوبيل، فإن مثل هذه الأنظمة يمكن أن تعطل. تعد الأنظمة والإجراءات اللازمة لتجنب مثل هذه الكوارث أولوية مهمة لمناصري الطاقة النووية. إذا تم إنتاج جميع الطاقة الكهربائية عن طريق الانشطار النووي U-235، فإن مخزون الأرض من اليورانيوم سوف ينضب خلال أقل من قرن. ومع ذلك، يمكن توسيع إمدادات الأرض من المواد الانشطارية بشكل كبير باستخدام المفاعل الولود. يعمل المفاعل الولود عند إقلاعه لأول مرة باستخدام انشطار U-235 كما هو موضح في مفاعل الماء المضغوط. ولكن بالإضافة إلى إنتاج الطاقة، فإنه يتم امتصاص بعض النيوترونات السريعة الناشئة عن انشطار U-235، مما يؤدي إلى إنتاج Pu-239 عبر مجموعة من التفاعلات:



Pu-239 هو نفسه ذو قابلية عالية للانشطار، وبالتالي يمكن استخدامه كوقود نووي بدلاً من U-235. ونظراً لأن 99.3٪ من اليورانيوم الذي يحدث بشكل طبيعي هو نظير U-238، فإن استخدام المفاعلات الولودة من شأنه أن يزيد من إمدادنا بالوقود النووي بنسبة تقارب 100٪. تعمل المفاعلات الولودة الآن في بريطانيا العظمى وفرنسا وروسيا. ولكن المفاعلات الولودة لها أيضاً عيوبها. أولاً، تنتج المفاعلات الولودة البلوتونيوم، والذي يمكن إذا تسرب إلى البيئة، أن يسبب مشاكل خطيرة للصحة العامة. ثانياً، يمكن استخدام البلوتونيوم لصنع القنابل، مما يزيد بشكل كبير من خطر الانتشار النووي.

## المثال 10.10

### حساب طاقة الوقود الانشطاري

احسب كمية الطاقة الناتجة عن انشطار 1.00 kg من  $^{235}\text{U}$  باعتبار أن متوسط تفاعل انشطار  $^{235}\text{U}$  ينتج 200 MeV.

### خطة الحل:

الطاقة المنتجة الكلية هي عدد ذرات  $^{235}\text{U}$  مضروبة بالطاقة المعطاة لكل انشطار لذرة  $^{235}\text{U}$ . وبالتالي، يجب إيجاد عدد ذرات  $^{235}\text{U}$  في 1.00 kg.

### الحل:

عدد ذرات  $^{235}\text{U}$  في 1.00 kg هي رقم أفوكادو مضروباً بعدد المولات. كتلة واحد مول من  $^{235}\text{U}$  هي 235.04 g ، وعليه يكون:

$$= 4.25 \text{ mol} = (1000 \text{ g}) / (235.04 \text{ g/mol}). \text{ وبالتالي، فإن عدد ذرات } ^{235}\text{U} \text{ هي:}$$

$$= 2.56 \times 10^{24} \text{ } ^{235}\text{U} = (4.25 \text{ mol})(6.02 \times 10^{23} \text{ } ^{235}\text{U/mol})$$

وبالتالي، فإن الطاقة المنبعثة الكلية هي:

$$E = (2.56 \times 10^{24} \text{ } ^{235}\text{U}) \left( \frac{200 \text{ MeV}}{^{235}\text{U}} \right) \left( \frac{1.60 \times 10^{-13} \text{ J}}{\text{MeV}} \right) = 8.21 \times 10^{13} \text{ J}.$$

## ملاحظة:

هذه الكمية الأخرى من الطاقة هي كبيرة إلى حدٍ مذهل، حيث تعادل نحو 14000 برميلٍ من النفط الخام أو 600000 غالون من البنزين. ومع ذلك، فهي ليست سوى ربع الطاقة الناتجة عن اندماج مزيج كتلته 1.00 kg من الدتريون والتريتيوم. على الرغم من أن كل تفاعل انشطار ينتج عنه نحو 10 أضعاف طاقة تفاعل الاندماج، فإن الطاقة لكل كيلوغرام من وقود الانشطار أقل، لأن هناك عدداً أقل بكثير من المولات لكل كيلوغرام من النكليدات الثقيلة.

وقود الانشطار هو أيضاً أكثر ندرة من وقود الاندماج، وأقل من 1% من اليورانيوم ( $^{235}\text{U}$ ) قابل للاستخدام بسهولة.

 **5.10 تحقق من فهمك:** أيهما يؤدي إلى مردود طاقي أكبر في تفاعل الانشطار، عينة كبيرة أم صغيرة من  $^{235}\text{U}$  النقي؟

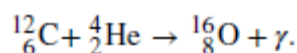
## 6.10 | الاندماج النووي Nuclear Fusion

### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

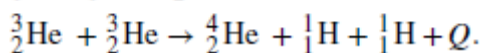
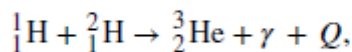
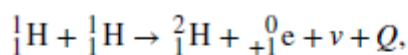
- وصف عملية الاندماج النووي من حيث نواتجها والمواد المتفاعلة.
- حساب طاقات الجسيمات التي ينتجها تفاعل الاندماج.
- توضيح مفهوم الانشطار في سياق قنابل الاندماج، وإنتاج الطاقة بواسطة الشمس، والاصطناع النووي.

عملية الجمع بين نوى أخف لصنع نوى أثقل تُسمى الاندماج النووي. كما هو الحال مع تفاعلات الانشطار، فإن تفاعلات الاندماج ناشرة للحرارة - أي أنها تطلق طاقة. لنفترض أننا ندمج نوى الكربون مع الهليوم لإنتاج الأكسجين:

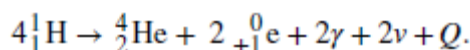


يمكن فهم تغيرات الطاقة في هذا التفاعل باستخدام رسم بياني لطاقة الربط لكل نكلون (**الشكل 7.10**). عند مقارنة طاقة الربط لكل نكلون من الأكسجين والكربون والهليوم، فإن نواة الأكسجين تكون مترابطة بإحكام أكثر من نواة الكربون والهليوم، مما يشير إلى أن التفاعل ينتج انخفاضاً في طاقة النظام. يتم إطلاق هذه الطاقة على شكل أشعة غاما. ويقال إن تفاعلات الاندماج تكون ناشرة للحرارة عندما تكون كمية الطاقة المنبعثة (المعروفة بقيمة  $Q$ ) في كل تفاعل أكبر من الصفر ( $Q > 0$ ).

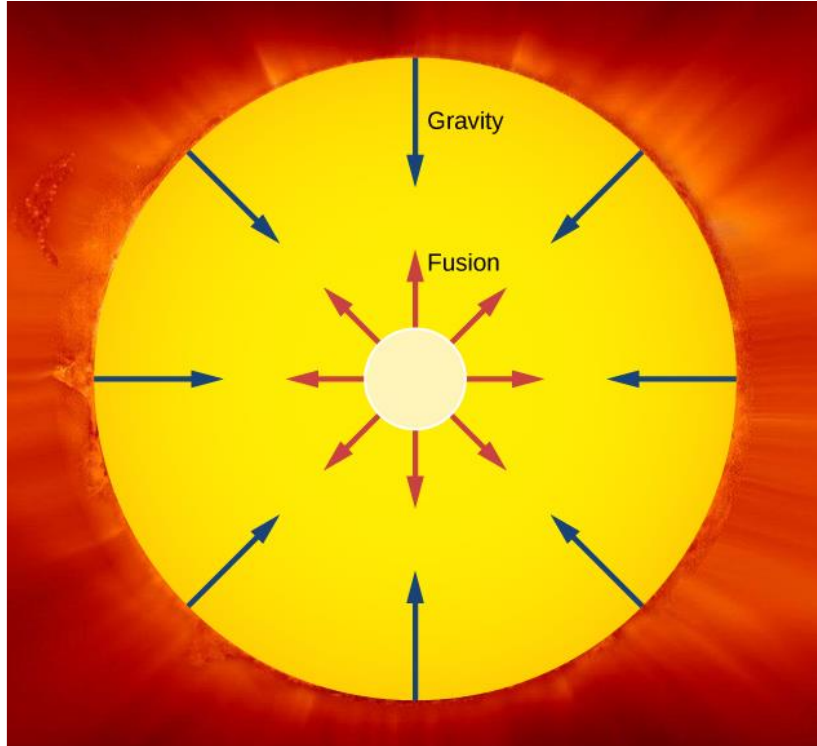
من الأمثلة المهمة للاندماج النووي في الطبيعة هو إنتاج الطاقة في الشمس. اقترح هانز بيث في عام 1938 أن الشمس تنتج طاقة عندما تندمج نوى الهيدروجين ( $1\text{H}$ ) مع نوى الهليوم المستقرة ( $4\text{He}$ ) في نواة الشمس (**الشكل 22.10**). وتتلخص هذه العملية، التي تُسمى سلسلة بروتون-بروتون، بثلاثة تفاعلات:



وبالتالي، تتشكل نواة الهليوم المستقرة من اندماج نوى ذرة الهيدروجين. ويمكن تلخيص هذه التفاعلات الثلاثة كما يلي:



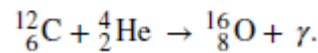
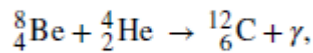
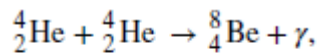
تبلغ قيمة  $Q$  الصافية نحو 26 MeV. ينتج عن إطلاق هذه الطاقة ضغط غازي حراري باتجاه الخارج يحول دون حدوث انهيار الجاذبية في الشمس. وجد علماء الفيزياء الفلكية أن اندماج الهيدروجين يوفر للنجوم الطاقة التي تتطلبها للحفاظ على توازن الطاقة على مدار عمر النجم.



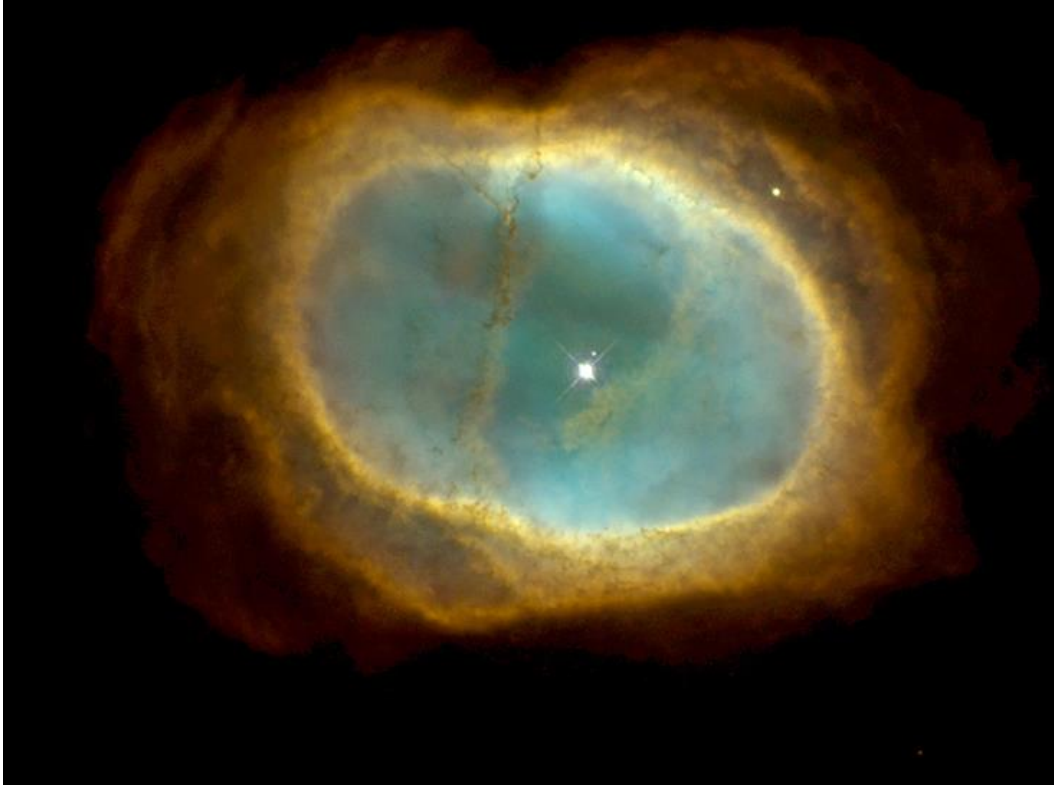
**الشكل 22.10** تنتج الشمس الطاقة عن طريق اندماج الهيدروجين مع الهليوم في نواة الشمس. تظهر الأسهم الحمراء ضغطاً باتجاه الخارج بسبب الغاز الحراري، والذي يميل إلى جعل الشمس تتوسع. تظهر الأسهم الزرقاء ضغطاً داخلياً بسبب الجاذبية، والتي تميل إلى جعل الشمس تنقلص. هذان التأثيران يوازن الواحد الآخر.

### الاصطناع النووي

يعتقد العلماء الآن أن العديد من العناصر الثقيلة الموجودة على الأرض وفي جميع أنحاء الكون تم تجميعها في الأصل عن طريق الاندماج داخل النوى الساخنة للنجوم. تُعرف هذه العملية باسم **الاصطناع النووي**. على سبيل المثال، في النجوم الأخف، يتحد الهيدروجين لتكوين الهليوم عبر سلسلة البروتون. بمجرد نفاذ الوقود الهيدروجيني، يدخل النجم في المرحلة التالية من حياته ويدمج الهليوم. مثال على التفاعل النووي التسلسلي الذي يمكن أن يحدث:

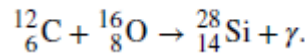
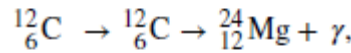
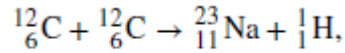


نوى الكربون والأكسجين الناتجة في مثل هذه العمليات تصل في النهاية إلى سطح النجم عن طريق الحمل الحراري. بالقرب من نهاية عمره، يفقد النجم طبقاته الخارجية في الفضاء، مما يثري الوسط بيننجمي بنوى العناصر الأثقل (**الشكل 23.10**).



**الشكل 23.10** يتم إنتاج سديم كوكبي في نهاية حياة النجم. يأتي اللون الأخضر لهذا السديم الكوكبي من أيونات الأكسجين.

لا تصبح النجوم المشابهة للشمس في الكتلة ساخنة بدرجة تكفي لإدماج النوى التي لها ثقل نوى الأكسجين (أو أثقل منها). ومع ذلك، في النجوم الضخمة التي تصبح حرارة نواها ( $T > 6 \times 10^8 \text{K}$ )، يتم إنتاج نوى أكثر تعقيداً. بعض التفاعلات التمثيلية هي:



يستمر الاصطناع النووي حتى تصبح النواة هي معدن نيكول - حديد بشكل أساس. يتمتع الحديد بخاصية غريبة تتمثل في أن أي تفاعل اندماج أو انشطار يتضمن نواة الحديد يكون ماصاً للحرارة، مما يعني أن الطاقة يتم امتصاصها بدلاً من إنتاجها. وبالتالي، لا يمكن توليد الطاقة النووية في نواة غنية بالحديد. بسبب عدم وجود ضغط خارجي من تفاعلات الاندماج، يبدأ النجم في الانقباض بسبب الجاذبية. تسخن هذه العملية النواة إلى درجة حرارة تصل إلى  $5 \times 10^9 \text{K}$ . وتؤدي أمواج الصدمة المتولدة داخل النجم بسبب الانفجار إلى انفجار النجم بسرعة. يمكن أن يزيد لمعان النجم مؤقتاً إلى ما يقرب من لمعان مجرة بأكملها. خلال هذا الحدث، يتفاعل فيض النيوترونات النشطة مع الحديد والنوى الأخرى لإنتاج عناصر أثقل من الحديد. ويتم إطلاق هذه العناصر، إلى جانب جزء كبير من النجم، إلى الفضاء بسبب الانفجار. تؤدي المستعرات الأعظمية وتشكيل السدم الكوكبية معاً دوراً رئيسياً في تبثر العناصر الكيميائية في الفضاء.

في النهاية، يتم تجميع الكثير من المواد التي فقدتها النجوم مع بعضها البعض عبر قوة الجاذبية، وتتكثف في جيل جديد من النجوم والكواكب المصاحبة لها. تقدم الصور الحديثة من تليسكوب هابل الفضائي لمحة عن هذه العملية الرائعة التي تحدث في كوكبة سرينز

(الشكل 24.10). يبدأ الجيل الجديد من النجوم عملية الاصطناع النووي من جديد، بنسبة أعلى من العناصر الأثقل. وهكذا، تعد النجوم "مصانع" للعناصر الكيميائية، فقد كانت العديد من ذرات أجسامنا ذات يوم جزءاً من النجوم.



**الشكل 24.10** التقطت هذه الصورة بواسطة تلسكوب سبيتزر الفضائي التابع لوكالة ناسا و(2MASS)، تُظهر سيرينس كلاود كور، وهي منطقة تشكل النجوم في كوكبة سرينس (كوكبة الثعبان). تقع على بعد نحو 750 سنة ضوئية، تتكون هذه المجموعة من النجوم من غبار التبريد والغازات. تم استخدام ضوء الأشعة تحت الحمراء للكشف عن أصغر النجوم باللون البرتقالي والأصفر.

### المثال 3.10

#### طاقة الشمس

تبلغ الطاقة المنتجة من الشمس ما يقارب  $3.8 \times 10^{26}$  J/s. يتم إنتاج معظم هذه الطاقة في نواة الشمس بواسطة سلسلة بروتون-بروتون. وتنتقل هذه الطاقة إلى الخارج عن طريق الحمل الحراري والإشعاع. (a) ما هو عدد تفاعلات الاندماج في الثانية التي يجب أن تحدث لانتاج الطاقة التي تشعها الشمس؟ (b) ما هو معدل انخفاض كتلة الشمس؟ (c) خلال نحو خمس مليارات سنة، سيتم استنزاف النواة المركزية للشمس من الهيدروجين. ما هي النسبة المئوية التي ستخفض بها كتلة الشمس من قيمتها الحالية عندما ينضب الهيدروجين في النواة؟

#### خطة الحل:

الطاقة الكلية المنتجة في الثانية معطاة في نص المسألة. فإذا علمنا الطاقة المنبعثة في كل تفاعل اندماج، يمكننا تحديد معدل تفاعلات الاندماج. وإذا كان نقص الكتلة في تفاعل الاندماج معلوماً، فإن معدل نقص الكتلة معلوم. وبضرب هذا المعدل بخمسة مليارات سنة نحصل على الكتلة الكلية التي فقدتها الشمس. ثم يتم تقسيم هذه القيمة على الكتلة الأصلية للشمس لتحديد النسبة المئوية لكتلة الشمس المفقودة عند نفاذ وقود الهيدروجين.

#### الحل:

(a) نقص الكتلة لتفاعل الاندماج هو:

$$\begin{aligned}\Delta m &= 4m({}_1^1\text{H}) - m({}_2^4\text{He}) - 2m({}_1^0\text{e}) \\ &= 4(1.007825 \text{ u}) - 4.002603 \text{ u} - 2(0.000549 \text{ u}) \\ &= 0.0276 \text{ u}.\end{aligned}$$



الطاقة الصادرة في تفاعل الاندماج هي:

$$Q = (0.0276 \text{ u})(931.49 \text{ MeV/u}) = 25.7 \text{ MeV}.$$

وبالتالي، لإنتاج  $2.38 \times 10^{39} \text{ MeV/s} = 3.8 \times 10^{26} \text{ J/s}$ ، يجب أن يكون هناك:

$$\frac{2.38 \times 10^{39} \text{ MeV/s}}{25.7 \text{ MeV/reaction}} = 9.26 \times 10^{37} \text{ reaction/s}.$$

(b) تنخفض كتلة الشمس بمقدار  $0.0276 \text{ u} = 4.5 \times 10^{-29} \text{ kg}$  لكل تفاعل اندماج، وبالتالي فإن معدل تناقص كتلتها هو:

$$(9.26 \times 10^{37} \text{ reaction/s})(4.58 \times 10^{-29} \text{ kg/reaction}) = 4.24 \times 10^9 \text{ kg/s}.$$

(c) في  $5 \times 10^9 \text{ y} = 1.6 \times 10^{17} \text{ s}$ ، ستتناقص كتلة الشمس بمقدار:


$$\Delta M = (4.24 \times 10^9 \text{ kg/s})(1.6 \times 10^{17} \text{ s}) = 6.8 \times 10^{26} \text{ kg}.$$

تبلغ الكتلة الحالية للشمس نحو  $2.0 \times 10^{30} \text{ kg}$ ، وبالتالي فإن النسبة المئوية للانخفاض في كتلتها عندما يتم استنفاد وقود الهيدروجين داخلها هي:

$$\left( \frac{6.8 \times 10^{26} \text{ kg}}{2.0 \times 10^{30} \text{ kg}} \right) \times 100\% = 0.034\%.$$

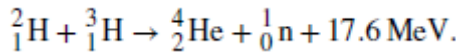
### ملاحظة:

بعد خمس مليارات سنة، فإن كتلة الشمس هي تقريباً نفس كتلتها الآن. أي أن حرق الهيدروجين لا يؤثر كثيراً على تغير كتلة الشمس. يفترض هذا الحساب أن تغيير تحلل بروتون - بروتون فقط هو المسؤول عن إنتاج طاقة الشمس.

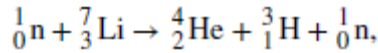
 **6.10 تحقق من فهمك:** أين تتولد الطاقة الصادرة من الشمس؟

### القنبلة الهيدروجينية

في عام 1942، اقترح روبرت أوبنهايمر أن درجة الحرارة العالية جدا للقنبلة الذرية يمكن استخدامها لتحفيز تفاعل اندماج بين الديتريوم والتريتيوم، وبالتالي إنتاج قنبلة اندماج (أو قنبلة هيدروجينية). التفاعل بين الديتريوم والتريتيوم، اللذين يعدان من نظائر الهيدروجين، يكون من الشكل:



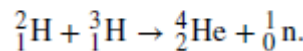
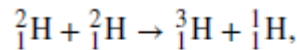
الديتريوم وفير نسبياً في مياه المحيط ولكن التريتيوم نادر. ومع ذلك، يمكن توليد التريتيوم في مفاعل نووي من خلال تفاعل يشتمل على الليثيوم. تسبب النيوترونات من المفاعل التفاعل التالي:



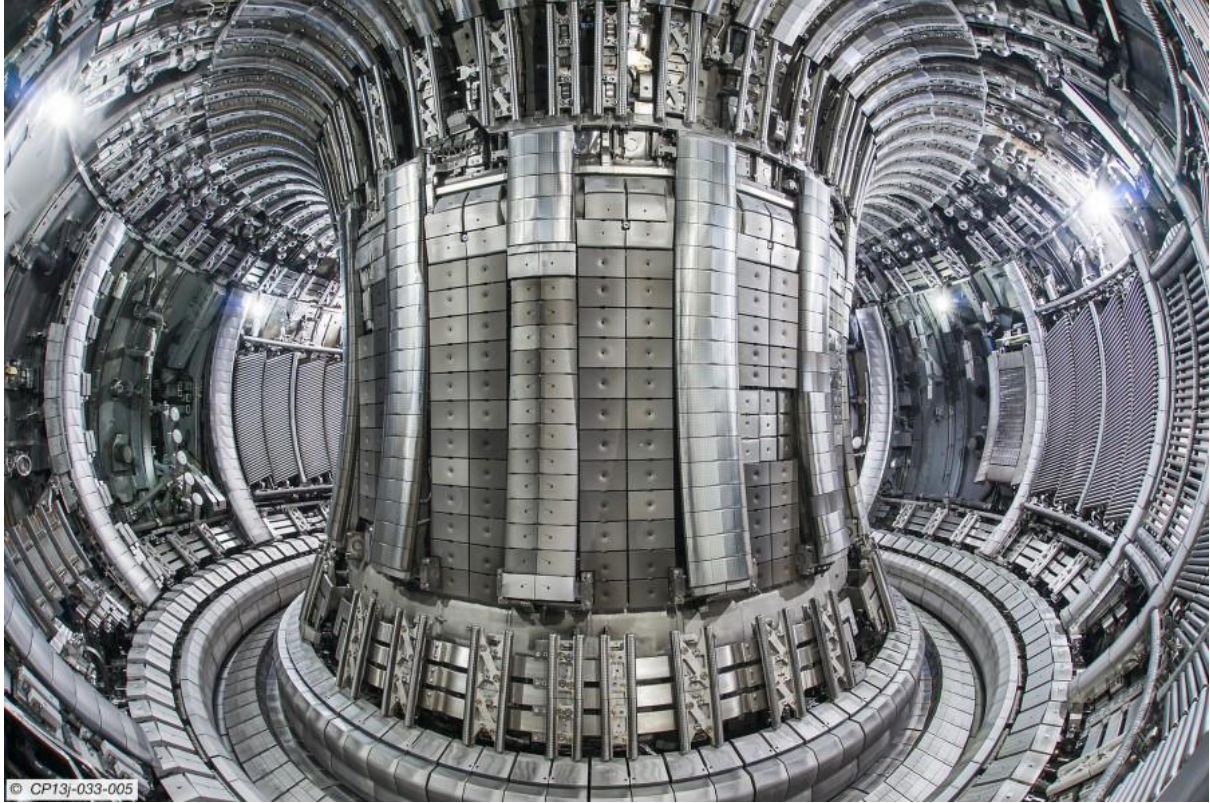
لإنتاج التريتيوم المطلوب. تم تفجير أول قنبلة هيدروجينية في عام 1952 في جزيرة إنويتوك النائبة في جزر مارشال. لم يتم استخدام القنبلة الهيدروجينية في الحرب. تعد القنابل الهيدروجينية الحديثة أقوى بنحو 1000 مرة من القنابل الانشطارية التي أُلقيت على هيروشيما وناغازاكي في الحرب العالمية الثانية.

### مفاعل الاندماج

سلسلة الاندماج، التي يُعتقد أنها الأكثر عملية للاستخدام في مفاعل الاندماج النووي، هي عملية من خطوتين:



هذه السلسلة، مثل سلسلة بروتون - بروتون، تنتج الطاقة دون أي ناتج ثانوي مشع. ومع ذلك، هناك مشكلة صعبة للغاية يجب التغلب عليها قبل استخدام الاندماج لإنتاج كميات كبيرة من الطاقة حيث نحتاج إلى درجات حرارة عالية جداً ( $\sim 10^7$  K) لدفع عملية الاندماج. لمواجهة هذا التحدي، يجري تطوير مفاعلات اختبار الاندماج لتتحمل درجات حرارة أكبر بنحو 20 مرة من درجة حرارة الشمس الأساسية. مثال على ذلك هو Joint European Torus (JET) الموضح في **الشكل 25.10**. لا يزال يتعين القيام بالكثير من العمل بشأن تكنولوجيا مفاعل الاندماج، لكن العديد من العلماء يتوقعون أن طاقة الاندماج سوف تغذي مدن العالم في نهاية القرن العشرين.



**الشكل 25.10** يستخدم كاشف اندماج توكاماك توروس الأوروبي المشترك (JET) الحقول المغناطيسية لدمج نوى الديتريوم والتريتيوم.

## 7.10 | التطبيقات الطبية والآثار البيولوجية للإشعاع النووي

### Medical Applications and Biological Effects of Nuclear Radiation

#### الأهداف التعليمية

- في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:
- وصف استخدامين طبيين للتقانة النووية.
- شرح أصل التأثيرات البيولوجية الناتجة عن الإشعاع النووي.
- ذكر المصادر الشائعة للإشعاع وتأثيراتها.
- تقدير التعرض للإشعاع النووي باستخدام وحدات الجرعة الشائعة.

تعد الفيزياء النووية جزءاً لا يتجزأ من حياتنا اليومية (**الشكل 26.10**). تستخدم المركبات المشعة في كشف السرطان، ودراسة الآثار القديمة، وتزويد مدنا بالطاقة. يعمل الاندماج النووي أيضاً على تشغيل الشمس، المصدر الرئيس للطاقة على الأرض. محور هذا الفصل هو الإشعاع النووي. في هذا الجزء من الفصل، نطرح أسئلة مثل: كيف يتم استخدام الإشعاع النووي لصالح المجتمع؟ ما هي المخاطر الصحية؟ ما مقدار الإشعاع النووي الذي يتعرض له الشخص العادي في حياته؟

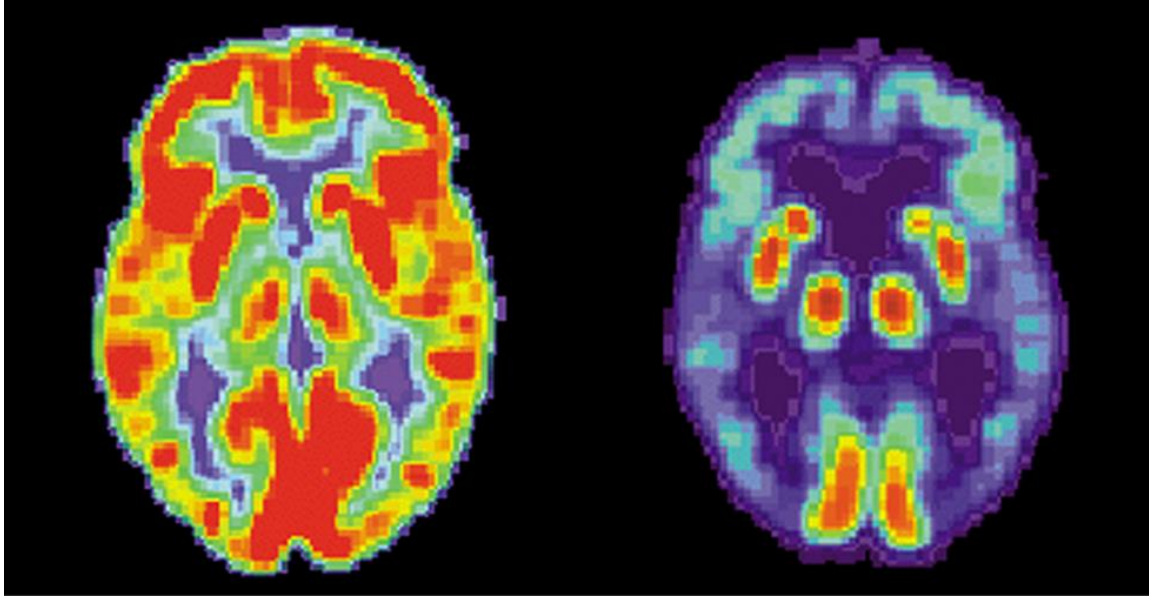


**الشكل 26.10** تستخدم الدكتورة توري راندال، أمينة متحف سان دييغو مان، الإشعاع النووي لدراسة مومياء طفل من البيرو عمره 500 عام. أصل هذا الإشعاع هو تحول نواة إلى أخرى.

### التطبيقات الطبية

الاستخدام الطبي للإشعاع النووي أمر شائع للغاية في المستشفيات والعيادات في وقتنا الراهن. أحد أهم استخدامات الإشعاع النووي هو تحديد موقع الأنسجة المريضة وفحصها. يتطلب هذا التطبيق دواء (عقار) خاص يُسمى **المستحضر الطبي الإشعاعي**.

تحتوي المستحضرات الطبية الإشعاعية على نظير مشع غير مستقر. عندما يدخل هذا الدواء الجسم، فإنه يميل إلى التركيز في المناطق الملتهبة في الجسم. (تذكر أن تفاعل الدواء مع الجسم لا يعتمد على ما إذا كان يتم استبدال نواة معينة بأحد نظائرها، لأن هذا التفاعل يتحدد بالتفاعلات الكيميائية). تستخدم أجهزة الكشف عن الإشعاع المستخدمة خارج الجسم إشعاعاً نووياً من النظائر المشعة لتحديد موقع الأنسجة المريضة. تُسمى المستحضرات الطبية الإشعاعية **بالعلامات المشعة** لأنها تسمح للأطباء بتتبع حركة الأدوية في الجسم. تستخدم العلامات المشعة لعدة أغراض، بما في ذلك تحديد الخلايا السرطانية في العظام وأورام المخ ومرض الزهايمر (**الشكل 27.10**). تُستخدم العلامات المشعة أيضاً لمراقبة وظيفة أعضاء الجسم، كندفق الدم ونشاط عضلة القلب وامتصاص اليود في الغدة الدرقية.



**الشكل 27.10** يتم إنتاج هذه الصور باستخدام الأدوية الطبية المشعة. تشير الألوان إلى نشاط استقلابي أو كيميائي حيوي (يشير اللون الأحمر إلى نشاط مرتفع والأزرق يشير إلى نشاط منخفض). يوضح الشكل الموجود على اليسار المخ الطبيعي للإنسان ويظهر الشكل الموجود على اليمين مخ شخص مصاب بمرض الزهايمر، حيث تشير صورة الدماغ الطبيعي إلى نشاط استقلابي أكبر بكثير (جزء أكبر من المناطق الحمراء والبرتقالية).

يبين **الجدول 2.10** بعض الاستخدامات التشخيصية الطبية للأدوية الإشعاعية، بما في ذلك النظائر ومستويات النشاط النموذجية (A). يستخدم أحد الاختبارات التشخيصية الشائعة اليود لتصوير الغدة الدرقية، حيث يتركز اليود في ذلك العضو. التشخيص النووي المشترك الآخر هو فحص التاليوم لنظام القلب والأوعية الدموية، والذي يكشف عن انسداد في الشرايين التاجية ويفحص نشاط القلب. يمكن استخدام ملح  $TlCl$  لأنه يتصرف مثل  $NaCl$  ويتبع الدم. لاحظ أن **الجدول 2.10** يبين العديد من الاستخدامات التشخيصية للنظير  $^{99m}Tc$ ، حيث يشير "m" إلى الحالة المستقرة لنواة التكنيتيوم. يستخدم هذا النظير في العديد من المركبات لتصوير الهيكل العظمي والقلب والرئتين والكلى. نحو 80٪ من كل المواد المشعة تستخدم  $^{99m}Tc$  لأنه ينتج شعاع غاما واحد، ويتعرف عليه بسهولة، وطاقته 0.142 MeV وعمرالنصف له قصير 6.0 ساعات، مما يقلل من التعرض للإشعاع.

**الجدول 2.10 الاستخدامات التشخيصية للمستحضرات الطبية الإشعاعية**

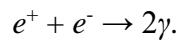
النشاط (mCi)، حيث: $1 \text{ mCi} = 3.7 \times 10^7 \text{ Bq}$ .	الإجراء، النظير المستخدم	النشاط (mCi)، حيث: $1 \text{ mCi} = 3.7 \times 10^7 \text{ Bq}$ .	الإجراء، النظير المستخدم
0.2	صورة تجمع الدم في القلب والأوعية الدموية $^{131}I$	7.5	الصورة الدماغية $^{99m}Tc$
2	$^{99m}Tc$	50	$^{15}O$ (PET)
0.1	صورة العظام $^{85}Sr$	7.5	الصورة الصدرية (صورة الرنتجين) $^{13}Xe$
10	$^{99m}Tc$	2	$^{99m}Tc$
3	تدفق الشرايين القلبية الوعائي $^{201}Tl$	0.05	صورة الغدة الدرقية $^{131}I$
7.5	$^{24}Na$	0.07	$^{123}I$
0.1	صورة الكلى $^{197}Hg$	0.1	صورة الكبد $^{198}Au$ (colloid)
1.5	$^{99m}Tc$	2	$^{99m}Tc$ (colloid)

أنتجت أجهزة الكشف الإشعاعي الأولى صوراً ثنائية الأبعاد، كالصور مأخوذة بالكاميرا. ومع ذلك، فإنه يمكن استخدام مجموعة دائرية من أجهزة الكشف التي يمكن تدويرها لإنتاج صور ثلاثية الأبعاد. تشبه هذه التقنية تلك المستخدمة في فحوصات التصوير المقطعي بالأشعة السينية (CT). يُطلق على أحد تطبيقات هذه التقنية بالتصوير المقطعي أحادي الفوتون (SPECT) (الشكل 28.10). الدقة المكانية لهذه التقنية نحو 1 cm.

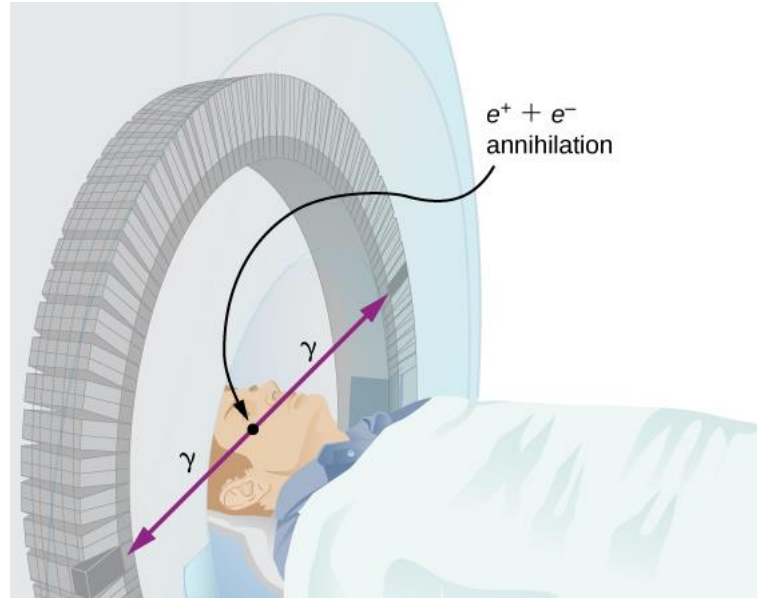


**الشكل 28.10** يستخدم جهاز SPECT مستحضرات طبية إشعاعية لإنتاج صورة لجسم الإنسان. يستخدم الجهاز فيزياء التحلل النووي والاصطدامات الإلكترونية.

يتم تحسين دقة وضوح الصورة باستخدام تقنية تُعرف باسم التصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني (PET). تستخدم هذه التقنية نظائر مشعة تتحلل عن طريق إشعاع بيتا  $\beta^+$ . عندما يصادف البوزيترون إلكترونًا، فإن هذه الجسيمات تفني بعضها البعض وتنتج فوتونين من أشعة غاما. ويمثل هذا التفاعل بالعلاقة:



هذان الفوتونان من أشعة غاما لهما الطاقة نفسها والتي تبلغ 0.511 MeV، ويتنافران مبتعدين (الشكل 29.10). هذا الأثر التحليلي سهل التحديد يمكن استخدامه لتحديد موقع النظائر المشعة. وكأمثلة على النظائر الباعثة لأشعة  $\beta^+$  والمستخدم في تقنية التصوير المقطعي البوزيتروني هي:  $^{11}\text{C}$ ،  $^{13}\text{N}$ ،  $^{15}\text{O}$ ، و  $^{18}\text{F}$ . تتميز النواة بقدرتها على العمل كعلامات لمركبات الجسم الطبيعية. دقتها التي تبلغ 0.5 cm أفضل من دقة SPECT.



**الشكل 29.10** يستخدم نظام PET فوتونين من أشعة غاما المتطابقين واللذين يتم إنتاجهما من خلال عملية فناء بوزيترون-إلكترون. هذان الشعاعان منبعثان في اتجاهين متعاكسين، بحيث يتم تحديد الخط الذي ينبعث على طول كل زوج من الأشعة.

تعد عملية التصوير باستخدام تقنية PET مفيدة بشكل خاص لفحص تشريح الدماغ ووظيفته. وعلى سبيل المثال، يمكن استخدام فحوصات PET لمراقبة استهلاك الدماغ للأوكسجين والماء، وتحديد مناطق انخفاض الاستقلاب (المرتبطة بمرض الزهايمر)، وتحديد الأجزاء المختلفة من الدماغ المسؤولة عن النشاط البصري والكلام والنشاط الحركي الدقيق.

• قم بزيارة الرابط التالي: (<https://openstaxcollege.org/l/21simmagresing>)

استعرض التصوير بالرنين المغناطيسي المبسط (MRI) لمعرفة فيما إذا كان المين في الصورة وربما أم لا! رأسك مليء بأجهزة الإرسال اللاسلكية الصغيرة (السبين النووي لنواة الهيدروجين في جزيئات الماء). في وحدة التصوير بالرنين المغناطيسي، يمكن جعل هذه الأجهزة الراديوية الصغيرة تبت مواقعها، لإعطاء صورة مفصلة عن الموجود داخل رأسك.

### الآثار البيولوجية (الحيوية)

يمكن أن يكون للإشعاع النووي آثار إيجابية وسلبية على الأنظمة الحيوية. ومع ذلك، يمكن استخدامه أيضاً لكشف السرطان وعلاجه. كيف نفهم هذه الآثار؟ للإجابة على هذا السؤال، أنظر إلى الجزيئات الموجودة داخل الخلايا، وخاصة جزيئات الحمض النووي.

تحتوي الخلايا على جزيئات DNA طويلة حلزونية تحتوي على شفرات كيميائية تحكم وظيفة الخلية وعملها. يمكن للإشعاع النووي أن يغير السمات البنوية لسلسلة الحمض النووي، مما يؤدي إلى تغييرات في الشفرة الوراثية. في الخلايا البشرية، يمكن أن يكون لدينا ما يصل إلى مليون حالة فردية من تلف الحمض النووي لكل خلية في اليوم الواحد. يحتوي الحمض النووي على رموز تتحقق فيما إذا كان الحمض النووي تالفًا ويمكنه إصلاح نفسه. هذه القدرة على إصلاح الحمض النووي هي أمر حيوي للحفاظ على سلامة الشفرة الوراثية وللعمل الطبيعي للكائن الحي بأكمله. يجب أن تكون نشطة باستمرار وسريعة الاستجابة. يعتمد معدل إصلاح الحمض النووي على عدة عوامل مثل نوع الخلية وعمرها. إذا أضر الإشعاع النووي بقدرة الخلية على إصلاح الحمض النووي، فإنه يمكن للخلية أن:

1. تتراجع إلى حالة السكون التي لا رجعة فيها (المعروفة باسم الشيوخوخة).

2. تنتحر (أو ما يعرف باسم موت الخلية المبرمج).

3. تتطور إلى انقسام خلايا غير المنظم، وربما يؤدي إلى الأورام والسرطانات.

يمكن أن يضر الإشعاع النووي جسم الإنسان بعدة طرق أخرى. على سبيل المثال، جرعات عالية من الإشعاع النووي يمكن أن تسبب الحروق حتى تساقط الشعر.

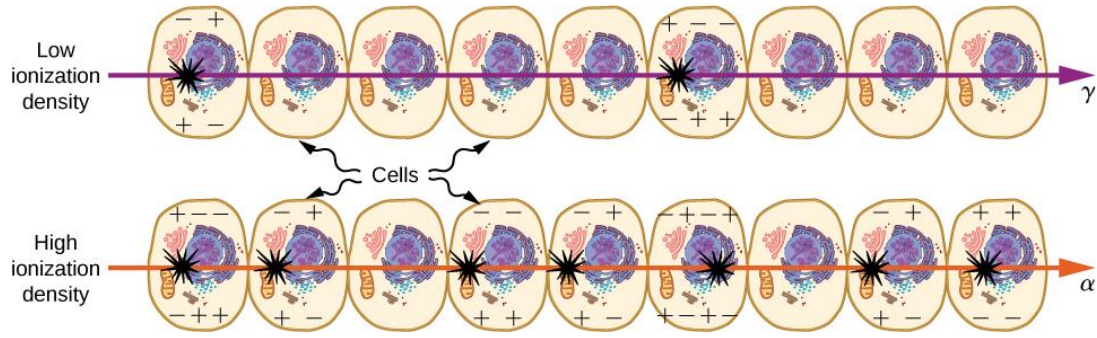
ويتم التعبير عن الآثار البيولوجية للإشعاع النووي من خلال العديد من الكميات الفيزيائية المختلفة وفي العديد من الواحدات المختلفة. هناك واحدة شائعة للتعبير عن التأثيرات الحيوية للإشعاع النووي هي راد أو واحدة الجرعة الإشعاعية. حيث واحد راد يساوي  $1/100 \text{ J}$  من الطاقة النووية المودعة لكل كيلوغرام من الأنسجة، وتكتب كما يلي:

$$1 \text{ rad} = 0.01 \text{ J/kg.}$$

على سبيل المثال، إذا تعرض شخص وزنه  $50.0 \text{ kg}$  للإشعاع النووي في جميع أنحاء جسده وقام بامتصاص  $1.00 \text{ J}$ ، فإن الجرعة الإشعاعية لكامل الجسم هي:

$$(1.00 \text{ J})/(50.0 \text{ kg}) = 0.0200 \text{ J/kg} = 2.00 \text{ rad.}$$

يدمر الإشعاع النووي الخلايا من خلال تأيينه للذرات في الخلايا أثناء مروره عبر الخلايا (الشكل 30.10). تعتمد تأثيرات الإشعاعات المؤينة على الجرعة مقدرة بالراد، ولكنها أيضاً تعتمد على نوع الإشعاع (ألفا، بيتا، غاما، أو الأشعة السينية) ونوع الأنسجة. وعلى سبيل المثال، إذا كان نطاق الإشعاع صغيراً، كما هو الحال بالنسبة لأشعة  $\alpha$ ، فإن التأين والضرر الناتج هو أكثر تركيزاً وإصلاح الكائن الحي المعرض له أكثر صعوبة. لحساب مثل هذه التأثيرات، نحدد الفعالية الحيوية النسبية (RBE). نبين في الجدول 3.10 قيم RBE للعينة لعدة أنواع من الإشعاع النووي المؤين.



**الشكل 30.10** تظهر الصورة التأين الناتج في الخلايا بواسطة أشعة  $\alpha$  و  $\gamma$ . نظراً للمدى القصير، فإن التأين والأضرار الناتجة عن أشعة  $\alpha$  أكثر تركيزاً وإصلاح الكائن الحي المعرض لها أكثر صعوبة. وهكذا، فإن RBE لأشعة ألفا أكبر من RBE لأشعة غاما، على الرغم من أنهما يعطيان الكمية نفسها من التأين عند الطاقة نفسها.

**الجدول 3.10 الفعالية الحيوية النسبية [1] قيم تقريبية يصعب تحديدها.**

RBE [1]	نوع الإشعاع وطاقته
1	الأشعة السينية
1	أشعة غاما
1	أشعة بيتا التي طاقتها أكبر من 32keV
1.7	أشعة بيتا التي طاقتها أصغر من 32keV
5-2	النترونات، من الحرارية حتى البطيئة (<20keV)
10 (للجسم) - 32 (للعيون)	النترونات، السريعة (1-10 MeV)
10 (للجسم) - 32 (للعيون)	البروتونات، (1-10 MeV)
20-10	أشعة ألفا من التحلل الإشعاعي
20-10	الأيونات الثقيلة الصادرة من المسرعات

تُسمى وحدة قياس الجرعة الإشعاعية الأكثر ارتباطاً بالتأثيرات في الأنسجة الحيوية بالريم (**roentgen equivalent man rem**) وتعرف على أنها الجرعة (مقدرة بالراد) مضروبة في الفعالية الحيوية النسبية (RBE). وبالتالي، إذا كانت الجرعة الجسدية الكاملة لشخص ما تبلغ 2.00 راد من أشعة غاما، فإن الجرعة مقدرة بالريم ستكون:  $2.00 \text{ rem} = (1 \text{ rad}) (2.00)$  لكامل الجسم. إذا كانت الجرعة الجسدية الكاملة لشخص ما تبلغ 2.00 راد من أشعة ألفا، فإن الجرعة مقدرة بالريم ستكون:  $40.0 \text{ rem} = (20 \text{ rad}) (2.00)$  لكامل الجسم. إن لأشعة ألفا تأثيراً أكبر بنحو 20 مرة على الشخص من أشعة غاما لها الطاقة المودعة نفسها. أي أن SI المعادل للريم، والمصطلح الأكثر اعتماداً، هو زيفرت، حيث إن:  $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$ .

قيم RBE الواردة في **الجدول 3.10** هي قيم تقريبية ولكنها تعكس فهم الأشعة النووية وتفاعلها مع الأنسجة الحية. على سبيل المثال، من المعروف أن النترونات تسبب ضرراً أكبر من أشعة غاما، مع أن كليهما غير مؤين وواسع النطاق، بسبب الإشعاع الثانوي. تُسمى أي جرعة أقل من 100 mSv (10 rem) بالجرعة المنخفضة، ومن 0.1 Sv إلى 1 Sv (10 to 100 rem) تُسمى بالجرعة المعتدلة، وأي شيء أكبر من 1 Sv (100 rem) يُسمى جرعة عالية. ومن الصعب تحديد فيما إذا كان الشخص قد تعرض لأقل من 10 mSv.

نبين في **الجدول 4.10** الآثار الحيوية لمستويات مختلفة من الإشعاع النووي على جسم الإنسان. إن أول دليل على تعرض شخص ما للإشعاع هو حدوث تغيير في تعداد الدم، وهذا ليس مفاجئاً لأن خلايا الدم هي أسرع خلايا تتكاثر في الجسم. في الجرعات العالية، يتم ملاحظة غثيان وفقدان الشعر، والذي قد يكون بسبب التداخل مع تكاثر الخلايا. الخلايا الموجودة في بطانة الجهاز الهضمي تتكاثر بسرعة، وتدميرها يسبب الغثيان. عندما يتباطأ نمو خلايا الشعر، تصبح بصيالات الشعر رفيعة وتنقطع. تسبب الجرعات الكبيرة موتاً كبيراً للخلايا في جميع الأجهزة، ولكن أقل الجرعات، التي تسبب الوفيات، تؤدي إلى ذلك عن طريق إضعاف الجهاز المناعي من خلال فقدان خلايا الدم البيضاء.



## الجدول 4.10 الآثار الفورية للإشعاع (على البالغين، عند تعرض كامل الجسم، والتعرض لمرة واحدة)

[1] اضرب بالرقم 100 للحصول على الجرعة مقدرة بالريم.

الجرعة مقدرة بالسيفرت Sv <sup>[1]</sup>	تأثير الجرعة
0-0.10	لا يوجد تأثير ملحوظ.
0.1-1	انخفاض طفيف إلى معتدل في تعداد خلايا الدم البيضاء.
0.5	العقم المؤقت، 0.35 للنساء، 0.50 (للرجال).
1-2	انخفاض كبير في تعداد خلايا الدم والغثيان والقيء. نادراً ما تكون قاتلة.
2-5	الغثيان والقيء وفقدان الشعر وتلف الدم الشديد والنزيف والوفاة.
4.5	قاتلة لنحو 50 ٪ من السكان في غضون 32 يوماً بعد التعرض إذا لم يتم علاجها.
5-20	أسوأ الآثار الناجمة عن خلل في الأمعاء الدقيقة وأنظمة الدم. احتمال النجاة محدود.
>20	قاتلة في غضون ساعات بسبب انهيار الجهاز العصبي المركزي.

## مصادر الإشعاع

يتعرض الإنسان أيضاً إلى العديد من مصادر الإشعاع النووي. نورد في **الجدول 5.10** ملخصاً لجرعات الإشعاع المتوسطة لمختلف المصادر حسب البلد. تصدر الأرض الإشعاع بسبب نظائر اليورانيوم والثوريوم والبوتاسيوم. تعتمد مستويات الإشعاع من هذه المصادر على الموقع ويمكن أن تختلف بعامل 10. تحتوي الأسمدة على نظائر البوتاسيوم واليورانيوم، والتي تھضمها في الطعام الذي نتناوله. النشاط الإشعاعي للأسمدة يفوق 3000 Bq/kg، مقارنة بنحو 66 Bq/kg فقط للكربون - 14.

## الجدول 5.10 مصادر الإشعاع الخلفية والجرعات المتوسطة

[1] اضرب بالرقم 100 للحصول على الجرعة مقدرة بوحدة (mrem/y).

الجرعة (mSv/y) <sup>[1]</sup>				المصدر
العالم	الولايات المتحدة	ألمانيا	استراليا	
0.39	0.30	0.28	0.30	الإشعاع الطبيعي - الأشعة الكونية الخارجية
1.48	0.30	0.40	0.40	التربة ومواد البناء
1.2	2.0	1.1	0.90	غاز الرادون
0.29	0.40	0.28	0.24	الإشعاع الطبيعي - العناصر الداخلية <sup>226</sup> Ra، <sup>14</sup> C، <sup>40</sup> K
0.40	0.53	0.90	0.80	الإشعاع الاصطناعية في الطب البشري وطب الأسنان
2.8	3.5	3.0	2.6	المجموع

الزيارات الطبية هي أيضاً مصدر للإشعاع النووي. نورد في **الجدول 6.10** عينة من جرعات الإشعاع النووي الشائعة. هذه الجرعات منخفضة عموماً ويمكن تخفيضها أكثر من خلال التقنيات المتطورة وأجهزة الكشف الأكثر حساسية. باستثناء محتمل للأشعة السينية الروتينية للأسنان، فإن الاستخدام الطبي للإشعاع النووي لا يتم إلا عندما تكون الفائدة المرجوة من هذه المخاطرة تستحق ذلك. الأشعة السينية المنبعثة عند تصوير الصدر تعطي أقل جرعات - نحو 0.1 mSv للأسنان المصابة، مع تناثر أقل من 5٪ في الأنسجة التي لا يتم تصويرها بشكل مباشر. وتتراوح إجراءات التصوير الأخرى بالأشعة السينية حيث تصل إلى نحو 10 mSv عند الفحص بالأشعة المقطعية، ونحو ميلي زيفرت (0.5 رم) لتصوير الأسنان بالأشعة السينية، وكلاهما يؤثر فقط على الأنسجة المصورة. الصور الطبية والمواد الطبية المشعة تعطي جرعات تتراوح من 1 mSv إلى 5 mSv، وعادة ما تكون موضعية.

## الجدول 6.10 الجرعات النموذجية المستلمة خلال اختبارات الأشعة السينية التشخيصية

الجرعة الفعالة (mSv)	الإجراء
0.02	تصوير الصدر
0.01	تصوير الأسنان
0.07	تصوير الجمجمة
0.02	تصوير الساق
0.40	تصوير الثدي
7.0	حقنة الباريوم الشرجية (تصوير القولون)
3.0	تصوير الجزء العلوي من الجهاز الهضمي
2.0	التصوير المقطعي للرأس
10.0	التصوير المقطعي للبطن

### المثال 12.10

#### احسب كتلة السيزيوم $^{137}\text{Cs}$ الناتجة من تشرنوبيل؟

في حادثة تشرنوبيل في أوكرانيا (في الاتحاد السوفيتي سابقاً) تعرض السكان المحيطون لكمية كبيرة من الإشعاع من خلال تحليل  $^{137}\text{Cs}$ . كان مستوى النشاط الإشعاعي الأولي  $A = 6.0 \text{ MCi}$ . أحسب إجمالي كتلة  $^{137}\text{C}$  المتحللة في هذا الحادث.

#### خطة الحل:

يمكن تحديد العدد الكلي للنوى  $N$ ، من فترة نصف العمر للسيزيوم  $^{137}\text{C}$  والتي تبلغ (30.2 سنة). ويمكن حساب الكتلة من  $N$  باستخدام مفهوم المول.

#### الحل:

بجمل المعادلة:  $A = \frac{0.693N}{t_{1/2}}$  من أجل قيمة  $N$  نجد:

$$N = \frac{A t_{1/2}}{0.693}$$

بإدخال القيم المعطاة نحصل على:

$$N = \frac{(6.0 \text{ MCi})(30.2 \text{ y})}{0.693}$$

للتحويل من كوري إلى بيكريل ومن سنوات إلى ثوان، نكتب:

$$N = \frac{(6.0 \times 10^6 \text{ Ci})(3.7 \times 10^{10} \text{ Bq/Ci})(30.2 \text{ y})(3.16 \times 10^7 \text{ s/y})}{0.693} = 3.1 \times 10^{26}$$


تحتوي كتلة مول واحد من النكليد  $^A\text{X}$  هي  $A$  غرام، ولذلك فإنّ مول واحد من  $^{137}\text{Cs}$  كتلته 137 g. يحتوي المول على  $6.02 \times 10^{23}$  نواة. وبالتالي فإن كتلة  $^{137}\text{Cs}$  الصادرة كانت:

$$m = \left( \frac{137 \text{ g}}{6.02 \times 10^{23}} \right) (3.1 \times 10^{26}) = 70 \times 10^3 \text{ g} = 70 \text{ kg}$$

#### ملاحظة:

كتلة  $^{137}\text{Cs}$  الصادرة في حادثة تشرنوبيل هي مادة صغيرة بالمقارنة مع كمية الوقود النموذجية المستخدمة في مفاعل نووي. ومع ذلك، تم نقل ما يقرب من 250 شخصاً إلى المستشفيات المحلية فور وقوع الحادث، وتم تشخيصهم على أنهم يعانون من متلازمة الإشعاع الحادة. فقد تعرضوا لجرعات إشعاعية خارجية تتراوح بين 1 Sv إلى 16 Sv. بالنظر إلى الآثار الحيوية المبينة في

**الجدول 4.10**، فإن هذه الجرعات خطيرة للغاية. ويقدر عدد القتلى في نهاية المطاف بنحو 4000 شخص، ويرجع ذلك أساساً إلى السرطان الناجم عن الإشعاع.

**7.10 تحقق من فهمك:**  ينتشر الإشعاع في جميع الاتجاهات من مصدره، كالإشعاع الكهرومغناطيسي الناتج عن المصباح الكهربائي. هل مفهوم النشاط الإشعاعي مشابهاً بشكل أكبر للقوة أم الشدة أم السطوع؟

## مراجعة الفصل العاشر

### الكلمات المفتاحية:

- النشاط : حجم معدل التحلل للنكليدات المشعة.
- أشعة ألفا ( $\alpha$ ): أحد أنواع الأشعة المنبعثة من نواة الذرة كجزئيات ألفا.
- تحلل ألفا: هو تحلل نووي إشعاعي مرتبط بانبعث جسيم ألفا.
- مضاد الإلكترون: مصطلح آخر للبيزيترونات.
- مضاد النترينو: هو جسيم مضاد لنترينو الإلكترون في تحلل  $\beta$ .
- الكتلة الذرية: هي الكتلة الكلية للبروتونات والنيوترونات والإلكترونات في ذرة واحدة.
- واحدة الكتلة الذرية: هي واحدة تستخدم للتعبير عن كتلة نواة واحدة، حيث:  $1u = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$ .
- النواة الذرية: مجموعة نوى متوضعة بشكل مترص في مركز الذرة.
- العدد الذري (الرقم الذري): هو عدد البروتونات في النواة.
- بيكريل (Bq): واحدة SI لمعدل تحلل المادة المشعة، وتساوي 1 تحلل/ثانية.
- أشعة بيتا ( $\beta$ ): هي أحد أنواع الأشعة المنبعثة من نواة الذرة كجزئيات بيتا.
- تحلل بيتا: هو تحلل نووي مشع مرتبط بانبعث جسيم بيتا.
- طاقة الترابط (BE): هي الطاقة اللازمة لكسر النواة إلى البروتونات والنيوترونات المكونة لها.
- طاقة الربط لكل نكلون (BEN): هي الطاقة اللازمة لإزالة النكلون من النواة.
- المفاعل الولود: هو مفاعل مصمم لصنع البلوتونيوم.
- تأريخ الكربون-14: هي طريقة لتحديد عمر الأنسجة التي كانت حية سابقاً باستخدام النسبة  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ .
- مخطط النكليدات: رسم بياني يشتمل على نوى مستقرة وغير مستقرة.
- الكتلة الحرجة: الحد الأدنى من الكتلة المطلوبة من نويد معين حتى يحدث الانشطار المستدام ذاتياً.
- الحالة الحرجة (الحرجية): هي حالة يصبح فيها التفاعل التسلسلي مكتفياً ذاتياً بسهولة.
- كوري (Ci): هي واحدة قياس معدل التحلل، أو نشاط 1 g من  $^{226}\text{Ra}$ ، أي ما يعادل  $3.70 \times 10^{10} \text{ Bq}$ .
- النواة الابنة: هي النواة الناتجة عن تحلل النواة الأصل.
- التحلل: هي العملية التي تفقد من خلالها النواة الذرية الفردية للذرة غير المستقرة الكتلة والطاقة عن طريق إصدار جزئيات مؤينة.
- ثابت التحلل: كمية متناسبة عكسا مع نصف العمر وتستخدم في علاقة حساب عدد النوى كتابع للزمن.
- سلسلة التحلل: سلسلة من التحلل النووي تنتهي بنواة مستقرة.
- الانشطار: هو انقسام النواة.
- أشعة غاما ( $\gamma$ ): هي أحد أنواع الأشعة المنبعثة من نواة الذرة كجزئيات غاما.
- تحلل غاما: هو تحلل نووي إشعاعي مرتبط بانبعث أشعة غاما.
- عمر النصف: هو الزمن اللازم لتحلل نصف النوى الأصلية (أو حتى يبقى نصف النوى الأصلية).
- الجرعة العالية: هي جرعة من الإشعاع قيمتها أكبر من 1 Sv (100 rem).
- النظائر: هي نوى لها نفس عدد البروتونات ولكن لها أعداد مختلفة من النيوترونات.

العمر: هو متوسط الوقت الذي توجد فيه النواة قبل أن تتحلل.

نموذج قطرة السائل: نموذج النواة (فقط لفهم بعض معالمه) التي يسلك فيها النكلونات سلوك ذرات في قطرة.

الجرعة المنخفضة: هي جرعة من الإشعاع قيمتها أقل من 100 mSv (10 rem).

نقص الكتلة: الفرق بين كتلة النواة والكتلة الكلية للنكلونات المكونة لها.

رقم الكتلة (الرقم الكتلي): هو عدد النكلونات في النواة.

الجرعة المعتدلة: هي جرعة من الإشعاع تتراوح قيمتها بين 0.1 Sv إلى 1 Sv (10 إلى 100 rem).

التريتيو: جسيم أولي دون ذري لا يحتوي على شحنة كهربائية صافية.

عدد النيوترونات: عدد النيوترونات في النواة.

الاندماج النووي: عملية الجمع بين نوى خفيفة لصنع نوى أثقل.

مفاعل الاندماج النووي: هو مفاعل نووي يستخدم سلسلة الاندماج لإنتاج الطاقة.

نكلونات: البروتونات والنيوترونات وحدث داخل نواة الذرة.

الاصطناع النووي: هي عملية الاندماج التي يعتقد أن جميع العناصر على الأرض قد تم إنشاؤها بها.

نكليد: النواة.

النواة الأم: هي النواة الأصلية قبل التحلل.

بوزيترون: هو إلكترون ذو شحنة موجبة.

التصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني (PET): تقنية التصوير المقطعي التي تستخدم بواغث  $\beta^+$  وتكشف شعاعي غاما المتنافيين، مما يساعد في تحديد موقع المصدر.

سلسلة بروتون - بروتون: هي تفاعلات مجتمعة تدمج نوى الهيدروجين لإنتاج نوى الهليوم.

وحدة الجرعة الإشعاعية (rad): هي الطاقة المؤينة المودعة لكل كيلوغرام من الأنسجة.

التأريخ الإشعاعي: هو تطبيق التحلل الإشعاعي الذي يحدد فيه عمر المادة بكمية النشاط الإشعاعي الذي يحدث من نوع معين.

قانون التحلل الإشعاعي: يصف النقص الأسي للنوى الأم في عينة مشعة.

العلامات المشعة: عقاقير خاصة (مستحضرات طبية إشعاعية) تسمح للأطباء بتتبع حركة العقاقير (الأدوية) الأخرى في الجسم.

النشاط الإشعاعي: الانبعاث التلقائي للإشعاع من النوى.

الصيدلية الإشعاعية: مركب يستخدم للتصوير الطبي.

نصف قطر النواة: نصف قطر النواة يعرف بأنه  $r = r_0 A^{1/3}$ .

الفعالية البيولوجية النسبية (RBE): هو الرقم الذي يعبر عن الكمية النسبية للضرر الذي يمكن أن تسببه كمية ثابتة من الإشعاعات المؤينة من نوع معين على الأنسجة الحية.

الريم (rem): وحدة الجرعة الأكثر ارتباطاً بالآثار في الأنسجة الحية.

السيفرت (Sv): وحدة دولية تكافئ الريم.

التصوير المقطعي بانبعث الفوتون الأحادي (SPECT): هو التصوير المقطعي الذي يتم باستخدام المواد المشعة التي تبعث أشعة غاما.

القوة النووية القوية: القوة التي تربط النكلونات معاً في النواة.

عنصر عبر اليورانيوم: عنصر يقع وراء اليورانيوم في الجدول الدوري.

### المعادلات الرئيسية

$A = Z + N$	رقم الكتلة الذرية
${}^A_Z X$	الصيغة القياسية للتعبير عن النظير
$r = r_0 A^{1/3}$	نصف القطر النووي، حيث $r_0$ هو نصف قطر بروتون واحد
$\Delta m = Zm_p + (A-Z)m_n - m_{nuc}$	نقص الكتلة
$E = (\Delta m)c^2$	طاقة الترابط
$BEN = \frac{E_b}{A}$	طاقة ملزمة لكل نكلون
$-\frac{dN}{dt} = \lambda N$	معدل التحلل الإشعاعي
$N = N_0 e^{-\lambda t}$	قانون التحلل الإشعاعي
$\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}}$	ثابت التحلل
$\bar{T} = \frac{1}{\lambda}$	عمر المادة
$A = A_0 e^{-\lambda t}$	نشاط المادة المشعة
$\ln A = -\lambda t + \ln A_0$	نشاط المادة المشعة (الصيغة الخطية)
${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} X + {}^4_2 \text{He}$	تحلل ألفا
${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} X + {}^0_{-1} e + \bar{\nu}$	تحلل بيتا
${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} X + {}^0_{+1} e + \nu$	انبعاث البوزيترون
${}^A_Z X^* \rightarrow {}^A_Z X + \gamma$	تحلل غاما

### ملخص الفصل

#### 1.10 خصائص النوى

- تتكون النواة الذرية من البروتونات والنترونات.
- يُعطى عدد البروتونات في النواة من خلال العدد الذري  $Z$ . عدد النترونات في النواة هو  $N$ . وعدد النويات (النكلونات) هو رقم الكتلة  $A$ .
- النوى الذرية التي لها العدد الذري نفسه  $Z$ ، وأعداد نترونها مختلفة  $N$ ، هي نظائر للعنصر نفسه.
- الكتلة الذرية لعنصر ما هي المتوسط المرجح لكتل نظائره.

#### 2.10 طاقة الترابط النووي

- النقص الكتلي للنواة هو الفرق بين الكتلة الكلية للنواة ومجموع كتل جميع النكلونات المكونة لها.
- طاقة الترابط (BE) للنواة تساوي كمية الطاقة المنبعثة عند تكوين النواة، أو نقص الكتلة مضروباً بمربع سرعة الضوء.
- يشير الرسم البياني لطاقة الترابط لكل نكلون (BEN) بدلالة الرقم الذري  $A$  إلى أن النوى سواءً كانت مقسمة أو مجتمعة فإنها تُطلق كمية هائلة من الطاقة.

- طاقة الترابط للنكولون في النواة تشبه طاقة التأين للإلكترون في الذرة.

### 3.10 التحلل الإشعاعي

- عند تحلل مادة مشعة، إذا كان ثابت التحلل ( $\lambda$ ) كبيراً، يكون عمر النصف صغيراً، والعكس صحيح.
- يستخدم قانون التحلل الإشعاعي،  $N = N_0 e^{-\lambda t}$  خصائص المواد المشعة لتقدير عمر المواد.
- يحتوي الكربون المشع على نفس كيمياء الكربون المستقر، لذلك فإنه يختلط مع الغلاف الجوي ويصبح في النهاية جزءاً من كل كائن حي. وبمقارنة وفرة  $^{14}\text{C}$  في قطعة أثرية مع الوفرة الطبيعية في الأنسجة الحية، فمن الممكن تحديد عمر القطعة الأثرية.

### 4.10 التفاعلات النووية

- الأنواع الثلاثة للإشعاع النووي هي أشعة ألفا ( $\alpha$ ) وأشعة بيتا ( $\beta$ ) وأشعة غاما ( $\gamma$ ).
- يتمثل تحلل  $\alpha$  رمزياً بالتفاعل التالي:  ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\text{X} + {}^4_2\text{He}$ . وهناك نوعان من تحلل  $\beta$ : حيث ينبعث من النواة إما إلكترون ( $\beta^-$ ) (أو بوزيترون ( $\beta^+$ )). ويمثل تحلل  $\gamma$  رمزياً بالتفاعل التالي:  ${}^A_Z\text{X}^* \rightarrow {}^A_Z\text{X} + \gamma$ .
- عندما تتحلل نواة ثقيلة إلى نواة أخف، يمكن للنواة الابنة الأخف أن تصبح النواة الأم للتحلل التالي، وهكذا، منتجة بذلك سلسلة التحلل.

### 5.10 الانشطار

- الانشطار النووي هو عملية يكون فيها مجموع كتل النوى الناتجة أقل من كتل المواد المتفاعلة.
- يمكن فهم تغيرات الطاقة في تفاعل الانشطار النووي بدلالة منحنى طاقة الترابط لكل نكولون.
- يُطلق اسم عملية التوليد على إنتاج نظائر جديدة أو مختلفة عن طريق التحول النووي، والمفاعلات المصممة لهذا الغرض تُسمى المفاعلات الولودة.

### 6.10 اندماج النووي

- الاندماج النووي هو تفاعل يتم فيه الجمع بين نواتين لتشكيل نواة أكبر؛ ويتم إطلاق الطاقة عندما يتم دمج النوى الخفيفة لتشكيل نوى متوسطة الكتلة.
- كمية الطاقة المنبعثة من تفاعل الاندماج تُعرف باسم القيمة  $Q$ .
- يُفسر الاندماج النووي التفاعل بين الدتريوم والتريتيوم الذي ينتج عنه القنبلة الانشطارية (أو الهدروجينية)، كما يفسر الاندماج أيضاً إنتاج الطاقة في الشمس وعملية الاصطناع النووي وإنشاء العناصر الثقيلة.

### 7.10 التطبيقات الطبية والآثار البيولوجية للإشعاع النووي

- تستخدم التقانة النووية في الطب لتحديد ودراسة الأنسجة المريضة باستخدام أدوية خاصة تُسمى المستحضرات الطبية المشعة.
- تُستخدم العلامات المشعة لتحديد الخلايا السرطانية في العظام وأورام المخ ومرض الزهايمر، ومراقبة عمل أعضاء الجسم، كتدفق الدم ونشاط عضلات القلب وامتصاص اليود في الغدة الدرقية.
- الآثار البيولوجية للإشعاع المؤين ناتجة عن تأثيرين له على الخلايا: التداخل مع تكاثر الخلايا وتدمير وظيفة الخلية.
- تشمل المصادر الشائعة للإشعاع تلك المنبعثة من الأرض بسبب نظائر اليورانيوم والثوريوم والبوتاسيوم. كما تشمل أيضاً الإشعاع الطبيعي الناجم عن الأشعة الكونية والترربة ومواد البناء والمصادر الاصطناعية من أجهزة الفحص والشخيص في الطب البشري وطب الأسنان.
- يُعبر عن التأثيرات البيولوجية للإشعاع النووي بالعديد من الكميات الفيزيائية المختلفة ومقدرة بمختلف الواحدات، بما في ذلك واحدة الراد أو واحدة الجرعة الإشعاعية.

## أسئلة نظرية

### 1.10 خصائص النوى

1. حدد بوضوح الفرق بين المصطلحات التالية: النيوترون، النيكلون، النواة، النيكليد.
2. ما هي النظائر؟ وماذا يكون لنظائر ذرة ما الخواص الكيميائية نفسها؟

### 2.10 طاقة الترابط النووي

3. اشرح لماذا يجب أن يكون للنظام المرتبط كتلة أقل من كتل مكوناته. لماذا لا يلاحظ هذا الشيء في النظم التقليدية، كما هو الحال في مبنى مصنوع من الطوب، مثلاً؟
4. لماذا يكون عدد النيوترونات أكبر من عدد البروتونات في النوى المستقرة التي لها  $A$  أكبر من نحو 40؟ لماذا يكون هذا التأثير واضحاً للنوى الأثقل؟
5. للحصول على قيمة أكثر دقة لطاقة الترابط لكل نكلون، من المهم أن تؤخذ في الحسبان القوى بين النيكلونات على سطح النواة. هل هذه التأثيرات السطحية ستزيد أم تقلل من القيمة المقدرة للمقدار  $BEN$ ؟

### 3.10 التحلل الإشعاعي

6. كيف يرتبط معدل النشاط الأولي للمادة المشعة بنصف عمرها؟
7. بالنسبة لتأريخ الكربون الموصوف في هذا الفصل، ما هو الافتراض المهم الذي يتم وضعه حول التباين الزمني في شدة الأشعة الكونية؟

### 4.10 التفاعلات النووية

8. ما هو الفرق الرئيس وشبه الرئيس بين تحلل بيتا ( $\beta^-$ ) وتحلل ألفا؟
9. ما هو الفرق بين أشعة غاما والأشعة السينية المميزة  $X$  والضوء المرئي؟
10. ما هي خصائص النشاط الإشعاعي التي تظهر أنه نووي في الأصل وليس ذرياً؟
11. بالنظر إلى الشكل 12.10. إذا تم استبدال الحقل المغناطيسي بحقل كهربائي وكان متجهها باتجاه الصفحة، في أي اتجاه سينعطف كل من  $\alpha$  و  $\beta^+$  و  $\gamma$ ؟
12. ما هو السبب في أن نواة الأرض منصهرة؟

### 5.10 الانشطار

13. هل يجب أن تُسمى القنبلة الذرية بالقنبلة النووية؟
14. لماذا يحدث التفاعل التسلسلي أثناء تفاعل الانشطار؟
15. ما هو وجه الشبه بين النواة الذرية وقطرة السائل؟

### 6.10 الاندماج النووي

16. اشرح الفرق بين الانشطار النووي والاندماج النووي.
17. لماذا تتولد طاقة عند اندماج النوى الخفيفة إلى نوى أثقل؟

### 7.10 التطبيقات الطبية والآثار البيولوجية للإشعاع النووي

18. لماذا يُعد فحص PET أكثر دقة من فحص SPECT؟
19. النظائر التي تصدر أشعة  $\alpha$  تُعد آمنة نسبياً خارج الجسم و لكنها خطيرة جداً بداخله. اشرح السبب.



20. يمكن للإشعاع المؤين أن يضعف قدرة الخلية على إصلاح الحمض النووي. ما هي الطرق الثلاث التي يمكن للخلية أن تستجيب بها؟

## مسائل:

### 1.10 خصائص النوى

21. أوجد الأعداد الذرية والأرقام الكتلية وأعداد النيوترونات لكلٍ من:  
(a)  $^{58}_{29}\text{Cu}$  و (b)  $^{24}_{11}\text{Na}$  و (c)  $^{210}_{84}\text{Po}$  و (d)  $^{45}_{20}\text{Ca}$  و (e)  $^{206}_{82}\text{Pb}$ .
22. الفضة لها نظيران مستقران:  $^{107}_{47}\text{Ag}$  (كتلتها الذرية 106.905095 g/mol ووفرتها 51.83%) و  $^{109}_{47}\text{Ag}$  (كتلتها الذرية 108.904754 g/mol ووفرتها 48.17%)، أوجد الكتلة الذرية لعنصر الفضة.
23. يمكن التعبير عن كتلة النواة ( $M$ ) ونصف قطرها ( $r$ ) بدلالة الرقم الكتلي  $A$ . (a) بين أن كثافة النواة مستقلة عن  $A$ . (b) احسب كثافة نواة الذهب (Au). قارن إجابتك بكثافة الحديد (Fe).
24. جسيم كتلته 10 u. إذا تم تحويل هذه الكتلة بالكامل إلى طاقة، فما هي كمية الطاقة التي يتم إطلاقها؟ عبر عن إجابتك بوحدة (MeV). (تذكر بأن  $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ ).
25. أوجد طول ظل مكعب كتلته 1.0 kg وكثافته هي كثافة المادة النووية.
26. التفاصيل التي يمكن ملاحظتها باستخدام مسبار محدودة بطول موجته. احسب طاقة الجسيم الذي يبلغ طوله الموجي  $1 \times 10^{-16} \text{ m}$  وهو صغير بما يكفي لكشف تفاصيل حجمها نحو عُشر حجم النكلون.

### 2.10 طاقة الترابط النووي

27. ما مقدار الطاقة التي ستصدر إذا تم الجمع بين ست ذرات هيدروجين وست نوترونات لتشكيل  $^{12}_6\text{C}$ ؟
28. أوجد النقص الكتلي وطاقة الترابط لنواة الهليوم ذات 4 نكلونات.
29.  $^{56}\text{Fe}$  هو من أكثر النكليدات المترابطة بإحكام. وتشكل أكثر من 90% من الحديد الطبيعي. لاحظ أن  $^{56}\text{Fe}$  له أعداد متساوية من البروتونات والنيوترونات. احسب طاقة الترابط لكل نكلون في  $^{56}\text{Fe}$  وقارنها بالقيمة التقريبية التي تم الحصول عليها من الرسم البياني في الشكل 7.10

30.  $^{209}\text{Bi}$  هو أثقل نكليد مستقر، و (BEN) له منخفضة مقارنة بالنكليدات متوسطة الكتلة. احسب BEN لهذه النواة وقارنها مع القيمة التقريبية التي تم الحصول عليها من الرسم البياني في الشكل 7.10.
31. (a) احسب BEN للـ  $^{235}\text{U}$ ، وهو الأندر من بين نظيري اليورانيوم الأكثر شيوعاً؛ (b) احسب BEN لليورانيوم  $^{238}\text{U}$ . (معظم اليورانيوم الموجود هو  $^{238}\text{U}$ ).

32. حقيقة أن ذروة BEN عند  $A = 60$  تقريباً تعني أن نطاق القوة النووية القوية تبلغ نحو قطر هذه النواة.  
(a) احسب قطر النواة التي لها  $A = 60$ .  
(b) قارن بين قيم BEN لكل من:  $^{90}\text{Sr}$  و  $^{58}\text{Ni}$ ، الأول هو واحد من النكليدات الأكثر ترابطاً بإحكام، في حين أن الثاني أكبر وأقل ترابطاً.

### 3.10 التحلل الإشعاعي

33. يتم الحصول على عينة من المواد المشعة من صخرة قديمة للغاية. يُعطي منحنى  $\ln A$  بدلالة  $t$  ميلاً قيمته  $10^{-9} \text{ s}^{-1}$  (انظر الشكل 10.10 (b)) ما هو نصف العمر لهذه المادة؟
34. أثبت أن:

$$\bar{T} = \frac{1}{\lambda}$$

**35.** عمر النصف للسترونسيوم  $^{91}\text{Sr}$  هو 9.70 ساعة. (أ) أوجد ثابت التحلل (ب) احسب نشاط عينة أولية كتلتها 1 g بعد 15 ساعة.

**36.** عينة من الكربون الخالص  $^{14}\text{C}$  ( $T_{1/2} = 5730 \text{ y}$ ) نشاطها  $1.0 \mu\text{Ci}$ . ما هي كتلة العينة؟

**37.** تحتوي عينة مشعة مبدئياً على  $2.40 \times 10^{-2}$  مول من مادة مشعة يبلغ نصف عمرها 6.00 ساعات. ما هو عدد مولات المواد المشعة التي تبقى بعد 6.00 ساعات؟ بعد 12.0 ساعة؟ بعد 36.0 ساعة؟

**38.** تم الكشف عن نيران قديمة في معسكر خلال الحفريات الأثرية. حيث تم العثور على فحم يحتوي على أقل من 1/1000 الكمية العادية من  $^{14}\text{C}$ . قَدِّر الحد الأدنى لعمر الفحم، مع ملاحظة أن  $2^{10} = 1024$ .

**39.** احسب النشاط  $R$ ، مقدراً بالكوري لكتلة 1.00 g من  $^{226}\text{Ra}$ . (ب) اشرح لماذا لا تكون إجابتك هي 1.00 كوري تماماً، باعتبار أنه من المفترض أن الكوري في الأصل هو بالضبط نشاط 1.00 g من الراديوم.

**40.** يتكون اليورانيوم الطبيعي من  $^{235}\text{U}$  (نسبة وفرته المئوية هي 0.7200%)،  $\lambda = 3.12 \times 10^{-17} \text{ /s}$ ، و  $^{238}\text{U}$  (نسبة وفرته المئوية هي 99.27%)،  $\lambda = 4.92 \times 10^{-18} \text{ /s}$ . ما هي قيم الوفرة المئوية لكل من  $^{235}\text{U}$  و  $^{238}\text{U}$  عندما تشكلت الأرض أي من منذ نحو 4.5  $10^9 \times$  سنة؟

**41.** إحدى طائرات الحرب العالمية الثانية كانت تمتلك أدوات ذات أرقام مطلية بالراديوم. تبلغ قيمة نشاط أي من هذه الأدوات  $1.0 \times 10^5 \text{ Bq}$  عندما تكون جديدة. (a) ما هي كتلة  $^{226}\text{Ra}$  التي كانت موجودة؟ (ب) بعد بضع سنوات، تعرضت الطبقة الفوسفورية الموجودة على الأرقام للتلف الكيميائي، دون انبعاث الراديوم. ما هو نشاط هذه الأرقام بعد 57.0 سنة من صنعها؟

**42.** يستخدم مصدر  $^{210}\text{Po}$  في مختبر فيزيائي مكتوب عليه أن نشاطه يبلغ  $1.0 \mu\text{Ci}$  في اليوم الذي تم صنعه فيه. يقيس أحد الطلاب النشاط الإشعاعي لهذا المصدر من خلال عداد جيجر ويشاهد 1500 عدد في الدقيقة. فتلاحظ أن المصدر تم صنعه قبل 120 يوماً من إجراء القياس. ما هو الجزء المتحلل الذي يشاهده الطالب باستخدام الجهاز؟

**43.** تُطلق الطائرات على الدبابات قذائف خارقة للدروع مزودة بقلب يورانيوم منضب. (كثافة اليورانيوم العالية هو ما يجعلها فعالة). ويُسمى اليورانيوم المنضب بهذا الاسم لأنه تم إزالة  $^{235}\text{U}$  منه لاستخدامه في المفاعل ولأنه  $^{238}\text{U}$  نقي تقريباً. اليورانيوم المنضب يُسمى خطأً باليورانيوم غير المشع. ولإثبات أن هذا الاعتقاد خاطئ:

(a) احسب نشاط 60.0 g من  $^{238}\text{U}$  النقي. (ب) احسب نشاط 60.0 g من اليورانيوم الطبيعي، بإهمال  $^{234}\text{U}$  وجميع النكليدات البينات.

#### 4.10 التفاعلات النووية

**44.** يخضع  $^{249}\text{Cf}$  لتحلل ألفا. (a) اكتب معادلة التفاعل. (ب) أوجد الطاقة المنبعثة في التحلل.

**45.** (a) احسب الطاقة المنبعثة من تحلل ألفا  $^{238}\text{U}$ . (ب) ما هو الجزء من كتلة نواة واحدة من  $^{238}\text{U}$  التي دُمرت في التحلل؟ كتلة  $^{234}\text{Th}$  هي  $234.043593 \text{ u}$ . (c) على الرغم من أن فقدان الكتلة الكسرية كبير بالنسبة لنواة واحدة، إلا أنه يصعب مراقبة عينة كبيرة كاملة من اليورانيوم. علل ذلك؟

**46.** تتفاعل جسيمات  $\beta^-$  المنبعثة عند تحلل  $^3\text{H}$  (التريتيوم) مع المادة لتشكل ضوءاً في إشارة الخروج (التي تضيء الظلام). إن إشارة كهذه في وقت الصنع تحتوي على 15.0 Ci من  $^3\text{H}$ . (a) ما هي كتلة التريتيوم؟ (ب) ما هو نشاطها بعد مرور 5 سنوات على صنعها؟

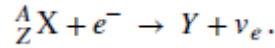
**47.** (a) اكتب معادلة تحلل  $\beta^-$  بالكامل  $^{90}\text{Sr}$ ، منتج النفايات الرئيس للمفاعلات النووية. (ب) أوجد الطاقة المنبعثة في التحلل.

48. اكتب معادلة تفاعل تحلل  $\beta^-$  النووي الذي ينتج نواة  $^{90}\text{Y}$ . (تلميح: النويد الأم هو منتج رئيس للنفايات في المفاعلات النووية وخصائصه الكيميائية مشابهة للكالسيوم، حيث يتركز في العظام إذا تم بلعه).

49. اكتب معادلة التحلل الكاملة بالترميز الكامل من الشكل:  ${}^A_Z\text{X}_N$  لتحلل بيتا ( $\beta^-$ ) للترينيوم  ${}^3\text{H}$ ، وهو نظير مصنوع من الهدروجين المستخدم في بعض شاشات الساعات الرقمية، وقد صُنع في المقام الأول للاستخدام في القنابل الهدروجينية.

50. إذا تمكنت قطعة من الرصاص بشحنة 1.50 cm من امتصاص 90.0% من الأشعة من مصدر مشع، فكم تبلغ سماكة القطعة الرصاصية مقدرة بالسنتيمتر والقادرة على امتصاص كل الأشعة باستثناء 0.100%؟

51. يمكن أن يتفاعل الإلكترون مع النواة من خلال عملية تحلل بيتا:



(a) اكتب معادلة التفاعل الكاملة لالتقاط الإلكترون بواسطة  ${}^7\text{Be}$ .

(b) احسب الطاقة المنبعثة.

52. (a) اكتب معادلة التفاعل الكاملة لالتقاط الإلكترون بواسطة  ${}^{15}\text{O}$ . (b) احسب الطاقة المنبعثة.

53. لوحظ وضع تحلل نادر انبعثت فيه نواة  ${}^{14}\text{C}$  من  ${}^{222}\text{Ra}$ . (a) معادلة التحلل هي:  ${}^{222}\text{Ra} \rightarrow {}^A\text{X} + {}^{14}\text{C}$ . حدد النواة  ${}^A\text{X}$ . (b) أوجد الطاقة المنبعثة في التحلل. كتلة  ${}^{222}\text{Ra}$  هي 222.015353 u.

### 5.10 الانشطار

54. يتم إيقاف تشغيل مفاعل كبير للطاقة يعمل منذ عدة أشهر، لكن النشاط المتبقي في النواة لا يزال ينتج 150 MW من الطاقة. إذا كان متوسط الطاقة لكل تحلل من منتجات الانشطار هو 1.00 MeV، فما هو النشاط الأساس؟

55. (a) احسب الطاقة المنطلقة في الانشطار الناجم عن الترونات:  $n + {}^{238}\text{U} \rightarrow {}^{96}\text{Sr} + {}^{140}\text{Xe} + 3n$ . إذا علمت أن:  $m({}^{140}\text{Xe}) = 139.92164$  و  $m({}^{96}\text{Sr}) = 95.921750$  u.

(b) هذه النتيجة تزيد بنحو 6 MeV عن نتيجة الانشطار العفوي. لماذا؟

(c) تأكد من أن العدد الإجمالي للنكلونات والشحنة الكلية في هذا التفاعل مصانان.

56. (a) احسب الطاقة المنطلقة في الانشطار الناجم عن الترونات:  $n + {}^{235}\text{U} \rightarrow {}^{92}\text{Kr} + {}^{142}\text{Ba} + 2n$ . إذا علمت أن:  $m({}^{92}\text{Kr}) = 91.926269$  u و  $m({}^{142}\text{Ba}) = 141.916361$  u. (b) تأكد من أن العدد الكلي للنكلونات والشحنة الكلية في هذا التفاعل مصانان.

57. يبلغ ناتج الطاقة الكهربائية لمفاعل نووي كبير 900 MW. تبلغ كفاءة أو مردود المفاعل في تحويل الطاقة النووية إلى طاقة كهربائية 35.0%.

(a) ما هو ناتج الطاقة النووية الحرارية بوحدة MW؟

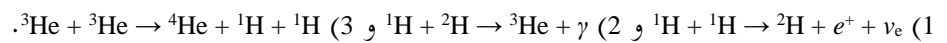
(b) ما هو عدد انشطارات نوى  ${}^{235}\text{U}$  في كل ثانية، بفرض أن الانشطار المتوسط ينتج 200 MeV؟

(c) ما هي كتلة  ${}^{235}\text{U}$  التي تتعرض للانشطار في سنة واحدة من تشغيل المفاعل بالطاقة الكاملة؟

58. أوجد الطاقة الكلية المنبعثة إذا تعرض 1.00 kg من  ${}^{235}_{92}\text{U}$  للانشطار.

### 6.10 الاندماج النووي

59. تحقق من مصونية العدد الإجمالي للنكلونات والشحنة الكلية لكل من تفاعلات الاندماج التالية في سلسلة بروتون-بروتون.



(اكتب قائمة بكل من الكميات المصانة قبل التفاعلات وبعدها).

60. احسب ناتج الطاقة في كل من تفاعلات الاندماج في سلسلة بروتون-بروتون، وتحقق من القيم المحسوبة في المسألة السابقة.

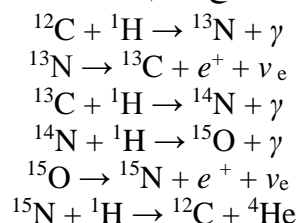
61. أثبت أن إجمالي الطاقة المنبعثة في سلسلة بروتون-بروتون هي 26.7 MeV، باعتبار التأثير الكلي في:

62. تفاعلا الاندماج المذكوران في النص هما:  $n + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$  و  $n + {}^1\text{H} \rightarrow {}^2\text{H} + \gamma$ . كلا التفاعلين يُطلقان طاقة، ولكن

التفاعل الثاني ينتج عنه كمية أكبر من الوقود. تأكد من أن الطاقات المنتجة في التفاعلات هي: 20.58 MeV و 2.22 MeV على التوالي. حدد أي من النكليدات الناتجة مترابط بإحكام أكثر من الآخر  ${}^4\text{He}$  أم  ${}^2\text{H}$ .

63. الطاقة الناتجة من الشمس هي  $4 \times 10^{26} \text{ W}$ . (a) إذا كانت سلسلة بروتون - بروتون هي مايقدم 90٪ من هذه الطاقة، فكم عدد البروتونات المستهلكة في الثانية؟ (b) كم عدد النيوترونات في الثانية التي يجب أن يكون لكل متر مربع على سطح الأرض من هذه العملية؟

64. مجموعة أخرى من التفاعلات التي تدمج الهيدروجين مع الهليوم في الشمس وخاصة في النجوم الأكثر حرارة تُسمى دورة CNO:



تُعد هذه العملية هي "دورة" لأن  ${}^{12}\text{C}$  يظهر في بداية هذه التفاعلات ونهايتها. اكتب التأثير الكلي لهذه الدورة (كما تم لسلسلة بروتون-بروتون في:  $2e^- + 4{}^1\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + 2\nu_e + 6\gamma$ ). بفرض أن البوزيترونات تُفني الإلكترونات لتشكيل كمية أكبر من أشعة غاما.

65. (a) احسب الطاقة المنبعثة من اندماج خليط من 1.00 kg من الدتريوم والتريتيوم، الذي ينتج الهليوم. عدد نوى الديتريوم والتريتيوم في الخليط متساوية. (b) إذا حدثت هذه العملية بشكل مستمر على مدار عام، فما هو متوسط ناتج الطاقة؟

### 7.10 التطبيقات الطبية والآثار البيولوجية للإشعاع النووي

66. ما هي الجرعة مقدرة بوحدة mSv لكل من القيم التالية: (a) 0.1 Gy من الأشعة السينية؟ (b) 2.5 mGy من التعرض النتروني للعين؟ (c) 1.5m Gy من أشعة ألفا؟

67. احسب الجرعة الإشعاعية مقدرة بوحدة Gy لكل من القيم التالية: (a) سلسلة من الأشعة السينية المنبعثة من جهاز تصوير شدتها 10 mSv (b) 50 mSv منبعثة من أشعة ألفا مسلطة على الجلد. (c) 160 mSv من أشعة  $\beta^-$  و  $\gamma$  منبعثة من  ${}^{40}\text{K}$  الموجود في جسمك.

68. أوجد كتلة  ${}^{239}\text{Pu}$  التي يبلغ نشاطها  $1.00 \mu\text{Ci}$ .

69. في الثمانينيات، استخدم مصطلح picowave لوصف تشعيع الأغذية للتغلب على المقاومة العامة من خلال اللعب على معرفة الناس بأن أشعة الميكرويف آمنة. احسب الطاقة مقدرة بوحدة MeV لفوتون طول موجته من رتبة البيكومتر.

70. يتم تعريف شخص مصاب بالسرطان جرعة من أشعة غاما تبلغ 200 Gy. ما هي الجرعة مقدرة بالسيفرت؟

71. درع من الرصاص ثخانتة 0.170 mm يمتص نصف أشعة غاما المنبعثة من  ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ ، ويتم امتصاص النصف الثاني من الأشعة بعد عبورها الطبقة الأولى من الرصاص في الطبقة الثانية المساوية لها في الثخانة. ما هي ثخانة الطبقة الرصاصية القادرة على امتصاص كل هذه الأشعة باستثناء 1/1000 منها؟

72. إذا تم تعريض ورم سرطاني جرعة 40 Sv من أشعة  $\alpha$ ، احسب الجرعة الإشعاعية مقدرة بالغراي؟

73. يتلقى سباك في محطة للطاقة النووية جرعة إشعاعية بكامل جسده تبلغ شدتها 30 mSv لمدة 15 دقيقة أثناء إصلاحه لصمام بالغ الأهمية. احسب خطر الوفاة السنوي بالسرطان الناجم عن هذا الإشعاع واحتمال حدوث عيب وراثي من هذا الحد الأقصى المسموح بالتعرض له من الإشعاع.

74. احسب الجرعة مقدرة بوحدة rem/y التي تتعرض لها رثنا أحد موظفي مصنع الأسلحة الذي يستنشق  $^{239}\text{Pu}$  ، ويحتفظ بنشاط  $1.00 \mu\text{Ci}$  عند وقوع حادث. كتلة أنسجة الرئة المتضررة هي 2.00 kg وتحلل البلوتونيوم عن طريق انبعاث جزيء  $\alpha$  بشدة تبلغ 5.23 MeV. افرض أن قيمة RBE هي 20.

## مسائل إضافية

75. يذكر موقع wiki-phony أن الكتلة الذرية للكlor تبلغ 40 g/mol. تحقق من هذه النتيجة. (تلميح: النظائر الأكثر شيوعاً للكlor هي:  $^{35}\text{Cl}$  و  $^{37}\text{Cl}$ . (وفرة النظير Cl-35 هي 75.80% ، ووفرة النظير Cl-37 هي 24.20%).

76. يكتشف فيزيائي مختص بدراسة الجسيمات جسيماً محايداً كتلته تبلغ  $2.02733 \text{ u}$  ويفترض أنه عبارة عن ترونين مرتبطين معاً. (a) أوجد طاقة الترابط.

(b) ما هو الشيء غير المعقول في هذه النتيجة؟

77. وجد أحد علماء الفيزياء النووية  $1.0 \mu\text{g}$  من النظير  $^{236}\text{U}$  في قطعة من اليورانيوم الخام، عمر النصف لها ( $T_{1/2} = 2.348 \times 10^7 \text{ y}$ ). (a) استخدم قانون التحلل لتحديد كمية  $^{236}\text{U}$  التي كانت موجودة على الأرض عندما تشكلت منذ  $4.543 \times 10^9$  سنة حتى يتبقى منها اليوم  $1.0 \mu\text{g}$ . (b) ما هو غير المعقول في هذه النتيجة؟ (c) كيف يتم حل هذه النتيجة غير المعقولة؟

78. تدعي مجموعة من العلماء أن عمر قطعة خشب يبلغ 3 مليارات عام محددتين ذلك باستخدام تقنية تأريخ الكربون. لماذا يبدو هذا الادعاء غير منطقي؟

79. وفقاً لشريكك في المختبر، فإن بلورة يود الصوديوم، والتي تبلغ ثخانتها 2.00 cm، تمتص كل الأشعة الصادرة من مصدر مشع باستثناء 10% فقط، بينما تمتص قطعة ثخانتها 4.00 cm من نفس المادة كل الأشعة باستثناء 5%؟ هل هذه النتيجة معقولة؟

80. في قسم العلوم في أحد الصحف، يشيد أحد المقالات بالجهود التي بذلتها مجموعة من العلماء لإنشاء مفاعل نووي جديد يقوم على انشطار الحديد (Fe). هل تعد هذه فكرة جيدة؟

81. طبقة السيراميك الموجودة على طبق "Fiestaware" ذي اللون الأحمر البرتقالي هي  $\text{U}_2\text{O}_3$  يحتوي على 50.0 g من  $^{238}\text{U}$ ، والقليل جداً من  $^{235}\text{U}$ . (a) احسب نشاط الطبقة. (b) احسب الطاقة الكلية التي ستصدر عن تحلل  $^{238}\text{U}$ . (c) إذا كانت تكلفة الطاقة تساوي 12.0 cent لكل كيلوواط ساعي، فما هي القيمة النقدية للطاقة المنبعثة؟ (هذه الأطباق السيراميكية ذات الألوان الزاهية كانت تصنع منذ نحو 30 سنة، ولكنها لا تزال متاحة حتى يومنا هذا كمقتنيات لهواة جمع الأشياء).

82. توجد كميات كبيرة من اليورانيوم المنضب ( $^{238}\text{U}$ ) في السوق المحلية كمنتج ثانوي لمعالجة اليورانيوم لوقود المفاعلات والأسلحة النووية. اليورانيوم كثيف للغاية ويستخدم كمضاد وزن جيد للطائرات. افترض أن لديك كتلة وزنها 4000 kg من  $^{238}\text{U}$ . (a) أوجد نشاطها. (b) كم عدد السعرات الحرارية التي يتم توليدها يومياً عن طريق تسخين طاقة التحلل؟ (c) هل تعتقد أنك تستطيع اكتشاف هذا كحرارة؟ فسّر الإجابة.

83. يتم اختبار قطعة من الخشب من مقبرة مصرية قديمة لنشاطها الكربوني-14. فإذا وجد أن النشاط لكل غرام من الكربون هو  $A = 10 \text{ decay/min} \cdot \text{g}$ . فما هو عمر الخشب؟

## مسائل للتحدي:

**84.** توضح هذه المسألة أن طاقة الترابط للإلكترون في الحالة الأساسية لذرة الهيدروجين أصغر بكثير من طاقات الكتلة الساكنة للبروتون والإلكترون.

(a) احسب مكافئ الكتلة مقدراً بوحدة  $u$  لطاقة الترابط البالغة  $13.6 \text{ eV}$  في ذرة الهيدروجين، وقارن ذلك مع الكتلة المعروفة لذرة الهيدروجين.

(b) قم بطرح الكتلة المعروفة للبروتون من الكتلة المعروفة لذرة الهيدروجين.

(c) خذ نسبة طاقة الترابط للإلكترون ( $13.6 \text{ eV}$ ) إلى الطاقة المكافئة لكتلة الإلكترون ( $0.511 \text{ MeV}$ ).

(d) ناقش كيف تؤكد إجاباتك الهدف المعلن لهذه المسألة.

**85.** تم إطلاق مسبار غاليليو الفضائي في رحلته الطويلة عبر الزهرة والأرض في عام 1989، وكان هدفها النهائي هو كوكب المشتري. مصدر الطاقة للمسبار هو  $11.0 \text{ kg}$  من  $^{238}\text{Pu}$ ، وهو منتج ثانوي لإنتاج البلوتونيوم المستخدم في الأسلحة النووية. يتم توليد الطاقة الكهربائية حرارياً من الحرارة الناتجة عن اصطدام جسيمات ألفا المنبعثة في كل تحلل بطاقة تبلغ  $5.59 \text{ MeV}$  بحاجز داخل البلوتونيوم ودرعه. عمر النصف للبلوتونيوم  $^{238}\text{Pu}$  هو  $87.7$  سنة.

(a) ما هو النشاط الأصلي للبلوتونيوم  $^{238}\text{Pu}$  مقدراً بالبيكريل؟

(b) ما هي الطاقة المنبعثة مقدرة بالكيلووات؟

(c) ما الطاقة المنبعثة بعد  $12.0$  سنة من الإطلاق؟ يمكن إهمال أي طاقة إضافية من النكليات البنات وأي ضياعات من انبعاث أشعة غاما.

**86.** احسب الطاقة المنبعثة عند تحلل  $\beta^-$  لنواة الكوبالت  $^{60}\text{Co}$ .

**87.** كثيراً ما يُستدعى المهندسون لفحص تجهيزات محطات الطاقة النووية وإصلاحها، إذا لزم الأمر. بفرض انقطاع الطاقة الكهربائية عن المدينة. بعد فحص المفاعل النووي، وُجد خلل تسريبي في الأنبوب، الذي يصل بين مولد البخار ووحدة التوربينات. (a) كيف تقارن قراءات الضغط لوحدة التوربينات مع مكثف البخار؟ (b) لماذا توقف المفاعل النووي عن إنتاج الكهرباء؟

**88.** إذا تحتم على نواتين الاندماج في تفاعل نووي، فإنهما يجب أن تتحركا بسرعة كافية، بحيث أن قوة كولون التنافرية بينهما لا تمنعهما من الاقتراب على بعد  $R \approx 10^{-14} \text{ m}$ . عند هذه المسافة أو أقل، يمكن للقوة النووية الجاذبة التغلب على قوة كولون، وبالتالي تكون النوى قادرة على الاندماج.

(a) أوجد علاقة بسيطة يمكن استخدامها لتقدير الحد الأدنى من الطاقة الحركية، التي يجب أن تمتلكها النوى إذا أرادت الاندماج. ولإبقاء الحساب بسيطاً، افترض أن النواتين متطابقتان، وتتحركان نحو بعضهما السرعة  $v$  نفسها. (b) استخدم هذه الطاقة الحركية الدنيا لتقدير درجة الحرارة الدنيا، التي يجب أن يمتلكها غاز النوى قبل أن يخضع عدد كبير منها للاندماج. احسب درجة الحرارة الدنيا هذه أولاً للهيدروجين ثم للهليوم. (تلميح: لكي يحدث الاندماج، يجب أن تكون الطاقة الحركية الدنيا، عندما تكون النوى متباعدة عن بعضهما، مساويةً لطاقة كولون المحتملة عندما تفصل بينهما المسافة  $R$ ).

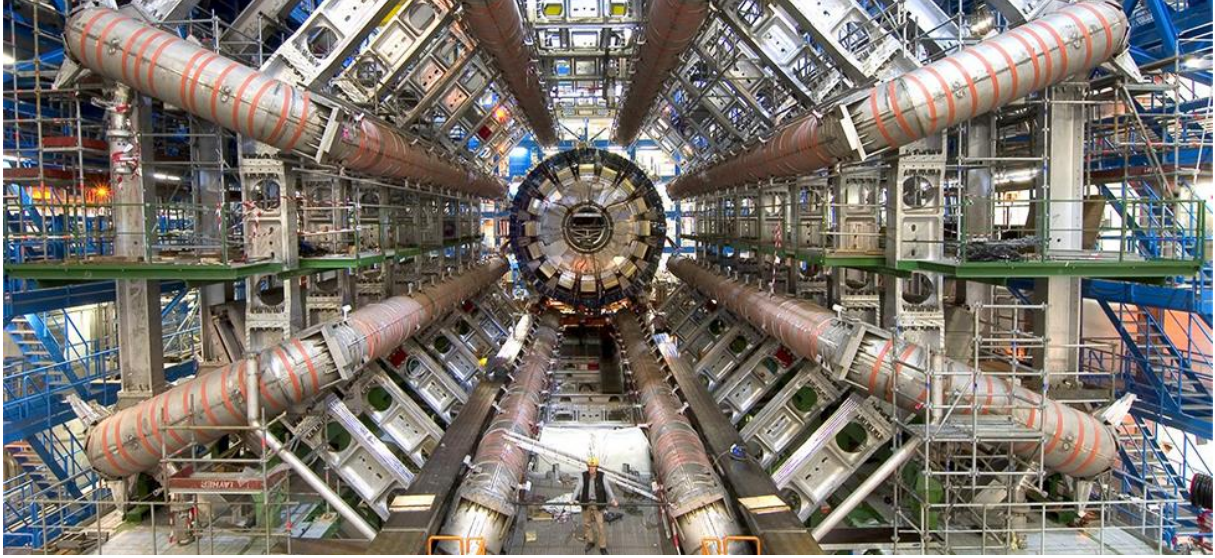
**89.** من أجل التفاعل التالي:  $n + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$ ، أوجد مقدار الطاقة المنتقلة إلى  ${}^4\text{He}$  و  $\gamma$  (على الجانب الأيمن من المعادلة). افترض أن المواد المتفاعلة كانت في حالة سكون في بداية التفاعل. (تلميح: استخدم مبدأ مصونية العزم).

**90.** كثيراً ما يُستدعى المهندسون إلى المراكز الطبية والمستشفيات لفحص التجهيزات الطبية وإصلاحها إذا لزم الأمر. بفرض أن نظام PET قد تعطل. وبعد فحص الوحدة، ارتباكك شك بأن أحد كواشف الفوتونات في PET قد انحرف عن مكانه. لتختبر صحة

اعتقادك، يمكنك وضع كاشف واحد في الموقع  $(r, \theta, \phi) = (1.5, 45, 30)$  بالنسبة لعينة اختبار مشعة في مركز سرير المريض. (a) إذا كان كاشف الفوتونات الثاني متوضعاً بشكل صحيح، أين يجب أن يكون موجوداً؟ (b) ما هي قراءة الطاقة المتوقعة؟

## الفصل الحادي عشر | فيزياء الجسيمات وعلم الكونيات

### PARTICLE PHYSICS AND COSMOLOGY



**الشكل 1.11** يقع مصادم الهادرونات الكبير (LHC) عند عمق أكثر من 150 m تحت سطح الأرض عند حدود سويسرا وفرنسا بالقرب من جنيف بسويسرا. LHC هو أقوى آلة تم تطويرها على الإطلاق لاختبار فهمنا لتفاعلات الجسيمات الأولية. يظهر هنا الكاشف ATLAS، الذي يُستخدم لتحديد الجسيمات الجديدة التي تتشكل خلال التصادم.

#### مخطط الفصل

1.11 مقدمة في فيزياء الجسيمات

2.11 قوانين مصونية الجسيم

3.11 الكواركات

4.11 مسرعات وكواشف الجسيمات

5.11 النموذج القياسي

6.11 الانفجار الكبير

7.11 تطور الكون المبكر

#### المقدمة

ناقشنا في بداية هذا الكتاب مجموعة واسعة من المقاييس التي تشملها مواضيع الفيزياء، من أصغر الجزيئات إلى أكبر مقياس ممكن - وهو الكون نفسه. ندرس في هذا الفصل الأخير بعض حدود البحث في هذه المقاييس القصوى. تتعامل فيزياء الجسيمات مع اللبنة الأساسية للمادة والقوى التي تجمعها. علم الكونيات هو دراسة النجوم والمجرات والبنى المجرية التي تملأ عالمنا، وكذلك تاريخهم الماضي وتطورهم المستقبلي.



هذان المجالان في الفيزياء ليسا منفصلين كما تعتقد. تتطلب دراسة الجسيمات الأولية طاقات هائلة لإنتاج جزيئات معزولة، تشمل بعضاً من أكبر الآلات التي صنعها البشر. لكن هذه الطاقات العالية كانت موجودة في المراحل المبكرة من الكون، والكون الذي نراه من حولنا اليوم قد شكله جزئياً طبيعة الجسيمات الأولية التي نشأت آنذاك وتفاعلاتها. ضع في اعتبارك أن فيزياء الجسيمات وعلم الكونيات كلاهما مجال بحث حالي مكثف، يخضع للكثير من التناقضات من جانب علماء الفيزياء (وكذلك مؤلفو الخيال العلمي).

سنحاول في هذا الفصل التأكيد على ما هو معروف على أساس الاستنباط من الأدلة الملحوظة، وتحديد المعتقدات التي لا تزال غير مثبتة.

## 1.1 | مقدمة في فيزياء الجسيمات Introduction to Particle Physics

### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- وصف القوى الأساسية الأربعة والجزيئات التي تشارك فيها.
- تحديد ووصف الفرمونات والبوزونات.
- تحديد ووصف عائلات الكوارك ولبتون.
- التمييز بين الجسيمات والجسيمات المضادة، ووصف تفاعلاتها.

تتمتع فيزياء الجسيمات الأولية بدراسة الجزيئات الأساسية وتفاعلاتها في الطبيعة. أولئك الذين يدرسون فيزياء الجسيمات الأولية - علماء فيزياء الجسيمات - يتحدثون عن علماء الفيزياء الآخرين من حيث المواضيع التي يدرسونها. لا يهتم فيزيائيو الجسيمات بدراسة العالم الجوهري للخلايا أو الجزيئات أو الذرات أو حتى النواة الذرية. إنهم مهتمون بالعمليات الفيزيائية، التي تحدث على نطاق أصغر حتى من النوى الذرية. وفي الوقت نفسه، ينخرطون في أكثر الألغاز عمقاً في الطبيعة: كيف بدأ الكون؟ ما الذي يفسر نمط الكتل في الكون؟ لماذا يوجد أكثر من مادة مضادة في الكون؟ لماذا تتم مصونية الطاقة والعزم؟ كيف سيتطور الكون؟

### القوى الأربعة الأساسية

إنّ فهم الجزيئات وتفاعلاتها هي خطوة مهمة للإجابة عن هذه الأسئلة. حيث يُعبّر عن تفاعلات الجسيمات بدلالة القوى الأربعة الأساسية. هذه القوى هي القوة النووية القوية والقوة الكهرومغناطيسية والقوة النووية الضعيفة وقوة الجاذبية مرتبة من الأقوى إلى الأقل شدة.

1. القوة النووية القوية. القوة النووية القوية هي قوة جذب قوية للغاية تعمل فقط عند مسافات قصيرة جداً (نحو  $10^{-15}$  m). القوة النووية القوية مسؤولة عن ربط البروتونات والنيوترونات معاً في النوى الذرية. لا تشارك جميع الجسيمات في القوة النووية القوية؛ فالإلكترونات والنيوترونات مثلاً لا تتأثر بها. وكما يُوحى الاسم، فإن هذه القوة أقوى بكثير من القوى الأخرى.
2. القوة الكهرومغناطيسية. يمكن للقوة الكهرومغناطيسية أن تعمل عند مسافات كبيرة جداً (أي أن مجالها غير محدود)، لكنها لا تمثل سوى قوة مقدارها 0.01 من شدة القوة النووية القوية. ويُقال إن الجسيمات، التي تتفاعل من خلال هذه القوة، لها "شحنة". في النظرية الكلاسيكية للكهرباء الساكنة (قانون كولون)، تتناسب القوة الكهربائية طردياً مع جداء شحنات الجسيمات المتفاعلة، وعكساً مع

مربع البعد بينها. وبخلاف القوة النووية القوية، فإن القوة الكهرومغناطيسية يمكن أن تكون تجاذبية أو تنافرية (الشحنات المتعاكسة تتجاذب والمتشابهة تتنافر). وتعتمد القوة الكهرومغناطيسية بطريقة أكثر تعقيداً على هذه الشحنات وحركاتها. يعد توحيد القوة الكهربائية والمغناطيسية في قوة كهرومغناطيسية واحدة (إنجاز جيمس كليرك ماكسويل) أحد أعظم الإنجازات الفكرية في القرن التاسع عشر. هذه القوة هي محور النماذج العلمية للبنية الذرية والترابط الجزيئي.

**3. القوة النووية الضعيفة.** تعمل القوة النووية الضعيفة عند مسافات قصيرة جداً ( $10^{-15}$  m)، وكما يُوحى اسمها، فهي ضعيفة جداً. وتساوي تقريباً  $10^{-6}$  من شدة القوة النووية القوية. تتجلى هذه القوة بشكل ملحوظ في تحلل الجزيئات الأولية وتفاعلات النيوترون. فعلى سبيل المثال، يمكن للنيوترون أن يتحلل إلى بروتون وإلكترون وإلكترون نترينو من خلال القوة الضعيفة. وتعد القوة الضعيفة ذات أهمية حيوية لأنها ضرورية لفهم الاصطناع النووي النجمي - العملية التي تشكل نوى ذرية جديدة في قلب النجوم.

**4. قوة الجاذبية.** كما هو الحال بالنسبة للقوة الكهرومغناطيسية، فإن قوة الجاذبية يمكن أن تعمل عند مسافات كبيرة بلا حدود؛ ومع ذلك، فهي تبلغ  $10^{-38}$  فقط من شدة القوة النووية القوية. في النظرية الكلاسيكية للجاذبية نيوتن، تتناسب القوة الجاذبية طردياً مع جداء كتل الجسيمات المتفاعلة وعكساً مع مربع البعد بينها. هذه القوة هي قوة جاذبة تعمل بين جميع الجزيئات ذات الكتلة. في النظريات الحديثة للجاذبية، يعد سلوك القوة هذه حالة خاصة للتفاعلات الجهرية منخفضة الطاقة. وبالمقارنة مع قوى الطبيعة الأخرى، فإن قوة الجاذبية هي الأضعف إلى حد بعيد.

قد لا تكون القوى الأساسية "أساسية" حقاً، ولكنها قد تكون في الواقع جوانب مختلفة للقوة نفسها. تماماً كما تم توحيد القوى الكهربائية والمغناطيسية إلى القوة الكهرومغناطيسية، فإن علماء الفيزياء في سبعينيات القرن الماضي قاموا بتوحيد القوة الكهرومغناطيسية مع القوة النووية الضعيفة إلى **القوة الكهروضعيفة electroweak force**. إن أي نظرية علمية تحاول توحيد القوة الكهروضعيفة والقوة النووية القوية تُسمى **النظرية الموحدة الكبرى grand unified theory**، وأي نظرية تحاول توحيد القوى الأربع تُسمى **نظرية كل شيء theory of everything**. وسنعود إلى مفهوم التوحيد لاحقاً في هذا الفصل.

## تصنيف الجسيمات الأولية

يوجد عدد كبير من الجسيمات دون الذرية في الطبيعة. ويمكن تصنيف هذه الجسيمات بطريقتين: خاصية السبين والمشاركة في القوى الأساسية الأربعة. تذكر أن سبين الجسيم مشابه لسبين جسيم ماكروسكوبي حول محوره. هذه الأنواع من التصنيف موصوفة بشكل منفصل أدناه.

## التصنيف حسب السبين

يمكن تقسيم جزيئات المادة إلى **فرمونات** و**بوزونات**. تتمتع الفرمونات بسبين نصفي ( $1/2 \hbar, 3/2 \hbar, 5/2 \hbar, \dots$ )، بينما تتمتع البوزونات بسبين كامل ( $0 \hbar, 1 \hbar, 2 \hbar, \dots$ ). من الأمثلة المألوفة للفرمونات نذكر الإلكترونات والبروتونات والنيوترونات. أما الفوتون فهو مثال مألوف عن البوزون. تتصرف الفرمونات والبوزونات بشكل مختلف تماماً في المجموعات. فعلى سبيل المثال، عندما تقتصر الإلكترونات على منطقة صغيرة من الفراغ، فإن مبدأ الاستبعاد لباولي ينص على أنه لا يمكن للإلكترونين أن يشغلا الحالة الكمومية نفسها داخل نظام الكم في وقت واحد. ومع ذلك، عندما تقتصر الفوتونات على منطقة صغيرة من الفراغ، فإنه لا يوجد مثل هذا القيد.

يمكن فهم سلوك الفرمونات والبوزونات في المجموعات من حيث خاصية عدم التمييز. يُقال إن الجزيئات "لا يمكن تمييزها" إذا كانت متطابقة. على سبيل المثال، لا يمكن تمييز الإلكترونات لأن كل إلكترون في الكون له الكتلة نفسها ويدور تماماً مثل جميع الإلكترونات الأخرى - "عندما ترى إلكترونًا واحدًا، فقد رأيتهم جميعاً". إذا قمت بتبديل جسيمين لا يمكن تمييزهما في المنطقة الصغيرة نفسها

من الفراغ، فإن مربع التابع الموجي الواصف لهذا النظام، ويمكن قياسه ( $|\psi|^2$ )، لم يتغير. لو لم تكن هذه هي الحالة، فإنه يمكننا تحديد فيما إذا كانت الجسيمات قد تم تبديلها أم لا، ولم يكن الجسم غير قابل للتمييز حقاً. تختلف الفرمونات والبوزونات باختلاف إشارة التابع الموجي - ( $\psi$ )، التي لا تكون ملحوظة بشكل مباشر:

$$\psi \rightarrow -\psi \text{ : (فرمونات لا يمكن تمييزها)}$$

$$\psi \rightarrow +\psi \text{ : (بوزونات لا يمكن تمييزها)}$$

يقال إن الفرمونات "غير متناظرة بالتبادل" وأن البوزونات "متناظرة بالتبادل". مبدأ الاستبعاد لبولي هو نتيجةً لتناظر التبادل للفرمونات - موضوع يُناقش في دورة أكثر تقدماً في الفيزياء الحديثة. يعتمد التركيب الإلكتروني للذرات على مبدأ الاستبعاد لبولي، وبالتالي يرتبط ارتباطاً مباشراً بالتمييز بين الإلكترونات.

### التصنيف حسب تفاعلات القوة

يمكن تقسيم الفرمونات أيضاً إلى الكواركات واللبتونات. الفرق الأساس بين هذين النوعين من الجزيئات هو أن الكواركات فقط هي التي تتفاعل فيما بينها بالقوة القوية. تم تنظيم الكواركات واللبتونات (وكذلك البوزونات التي سيتم مناقشتها لاحقاً) في الشكل 2.11. يحتوي الصفان العلويان (أول ثلاثة أعمدة باللون الأرجواني) على ستة كواركات. يتم ترتيب هذه الكواركات في مجموعتين من الجسيمات: العلوي (up) والساحر (charm) والقمة (top) ( $u, c, t$ )، والسفلي (down) والغريب (strange) والقاعدة (bottom) ( $d, s, b$ ). يشترك أفراد عائلة الجسيمات ذاتها بالخصائص نفسها، ولكنهم يختلفون في الكتلة (مقدرة بوحدة  $\text{MeV}/c^2$ ). على سبيل المثال، كتلة كوارك القمة أكبر بكثير من كتلة كوارك الساحر، وكتلة كوارك الساحر أكبر بكثير من كتلة كوارك العلوي. تتفاعل جميع الكواركات فيما بينها بالقوة النووية القوية.

	I	II	III	
Mass	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
Charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Name	u up	c charm	t top	$\gamma$ photon
Quarks				
Mass	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
Charge	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Name	d down	s strange	b bottom	g gluon
Bosons (forces)				
Mass	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
Charge	0	0	0	0
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Name	$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ tau neutrino	$Z^0$ weak force
Leptons				
Mass	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
Charge	-1	-1	-1	$\pm 1$
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Name	e electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau	$W^\pm$ weak force

الشكل 2.11 مجموعات الجسيمات دون الذرية، مصنفة حسب أنواع القوى التي تتفاعل بها.

تتكون المادة العادية من نوعين من الكواركات: الكوارك العلوي (شحنته الأولية  $q = +2/3$ ) والكوارك السفلي ( $q = -1/3$ ). الكواركات الأثقل غير مستقرة وتحلل بسرعة إلى أخف منها عبر القوة الضعيفة. ترتبط الكواركات معاً في مجموعات من التوائم والأشجار عبر القوة القوية تُسمى **الهدرونات**. وتُسمى الهدرونات، التي تتكون من كواركين **بالميزونات**، وتُسمى تلك التي تتكون من ثلاثة كواركات **بالباريونات**. ومن ضمن الأمثلة على الميزونات يوجد البيون والكاون، وكمثال على الباريونات البروتون والمألوف والنترون. والبروتون هو اثنان من الكواركات العلوية وكوارك سفلي واحد، والنترون هو كوارك علوي واحد واثنان من الكواركات السفلية. نورد في **الجدول 1.11** خصائص الميزونات والباريونات النموذجية. تشارك الكواركات في القوى الأساسية الأربعة: القوية والضعيفة والكهرطيسية والجاذبية.

يحتوي الصفان السفليان في الشكل (باللون الأخضر) على ستة لبتونات مرتبة في مجموعتين من الجسيمات: إلكترون وميون وتاو ( $e, \mu, \tau$ )، وإلكترون نترينو وميون نترينو وتاو نترينو ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ). الميون أثقل من الإلكترون بنحو 200 مرة، ولكنه يشبه الإلكترون. والتاو أثقل بنحو 3500 مرة من الإلكترون، ولكنه يشبه الميون والإلكترون. كما أن الميون والتاو بمجرد نشوئهما، فإنهما يتحللان بسرعة إلى الجزيئات الأخف وزناً عبر القوة الضعيفة.

لا تشارك اللبتونات في القوة القوية. وستتم مناقشة الكواركات واللبتونات لاحقاً في هذا الفصل. تشارك اللبتونات في القوى الضعيفة والكهرطيسية والجاذبية، ولكنها لا تشارك في القوة القوية.

البوزونات (الموضحة باللون الأحمر) هي حاملات القوة للفرمونات. في هذا النموذج، تتفاعل اللبتونات والكواركات مع بعضها عن طريق إرسال البوزونات واستقبالها. على سبيل المثال، يحدث التفاعل الكولومبي عندما يقوم جسيمان موجبا الشحنة بإرسال واستقبال (تبادل) الفوتونات. ويقال إن الفوتونات "تحمل" القوة بين الجسيمات المشحونة. وبالمثل، يحدث التجاذب بين كواركين في نواة ذرية عندما يقوم كواركان بإرسال **الغلونات** واستقبالها. ومن الأمثلة الإضافية على ذلك **بوزونات W و Z** (التي تحمل القوة النووية الضعيفة) والجرافيتونات (التي تحمل قوة الجاذبية). بوزون هيغز هو جسيم خاص: عندما يتفاعل مع جزيئات أخرى، فإنه لا يمنحهم القوة بل الكتلة. وبعبارة أخرى، يساعد بوزون هيغز في تفسير سبب وجود كتلة للجزيئات. هذه التأكيدات جزء من نموذج علمي مبدئي ولكنه منتج للغاية (النموذج القياسي)، والذي ستتم مناقشته لاحقاً.

## الجسيمات والجسيمات المضادة

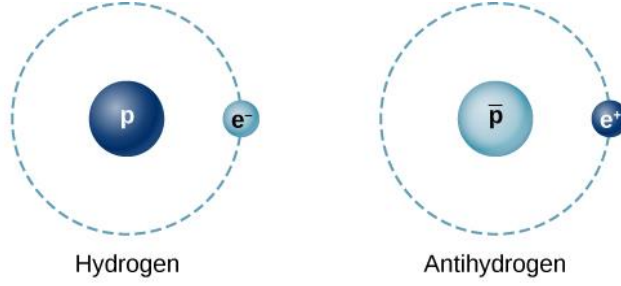
في أواخر العشرينات من القرن العشرين، تم دمج النظرية الخاصة بالنسبية وميكانيك الكم في نظرية الكم النسبية للإلكترون. كانت النتيجة المفاجئة لهذه النظرية هي التنبؤ بمحالتين للطاقة لكل إلكترون: إحداهما مرتبطة بالإلكترون، والأخرى مرتبطة بجسيم آخر له كتلة الإلكترون نفسها ولكن شحنته  $e^+$ . وتُسمى هذا الجسيم مضاد للإلكترون أو **البوزيترون**. وقد تم اكتشاف البوزيترون تجريبياً في الثلاثينيات.

وسرعان ما اكتشف أنه لكل جسيم في الطبيعة يوجد **جسيم مضاد** له. الجسيمات المضادة لها نفس كتلة وعمر الجسيمات المرتبطة بها، ولكن شحنتها الكهربائية متعاكسة في الإشارة. ويتم إنتاج هذه الجزيئات في تفاعلات عالية الطاقة. تتضمن أمثلة الجسيمات عالية الطاقة مضاد الميون ( $\mu^+$ ) ومضاد الكوارك العلوي ( $\bar{u}$ ) ومضاد الكوارك السفلي ( $\bar{d}$ ). (لاحظ أن الجسيمات المضادة للكواركات يتم تمييزها باستخدام خط فوقها). يحتوي العديد من الميزونات والباريونات على جسيمات مضادة. على سبيل المثال، مضاد البروتون ( $\bar{p}$ ) هو  $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$  والبيون موجب الشحنة ( $\pi^+$ ) هو  $u\bar{d}$ . بعض الجسيمات المحايدة، كالفوتون والميزون  $\pi^0$ ، هي جسيماتها المضادة الخاصة بها نفسها. نورد في **الجدول 1.11** جسيمات وجسيمات مضادة نموذجية وخصائصها.

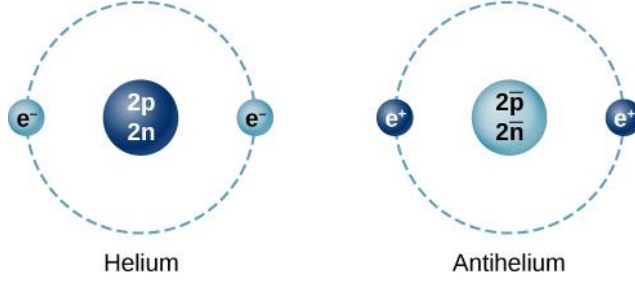
الجدول 1.11 الجسيمات وخصائصها

متوسط العمر (s)	الكتلة (MeV/c <sup>2</sup> )	الجسيم المضاد	الرمز	اسم الجسيم	
اللبتونات					
مستقر	0.511	e <sup>+</sup>	e <sup>-</sup>	إلكترون	
مستقر	≈ 0	$\bar{\nu}_e$	$\nu_e$	إلكترون نترينو	
$2.20 \times 10^{-6}$	105.7	$\mu^+$	$\mu^-$	ميون	
مستقر	≈ 0	$\bar{\nu}_\mu$	$\nu_\mu$	ميون نترينو	
$< 4 \times 10^{-13}$	1784	$\tau^+$	$\tau^-$	تاو	
مستقر	≈ 0	$\bar{\nu}_\tau$	$\nu_\tau$	تاو نترينو	
المهادونات					
مستقر	938.3	$\bar{p}$	p	بروتون	الباريونات
920	939.6	$\bar{n}$	n	نوترون	
$2.6 \times 10^{-10}$	1115.6	$\bar{\Lambda}^0$	$\Lambda^0$	لامدا	
$0.80 \times 10^{-10}$	1189.4	$\bar{\Sigma}^-$	$\Sigma^+$	سيجما	
$2.9 \times 10^{-10}$	1315	$\bar{\Xi}^-$	$\Xi^+$	Xi	
$0.82 \times 10^{-10}$	1672	$\bar{\Omega}^-$	$\Omega^+$	أوميغا	الميزونات
$2.60 \times 10^{-8}$	139.6	$\pi^+$	$\pi^-$	بيون	
$0.83 \times 10^{-16}$	135.0	$\pi^0$	$\pi^0$	$\pi$ -Zero	
$1.24 \times 10^{-8}$	493.7	$K^-$	$K^+$	كاون	
$0.89 \times 10^{-10}$	497.7	$\bar{K}_S^0$	$K_S^0$	k-Short	
$5.2 \times 10^{-8}$	497.0	$\bar{K}_L^0$	$K_L^0$	k-Long	
$7.1 \times 10^{-21}$	3100	J/ψ	J/ψ	J/ψ	
$1.2 \times 10^{-20}$	9460	γ	γ	ابسلون	

القوى التي تجعل المادة العادية متماسكة هي نفسها ما يجعل المادة المضادة متماسكة أيضاً. عند توافر الظروف المناسبة، فإنه من الممكن إنشاء مضادات مثل مضاد الهدروجين ومضاد الأوكسجين حتى مضاد الماء. في مضادات الذرات، تدور البوزيترونات حول نواة سالبة الشحنة من البروتونات المضادة والنوترونات المضادة. يبين الشكل 3.11 مقارنة بين الذرات والذرات المضادة.



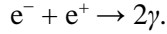
(a)



(b)

**الشكل 3.11** مقارنة بين أبسط ذرات المادة والمادة المضادة. (a) في نموذج بور، تتكون ذرة مضاد الهيدروجين من بوزيترون يدور حول مضاد البروتون. (b) تتكون ذرة مضاد الهليوم من بوزيترونات تدور حول نواة مكونة من اثنين من مضادات البروتون واثنين من مضادات النيوترون.

لا يمكن أن توجد المادة المضادة لفترة طويلة في الطبيعة لأن الجسيمات والجسيمات المضادة تقضي على بعضها مع إنتاج إشعاعات عالية الطاقة. ومن الأمثلة الشائعة على ذلك فناء الإلكترون - البوزيترون. تتم هذه العملية وفق التفاعل:



الإلكترون والبوزيترون يختفيان تماماً، ويتم إنتاج فوتونين في مكانهما. (اتضح أن إنتاج فوتون واحد من شأنه أن ينتهك قانوني مصونية الطاقة والعزم). كما يمكن لهذا التفاعل أن يحدث أيضاً في الاتجاه المعاكس: حيث يمكن لفوتونين أن يفنيا بعضهما البعض لإنتاج إلكترون وبوزيترون. أو يمكن لفوتون واحد أن ينتج زوجاً من الإلكترون - بوزيترون في حقل النواة، وهي عملية تُسمى إنتاج الأزواج. التفاعلات التي تكون من هذا النوع تُقاس بشكل روتيني في كواشف الجسيمات الحديثة. وجود الجسيمات المضادة في الطبيعة ليس خيالاً علمياً.

❖ شاهد هذا الفيديو (<https://openstaxcollege.org/l/21matter>) لمعرفة المزيد عن جزيئات المادة والمواد المضادة.

## 2.11 | قوانين مصونية الجسيمات Particle Conservation Laws

### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

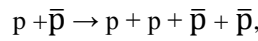
- التمييز بين قوانين المصونية الثلاث: رقم الباريون ورقم اللبتون والغرابة.
- استخدام القواعد لتحديد إجمالي رقم الباريون ورقم اللبتون وغرابة الجسيمات قبل التفاعل وبعده.
- استخدام رقم الباريون ورقم اللبتون ومصونية الغرابة لتحديد ما إذا كان الحدث هو تفاعلات الجسيمات أم تحللها.

تعد قوانين المصونية ضرورية جداً لفهم فيزياء الجسيمات. هناك دليل قوي على أن الطاقة والعزم والعزم الزاوي جميعها مصانة في جميع تفاعلات الجسيمات. لا يمكن أن يؤدي فناء الإلكترون - البوزيترون في حالة السكون مثلاً إلى إنتاج فوتون واحد فقط لأن هذا ينتهك قانون مصونية العزم الخطي. كما نوقش في فصل **النسبية**، فإن نظرية النسبية الخاصة تعدل تعريف العزم والطاقة والكميات المألوفة الأخرى. وتحديداً، يختلف العزم النسبي للجسيم عن عزمه الكلاسيكي بمعامل  $\gamma = 1/\sqrt{1 - (v/c)^2}$  تختلف قيمته من 1 إلى  $\infty$ ، تبعاً لسرعة الجسيم.

واجهنا أيضاً في الفصول السابقة قوانين المصونية الأخرى. على سبيل المثال، الشحنة الكهربائية مصانة في جميع ظواهر الكهرباء الساكنة. نقص الشحنة في مكان ما يُكتسب في مكان آخر، لأن الشحنة تحملها جسيمات. ليس هناك أي عمليات فيزيائية معروفة تنتهك قانون مصونية الشحنة. في الجزء التالي من هذا الفصل، سيتم وصف ثلاثة قوانين غير مألوفة للمصونية هي: رقم الباريون ورقم اللبتون والغرابية. وهذه القوانين ليست بأي حال قوانين المصونية الوحيدة في فيزياء الجسيمات.

## مصونية رقم الباريون

لا يوجد قانون مصونية معتمد حتى الآن يمنع النترون من التحلل عبر التفاعل التالي:  $n \rightarrow e^+ + e^-$ . تحافظ هذه العملية على الشحنة والطاقة والعزم. ومع ذلك، فإن هذا التفاعل لا يحدث لأنه ينتهك قانون مصونية رقم الباريون. حيث يشترط هذا القانون أن يكون إجمالي رقم الباريون للتفاعل هو نفسه قبل وبعد حدوث التفاعل. ولتحديد إجمالي رقم الباريون، يتم تعيين رقم باريون  $B$  لكل جسيم أولي. يأخذ رقم الباريون القيمة  $B = +1$  للباريونات، و  $-1$  لمضاد الباريون، و  $0$  لجميع الجسيمات الأخرى. بالعودة إلى الحالة أعلاه (تحلل النترون إلى زوج (إلكترون - بوزيترون))، يكون للنترون قيمة  $B = +1$ ، في حين أن لكل من الإلكترون والبوزيترون قيمة  $0$ . وبالتالي، لا يحدث التحلل بسبب تغير إجمالي رقم الباريون من  $1$  إلى  $0$ . ومع ذلك، فإن عملية الاصطدام بروتون - مضاد البروتون:



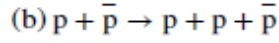
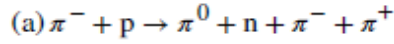
تحقق قانون مصونية رقم الباريون لأن رقم الباريون هو صفر قبل وبعد التفاعل. نورد في **الجدول 2.11** رقم الباريون للعديد من الجزيئات الشائعة.

### الجدول 2.11 الخصائص المصانة للجزيئات

رقم الغرابية	رقم الباريون ( $B$ )	رقم اللبتون ( $L_\tau$ )	رقم اللبتون ( $L_\mu$ )	رقم اللبتون ( $L_e$ )	الرمز	اسم الجسيم
0	0	0	1	0	$e^-$	إلكترون
0	0	0	0	1	$\nu_e$	إلكترون نترينو
0	0	0	1	0	$\mu^-$	ميون
0	0	0	1	0	$\nu_\mu$	ميون نترينو
0	0	1	0	0	$\tau^-$	تاو
0	0	1	0	0	$\nu_\tau$	تاو نترينو
1	0	0	0	0	$\pi^+$	بيون
1	0	0	0	0	$K^+$	كاون موجب
-1	0	0	0	0	$K^-$	كاون سالب
0	1	0	0	0	$p$	بروتون
0	1	0	0	0	$n$	نترون
-1	1	0	0	0	$\Lambda^0$	لامدا صفرية
-1	1	0	0	0	$\Sigma^+$	سيجما موجبة
-1	1	0	0	0	$\Sigma^-$	سيجما سالبة
-2	1	0	0	0	$\Xi^0$	Xi صفرية
-2	1	0	0	0	$\Xi^-$	Xi سالب
-3	1	0	0	0	$\Omega^-$	أوميغا

## مصونية رقم الباريون

وفقاً لقانون مصونية رقم الباريون، أي من التفاعلات التالية يمكنه أن يحدث؟



## خطة الحل:

نقوم بتحديد إجمالي رقم الباريون للمواد المتفاعلة والنواتج، ونقوم بالحل انطلاقاً من أن هذه القيمة لا تتغير بعد التفاعل.


## الحل:

بالنسبة للتفاعل (a)، فإن رقم الباريون للجسيمين المتفاعلين هو:  $0 + 1 = 1$ ، ورقم الباريون للنواتج الأربعة هو:  $0 + 1 + 0 + 0 = 1$ . نظراً لأن أرقام الباريون للجسيمات المتفاعلة والناتجة متساوية، فإن هذا التفاعل مسموح به وفقاً لقانون مصونية رقم الباريون.

بالنسبة للتفاعل (b)، فإن رقم الباريون للجسيمين المتفاعلين هو:  $1 + (-1) = 0$ ، ورقم الباريون للنواتج المقترحة هو:  $1 + 1 + (-1) = 1$ . لما كانت أرقام الباريون الصافية للمواد المتفاعلة والنواتج المقترحة ليست متساوية، فإن هذا التفاعل لا يمكن حدوثه.

## ملاحظة:

رقم الباريون مصان في التفاعل الأول، ولكنه غير مصان في التفاعل الثاني. تحدد مصونية رقم الباريون فيما إذا كان من الممكن لتفاعل ما أن يحدث في الطبيعة أم لا.

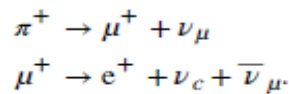
1.11 تحقق من فهمك: ما هو رقم الباريون لنواة الهدروجين؟ 

## مصونية رقم اللبتون

ينص قانون مصونية رقم اللبتون على أن مجموع أرقام اللبتون قبل التفاعل وبعده يجب أن يكون هو نفسه.

هناك ثلاثة أرقام لبتون مختلفة: رقم لبتون للإلكترون  $L_e$ ، ورقم لبتون للميون  $L_\mu$ ، ورقم لبتون للتاو  $L_\tau$ . يجب أن تكون جميع هذه الكميات مصانة بشكل منفصل في أي تفاعل. بالنسبة للإلكترونات والإلكترونات النترينو يكون  $L_e = 1$ ، وبالنسبة لجسيماتها المضادة،  $L_e = -1$ ؛ أما جميع الجسيمات الأخرى فيكون لها  $L_e = 0$ . وبالمثل،  $L_\mu = 1$  للميونات وميونات النترينو، و  $L_\mu = -1$  بالنسبة لجسيماتها المضادة، و  $L_\mu = 0$  لكل الجسيمات الأخرى. وأخيراً، فإن قيم  $L_\tau = 1$  للتاو أو نترينو، و  $-1$  لجسيماتهم المضادة، و  $0$  لأي جسيمات أخرى. تضمن مصونية رقم اللبتون أن يبقى عدد الإلكترونات والبوزيترونات في الكون ثابتاً نسبياً. (ملاحظة: رقم اللبتون الإجمالي، حسب علمنا، مصان في الطبيعة. ومع ذلك، فقد أظهرت الملاحظات اختلافات في رقم اللبتون العائلي (على سبيل المثال،  $L_e$ ) في ظاهرة تُسمى التذبذبات النترينية).

لتوضيح قانون قانون مصونية رقم اللبتون، انظر إلى عملية التحلل ثنائية الخطوة المعروفة التالية:



في تفاعل التحلل الأول، فإن رقم اللبتون للجسيم  $\pi^+$  يساوي  $0$ . بالنسبة لنواتج هذا التحلل،  $L_\mu = -1$  من أجل الجسيم  $\mu^+$  و  $L_\mu = 1$  من أجل الجسيم  $\nu_\mu$ . لذلك، يتم الحفاظ على رقم اللبتون للميون. لا تشارك الإلكترونات ولا التاو في هذا التحلل، لذلك

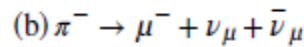
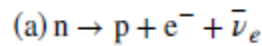


فإن  $L_e=0$  و  $L_\mu=0$  للجسيمات الأولية ولجميع نواتج التحلل. وبالتالي، يتم الحفاظ أيضاً على أرقام اللبتون للإلكترون والتاو. في التحلل الثاني، فإن للميون  $\mu^+$  رقم اللبتون  $L_\mu = -1$ ، في حين أن رقم اللبتون للميون لنواتج التحلل هو  $-1 = 0 + 0 + (-1)$ . وبالتالي، يتم الحفاظ على رقم اللبتون للميون. كما يتم الحفاظ على رقم اللبتون للإلكترون أيضاً، مثل  $L_e = 0$  للجسيم  $\mu^+$ ، في حين أن رقم اللبتون للإلكترون الصافي لنواتج التحلل هو:  $0 = 0 + 1 + (-1)$ . وأخيراً، فإنه يتم الحفاظ على رقم اللبتون للتاو نظراً لعدم اشتراك أي من التاو أو التاو نترينو في التحلل.

## مثال 2.11

### مصونية رقم اللبتون

بناءً على قانون مصونية رقم اللبتون، أي من التحللين التاليين يمكن أن يحدث؟



### خطة الحل:


حدد رقم اللبتون الإجمالي للمواد المتفاعلة والنواتج، وحل انطلاقاً من أن هذه القيمة يجب ألا تتغير بعد التفاعل.

### الحل:

بالنسبة للتحلل (a)، فإن رقم اللبتون - إلكترون للنترون يساوي 0، ورقم اللبتون - إلكترون لنواتج التحلل هو:  $0 = 0 + 1 + (-1)$ . بما أن أرقام اللبتون للإلكترون قبل التحلل وبعده هي نفسها، فإن هذا التحلل ممكن على أساس قانون مصونية رقم اللبتون للإلكترون. كما أن التاو والميونات لا تشترك في هذا التحلل، وبالتالي فإن أرقام اللبتون للميون والتاو مصادفة. بالنسبة للتحلل (b)، فإن رقم اللبتون للجسيم  $\pi^-$  يساوي 0، ورقم اللبتون للميون لنواتج التحلل المقترحة هو:  $1 = 1 + 1 + (-1)$ . وبالتالي، استناداً إلى قانون مصونية رقم اللبتون للميون فإن هذا التحلل لا يمكن أن يحدث.

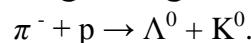
### ملاحظة:

رقم اللبتون مصادف في التفاعل الأول ولكنه غير مصادف في التفاعل الثاني. تُحدد مصونية رقم اللبتون فيما إذا كان من الممكن لتفاعل ما أن يحدث في الطبيعة أم لا.

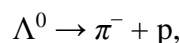
 **2.11 تحقق من فهمك:** ما هو رقم اللبتون للزوج (إلكترون - بوزيترون)؟

### مصونية الغرابة

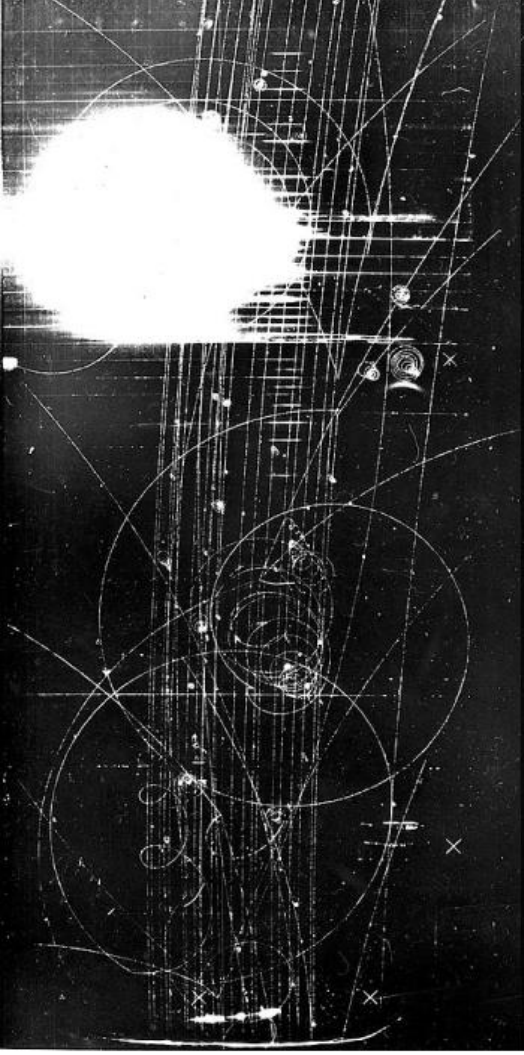
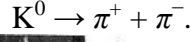
في أواخر الأربعينيات وأوائل الخمسينيات من القرن الماضي، كشفت تجارب الأشعة الكونية عن وجود جسيمات لم يتم ملاحظتها أبداً على الأرض. تم إنتاج هذه الجسيمات في تصادمات البيونات مع البروتونات أو النيوترونات في الغلاف الجوي. ولم يكن إنتاجها وتحللها اعتيادياً. فقد تم إنتاجها في تفاعلات نووية قوية للبيونات والنكلونات، ولذلك كان يُعتقد بأنها هادرونات، ومع ذلك، فقد تعدل تحللها بسبب التفاعل النووي الضعيف، الذي كان يحدث ببطء شديد. كانت أعمارها تتراوح بين  $10^{-10}$  إلى  $10^{-8}$  ثانية، في حين أن العمر الافتراضي للجسيم الذي يتحلل من خلال التفاعلات النووية القوية يبلغ  $10^{-23}$  ثانية. وكانت هذه الجسيمات أيضاً غير عادية لأنها كانت تُنتج دائماً على شكل أزواج في اصطدامات البيون والنواة. لهذه الأسباب، توصف هذه الجزيئات المكتشفة حديثاً بأنها غريبة. يوضح **الشكل 4.11** عملية إنتاج وتحلل زوج من هذه الجسيمات الغريبة وفقاً للتفاعل التالي:



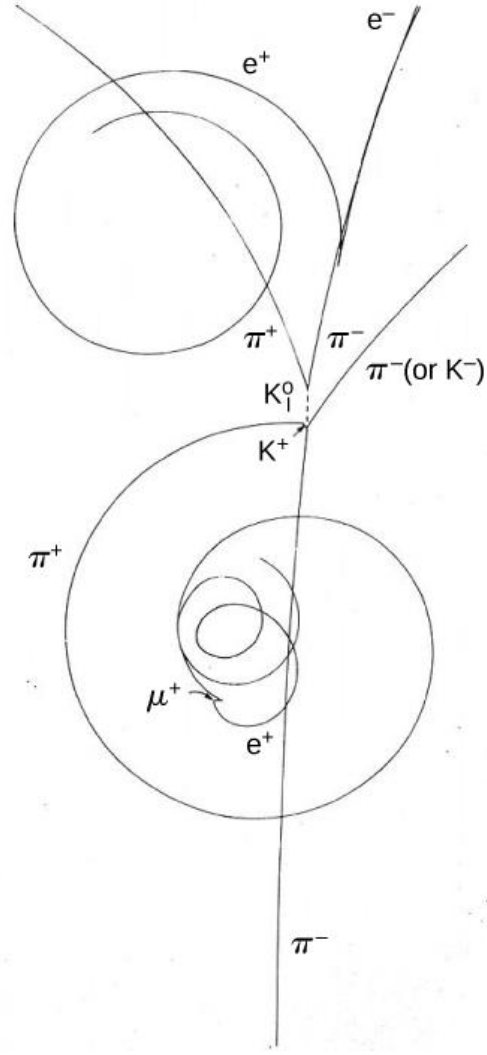
بعدها يتحلل الجسيم  $\Lambda^0$  من خلال التفاعل النووي الضعيف وفقاً للمعادلة:



ويتحلل الكاون من خلال التفاعل الضعيف:



(a)



(b)

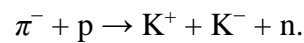
**الشكل 4.11** تفاعلات الهدرونات. (a) صورة الحجرة الفقاعية؛ (b) رسم يمثل هذه الصورة.

لترشيد سلوك هذه الجسيمات الغريبة، قام فيزيائيو الجسيمات باختراع خاصية جسيمية مصانة في التفاعلات القوية، ولكنها غير مصانة في التفاعلات الضعيفة. تُسمى هذه الخاصية بالغرابة، وكما يوحي الاسم، فهي مرتبطة بوجود كوارك غريب. تساوي غرابة الجسيم عدد الكواركات الغريبة للجسيم. تقتضي مصونية الغرابة أن تكون الغرابة الكلية للتفاعل أو التحلل (بمجموع غرابة جميع الجسيمات) هي نفسها قبل التفاعل وبعده. مصونية الغرابة ليست مطلقة: حيث تكون مصانة في التفاعلات القوية والتفاعلات الكهرطيسية، ولكنها ليست كذلك في التفاعلات الضعيفة. يُعطى عدد الغرابة للعديد من الجسيمات الشائعة في **الجدول 2.11**

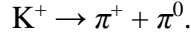
### مثال 3.11

#### مصونية الغرابة

(a) وفقاً لمصونية الغرابة، هل يمكن أن يحدث التفاعل التالي؟



(b) يتم اعتدال التحلل التالي من خلال القوة النووية الضعيفة:



هل يحافظ التحلل على الغرابة؟ إذا لم يكن الأمر كذلك، فهل يمكن أن يحدث التحلل؟

### خطة الحل:

تحديد غرابة المواد المتفاعلة والنواتج والحل انطلاقاً من أن هذه القيمة لا تتغير في التفاعل.


### الحل:

(a) الغرابة للمواد المتفاعلة هي:  $0 + 0 = 0$ ، والغرابة للنواتج هي:  $1 + (-1) + 0 = 0$ . وبالتالي، فإن التفاعل النووي القوي بين البيون والبروتون لا يحظره قانون مصونية الغرابة. لاحظ أن عدد الباريون مصان أيضاً في هذا التفاعل.

(b) الغرابة قبل هذا التحلل وبعده هي 1 و 0، وبالتالي فإن التحلل لا يحفظ الغرابة. ومع ذلك، قد لا يزال التحلل ممكناً، لأن قانون مصونية الغرابة لا ينطبق على التحلل الضعيف.

### ملاحظة:

الغرابة مصانة في التفاعل الأول ولكنها غير مصانة في التفاعل الثاني. إن مصونية الغرابة تحدد فيما إذا كان من الممكن لتفاعل ما أن يحدث في الطبيعة أم لا.

3.11 تحقق من فهمك: ما هو رقم الغرابة للميون؟ 

## 3.11 الكواركات Quarks

### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- مقارنة وتمييز الكواركات الستة المعروفة.
- استخدام تركيبة كوارك الهادرونات لتحديد الشحنة الكلية لهذه الجسيمات.
- شرح الأدلة الأساسية لوجود الكواركات.

في ستينيات القرن الماضي، بدأ علماء فيزياء الجسيمات بإدراك أن الهادرونات ليست جسيمات أولية ولكنها مصنوعة من جسيمات تُسمى الكواركات. (تم صياغة اسم "كوارك" من قبل الفيزيائي موري جيلمان، من عبارة ذكرت في رواية Finnegans Wake لجيمس جويس). في البداية، كان يُعتقد أنه لم يكن هناك سوى ثلاثة أنواع من الكواركات، تُسمى العلوي ( $u$ ) والسفلي ( $d$ ) والغريب ( $s$ ). ومع ذلك، سرعان ما نما هذا الرقم إلى ستة - ومن المثير للاهتمام، أنه عدد اللبتونات نفسه - ليشمل الساحر ( $c$ ) والقاعدة ( $b$ ) والقمة ( $t$ ).

جميع الكواركات عبارة عن فرمونات نصف سبين ( $s = 1/2$ )، ولها شحنة كسرية ( $1/3e$  أو  $2/3e$ )، ورقم الباريون لها  $B = 1/3$ . كل كوارك له كوارك مضاد بالكتلة نفسها، ولكن شحنته ورقم الباريون له تتمتعان بإشارة معاكسة. نورد في الجدول 3.11 أسماء الكواركات الستة وخصائصها.

### الجدول 3.11 الكواركات

رقم الغرابة (s)	رقم الباريون	السبين	الشحنة (مقدرة بوحدة e)	الكوارك
0	1/3	1/2	-1/3	السفلي (d)
0	1/3	1/2	+2/3	العلوي (u)
-1	1/3	1/2	-1/3	الغريب (s)
0	1/3	1/2	+2/3	الساحر (c)
0	1/3	1/2	-1/3	القاعدة (b)
0	1/3	1/2	+2/3	القمة (t)

### تركيبات الكوارك

كما ذكرنا سابقاً، ترتبط الكواركات معاً في مجموعات من اثنين أو ثلاثة لتكوين الهادرونات. تتشكل الباريونات من ثلاثة كواركات. ونورد في **الجدول 4.11** الباريونات النموذجية، وكذلك الكواركات المحتواة وخصائصها. ومن المثير للاهتمام، أن باريون الدلتا الموجب ( $\Delta^+$ ) يتكون من نفس الكواركات الثلاثة المكونة للبروتون، ولكن السبين الكلي للجسيم هو  $3/2$  بدلاً من  $1/2$ . وبالمثل، فإن كتلة  $\Delta^+$  ذات السبين  $3/2$  تساوي 1.3 مرة من كتلة البروتون، وباريون الدلتا الصفرية ( $\Delta_0$ ) ذات السبين  $3/2$  تساوي 1.3 مرة من كتلة النيوترون. من الواضح أن الطاقة المرتبطة بالسبين (أو العزم الزاوي) للجسيم تسهم في طاقة الكتلة. ومن المثير للاهتمام أيضاً أنه لا يُعتقد بوجود أي باريونات ذات كواركات القمة، لأن كواركات القمة تتحلل بسرعة كبيرة جداً بحيث لا يمكن ربطها بالكواركات الأخرى أثناء إنتاجها.

### الجدول 4.11 كواركات الباريون

الاسم	الرمز	الكواركات	الشحنة (مقدرة بوحدة e)	السبين	الكتلة ( $\text{GeV}/c^2$ )
بروتون	p	u u d	1	1/2	0.938
نيترون	n	u d d	0	1/2	0.940
دلتا موجب موجب	$\Delta^{++}$	u u u	2	3/2	1.232
دلتا موجب	$\Delta^+$	u u d	1	3/2	1.232
دلتا صفر	$\Delta^0$	u d d	0	3/2	1.232
دلتا سالب	$\Delta^-$	d d d	-1	3/2	1.232
لامدا صفر	$\Lambda^0$	u d s	0	1/2	1.116
سيجما موجبة	$\Sigma^+$	u u s	1	1/2	1.189
سيجما حيادية	$\Sigma^0$	u d s	0	1/2	1.192
xi سالبة	$\Xi^-$	s d s	-1	1/2	1.321
xi حيادية	$\Xi^0$	s u s	0	1/2	1.315
أوميغا سالبة	$\Omega^-$	s s s	-1	3/2	1.672
لامدا مسحورة	$\Lambda_{c^+}$	u d c	1	1/2	2.281
قاعدة مسحورة	$\Lambda_{b0}$	u d b	0	1/2	5.619

يتكون الميزون من اثنين من الكواركات - زوج الكوارك-الكوارك المضاد. نورد في **الجدول 5.11** الميزونات النموذجية وكذلك الكواركات المحتواة وخصائصها. باعتبار صيغة البيون هي ( $\pi^+ = u\bar{d}$ ). وفقاً للمحتوى الكواركي الخاص به، فإن شحنة البيون هي:

$$\frac{2}{3}e + \frac{1}{3}e = e.$$

يُكون كلا الكواركين نصف سبين ( $s = 1/2$ )، لذا فإن السبين الناتج هو 0 أو 1. سبين الميزون  $\pi^+$  يساوي 0. نفس تركيبة الكوارك - الكوارك المضاد تعطي الميزون رو ( $\rho$ ) مع السبين 1. هذا الميزون كتلته نحو 5.5 مرة من كتلة الميزون  $\pi^+$ .

## مثال 4.11

### البنية الكواركية

أثبت أن التركيب الكواركي الوارد في **الجدول 5.11** للباريون  $\Xi^0$  يتوافق مع القيم المعلومة للشحنة والسبين والغرابة لهذا الباريون.

### خطة الحل:


يتكون  $\Xi^0$  من كواركين غريبين وكوارك علوي ( $s u s$ ). يمكننا أن نجمع خصائص هذه الكواركات معاً للتنبؤ بالخصائص الناتجة للباريون  $\Xi^0$ .

### الحل:

شحنة الكوارك  $s$  هي  $-e/3$  وشحنة الكوارك  $u$  هي  $2e/3$  وبالتالي، فإن التركيب ( $s u s$ ) ليس لها أي شحنة صافية، بما يتفق مع الشحنة المعروفة للباريون  $\Xi^0$ . بما أن ثلاثة كواركات ذات السبين  $-1/2$  يمكن أن تتحد لإنتاج جسيم ذي سبين إما  $1/2$  أو  $3/2$ ، فإن التكوين الكواركي يتفق مع السبين المعروف للباريون  $\Xi^0$  وهو ( $s = 1/2$ ). وأخيراً، فإن الغرابة الصافية للتركيب ( $s u s$ ) هي:  $(-1) + (-1) = -2$ ، وهو ما يتفق أيضاً مع التجربة.

### ملاحظة:

يمكن تحديد شحنة وسبين وغرابة الباريون  $\Xi^0$  من خصائص الكواركات المكونة له. التنوع الكبير في الباريونات والميزونات يمكن إرجاعه إلى خصائص الكواركات الستة فقط: العلوي والسفلي والغريب والساحر والقاعدة والقمة.

 **4.11 تحقق من فهمك:** ما هو رقم الباريون للبيون؟

### الجدول 5.11 كواركات الميزون

الاسم	الرمز	الكواركات	الشحنة ( $e$ )	السبين	الكتلة ( $\text{GeV}/c^2$ )
بيون موجب	$\pi^+$	$u\bar{d}$	1	0	0.140
رو موجب	$\rho^+$	$u\bar{d}$	1	1	0.768
بيون سالب	$\pi^-$	$\bar{u}d$	-1	0	0.140
رو سالب	$\rho^-$	$\bar{u}d$	-1	1	0.768
بيون حيادي	$\pi^0$	$\bar{d}d$ أو $\bar{u}u$	0	0	0.135
إيتا حيادي	$\eta^0$	$\bar{s}s$ أو $\bar{d}d$ أو $\bar{u}u$	0	0	0.547
كاون موجب	$K^+$	$u\bar{s}$	1	0	0.494
كاون حيادي	$K^0$	$d\bar{s}$	0	0	0.498
كاون سالب	$K^-$	$\bar{u}s$	-1	0	0.494
J/Psi	$J/\psi$	$c\bar{c}$	0	1	3.10
إيتا مسحورة	$\eta^0$	$c\bar{c}$	0	0	2.98
D حيادي	$D^0$	$\bar{u}c$	0	0	1.86
D حيادي	$D^{*0}$	$\bar{u}c$	0	1	2.01
D موجب	$D^+$	$\bar{d}c$	1	0	1.87
B حيادي	$B^0$	$\bar{d}b$	0	0	5.26
أبسولون	$\Upsilon$	$b\bar{b}$	0	1	9.46

## اللون

الكواركات عبارة عن فرمونات متفكة مع مبدأ باولي للاستبعاد، لذلك قد يكون من المدهش معرفة أن الكواركات الثلاثة يمكن أن تلتصق ببعضها البعض داخل نواة. على سبيل المثال، كيف يمكن لكواركين علويين أن يتواجدا في المنطقة الصغيرة نفسها من الفراغ داخل بروتون؟ والحل هو أن نختار خاصية ثالثة جديدة لتمييزهم. تُسمى هذه الخاصية **باللون** كما أن الدور الذي تلعبه في التفاعل النووي القوي يشبه ما تقوم به الشحنة في التفاعلات الكهرومغناطيسية. لهذا السبب، يُسمى أحياناً لون الكوارك "بالشحنة القوية". تأتي الكواركات بثلاثة ألوان: الأحمر والأخضر والأزرق. (هذه مجرد علامات - فالكواركات ليست ملونة بالفعل). كل نوع من الكواركات ( $u, d, c, s, b, t$ ) يمكن أن يمتلك أي لون آخر. على سبيل المثال، توجد ثلاثة كواركات غريبة: كوارك غريب أحمر وكوارك غريب أخضر وكوارك غريب أزرق. الكواركات المضادة لها ألوان مضادة. الكواركات التي ترتبط معاً لتكوين هادرونات (الباريونات والميزونات) يجب أن تكون محايدة اللون أو عديمة اللون أو "بيضاء". وبالتالي، يجب أن يحتوي الباريون على كوارك أحمر وأزرق وخضراء. وبالمثل، يحتوي الميزون على زوج من الكواركات بأحد الألوان التالية: الأحمر - مضاد الأحمر، أو الأزرق - مضاد الأزرق، أو الأخضر - مضاد الأخضر. وبالتالي، يمكن إيجاد كواركين في حالة السنين نفسها في الهادرون، دون انتهاك مبدأ باولي للاستبعاد، لأن ألوانهما مختلفة.

## التقييد اللوني (التقييد الكواركي)

أول دليل قوي على وجود الكواركات جاء من سلسلة من التجارب التي أجريت في مركز ستانفورد للتسريع الخطي (SLAC) وفي سيرن نحو عام 1970. وقد صُممت هذه التجربة لاستكشاف بنية البروتون، تماماً كما فعل رذرفورد حين قام بدراسة البنية داخل الذرة من خلال تجارب تبعثر جسيمات ألفا التي قام بها. تم صدم الإلكترونات بالبروتونات بطاقة تفوق 20 GeV. عند هذه الطاقة يكون  $E \approx pc$ ، لذلك فإن الطول الموجي لدي بولي للإلكترون هو:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{hc}{E} \approx 6 \times 10^{-17} \text{ m.} \quad (11.1)$$

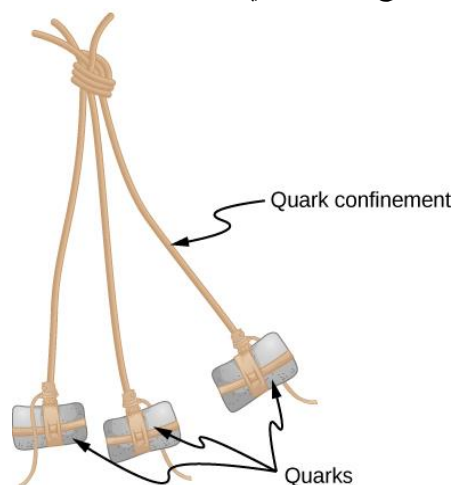
الطول الموجي للإلكترون أصغر بكثير من قطر البروتون (نحو  $10^{-15} \text{ m}$ ). وبالتالي فإنه يمكن استخدام الإلكترونات لاستكشاف بنية النواة تماماً كما هو الحال عند استخدام السيارات التي تسير عبر سلسلة الجبال الصخرية. وجدت تجارب SLAC أن بعض الإلكترونات قد انحرقت عند زوايا كبيرة جداً، مما يشير إلى وجود مراكز تشتت صغيرة داخل البروتون. كان توزيع التشتت متسقاً مع الإلكترونات المتبعثرة من مواقع ذات سبين يساوي 1/2 سبين الكواركات. استخدمت التجارب في CERN النترينوات بدلاً من الإلكترونات. وقد وجدت هذه التجربة أيضاً دليلاً على مراكز التبعثر الصغيرة. في كلتا التجريبتين، أشارت النتائج إلى أن شحنات الجسيمات المتبعثرة كانت إما  $+2/3e$  أو  $-1/3e$ ، بما يتفق مع نموذج الكوارك.

❖ شاهد هذا الفيديو (<https://openstaxcollege.org/l/21quarks>) لمعرفة المزيد حول الكواركات.

لقد حقق نموذج الكوارك نجاحاً كبيراً في تنظيم العالم المعقد للجسيمات دون الذرية. ومن المثير للاهتمام، أنه لم تنتج أي تجربة كواركاً معزولاً إطلاقاً. كل الكواركات لها شحنة كسرية، وبالتالي يجب تمييزها بسهولة عن الجسيمات الأولية المعروفة، والتي تكون شحنتها كلها من المضاعفات الصحيحة للقيمة  $e$ . لماذا لا يتم ملاحظة الكواركات المعزولة؟ في النماذج الحالية للتفاعلات الجسيمية، يتم التعبير عن الجواب بدلالة التقييد الكواركي.

يشير التقييد الكواركي إلى تقييد الكواركات في مجموعات من اثنتين أو ثلاث في منطقة صغيرة من الفراغ. تتمتع هذه الكواركات بالحرية التامة في التنقل في هذا الفراغ، وإرسال الغلونات (حاملات القوة القوية) واستقبالها. ومع ذلك، إذا ابتعدت هذه الكواركات عن بعضها، فإن القوة القوية تقوم بسحبها. يشبه هذا الفعل البولا، وهو سلاح يستخدم للصيد (الشكل 5.11)، حيث يتم ربط

الحجارة بنقطة مركزية بواسطة خيط، بحيث أنه لا يمكن لأي من الصخور أن تتحرك بعيداً عن الأخرى. يتوافق البولا مع الباريون، والحجارة تتوافق مع الكواركات، والخيط يتوافق مع الغلونات التي تربط النظام معاً.



**الشكل 5.11** الباريون يشبه البولا، وهو سلاح يستخدم للصيد. حيث تتوافق الصخور الموجودة في هذه الصورة مع كواركات الباريون. الكواركات حرة الحركة، ولكنها يجب أن تظل قريبة من الكواركات الأخرى.

## 4.11 | مسرعات الجسيمات والكواشف Particle Accelerators and Detectors

### الأهداف التعليمية

في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- مقارنة وتمييز الأنواع المختلفة من مسرعات الجسيمات.
- وصف الغرض والمكونات وآلية العمل لآلة التصادم النموذجية.
- شرح دور كل نوع من الكواشف الفرعية لكاشف الجسيمات متعدد الأغراض النموذجي.
- استخدام انحناء مسار الشحن لتحديد عزم الجسيمات.

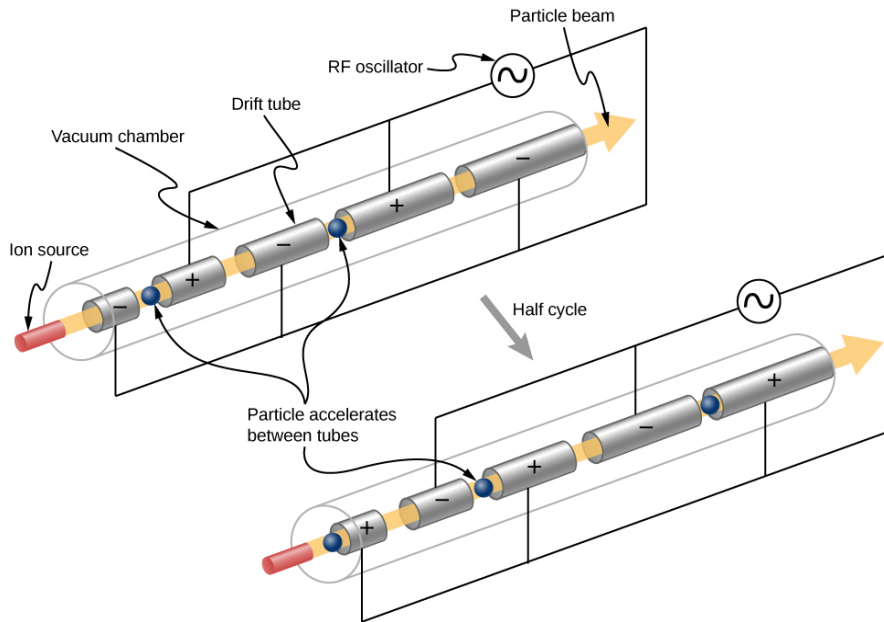
الهدف من فيزياء الجسيمات التجريبية هو قياس الجسيمات الأولية بدقة. الطريقة الأساسية المستخدمة لتحقيق هذه الغاية هي إنتاج هذه الجسيمات في تصادمات عالية الطاقة، ومن ثم قياس نواتج استخدام أجهزة كشف جسيمات عالية الحساسية. تستخدم هذه التجارب لاختبار ومراجعة النماذج العلمية للتفاعلات الجسيمية. الغرض من هذا الجزء من الفصل هو وصف مسرعات وكواشف الجسيمات. تعتمد الآلات الحديثة على الأجهزة السابقة، لذلك من المفيد تقديم تاريخ موجز عن المسرعات وأجهزة الكشف.

### مسرعات الجسيمات المبكرة

**مسرّع الجسيمات** هو آلة مصممة لتسريع الجسيمات المشحونة. وعادةً ما يتم تحقيق هذا التسارع باستخدام الحقول الكهربائية أو الحقول المغناطيسية القوية أو كليهما. وكمثال بسيط على مسرّع الجسيمات شاهد مسرّع فان دي غراف في الرابط التالي (**الكومون الكهربائي** (<http://cnx.org/content/m58427/latest/>)). يقوم هذا النوع من المسرعات بتجميع الشحنات على كرة معدنية مجوفة باستخدام حزام متحرك. عندما يكون فرق الكومون الكهروساكن للكورة كبيراً بما فيه الكفاية، يتم استخدام الحقل لتسريع

الجسيمات من خلال أنبوب مفرغ. الطاقات التي ينتجها مسرع فان دي غراف ليست كبيرة بما يكفي لإنشاء جسيمات جديدة، ولكن الجهاز كان مهماً للاستكشاف المبكر للنواة الذرية.

يمكن إنتاج طاقات أكبر بواسطة مسرع خطي (يُطلق عليه اسم "linac"). يتم تسريع الجسيمات المشحونة المنتجة في بداية اللينك بخط متواصل من الأنابيب المجوفة المشحونة. يتم ضبط الجهد بين زوج معين من الأنابيب لسحب الجسيم المشحون إلى الداخل، وبمجرد وصول الجسيم، يتم ضبط الكمون بين الزوج التالي من الأنابيب لدفع الجسيم المشحون إلى الخارج. بمعنى آخر، يتم تطبيق الفولتية بطريقة تعطي فيها الأنابيب سلسلة من الركلات الكهربائية المتزامنة بعناية (الشكل 6.11). تستخدم أجهزة اللينك الحديثة مجاوب الترددات الراديوية (RF) التي تنشئ الحقول الكهربائية المتذبذبة، والتي تدفع الجسيم إلى الأمام تماماً كما تدفع أمواج المحيط من يتزلج عليها. يمكن لأجهزة اللينك تسريع الإلكترونات إلى أكثر من 100 MeV. (تتحرك الإلكترونات ذات الطاقات الحركية التي تزيد على 2 MeV بسرعة تقارب سرعة الضوء.) في أبحاث الجسيمات الحديثة، غالباً ما تستخدم المعجلات الخطية في المرحلة الأولى من التسارع.



**الشكل 6.11** في المسرع الخطي، تقوم الأنابيب المشحونة بتسريع الجسيمات عبر سلسلة من الركلات الكهربائية. كل أنبوب يكون أطول من الأنبوب السابق لأن الجسم يتحرك بشكل أسرع أثناء تسارعه.

## مثال 5.11

### أنابيب التسريع

يحتوي مسرع خطي مصمم لإنتاج حزمة من البروتونات طاقتها الحركية 800 MeV على 2000 أنبوب تسريع تفصل بينها فجوات. ما هو متوسط الكمون، الذي يجب تطبيقه بين الأنابيب لتحقيق الطاقة المطلوبة؟ (تلميح:  $U = qV$ ).

### خطة الحل:

الطاقة الممنوحة للبروتون في كل فجوة بين الأنابيب هي  $U = qV$ ، حيث  $q$  هي شحنة البروتون و  $V$  هي فرق الكمون بين طرفي الفجوة. بما أن  $q = qe = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$  و  $1 \text{ eV} = (1V) (1.6 \times 10^{-19} \text{ C})$ ، فإن البروتون يكتسب 1 eV من الطاقة لكل فولت



على طرفي الفجوة التي يمر بها. تم توقيت الكُمون المتناوب المطبق على الأنابيب، بحيث يُضاف إلى الطاقة في كل فجوة. الكُمون الفعال هو مجموع كمونات الفجوات ويساوي 800 MeV ليمنح كل بروتون طاقة تبلغ 800 MeV

**الحل:**

هناك 2000 فجوة ومجموع الكُمونات على أطرافها يبلغ 800 MeV. لذلك، فإن متوسط الكُمون المطبق هو 0.4 MV أو 400 kV.

**ملاحظة:**

تحقيق كُمون بهذا المطال في الفراغ لا يعد أمراً صعباً. ولكننا سنحتاج إلى كُمون أعلى بكثير للفجوات للوصول إلى طاقة أعلى، كذلك الموجودة في منشأة SLAC التي تبلغ طاقتها 50 GeV. يتم مساعدة السنكروترونات بواسطة المسار الدائري للجسيمات المتسارعة، والتي يمكن أن تدور عدة مرات، مما يضاعف وبشكل فعال عدد التسارعات بعدد المدارات. والذي من شأنه أن يجعل الوصول إلى طاقات أكبر من 1 TeV ممكناً.

**5.11 تحقق من فهمك:** ما مقدار الطاقة التي يكتسبها الإلكترون في تسارعه عبر فرق كُمون يبلغ 1 V؟

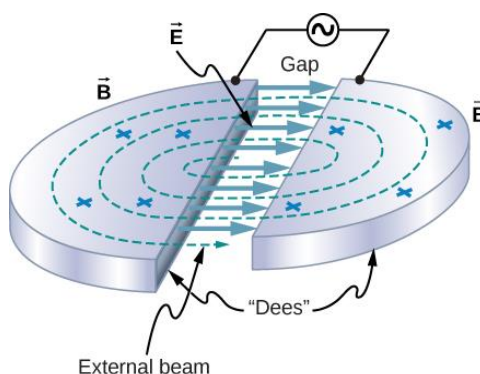
إن مسرع الجيل التالي بعد الينك هو السيكلوترون أو المسرع الدوراني (**الشكل 7.11**). يستخدم السيكلوترون الحقل الكهربائي المتناوب والمغانط الثابتة لتسريع الجسيمات في مسار حلزوني دائري. يتم تسريع الجسيم في وسط السيكلوترون أولاً بواسطة حقل كهربائي في فجوة بين مغناطيسين على شكل حرف D. عندما يعبر الجسيم المغناطيس الذي يكون على شكل حرف D، فإن الجسيم ينحرف إلى داخل المسار الدائري تحت تأثير قوة لورنتز. (نوقشت قوة لورنتز في فصل **القوى والمجالات المغناطيسية** (<http://cnx.org/content/m58737/latest/>)). بافتراض عدم وجود ضياعات في الطاقة، فإن عزم الجسيم يرتبط بنصف قطر

الانحناء بالعلاقة التالية:

$$p = 0.3Br$$

(11.2)

حيث  $p$  هو العزم، واحداً (GeV/c)،  $B$  واحداً Tesla، و  $r$  هو نصف قطر المسار ("المدار") مقدراً بالمتر. هذه العلاقة صالحة للسرعات الكلاسيكية والنسبية. يعيد المسار الدائري الجسيم إلى فجوة الحقل الكهربائي، فيتم عكس الحقل الكهربائي، وتستمر العملية. مع تسارع الجسيم، يصبح نصف قطر الانحناء أكبر - حلزونياً باتجاه الخارج- إلى أن تغادر الإلكترونات الجهاز.



**الشكل 7.11** تستخدم السيكلوترونات حقلاً مغناطيسياً لتحريك الجسيمات في مدارات دائرية. مع مرور الجسيمات بين الألواح المغناطيسية التي تكون على شكل الحرف D، يتم عكس الكُمون على طرفي الفجوة، وبذلك تتسارع الجسيمات مرتين في كل مدار.

❖ شاهد هذا الفيديو (<https://openstaxcollege.org/l/21cyclotron>) لمعرفة المزيد عن السيكلوترونات.

السنكروترون هو مسرع دوراني يستخدم الكمون المتناوب وقوة الحقل المغناطيسي المتزايدة لتسريع الجسيمات إلى طاقات أعلى. يتم تسريع الجسيمات المشحونة بواسطة تجويغات ترددات راديوية، ويتم توجيهها وتركيزها بواسطة مغناط. تتم مزامنة تجويغات الترددات الراديوية لإعطاء "ركلات" للجسيمات أثناء مرورها، ومن هنا جاءت تسمية المسرع بالتزامني. يتطلب توجيه الجسيمات ذات الطاقة العالية حقولاً مغناطيسية قوية، لذلك غالباً ما تستخدم مغناط فائقة الناقلية لتقليل الضياعات الحرارية. عندما تتحرك الجسيمات المشحونة في دائرة، فإنها تشع الطاقة: وفقاً للنظرية الكلاسيكية، فإن أي جسيم مشحون يتسارع (حيث أن الحركة الدائرية هي حركة متسارعة) يشع أيضاً. في السنكروترون، يُسمى هذا الإشعاع بإشعاع السنكروترون. هذا الإشعاع مفيد للعديد من الأغراض الأخرى، كالأغراض الطبية ودراسة المواد.

## مثال 6.11

### طاقة الإلكترون في السيكلوترون

يتم تسريع الإلكترون باستخدام السيكلوترون. إذا كان شدة الحقل المغناطيسي 1.5 Tesla، وكان نصف قطر المغناط التي تكون على شكل حرف D 1.2 m، فما هي الطاقة الحركية للجسيم الخارج؟

#### خطة الحل:

إذا تجاوز نصف قطر مدار الإلكترون نصف قطر المغناط التي تكون على شكل حرف D، فسيخرج الإلكترون من الجهاز. لذلك، فإن نصف قطر المغناط يضع حداً أعلى لنصف القطر، وبالتالي، لعزم الجسيمات المتسارعة وطاقته. يتم حساب عزم خروج الجسيم باستخدام نصف قطر المدار وقوة الحقل المغناطيسي. يمكن حساب طاقة الخروج للجسيم من عزم الجسيم (النسبية).

#### الحل:

بفرض عدم وجود ضياعات في الطاقة، فإن عزم الجسيم في السيكلوترون هو:

$$p = 0.3 Br = 0.3 (1.5 \text{ T})(1.2 \text{ m}) = 0.543 \text{ GeV}/c.$$


طاقة العزم  $pc^2 = 0.543 \text{ GeV} = 543 \text{ MeV}$  أكبر بكثير من طاقة الكتلة الساكنة للإلكترون،  $mc^2 = 0.511 \text{ MeV}$ ، لذلك يجب استخدام العلاقة النسبية لطاقة الإلكترون (انظر فصل النسبية). الطاقة الكلية للإلكترون هي:

$$E_{\text{total}} = \sqrt{(pc)^2 + (mc^2)^2} = \sqrt{(543)^2 + (0.511)^2} \approx 543 \text{ MeV}$$

$$K = E_{\text{total}} - mc^2 = 543 \text{ GeV} - 0.511 \text{ GeV} \approx 543 \text{ MeV}.$$

#### ملاحظة:

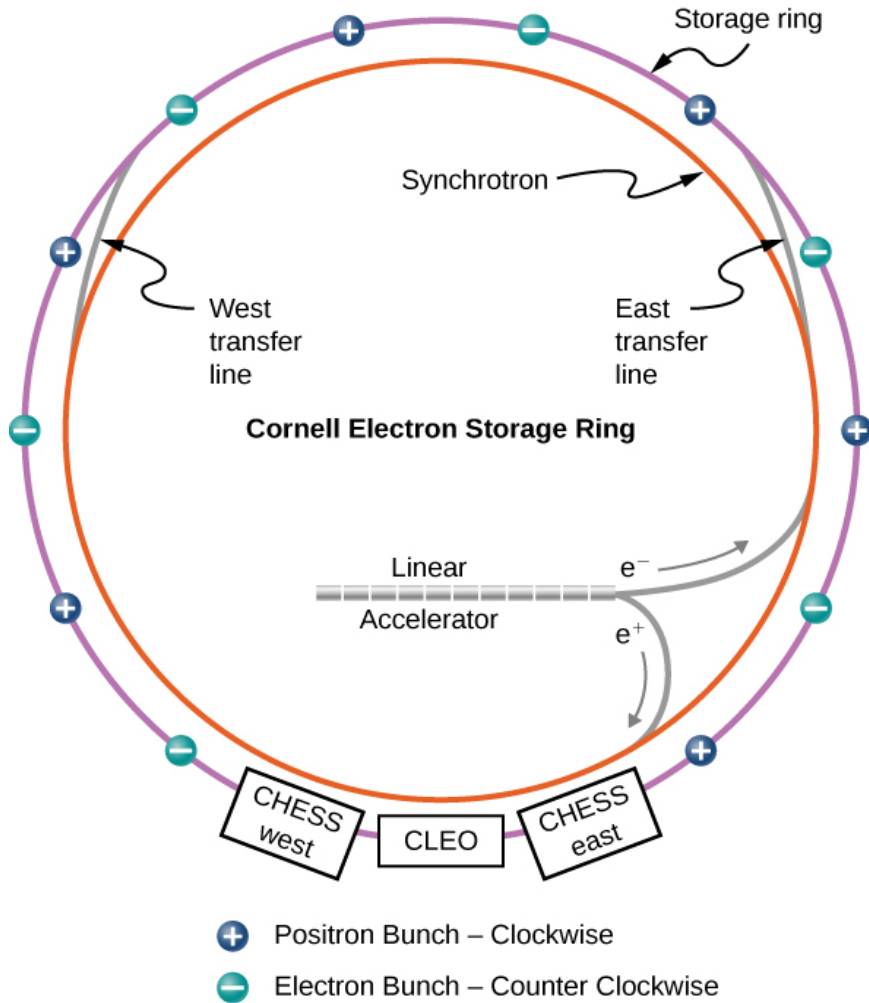
الطاقة الكلية للإلكترون أكبر بكثير من طاقة الكتلة الساكنة. بمعنى آخر، الطاقة الكلية للإلكترون تكون كلها تقريباً على شكل طاقة حركية. يمكن استخدام السيكلوترونات لإجراء تجارب فيزياء نووية أو في المعالجة بالجسيمات لعلاج السرطان.

 **6.11 تحقق من فهمك:** ينتقل جسيم مشحون ذو عزم معين في قوس عبر حقل مغناطيسي موحد. ما الذي سيحدث إذا تم مضاعفة الحقل المغناطيسي؟

### آلات الحزم المتصادمة

يمكن إنشاء جسيمات جديدة عن طريق تصادم الجسيمات عند طاقات مرتفعة. وفقاً لعلاقة أينشتاين الخاصة بالطاقة الكتلية، يتم تحويل طاقات الجسيمات المتصادمة إلى طاقة كتلية للجسيم المتشكل. الطريقة الأكثر فعالية للقيام بذلك هي باستخدام آلات حزم الجسيمات المتصادمة. تشكل آلة الحزم المتصادمة حزمتين تدوران بشكل متعاكس في مسرع سيكلوتروني، وتخزن الحزم عند طاقة ثابتة، ثم تقوم بتركيز الحزم على بعضها في مركز الكاشف الحساس في اللحظة المناسبة.

النموذج الأولي لآلة الحزم المتصادمة هي حلقة كورنيل لتخزين الإلكترون، وتقع في إيثاكا، نيويورك (الشكل 8.11). يتم إنشاء الإلكترونات ( $e^-$ ) والبوزيترونات ( $e^+$ ) في بداية المسرع الخطي ويتم تسريعها حتى 150 MeV. ثم يتم حقن الجسيمات في حلقة السنكروترون الداخلية، حيث يتم تسريعها بواسطة تجاويف الترددات الراديوية إلى 4.5 GeV حتى 6 GeV. عندما تصل الحزم إلى السرعة المطلوبة، يتم نقلها و "تخزينها" في حلقة تخزين خارجية عند الطاقة نفسها. تنتقل الحزمتان اللتان تدوران بشكل متعاكس عبر أنبوب الطرد نفسه، ولكن يتم الاحتفاظ بهما منفصلتين حتى يجين وقت الاصطدامات. تقوم الإلكترونات والبوزيترونات بتطويق الآلة في مجموعات 390000 مرة في كل ثانية.



**الشكل 8.11** تستخدم حلقة كورنيل لتخزين الإلكترون مسرعاً خطياً وسنكروتروناً لتسريع الإلكترونات والبوزيترونات إلى 4.5-6 GeV. يتم الاحتفاظ بالجزيئات في حلقة التخزين الخارجية في تلك الطاقة حتى يتم اصطدامها في كاشف الجسيمات.

عند اصطدام الإلكترون بالبوزيترون، يفني بعضها بعضاً لإنتاج فوتون، يوجد لفترة قصيرة جداً لا تكفي لاكتشافه. ينتج الفوتون زوج من اللبتون (مثلاً إلكترون وبوزيترون أو ميون وميون مضاد أو تاو وتاو مضاد) أو زوج من الكواركات. إذا تم إنتاج الكواركات، فإن الميزونات تتشكل، مثلاً  $c\bar{c}$  و  $b\bar{b}$ . يتم إنشاء هذه الميزونات في حالة سكون تقريباً لأن العزم الكلي الأولي لنظام إلكترون-بوزيترون هو صفر. لاحظ أنه لا يمكن إنشاء ميزونات عند أي طاقة تصادم ولكن فقط عند الطاقات "الرنانة" التي تتوافق مع الكتل الفريدة

للميزونات (**الجدول 5.11**). الميزونات التي تم إنشاؤها بهذه الطريقة تكون غير مستقرة للغاية وتحلل بسرعة إلى جزيئات أخف كالإلكترونات والبروتونات والفوتونات. توفر "شظايا" التصادم معلومات قيمة عن تفاعلات الجسيمات. مع تقدم مجال فيزياء الجسيمات، أصبحت آلات الحزم المتصادمة أكثر قوة. مصادم هادرون الكبير (LHC) حالياً أكبر مسرع في العالم، يصطدم البروتونات عند طاقات حزمية تتجاوز 6 TeV. يشير مركز طاقة الكتلة ( $W$ ) إلى إجمالي الطاقة المتاحة لإنشاء جسيمات جديدة في جهاز التصادم، أو إجمالي طاقة الجسيمات الواردة في إطار مركز الكتلة. تمت مناقشة مفهوم الإطار المرجعي لمركز الكتلة في فصل **العزم الخطي والتصادمات** (<http://cnx.org/content/m58317/latest/>). وبالتالي، فإن LHC قادر على إنتاج جسيم واحد أو أكثر بكتلة إجمالية تتجاوز 12 TeV. تعطى طاقة مركز الكتلة بالعلاقة:

$$W^2 = 2[E_1 E_2 + (p_1 c)(p_2 c)] + (m_1 c^2)^2 + (m_2 c^2)^2, \quad (11.3)$$

حيث:  $E_1$  و  $E_2$  هما الطاقة الكلية للجسيمين الواردين (1 و 2)،  $p_1$  و  $p_2$  هي قيم عزمهما، و  $m_1$  و  $m_2$  هما كتلتنا السكون.

## مثال 7.11

### إنشاء جسيم جديد

يتم إنشاء كتلة الأيسلون ( $Y$ ) وهو ميزون ( $b\bar{b}$ ) في مصادم إلكترون - بوزيترون متناظر. ماهي طاقة الحزمة المطلوبة؟

### خطة الحل:

**مجموعة بيانات الجسيمات** (<https://openstaxcollege.org/l/21particledata>) تذكر أن طاقة الكتلة الساكنة لهذا الميزون تبلغ نحو 10.58 GeV. يمكن تبسيط العلاقة الواردة أعلاه لحساب طاقة مركز الكتلة لأن المصادم متناظر أي أن:  $\vec{P}_1 = \vec{P}_2$  كما أن الكتل الساكنة للإلكترونات والبوزيترونات المتصادمة متطابقة ( $m_e c^2 = 0.511 \text{ MeV}$ ) وأصغر بكثير من كتلة الجسيم المتشكل بالطاقة. وبالتالي، يمكن التعبير عن طاقة مركز الكتلة ( $W$ ) كلياً بدلالة طاقة الحزمة،  $E_{\text{beam}} = E_1 = E_2$ .

### الحل:

استناداً إلى الافتراضات المذكورة أعلاه، لدينا:

$$W^2 \approx 2[E_1 E_2 + E_1 E_2] = 4E_1 E_2 = 4E_1^2.$$

وعليه فإن طاقة الحزمة هي:


$$E_{\text{beam}} \approx E_1 = \frac{W}{2}.$$

طاقة الكتلة الساكنة للجسيم الناتجة في الاصطدام تساوي طاقة مركز الكتلة، وبالتالي:

$$E_{\text{beam}} \approx \frac{10.58 \text{ GeV}}{2} = 5.29 \text{ GeV}.$$

### ملاحظة:

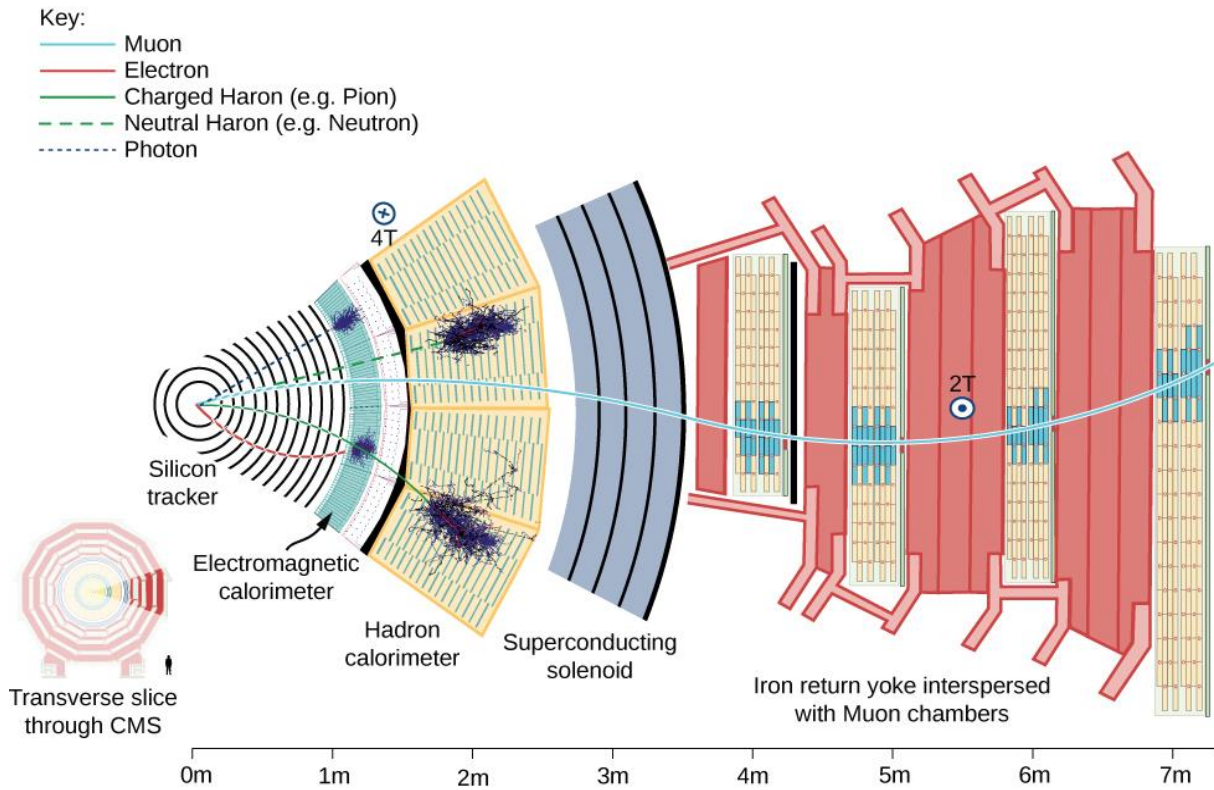
نظراً لقياس الطاقة في هذه المسألة، فإن طاقة الكتلة الساكنة لميزون أيسلون ( $Y$ ) ترجع بالكامل تقريباً إلى الطاقات الحركية الأولية للإلكترونات والبوزيترونات. هذا الميزون غير مستقر نهائياً ويتحلل بسرعة إلى جزيئات أخف وزناً وأكثر استقراراً. يظهر وجود الجسيم أيسلون ( $Y$ ) كزيادة هائلة في مثل هذه الأحداث عند 5.29 GeV.

6.11 تحقق من فهمك: لماذا يكون المصادم المتناظر "متناظراً"؟ 

تتطلب طاقات الحزم الأعلى مسرعاً أكبر، لذا فإن آلات الحزم المتصادمة الحديثة كبيرة جداً. LHC، على سبيل المثال، يبلغ محيطه 17 ميلاً (الشكل 27.5). (في الأربعينيات من القرن الماضي، قام إنريكو فيرمي بتصوير مسرع يطوق كل الأرض!) من التحديات العلمية المهمة في القرن الحادي والعشرين تقليل حجم مسرعات الجسيمات.

## كواشف الجسيمات

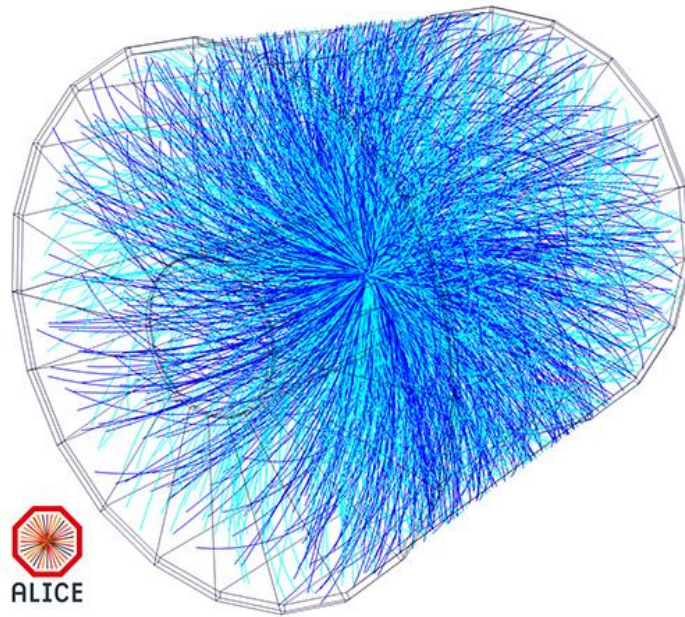
الغرض من **كواشف الجسيمات** هو قياس نتائج الاصطدامات الناتجة عن مسرع الجسيمات بدقة. الكواشف متعددة الأغراض. بمعنى آخر، يتم تقسيم الكاشف إلى عدة وحدات فرعية، كل منها مصمم لقياس جانب مختلف لحدث التصادم. على سبيل المثال، قد يتم تصميم أحد الكواشف لقياس الفوتونات، ويمكن تصميم كاشف آخر لقياس الميونات. لتوضيح كيفية مساهمة وحدات الكشف الفرعية في فهم حدث التصادم بأكمله، فإننا نصف وحدات الكشف الفرعية للولب الميون المركب (CMS)، والذي تم استخدامه لاكتشاف بوزون هيغنز في LHC (الشكل 9.11).



**الشكل 9.11** كاشف لولب الميون المركب. يتكون الكاشف من عدة طبقات، كل منها مسؤولة عن قياس أنواع مختلفة من الجسيمات.

يتجه أنبوب الحزمة الخاص بالكاشف إلى خارج (وإلى داخل) الصفحة على اليسار. تخرج الجسيمات الناتجة عن تصادمات  $pp$  (شظايا التصادم) من الكاشف في جميع الاتجاهات. تواجه هذه الجسيمات طبقات متعددة من وحدات الكشف الفرعية. وحدة الكشف الفرعية هي كاشف جسيمات موجود ضمن نظام أكبر من الكواشف المصممة لقياس أنواع معينة من الجسيمات. هناك عدة أنواع رئيسة لوحدة الكشف الفرعية. تُحدد أجهزة التتبع مسار الجسيمات وبالتالي عزمها؛ وتقيس المسرعات طاقة الجسيمات؛ بينما كواشف تحديد الجسيمات تحدد هوية الجسيم (الكتلة).

أول مجموعة من وحدات الكشف الفرعية، التي تواجهها الجسيمات هي نظام التتبع السليكوني. تم تصميم هذا النظام لقياس عزم الجسيمات المشحونة (كالإلكترونات والبروتونات). يتم غمر الكاشف في حقل مغناطيسي موحد، لذلك تنحرف الجسيمات المشحونة ضمن مسار دائري تحت تأثير قوة لورنتز (كما يحدث في السيكلوترون). إذا كان عزم الجسيم كبيراً، فيكون نصف قطر المسار كبيراً، ويكون المسار مستقيماً تقريباً. لكن إذا كان العزم صغيراً، يكون نصف قطر المسار صغيراً، ويكون المسار منحنيًا بشدة. عند مرور الجسيمات عبر الكاشف، فإنها تتفاعل مع كواشف ميكروية سليكونية في عدة نقاط. تنتج هذه الكواشف إشارات كهربائية صغيرة عند مرور الجسيمات المشحونة بالقرب من عناصر الكاشف. ثم يتم تضخيم هذه الإشارات وتسجيلها. يتم استخدام سلسلة من "الضربات" الكهربائية لتحديد مسار الجسيمات في نظام التتبع. يتم تحديد نصف قطر المسار "الأنسب" عن طريق الكمبيوتر، وبالتالي عزم الجسيمات. في LHC يتم تسجيل عدد كبير من المسارات لحدث التصادم نفسه. تحديد المسارات المناسبة مبينة بخطوط زرقاء وخضراء في الشكل 10.11.



**الشكل 10.11** منظر ثلاثي الأبعاد لشظايا الجسيمات في LHC كما يراها كاشف ATLAS.

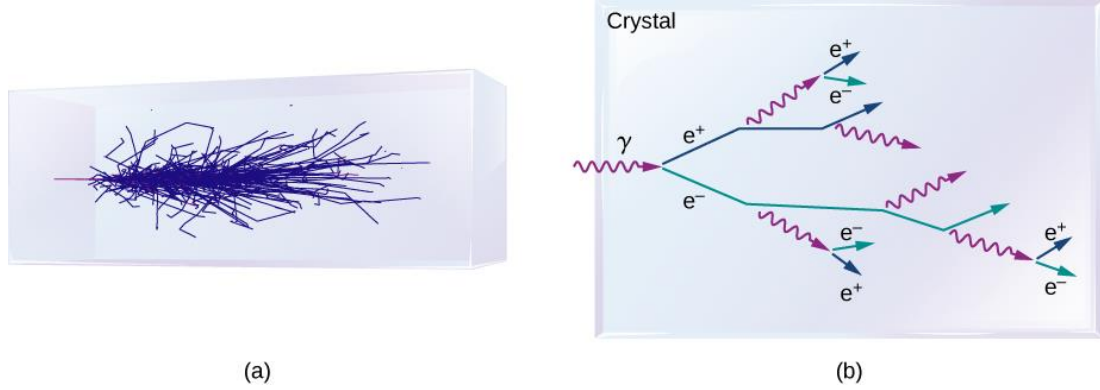
يقع المسعر الكهربائي خلف طبقات نظام التتبع. يتكون هذا الكاشف من بلورة صافية قائمة تحتوي على الرصاص. عندما تتفاعل الإلكترونات مع هذه البلورة، فإنها تشع فوتونات عالية الطاقة. تتفاعل الفوتونات مع البلورة لإنتاج أزواج إلكترون - بوزيترون. ثم تشع هذه الجسيمات المزيد من الفوتونات. تتكرر العملية، مما ينتج عنه سيل من الجسيمات (البلورة "تضيء"). النموذج الخام لهذه العملية يكون على النحو التالي.

يصطدم الإلكترون ذو الطاقة  $E_0$  بالبلورة ويفقد نصف طاقته على شكل فوتون. ينتج الفوتون زوجاً من الإلكترون - بوزيترون، وبمضي كل جسيم بنصف طاقة الفوتون. وفي الوقت نفسه، يشع الإلكترون الأصلي مرة أخرى. لذلك، يبقى لدينا أربع جسيمات: إلكترونان، بوزيترون واحد، وفوتون واحد، ولكل منها طاقة بمقدار  $E_0/4$ .

يزيد عدد الجسيمات في السيل بشكل هندسي. بعد عدد  $n$  من الأحداث الإشعاعية، يبلغ عدد الجسيمات  $N = 2^n$ . وبالتالي، فإن الطاقة الإجمالية لكل الجسيمات بعد عدد  $n$  من الأحداث الإشعاعية هو:

$$E(t) = \frac{E_0}{2^n},$$

حيث  $E_0$  هي الطاقة العارضة و  $E(t)$  هي كمية الطاقة لكل جسيم بعد عدد  $n$  من الأحداث. يتسبب الفوتون الوارد بسلسلة مماثلة من الأحداث (الشكل 11.11). إذا انخفضت طاقة كل جسيم عن قيمة حدية معينة، تصبح الأنواع الأخرى من العمليات الإشعاعية مهمة ويتوقف سيل الجسيمات. في النهاية، يتم امتصاص الطاقة الكلية للجسيم الوارد وتحوّل إلى إشارة كهربائية.



**الشكل 11.11** (a) سيل الجسيمات المنتجة في المسعر البلوري. (b) رسم تخطيطي يوضح التسلسل النموذجي للتفاعلات في سيل الجسيمات.

وراء المسعر البلوري يوجد المسعر الهادروني. كما يوحي الاسم، فإن وحدة الكشف الفرعية هذه تقوم بقياس الهادرونات كالبروتونات والبيونات. يتكون المسعر الهادروني من طبقات من سبيكة البراس والفولاذ مفصولة بمواضات بلاستيكية. والغرض منه هو امتصاص طاقة الجسيمات وتحويلها إلى إشارة إلكترونية. وراء هذا الكاشف يوجد ملف مغناطيسي كبير يستخدم لإنتاج حقل موحد للتتبع.

وحدة الكشف الفرعية الأخيرة هي كاشف الميون، والذي يتكون من ألواح من الحديد لا يمكن اختراقها إلا من قبل الميونات (والنوترونات). توجد بين هذه الألواح الحديدية أنواع متعددة من عناصر تتبع الميون التي تقيس عزم الميون بدقة. تعد كواشف الميون مهمة لأن بوزون هيغنز (سيتم مناقشته قريباً) يمكن اكتشافه من خلال تحلله إلى أربعة ميونات، ومن هنا جاء اسم الكاشف. بمجرد أن يتم جمع البيانات من كل وحدات كشف الجسيمات الفرعية، يمكن تقييم حدث التصادم بأكمله. تُعطى طاقة الجسيم  $i$  تعطي بالعلاقة:

$$E_i = \sqrt{(p_i c)^2 + (m_i c^2)^2},$$

حيث:  $p_i$  هو القيمة المطلقة للعزم للجسيم  $i$ ، و  $m_i$  هي الكتلة في حالة السكون. وبالتالي فإن الطاقة الكلية لجميع الجسيمات هي:

$$E_{\text{total}} = \sum_i E_i.$$

إذا تم الكشف عن جميع الجسيمات، يجب أن تكون الطاقة الكلية مساوية لطاقة مركز الكتلة لألة الحزم المتصادمة ( $W$ ). من الناحية العملية، لم يتم تحديد جميع الجسيمات، إما لأنه من الصعب جداً اكتشاف هذه الجسيمات (النوترونات) أو لأن هذه الجسيمات "تتسلل". في كثير من الحالات، يمكن "إعادة بناء" سلاسل كاملة من التحلل، كما تتم إعادة تجميع الساعة التي تم تحطيمها إلى قطع. هذه المعلومات عن سلاسل التحلل مهمة لتقييم نماذج تفاعلات الجسيمات.

## الأهداف التعليمية

- في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:
- وصف النموذج القياسي بدلالة القوى الأساسية الأربعة وجسيمات التبادل.
  - رسم مخطط فاينمان لتفاعل الجسيم البسيط.
  - استخدام مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ لحساب مدى القوى الموصوفة بالنموذج القياسي.
  - شرح السبب وراء نظريات التوحيد الكبرى.

النشاط الفكري الرئيس لأي عالم هو مراجعة النماذج العلمية وتطويرها. يسعى فيزيائيو الجسيمات إلى تطوير نماذج تفاعلات الجسيمات. يعتمد هذا العمل مباشرةً على العمل المنجز على الجاذبية والكهرطيسية في القرون السابع عشر والثامن عشر والتاسع عشر. الهدف النهائي للفيزياء هو "نظرية موحدة لكل شيء" تصف جميع تفاعلات الجسيمات بدلالة معادلة أنيقة واحدة وصورة. قد تكون المعادلة نفسها معقدة، لكن العديد من العلماء يشكون في أن الفكرة وراء المعادلة ستجعلنا نصيح: "كيف فاتنا ذلك؟ لقد كان الأمر واضحاً جداً!"

في هذا الجزء من الفصل، نقدم النموذج القياسي، وهو أفضل نموذج حالي لتفاعلات الجسيمات. قمنا بوصف النموذج القياسي بالتفصيل من حيث القوى الكهرطيسية والنوية الضعيفة والقوية. سنقوم في نهاية هذا الجزء بمراجعة نظريات التوحيد في فيزياء الجسيمات.

## مقدمة في النموذج القياسي

يحتوي النموذج القياسي لتفاعلات الجسيمات على فكرتين: نظرية الكهروضعيفة واللونية الكمومية (QCD) (القوة المؤثرة بين الشحنات اللونية). تقوم نظرية الكهروضعيفة بتوحيد كل من نظرية الديناميك الكهربائي الكمومي (QED)، والمكافئ الحديث للكهرطيسية الكلاسيكية ونظرية التفاعلات النوية الضعيفة. يجمع النموذج القياسي بين نظرية النسبية وميكانيك الكم. تحدث في النموذج القياسي تفاعلات الجسيمات من خلال تبادل البوزونات، "حاملات القوة". على سبيل المثال، يتم تبادل القوة الكهروضعيفة بين جسيمين موجبي الشحنة عن طريق إرسال فوتونات عديمة الكتلة واستقبالها.

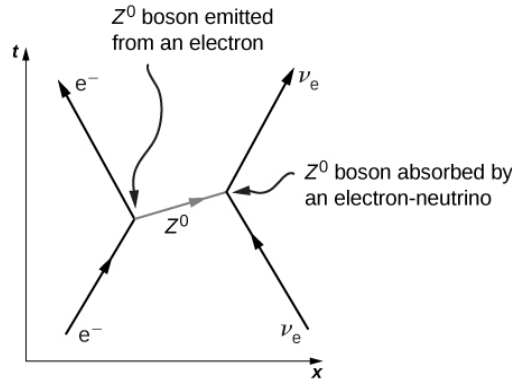
يمكن أن يحدث هذا في نطاق نظري لانهائي. ونتيجة هذه التفاعلات هي قوة كولون التنافرية (أو التجاذب). وبالمثل، ترتبط الكواركات معاً من خلال تبادل الغلونات عديمة الكتلة. تتبعثر اللبتونات من لبتونات أخرى (أو تتحلل إلى جزيئات أخف) من خلال تبادل البوزونات الضخمة W و Z. ونورد في **الجدول 6.11** ملخصاً للقوى كما هي موضحة في النموذج القياسي. القوة الجاذبية، التي يتم تعديلها من خلال تبادل الجرافتونات عديمة الكتلة، تضاف في هذا الجدول للتأكد من اكتماله ولكنها ليست جزءاً من النموذج القياسي.



## الجدول 6.11 القوى الأربع والنموذج القياسي

القوة	القوة النسبية	الجسيم المتبادل (البوزونات)	الجسيمات الفعالة	المدى
القوية	1	الغلون	الكواركات	$10^{-15}$ m
الكهرطيسية	1/137	الفوتون	الجسيمات المشحونة	$\infty$
الضعيفة	$10^{-10}$	البوزونات $W^+$ , $W^-$ , $Z$	الكواركات و اللبتونات والنترونات	$10^{-18}$ m
الجاذبية	$10^{-38}$	الجرافتون	كل الجسيمات	$\infty$

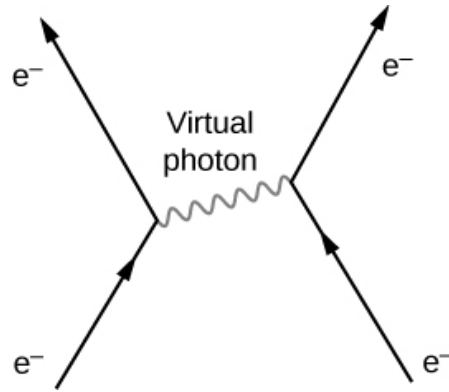
يمكن التعبير عن النموذج القياسي بدلالة المعادلات والرسوم البيانية. المعادلات معقدة وعادة ما تتم تغطيتها في دورة أكثر تقدماً في الفيزياء الحديثة. ومع ذلك، يمكن التقاط جوهر النموذج القياسي باستخدام **مخططات فاينمان**. مخطط فاينمان، الذي اخترعه الفيزيائي الأمريكي ريتشارد فاينمان (1918-1988)، هو مخطط زمكاني يصف كيفية تحرك وتفاعل الجسيمات. يتم استخدام رموز مختلفة للجسيمات المختلفة. تُظهر تفاعلات الجسيمات في بعد واحد على هيئة رسم بياني للزمن والموقع (وليس رسم بياني للزمن والموضع). على سبيل المثال، بالنظر إلى تبعثر الإلكترون والإلكترون-نترينو (**الشكل 12.11**). يتحرك الإلكترون نحو القيم الموجبة للمحور  $x$  (إلى اليمين) ويتصادم مع إلكترون نترينو يتحرك إلى اليسار. يتبادل الإلكترون بوزون  $Z$  (شحنته صفر). يتبعثر الإلكترون إلى اليسار ويتبعثر النترينو إلى اليمين. عملية التبادل ليست فورية. حيث ينتقل البوزون  $Z$  من جسيم إلى آخر خلال فترة زمنية قصيرة. يقال إن تفاعل الإلكترون والنترينو يحدث عبر القوة النووية الضعيفة. لا يمكن تفسير هذه القوة من خلال الكهرطيسية الكلاسيكية لأن شحنة النترينو هي صفر. وستتم مناقشة القوة النووية الضعيفة مرة أخرى لاحقاً في هذا الجزء من الفصل.



**الشكل 12.11** في مخطط فاينمان، تبادل البوزون  $Z^0$  الافتراضي يحمل القوة النووية الضعيفة بين الإلكترون والنترينو.

## القوة الكهرطيسية

وفقاً لنظرية الديناميك الكهربي الكمي QED، تنتقل القوة الكهرطيسية بين الجسيمات المشحونة من خلال تبادل الفوتونات. تستند هذه النظرية إلى ثلاث عمليات أساسية: ينتقل الإلكترون من مكان إلى آخر، فيبعث فوتوناً أو يمتصه، ثم ينتقل من مكان إلى آخر مرة أخرى. عندما يتفاعل إلكترونان، يقوم أحدهما بإصدار الفوتون ويستقبله الآخر (**الشكل 13.11**). تقوم الفوتونات بنقل الطاقة والعزم من إلكترون إلى آخر. والنتيجة الصافية في هذه الحالة هي قوة تنافرية. عملية تبادل الفوتونات هي عملية افتراضية. **الجسيم الافتراضي** هو جسيم موجود لفترة قصيرة جداً من الوقت لا يمكن ملاحظته. الفوتونات الافتراضية قد تنتهك قانون مصونية الطاقة. ولرؤية ذلك، اعتبر أنه إذا كان زمن انتقال الفوتون  $\Delta t$  صغيراً جداً، فإن مبدأ الارتياب لهايزنبرغ ينص على أن عدم اليقين (الإرتياب) في طاقة الفوتون،  $\Delta E$ ، قد يكون كبيراً جداً.



**الشكل 13.11** مخطط فاينمان لاثنتين من الإلكترونات تتفاعل من خلال تبادل الفوتون.

لتقدير مدى التفاعل الكهرومغناطيسي، افترض أن عدم اليقين في الطاقة مقارب لطاقة الفوتون نفسه، أي أن:

$$\Delta E \approx E. \quad (11.4)$$

ينص مبدأ هايزنبرغ (عدم اليقين) على:

$$\Delta E \approx \frac{h}{\Delta t}. \quad (11.5)$$

بالجمع بين هاتين المعادلتين، يكون لدينا:

$$\Delta t \approx \frac{h}{E}. \quad (11.6)$$

تُعطى طاقة الفوتون بالعلاقة  $E = hf$ ، وبالتالي:

$$\Delta t \approx \frac{h}{hf} \approx \frac{1}{f} = \frac{\lambda}{c}. \quad (11.7)$$

وعليه فإن المسافة  $d$  التي يمكن أن يقطعها الفوتون خلال هذا الزمن هي:

$$d = c \Delta t \approx c \left( \frac{\lambda}{c} \right) = \lambda. \quad (11.8)$$

يمكن أن تكون طاقة الفوتون الافتراضي صغيرة بشكل عشوائي، لذلك يمكن أن يكون طول موجته كبيراً بشكل عشوائي - من حيث المبدأ، وكبيراً بشكل لا نهائي. وبالتالي فإن القوة الكهرومغناطيسية هي قوة بعيدة المدى.

### القوة النووية الضعيفة

القوة النووية الضعيفة مسؤولة عن التحلل الإشعاعي. نطاق القوة النووية الضعيفة قصير جداً (نحو  $10^{-18}$  m فقط) وكما هو حال القوى الأخرى في النموذج القياسي، فإنه يمكن وصف القوة الضعيفة بدلالة تبادل الجسيمات.

(لا توجد وظيفة بسيطة مثل قوة كولون لوصف هذه التفاعلات). الجسيم المتبادل هو واحد من ثلاثة بوزونات:  $W^+$  و  $W^-$  و  $Z^0$ . يتنبأ النموذج القياسي بوجود هذه الجسيمات ذات سبين 1- كما يتنبأ أيضاً بكتلتها النوعية. وبتطبيقه على التجارب السابقة، تم التنبؤ بكتلة البوزونات  $W$  بأنها تبلغ  $81 \text{ GeV}/c^2$  وتبلغ كتلة  $Z^0$  نحو  $90 \text{ GeV}/c^2$ . كشفت تجربة سيرن CERN في ثمانينيات القرن الماضي عن جسيمات بهذه الكتل تحديداً - وهو انتصار مذهل للنموذج.

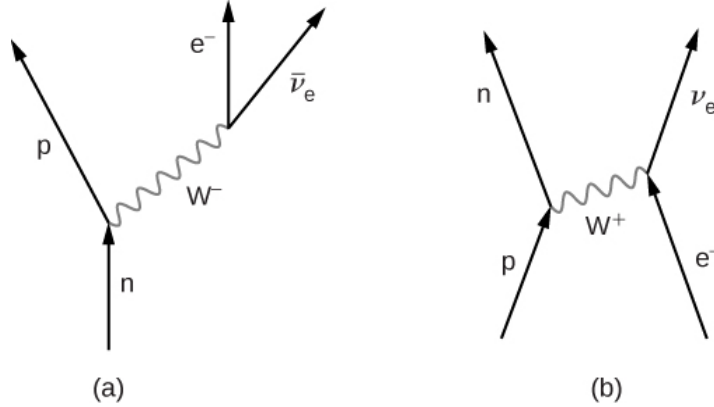
غالبًا ما ترتبط القوة النووية الضعيفة بتبعثر وتحلل الجسيمات غير المستقرة إلى جسيمات خفيفة. على سبيل المثال، تحلل النوترونات إلى بروتونات عبر القوة النووية الضعيفة. ويكتب هذا التفاعل بالشكل التالي:

$$n \rightarrow p + e^- + \nu_e,$$

حيث  $n$  هو النيوترون،  $p$  هو البروتون،  $e^-$  هو الإلكترون، و  $\nu_e$  هو نترينو الإلكترون عديم الكتلة تقريباً. هذه العملية، التي تدعى تحلل بيتا، مهمة في العديد من العمليات الفيزيائية. نورد في الشكل 14.11 (a) مخطط فاينمان لتحلل بيتا. يصدر النيوترون  $W^-$  ويصبح بروتوناً، ثم يقوم  $W^-$  بإنتاج إلكترون ومضاد النترينو. تشبه هذه العملية حادثة التبعثر:

$$e^- + p \rightarrow n + \nu_e,$$

في هذه العملية، يُصدر البروتون  $W^+$  ويتم تحويله إلى نوترون (b). ثم يجتمع  $W^+$  مع الإلكترون لتشكيل نترينو. ستجد المزيد من التفاعلات الكهروضعيفة في التمارين.



**الشكل 14.11** مخطط فاينمان للجسيمات التي تتفاعل من خلال تبادل بوزون  $W$ : (a) تحلل بيتا؛ (b) تحويل البروتون إلى نوترون.

يمكن تقدير مدى القوة النووية الضعيفة بحجة ماثلة للحجة السابقة. على افتراض أن حالة عدم اليقين في الطاقة مقارنة لطاقة جسيم التبادل التي تعطى بالعلاقة ( $E \approx mc^2$ )، يكون لدينا:

$$\Delta t \approx \frac{h}{mc^2}. \quad (11.9)$$

وبالتالي فإن الحد الأقصى للمسافة  $d$  الذي يمكن لجسيم التبادل أن يقطعها (على افتراض أنه يتحرك بسرعة قريبة من  $c$ ) هو:

$$d \approx c\Delta t = \frac{h}{mc}. \quad (11.10)$$

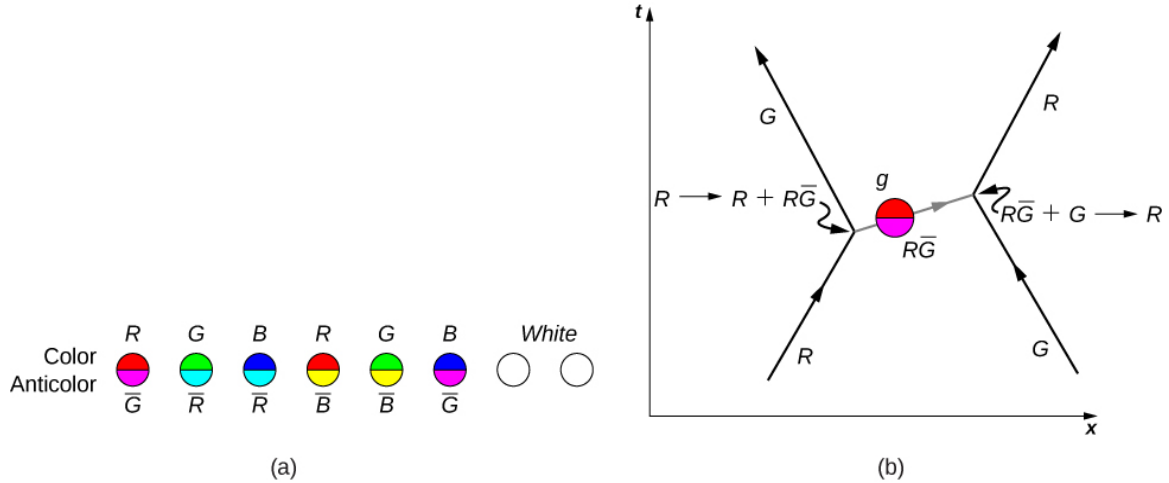
بالنسبة لأحد البوزونات المشحونة التي يكون لها:  $mc^2 \approx 80 \text{ GeV} = 1.28 \times 10^{-8} \text{ J}$  نحصل على  $mc = 4.27 \times 10^{-17} \text{ J}\cdot\text{s/m}$ . وبالتالي، فإن مجال متوسط القوة لهذا البوزون هو:

$$d \approx \frac{1.05 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}}{4.27 \times 10^{-17} \text{ J}\cdot\text{s/m}} \approx 2 \times 10^{-18} \text{ m}. \quad (11.11)$$

### القوة النووية القوية

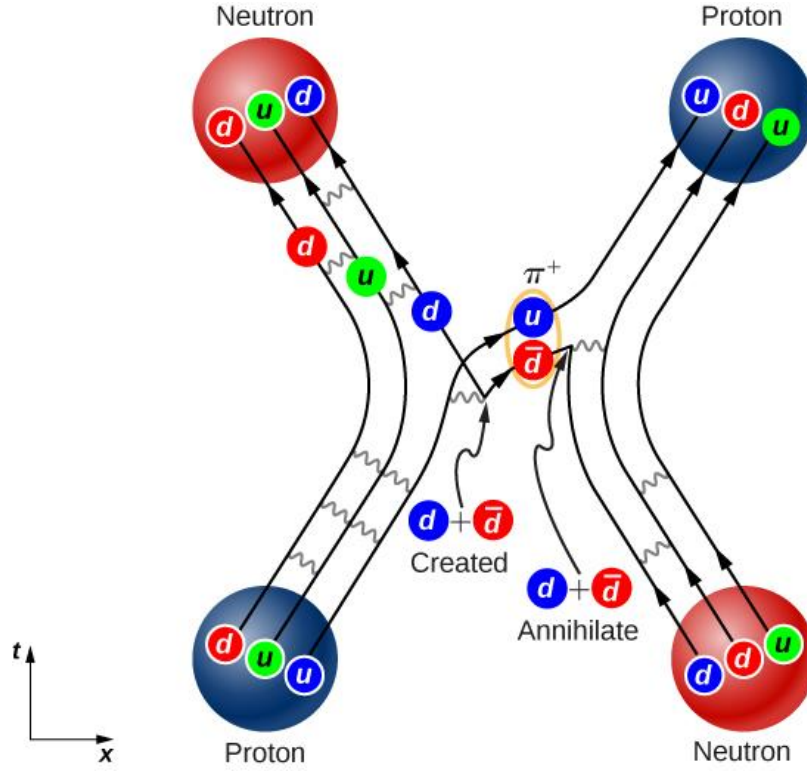
تصف التفاعلات النووية القوية التفاعلات بين الكواركات. يتم وصف تفاصيل هذه التفاعلات من خلال النظرية QCD. وفقاً لهذه النظرية، ترتبط الكواركات ببعضها عن طريق إرسال الغلونات واستقبالها. تماماً كما تحمل الكواركات شحنة كهربائية [إما  $(+2/3)e$  أو  $(-1/3)e$ ] والتي تحدد قوة التفاعلات الكهرومغناطيسية بين الكواركات، فإن الكواركات تحمل أيضاً "شحنة ملونة" (إما حمراء أو زرقاء أو خضراء)، والتي تحدد قوة التفاعلات النووية القوية. كما تمت مناقشته من قبل، ترتبط الكواركات معاً في مجموعات بتركيبات ألوان محايدة (أو "بيضاء")، كالأحمر والأزرق والأخضر والأحمر ومضاده.

ومن المثير للاهتمام، أن الغلونات نفسها تحمل شحنة اللون. يوجد ثمانية غلونات معروفة: ستة منها تحمل اللون ومضاده، واثنان لهما ألوان محايدة (الشكل 15.11(a)). لتوضيح التفاعل بين الكواركات من خلال تبادل الغلونات المشحونة، انظر إلى مخطط فاينمان في الجزء (b). مع مرور الزمن، يتحرك الكوارك الأحمر السفلي إلى اليمين ويتحرك الكوارك الغريب الأخضر إلى اليسار. (يظهر هذا في الحافة السفلية للرسم البياني). يتبادل الكوارك العلوي غلونا بلون أحمر-مضاد الأخضر مع الكوارك الغريب. (الألوان المضادة مبينة كألوان ثانوية. على سبيل المثال، يُمثل مضاد الأحمر بالون السماوي، لأن السماوي يخلط مع اللون الأحمر لتشكيل الضوء الأبيض). وفقاً لنظرية QCD، جميع التفاعلات في هذه العملية - التي تم تحديدها مع القمم - يجب أن تكون ذات لون محايد. لذلك، يتحول لون الكوارك السفلي من الأحمر إلى الأخضر، ويتحول لون الكوارك الغريب من الأخضر إلى الأحمر.



**الشكل 15.11 (a)** ثمانية أنواع من الغلونات تحمل القوة النووية القوية. الغلونات البيضاء هي مزيج من أزواج الألوان المضادة. (b) يتم التفاعل بين الكواركين من خلال تبادل الغلونات.

كما يقترح هذا المثال، فإن التفاعل بين الكواركات في نواة ذرية يمكن أن يكون معقداً جداً. يوضح الشكل 16.11 التفاعل بين البروتون والنترون. لاحظ أن البروتون يتحول إلى نترون، والنترون يتحول إلى بروتون أثناء التفاعل. يشير وجود أزواج الكوارك-الكوارك المضاد في التبادل إلى أن الترابط بين النكلونات يمكن تمثيله على أنه تبادل للبيونات.



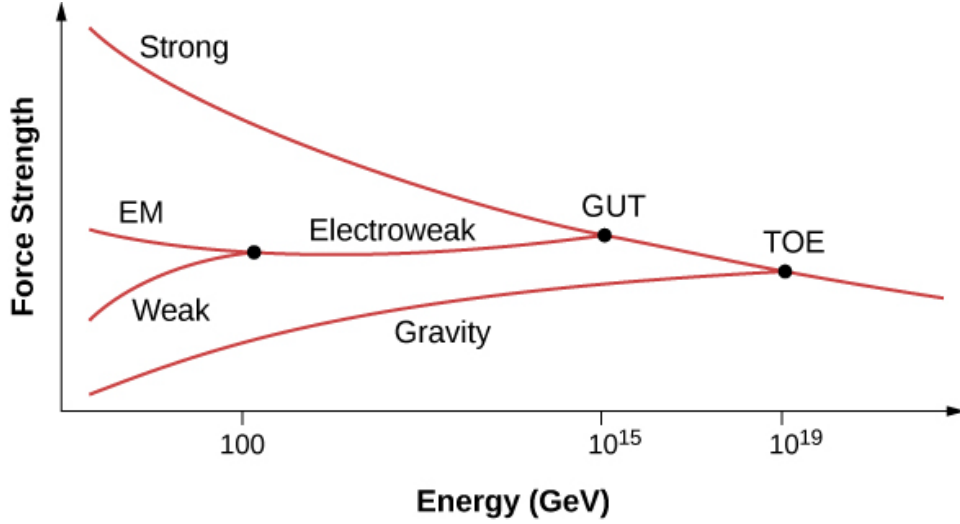
**الشكل 16.11** مخطط فاينمان الذي يصف التفاعل النووي القوي بين البروتون والنترون.

من الصعب عملياً إنتاج تنبؤات نظرية QCD. تنشأ هذه الصعوبة من الشدة الكامنة للقوة وعدم القدرة على إهمال حدود من المعادلات. وبالتالي، غالباً ما يتم إجراء حسابات QCD باستخدام أجهزة كمبيوتر عملاقة. يتم دعم وجود الغلونات من خلال تجارب تبعثر إلكترون - نكلون. إن عزم الكواركات المقدر، الذي تنطوي عليه هذه الأحداث المبعثرة، أصغر بكثير مما نتوقع بدون الغلونات، لأن الغلونات تحمل بعض العزم لكل تصادم.

### نظريات التوحيد

لطالما عرف الفيزيائيون أن قوة التفاعل بين الجسيمات تعتمد على مسافة التفاعل. وعلى سبيل المثال، يتعرض الجسيمان موجبا الشحنة لقوة تنافر أكبر عندما تفصل بينهما مسافة قصيرة مماهي عليه عندما تكون المسافة طويلة. في تجارب التبعثر، تعتمد قوة التفاعل على طاقة الجسيم المتفاعل، لأن الطاقة الأكبر تقتضي تفاعلات أوثق وأقوى.

يشك علماء فيزياء الجسيمات الآن في أن قوة جميع تفاعلات الجسيمات (القوى الأربع) تندمج عند الطاقات العالية، ويمكن وصف تفاصيل تفاعلات الجسيمات عند هذه الطاقات بدلالة قوة واحدة (**الشكل 17.11**). تصف النظرية الموحدة كيف تبدو هذه التفاعلات وتبين لماذا ينهار هذا الوصف عند مقاييس الطاقة المنخفضة. النظرية الموحدة الكبرى هي نظرية تحاول وصف التفاعل القوي والكهروضعيف بدلالة قوة واحدة فقط. تأخذ نظرية كل شيء (TOE) مفهوم التوحيد خطوة أخرى إلى الأمام. تجمع TOE بين القوى الأساسية الأربعة (بما في ذلك الجاذبية) في نظرية واحدة.



الشكل 17.11 توحيد القوى الكبرى عند الطاقات العالية .

## 6.11 | الانفجار الكبير The Big Bang

### الأهداف التعليمية

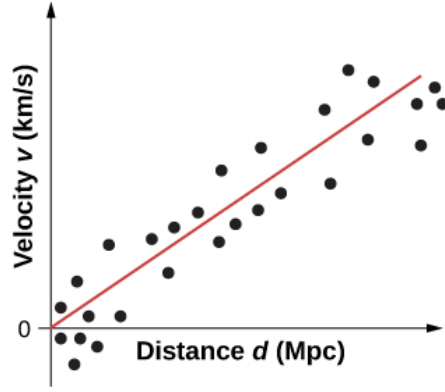
في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- شرح توسع الكون بدلالة مخطط هابل والانزياح الأحمر الكوني.
- وصف التشابه بين التمدد الكوني والبالون المتمدّد.
- استخدام قانون هابل لعمل تنبؤات حول السرعة المقاسة للمجرات البعيدة.

نحن نناقش الجسيمات الأولية، وهي من أصغر الأشياء التي يمكننا دراستها. وسنقوم الآن بدراسة ما نعرفه عن الكون، وهو أكبر شيء يمكننا دراسته. الرابط بين هذين الموضوعين هو الطاقة العالية: حيث تتطلب دراسة تفاعلات الجسيمات طاقات عالية جداً، وكذلك فإن أعلى طاقات نعرف أنها كانت موجودة خلال التطور المبكر للكون. يعتقد بعض علماء الفيزياء أن نظريات القوة الموحدة، التي وصفناها في الجزء السابق من هذا الفصل، في الواقع ممكن أن تكون قد حكمت سلوك الكون في لحظاته الأولى.

### قانون هابل

في عام 1929، نشر إدوين هابل أحد أهم الاكتشافات في علم الفلك الحديث. اكتشف هابل أن (1) المجرات تبدو وكأنها تبعد عن الأرض وأن (2) سرعة الانحسار ( $v$ ) تتناسب مع بعد المجرة ( $d$ ) عن الأرض. يمكن تحديد كل من  $d$  و  $v$  باستخدام أطيف الضوء النجمية. يبين الشكل 18.11 أفضل ملاءمة للبيانات التوضيحية النموذجية. (مخطط هابل الأصلي كان مبعثراً بشكل كبير ولكن الاتجاه العام ما زال واضحاً).



**الشكل 18.11** هذا الرسم البياني للانزياح الأحمر بدلالة بعد المجرات هو علاقة خطية، حيث أن الانزياحات الحمراء تكون أكبر عند المسافات الأكبر، مما يعني توسع الكون. ويعطي الميل قيمة تقريبية لمعدل التوسع.

يشير الاتجاه في البيانات إلى العلاقة النسبية البسيطة:

$$v = H_0 d, \quad (11.12)$$

حيث  $H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc}$  تُعرف باسم ثابت هابل. (ملاحظة: 1 Mpc هي ميغا بارسك أو مليون بارسك، حيث بارسك واحد هو 3.26 سنة ضوئية). تنص هذه العلاقة، والتي يطلق عليها قانون هابل، على أن النجوم والمجرات البعيدة تنحسر مبتعدة عنا بسرعة 70 km/s لكل واحد ميغا بارسك من البعد عنا. يتوافق ثابت هابل مع ميل الخط في **الشكل 18.11**. ثابت هابل هو تسمية خاطئة بعض الشيء، لأنه يختلف مع مرور الزمن. القيمة الواردة هنا هي فقط قيمته اليوم.

❖ شاهد هذا الفيديو (<https://openstaxcollege.org/l/21hubble>) لمعرفة المزيد حول تاريخ ثابت هابل.

يصف قانون هابل متوسط السلوك لجميع المجرات باستثناء أقربها. على سبيل المثال، المجرة التي تبعد عنا بمقدار 100 Mpc (كما هو محدد بحجمها وسطوعها) عادةً ما تبعد عنا بسرعة:

$$v = \left(70 \frac{\text{km}}{\text{s}}\right) (100 \text{ Mpc}) = 7000 \text{ km/s}.$$

قد تختلف هذه السرعة بسبب التفاعلات مع المجرات المجاورة. وعلى العكس من ذلك، فإنه إذا تبين أن إحدى المجرات تبعد عنا بسرعة 100000 km/s بناءً على انزياحها الأحمر، فهي على بعد:

$$d = v/H_0 = (10,000 \text{ km/s}) / \left(70 \frac{\text{km}}{\text{s}}\right) = 143 \text{ Mpc}.$$

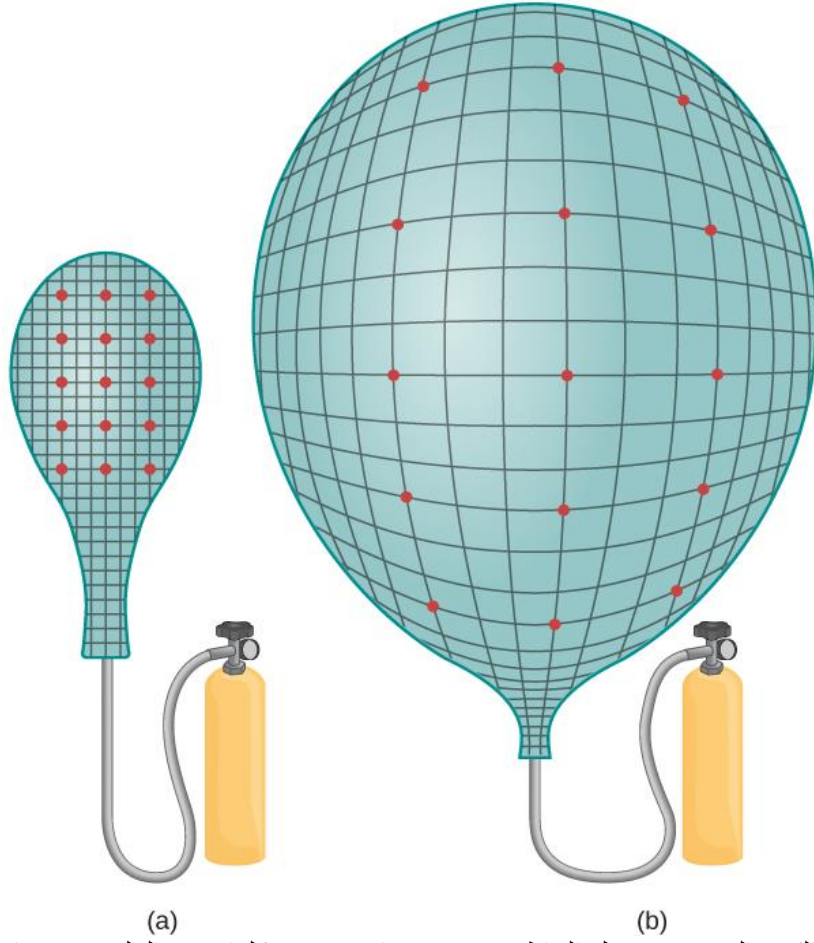
هذا الحساب الأخير تقريبي لأنه يفترض أن معدل التوسع منذ 5 مليارات سنة هو نفسه اليوم.

### نموذج الانفجار الكبير

يعتقد العلماء الذين يدرسون أصل الكون وتطوره ومصيره النهائي (علم الكونيات) أن الكون بدأ بانفجار أطلق عليه الانفجار الكبير قبل نحو 13.7 مليار سنة. لم يكن هذا الانفجار انفجاراً للحسيمات عبر الفضاء، كما يحدث في الألعاب النارية، ولكنه كان امتداداً سريعاً للفضاء نفسه. المسافات بين النجوم والمجرات الخارجية وسرعاتها تسمح لنا بتقدير الوقت الذي كانت فيه كل مواد الكون معاً في بداية الزمن.

غالباً ما يفسر العلماء توسع الانفجار الكبير باستخدام نموذج المنطاد المضخم (**الشكل 19.11**). حيث تمثل النقاط التي تظهر على سطح البالون المجرات، ويمثل جلد البالون الزمكان رباعي الأبعاد (النسبية). عند تضخم البالون، ترى كل نقطة أن النقاط

الأخرى تتحرك بعيداً. هذا النموذج يعطي فكرتين. الأولى، يتم ملاحظة التوسع من قبل جميع المراقبين في الكون، بغض النظر عن مكان وجودهم. "مركز التوسع" غير موجود، لذلك لا توجد الأرض في مركز التوسع "الممتاز" (انظر السؤال النظري 24).



**الشكل 19.11** تشبيه الكون المتوسع: تتحرك النقاط مبتعدة بعضها عن بعض كلما توسع البالون. قم بمقارنة (a) مع (b) بعد التوسع.

والثانية، كما ذكر سابقاً، يرجع توسع الانفجار الكبير إلى توسع الفضاء، وليس إلى زيادة المسافات الفاصلة بين المجرات في الفضاء العادي ثلاثي الأبعاد (الثابت). يؤثر هذا التمدد الكوني على جميع الأشياء: الغبار والنجوم والكواكب حتى الضوء. وبالتالي، فإن طول موجة الضوء ( $\lambda$ ) المنبعثة من المجرات البعيدة تكون "ممتدة". هذا ما يجعل الضوء يبدو "أكثر احمراراً" (ذو طاقة أقل) للمراقب - وهي ظاهرة تُسمى الانزياح الأحمر الكوني. يكون الانزياح الأحمر الكوني قابلاً للقياس فقط للمجرات التي تبعد مسافة أكبر من 50 مليون سنة ضوئية.

## مثال 8.11

### حساب السرعة والمسافات المجرية

لوحظ وجود مجرة لها انزياح أحمر:

$$z = \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{emit}}}{\lambda_{\text{emit}}} = 4.5.$$

تشير هذه القيمة إلى أن المجرة تتحرك بسرعة قريبة من سرعة الضوء. باستخدام معادلة الانزياح الأحمر (الوارد في النسبية)، حدد (a) ما مدى سرعة انحسار المجرة بالنسبة بالأرض؟ (b) كم تبعد هذه المجرة؟



### خطة الحل:

نحن بحاجة إلى استخدام معادلة دوبلر النسبية لتحديد السرعة من الانزياح الأحمر ومن ثم استخدام قانون هابل لإيجاد المسافة من السرعة.

### الحل:

a. وفقاً لمعادلة الانزياح الأحمر:

$$z = \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} - 1,$$


حيث  $\beta = v/c$ . بتعويض قيمة  $z$  والحل من أجل قيمة  $\beta$ ، نحصل على  $\beta = 0.93$ . تعني هذه القيمة أن سرعة المجرة هي:  $2.8 \times 10^8$  m/s

b. باستخدام قانون هابل، يمكننا إيجاد بُعد المجرة إذا عرفنا سرعة الانحسار:

$$d = \frac{v}{H_0} = \frac{2.8 \times 10^8 \text{ m/s}}{73.8 \times 10^3 \text{ m/s per Mpc}} = 3.8 \times 10^3 \text{ Mpc.}$$

### ملاحظة:

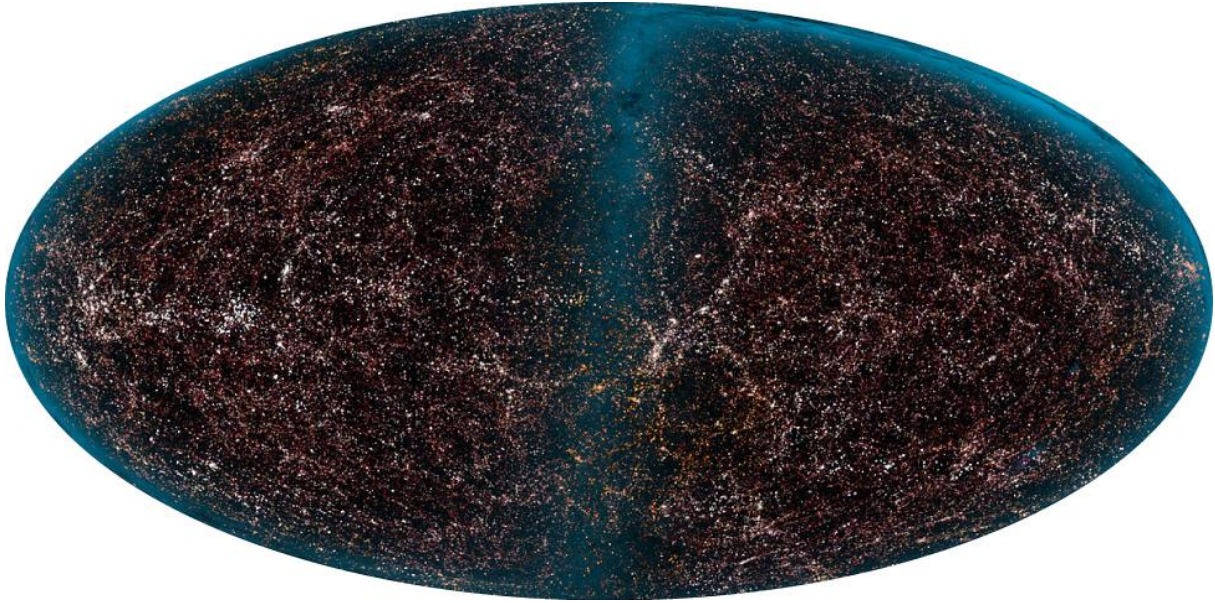
يبدو أن المجرات البعيدة تتحرك بسرعة كبيرة مبتعدة عن الأرض. يمكن استخدام الانزياح الأحمر لضوء النجوم من هذه المجرات لتحديد السرعة الدقيقة للانحسار، والتي تبلغ أكثر من 90٪ من سرعة الضوء في هذه الحالة. هذه الحركة لا ترجع إلى حركة المجرة عبر الفضاء بل ناتجة عن توسع الفضاء نفسه.

 **7.11 تحقق من فهمك:** إذا كان ضوء المجرة التي تبعد عنا هو "أحمر اللون". فماذا يحدث لضوء المجرة التي تتحرك نحونا؟

❖ شاهد هذا الفيديو (<https://openstaxcollege.org/l/21expansion>) لمعرفة المزيد عن التوسع الكوني.

### بنية وديناميكية الكون

يُعتقد في المقاييس الكبيرة، أن الكون موحد الخواص ومتجانس. يُعتقد أن الكون موحد الخواص لأنه يبدو متماثلاً في جميع الاتجاهات، ومتجانس لأنه يبدو متماثلاً في جميع الأماكن. يقال إن الكون سلس ذلك لأنه موحد الخواص ومتجانس. إن مسح المجرة، الذي أجري في الثمانينيات والتسعينيات من القرن الماضي بالمقياس اللوحي المؤتمت، يدعم فرضية سلاسة الكون (**الشكل 20.11**). ومع ذلك، حتى قبل جمع هذه البيانات، تم استخدام فرضية سلاسة الكون من قبل المنظرين لتبسيط نماذج تمدد الكون. فرضية سلاسة الكون تُسمى أحياناً مبدأ الكونية.



**الشكل 20.11** مسح المجرة بالمقياس اللوحي المؤتمت (APM). تم تصوير أكثر من مليوني مجرة في المنطقة التي تصنعها زاوية قدرها 100 درجة مركزها باتجاه القطب الجنوبي لدرب التبانة.

مصير هذا الكون المتسع والسلس هو سؤال مفتوح. وفقاً للنظرية العامة للنسبية، هناك طريقة مهمة لوصف حالة الكون هي من خلال القياس الزمكاني:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a(t)^2 d\Sigma^2, \quad (11.13)$$

حيث  $c$  هي سرعة الضوء،  $a$  هو معامل القياس (تابع للزمن)، و  $d\Sigma$  هو عنصر طول الفضاء. حيث يمكن كتابة هذا العنصر في الإحداثيات الكروية  $(r, \theta, \phi)$  على النحو التالي:

$$d\Sigma^2 = \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2), \quad (11.14)$$

حيث:  $k$  ثابت له واحدة مقلوب المساحة، ويُعبر عن انحناء الفضاء. يميز هذا الثابت بين الأكوان المفتوحة والمغلقة والمسطحة:

- $k = 0$  (الكون مسطح)
  - $k > 0$  (الكون مغلق، كالكرة)
  - $k < 0$  (الكون مفتوح، كالمقطع الزائد)
- فيما يتعلق بمعامل القياس  $a$ ، فإن هذا المقياس أيضاً يميز بين الأكوان الثابتة والمتمددة والمتقلصة:
- $a = 1$  (الكون ثابت)
  - $da / dt > 0$  (الكون متمدد)
  - $da / dt < 0$  (الكون متقلص)

يتم تحديد معامل القياس  $a$  والانحناء  $k$  من نظرية النسبية العامة لأينشتاين. إذا تعاملنا مع الكون على أنه غاز للمجرات، كثافته  $\rho$  وضغطه  $p$ ، وبفرض أن  $k = 0$  (الكون مسطح)، فإن معامل القياس  $a$  يعطى بالعلاقة:

$$\frac{d^2 a}{dt^2} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p)a, \quad (11.15)$$

حيث  $G$  هي ثابت الجاذبية الكونية. (بالنسبة للمادة العادية، نتوقع أن تكون الكمية  $\rho + 3p$  أكبر من الصفر). إذا كان معامل القياس موجباً ( $a > 0$ )، فإن قيمة معامل القياس "تتباطأ" ( $d^2a/dt^2 < 0$ )، ويتباطأ تمدد الكون مع مرور الزمن. إذا كان البسط أصغر من الصفر (بطريقة ما، يكون ضغط الكون سالباً)، فإن قيمة معامل القياس "تتسارع"، ويتسارع تمدد الكون بمرور الزمن. وفقاً للبيانات الكونية الحديثة، يبدو أن الكون يتوسع. يشرح العديد من العلماء الحالة الراهنة للكون بدلالة التوسع السريع جداً في الكون المبكر. يُسمى هذا التوسع بالتضخم.

## 7.11 | تطور الكون المبكر Evolution of the Early Universe

### الأهداف التعليمية

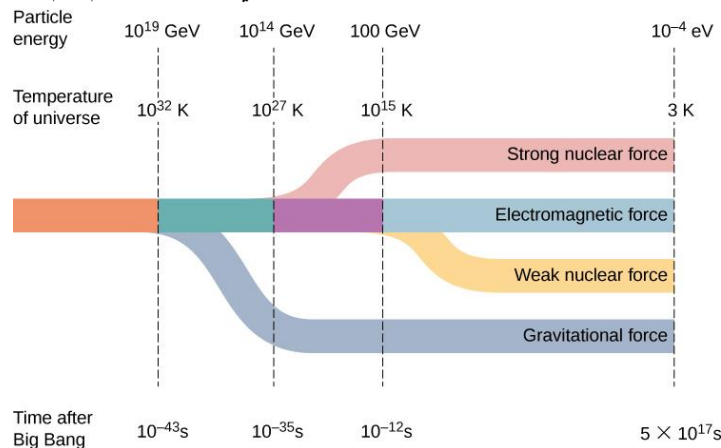
في نهاية هذا الجزء من الفصل، ستكون قادراً على:

- وصف تطور الكون المبكر بدلالة القوى الأساسية الأربعة.
- استخدام مفهوم العدسات الجاذبية لشرح الظواهر الفلكية.
- تقديم دليل على الانفجار الكبير بدلالة الأشعة الخلفية الكونية.
- التمييز بين المادة المظلمة والطاقة المظلمة.

ناقشنا في الجزء السابق من هذا الفصل بنية وديناميكية الكون. وتحديدًا، كيف أن الكون يبدو وكأنه يتوسع بل يتسارع. ولكن كيف كان الكون في بداية الزمن؟ في هذا الجزء، نناقش الأدلة التي تمكن العلماء من جمعها حول الكون المبكر وتطوره حتى الوقت الحاضر.

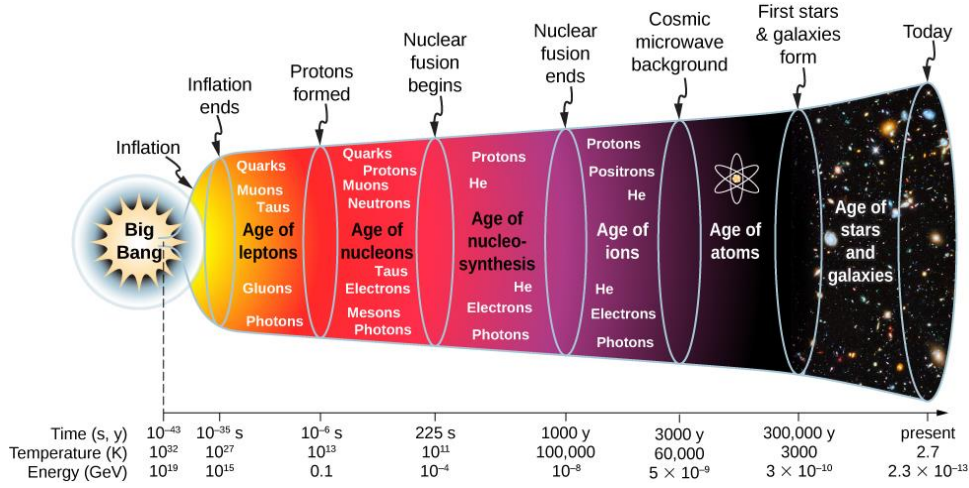
### الكون المبكر

قبل الفترة القصيرة للتضخم الكوني، يعتقد علماء الكونيات أن كل المواد في الكون كانت مضغوطة في فضاء أصغر بكثير من الذرة. يعتقد علماء الكونيات أيضاً أن الكون كان كثيفاً وساخنًا للغاية، وأن التفاعلات بين الجسيمات كانت تحكمها قوة واحدة. وبمعنى آخر، فإن القوى الأساسية الأربعة (النوية القوية والكهرطيسية والنوية الضعيفة والجاذبية) تندمج في واحدة عند هذه الطاقات (الشكل 21.11). كيف ولماذا تنهار هذه "الوحدة" عند الطاقات المنخفضة هي مسألة مهمة لم يتم حلها في الفيزياء.



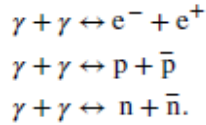
الشكل 21.11 الفصل بين القوى الأساسية الأربعة في الكون المبكر.

النماذج العلمية للكون المبكر هي تخمينية للغاية. يوضح الشكل 22.11 مخططاً زمنياً محتملاً للأحداث.

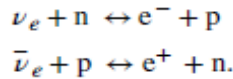


الشكل 22.11 جدول زمني تقريبي لتطور الكون من الانفجار الكبير إلى الوقت الحاضر.

1. الانفجار الكبير ( $t < 10^{-43}$  s): تنهار القوانين الحالية للفيزياء. في نهاية حدوث الانفجار الكبير الأولي، تكون درجة حرارة الكون نحو  $T = 10^{32}$  K.
2. طور التضخم ( $t = 10^{-43}$  إلى  $10^{-35}$  ثانية): يتوسع الكون بشكل أسي، وتنفصل الجاذبية عن القوى الأخرى. ويبرد الكون إلى نحو  $T = 10^{27}$  K.
3. عصر اللبتونات ( $t = 10^{-35}$  إلى  $10^{-6}$  ثانية): مع استمرار توسع الكون، تنفصل القوة النووية القوية عن القوى الكهرومغناطيسية و النوية الضعيفة (أو القوة الكهروضعيفة). وبعد فترة وجيزة، تنفصل القوة النووية الضعيفة عن القوة الكهرومغناطيسية. ويتحول الكون إلى حساء ساخن من الكواركات واللبتونات والفوتونات والجسيمات الأخرى.
4. عصر النكلونات ( $t = 10^{-6}$  إلى 225 ثانية): يتكون الكون من اللبتونات والهادرونات (كالبروتونات والنيوترونات والميزونات) التي تكون في حالة التوازن الحراري. تحدث عمليتا إنتاج الأزواج وفناء الزوج بالسهولة نفسها، لذلك تبقى الفوتونات في حالة توازن حراري:



عدد البروتونات يساوي تقريباً عدد النيوترونات خلال التفاعلات مع النترينوهات:



5. عصر الاصطناع النووي ( $t = 225$  ثانية إلى 1000 سنة): مع استمرار توسع الكون، تتفاعل الديوترونات مع البروتونات والنيوترونات لتكوين نوى أكبر؛ تتفاعل هذه النوى الكبيرة مع البروتونات والنيوترونات لتشكيل نوى ساكنة أكبر. في نهاية هذه الفترة، يكون نحو 1/4 كتلة الكون هو الهليوم. (وهذا ما يفسر الكمية الحالية من الهليوم في الكون). تفتقر الفوتونات إلى الطاقة اللازمة لمواصلة إنتاج الإلكترون - البوزيترون، وبالتالي فإن الإلكترونات والبوزيترونات تفني بعضها البعض إلى تشكيل فوتونات فقط.

6. عصر الأيونات ( $t = 1000$  إلى  $3000$  سنة): الكون حار بدرجة كافية لتأيين أي ذرات قد تتشكل. يتكون الكون من الإلكترونات والبوزترونات والبروتونات والنوى الخفيفة والفوتونات.

7. عصر الذرات ( $t = 3000$  إلى  $300000$  سنة): يبرد الكون إلى درجة حرارة أقل من  $105 \text{ k}$  وتتشكل الذرات. لا تتفاعل الفوتونات بقوة مع الذرات المحايدة، ولذلك فإنها "تفصل" عن الذرات. هذه الفوتونات تشكل الأشعة الخلفية الميكروية الكونية التي سنتناقش في وقت لاحق.

8. عصر النجوم والمجرات ( $t = 300000$  سنة حتى الآن): يتم تجميع الذرات والجسيمات معاً عن طريق الجاذبية وتشكيل كتل كبيرة. تخضع الذرات والجسيمات في النجوم لتفاعل الاندماج النووي.

❖ شاهد هذا الفيديو (<https://openstaxcollege.org/l/21bigbang>) لمعرفة المزيد حول علم الكون للانفجار الكبير.

لوصف ظروف الكون المبكر من الناحية الكمية، تذكر العلاقة بين متوسط الطاقة الحرارية للجسيم ( $E$ ) في نظام الجسيمات المتفاعلة ودرجة حرارة التوازن ( $T$ ) لهذا النظام:

$$E = k_B T, \quad (11.16)$$

حيث  $k_B$  هو ثابت بولتزمان. في الظروف الحارة للكون المبكر، كانت طاقات الجسيمات كبيرة بشكل لا يمكن تصوره.

## مثال 9.11

ما هو متوسط الطاقة الحرارية للجسيم بعد الانفجار الكبير؟

خطة الحل:

يعتمد متوسط الطاقة الحرارية لجسيم ما في نظام الجزيئات المتفاعلة على درجة حرارة التوازن لذلك النظام كما هو مبين في المعادلة 11.1. يتم إعطاء درجة الحرارة التقريبية هذه في الجدول الزمني المبين أعلاه.


الحل:

يعتقد علماء الكونيات أن درجة حرارة الكون بعد الانفجار الكبير مباشرة كانت تقريباً  $T = 10^{32} \text{ K}$ . لذلك، كان متوسط الطاقة الحرارية للجسيم

$$k_B T \approx (10^{-4} \text{ eV/K}) (10^{32} \text{ K}) = 10^{28} \text{ eV} = 10^{19} \text{ GeV}.$$

ملاحظة:

هذه الطاقة أكبر بكثير من طاقات الجسيمات التي تنتجها مسرعات الجسيمات التي صنعها الإنسان. حالياً، تعمل هذه المسرعات عند طاقات أقل من  $10^4 \text{ GeV}$ .

7.11 تحقق من فهمك:  قارن بين وفرة الهليوم من حيث كتلته التي كانت موجودة بعد الانفجار الكبير بنحو 10000 سنة وماهي عليه الآن.

تتشكل النكلونات عند طاقات مساوية تقريباً لكتلة البروتون الساكنة، أو  $1000 \text{ MeV}$ . وبالتالي فإن درجة الحرارة الموافقة لهذه الطاقة هي:

$$T = \frac{1000 \text{ MeV}}{8.62 \times 10^{11} \text{ MeV} \cdot \text{K}^{-1}} = 1.2 \times 10^{13} \text{ K}.$$

درجات الحرارة من هذه القيمة أو أعلى كانت موجودة منذ الثانية الأولى من الكون المبكر. ويمكن إجراء تحليل مماثل للذرات. حيث تتشكل الذرات عند طاقة تساوي طاقة التأين للهيدروجين في الحالة الأساسية (13 eV). وعليه فإن درجة الحرارة الفعالة لتشكل الذرة هي:

$$T = \frac{13 \text{ eV}}{8.62 \times 10^5 \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}} = 1.6 \times 10^5 \text{ K.}$$

يحدث هذا بعد انفصال القوى الأساسية الأربعة، بما في ذلك القوى اللازمة لربط البروتونات والنترونات في النواة (القوة النووية القوية) وربط الإلكترونات بالنواة (القوة الكهرومغناطيسية).

### الاصطناع النووي للعناصر الخفيفة

تُعدُّ الوفرة النسبية للعناصر الخفيفة كالهيدروجين والهيليوم والليثيوم والبريليوم في الكون دليلاً أساسياً على الانفجار الكبير. وتشير البيانات إلى أن أغلب الهليوم في الكون هو بدائي. فعلى سبيل المثال، اتضح أن 25٪ من المادة في الكون هي الهليوم، وهي نسبة عالية جداً ولا يمكن تفسيرها استناداً إلى إنتاج الهليوم في النجوم.

كم من العناصر في الكون تم إنشاؤها في الانفجار الكبير؟ إذا قمنا بتحريك عقارب الساعة إلى الوراء، يصبح الكون مضغوطاً بشكل أكبر، وأكثر سخونة. وفي نهاية المطاف، ستبلغ درجات الحرارة الحد الذي يسمح بالاصطناع النووي، وفترة تشكيل النواة، على غرار ما يحدث في قلب الشمس. يُعتقد أن الاصطناع النووي للانفجار الكبير قد حدث خلال بضعة مئات من الثواني من الانفجار الكبير.

كيف حدث الاصطناع النووي للانفجار الكبير؟ في البداية، اجتمعت البروتونات والنترونات لتشكيل الدترونيات  ${}^2\text{H}$ . فالتقطت الدترونات  ${}^3\text{H}$  لتشكيل تريتوناً  ${}^3\text{H} -$  نواة الهيدروجين المشع الذي يُسمى التريتيوم. استولت الدترونيات على البروتونات لصنع الهليوم  ${}^3\text{He}$ . عندما يلتقط  ${}^3\text{H}$  بروتوناً أو يلتقط  ${}^3\text{He}$  نوترونًا، فإنه ينتج الهليوم  ${}^4\text{He}$ . في هذه المرحلة من الانفجار الكبير، كانت نسبة البروتونات إلى النوترونات نحو 7:1. وبالتالي، فإن عملية التحويل إلى  ${}^4\text{He}$  استهلكت جميع النوترونات تقريباً. استمرت العملية نحو 3 دقائق وتحول ما يقرب من 25٪ من كل هذه المادة إلى  ${}^4\text{He}$ ، بالإضافة إلى نسب صغيرة من  ${}^2\text{H}$  و  ${}^3\text{H}$  و  ${}^3\text{He}$ . كما تم تشكيل كميات صغيرة من  ${}^7\text{Li}$  و  ${}^7\text{Be}$ . لقد أدى التوسع خلال هذا الوقت إلى تبريد الكون بدرجة كافية، بحيث توقفت التفاعلات النووية. تعتمد وفرة النوى الخفيفة  ${}^2\text{H}$  و  ${}^4\text{He}$  و  ${}^7\text{Li}$  بعد الانفجار الكبير على كثافة المادة.

تعطي الوفرة المتوقعة للعناصر في الكون اختباراً صارماً للانفجار الكبير والاصطناع النووي للانفجار الكبير. تتوافق التقديرات التجريبية الحديثة لكثافة المادة من مسبار Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) مع تنبؤات النماذج. تعطي هذه التوافقية دليلاً مقنعاً على صحة نموذج الانفجار الكبير.

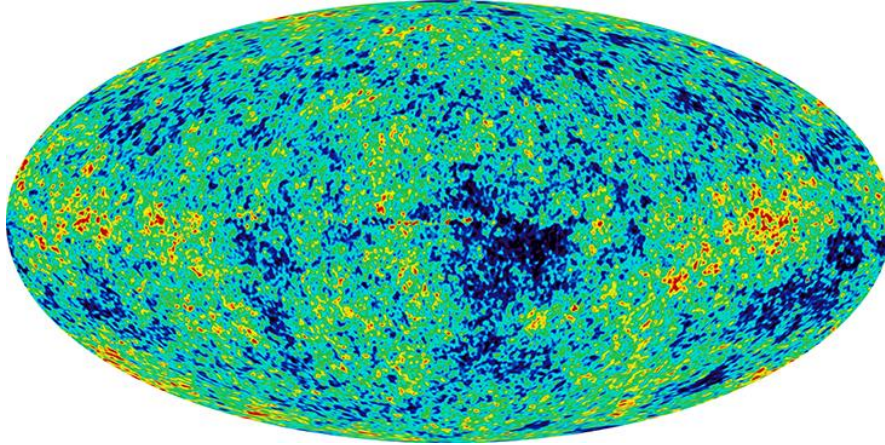
### إشعاع الخلفية الكونية الميكروي

وفقاً للنماذج الكونية، فإن حدث الانفجار الكبير قد خلف وراءه الإشعاع الحراري الذي يُسمى بإشعاع الخلفية الكونية الميكروي (CMBR). يجب أن تتبع شدة هذا الإشعاع منحنى إشعاع الجسم الأسود (الفوتونات والأمواج المادية). ينص قانون فين على أن الطول الموجي للإشعاع في ذروة الشدة هو:

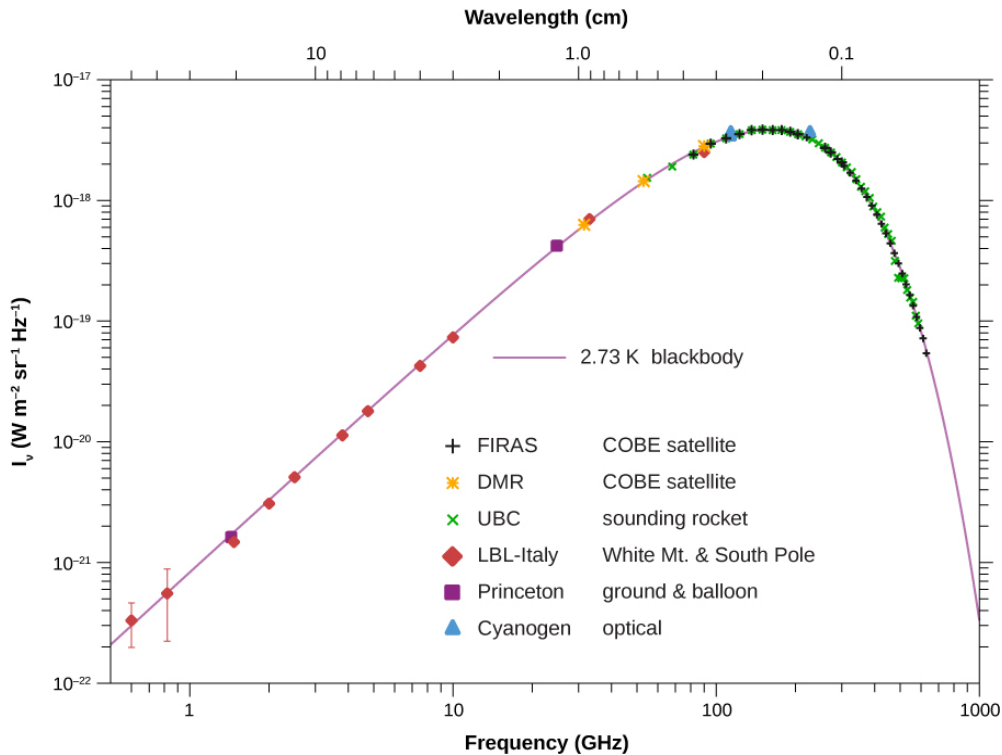
$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2.898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}}{T}, \quad (11.17)$$

حيث  $T$  هي درجة الحرارة بالكلفن. توقع العلماء أن تمدد الكون "تمدد الضوء"، وأن تكون درجة الحرارة منخفضة للغاية، لذلك يجب أن يكون إشعاع الخلفية الكونية ذا طول موجة طويل وطاقة منخفضة.

في الستينيات، لاحظ أرنو بينزياس وروبرت ويلسون من مختبرات بيل أنه على الرغم من كل ما فعلوه، فإنهم لم يتمكنوا من التخلص من الضجيج الخلفي الخافت في نظام الاتصالات عبر الأقمار الصناعية. كان الضجيج بسبب إشعاع ذي أطوال موجية في نطاق السنتمتر (منطقة الأمواج الميكروية). في وقت لاحق، ارتبط هذا الضجيج بإشعاع الخلفية الكونية. يبين **الشكل 23.11** خريطة كثافة إشعاع الخلفية الكونية. يتم تمثيل الطيف الحراري بشكل جيد باستخدام منحنى جسم أسود يتوافق مع درجة الحرارة  $T = 2.7K$  (**الشكل 24.11**).



**الشكل 23.11** تستخدم خريطة السماء المبينة في الشكل اللون لإظهار التقلبات، أو التجاعيد، في الخلفية الكونية الميكروية كما تم رصدها من مركبة الفضاء التابعة WMAP. تم إزالة درب التبانة من أجل الوضوح يمثل اللون الأحمر درجة حرارة أعلى وكثافة أعلى، بينما يشير اللون الأزرق إلى انخفاض درجة الحرارة والكثافة. لا تتعارض هذه الخريطة مع الادعاء السابق بسلسلة الكون لأن أكبر التقلبات لا تُمثل سوى جزء واحد في المليون.



**الشكل 24.11** توزع شدة إشعاع الخلفية الكونية الميكروية. تتوافق تنبؤات النموذج (الممثلة بالخط) جيداً مع النتائج التجريبية (الممثلة بالنقاط). تُعرض قيم التردد والسطوع على محور السجل.

إن تكوين الذرات في الكون المبكر يجعل هذه الذرات أقل عرضة للتفاعل مع الضوء. لذلك، يجب فصل الفوتونات التي تنتمي إلى إشعاع الخلفية الكونية عن المادة عند درجة حرارة  $T$  مرتبطة بنحو  $1 \text{ eV}$  (طاقة التأين التقريبية للذرة). كانت درجة حرارة الكون في هذه المرحلة:

$$k_B T \sim 1 \text{ eV} \Rightarrow T = \frac{1 \text{ eV}}{8.617 \times 10^5 \text{ eV/K}} \sim 10^4 \text{ K.}$$

وفقاً للنماذج الكونية، فإن الوقت الذي نثرت فيه الفوتونات للمرة الأخيرة جسيمات مشحونة كان نحو 380000 سنة بعد الانفجار الكبير. قبل ذلك الوقت، كانت المادة في الكون على شكل بلازما وكانت الفوتونات "متوازنة حرارياً".

### المادة والمادة المضادة

نعلم من الملاحظة المباشرة أن المادة المضادة نادرة. الأرض والنظام الشمسي من المواد النقية تقريباً، ويبدو أن معظم الكون تهيمن عليه المادة أيضاً. وقد ثبت ذلك من خلال عدم وجود إشعاع فناء قادم إلينا من الفضاء، لا سيما الغياب النسبي للطاقة  $0.511 \text{ MeV}$  من أشعة غاما الناتجة عن فناء الإلكترونات والبوزيترونات.

(تشكل المادة المضادة في الطبيعة في تصادمات الجسيمات وتحللات  $\beta^+$ ، ولكن بكميات صغيرة فقط وتفنى بسرعة، مخلفةً وراءها مادة باقية نقية تقريباً).

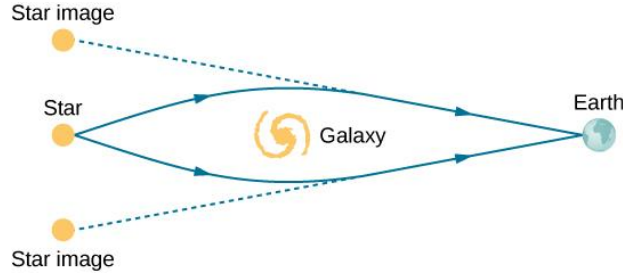
على الرغم من الهيمنة الملحوظة للمادة على المادة المضادة في الكون، إلا أن النموذج القياسي لتفاعلات الجسيمات والقياس التجريبي يُشير فقط إلى اختلافات بسيطة في طرق تفاعل المادة والمادة المضادة. على سبيل المثال، ينتج عن تحلل الكاون المحايد ما هو أقرب بشيء بسيط فقط للمادة من المادة المضادة. ومع ذلك، لو أن من خلال هذا التحلل، كان قد تم إنتاج ما هو أقرب قليلاً للمادة من المادة المضادة في الكون المبكر، لتمكن الباقي من فناء بعضهم البعض زوجاً بزواج، مخلفةً في الغالب مادة عادية لتشكيل النجوم والمجرات. وبهذه الطريقة، قد يكون العدد الهائل من النجوم، التي نلاحظها مجرد بقايا صغيرة من المادة الأصلية التي نشأت في الانفجار الكبير.

### المادة المظلمة والطاقة المظلمة

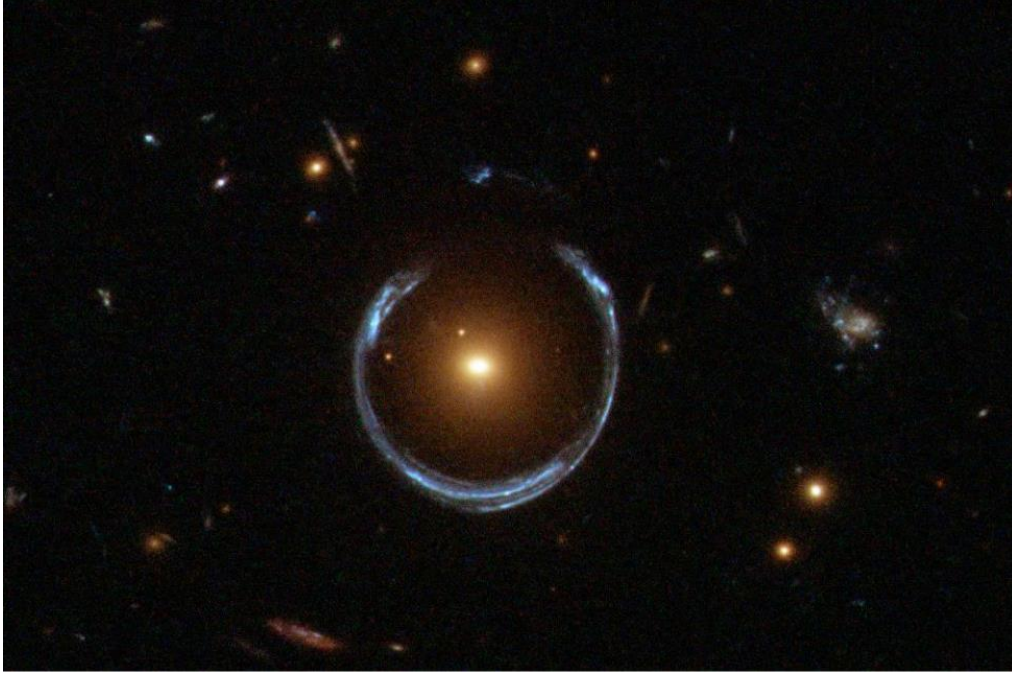
في العقدين الأخيرين، كشفت تقنيات جديدة وأكثر قوة أن الكون مليء **بالمادة المظلمة**. هذا النوع من المادة مثير للاهتمام ومهم لأن العلماء في الوقت الحالي لا يعرفون ما هو! ومع ذلك، يمكننا استنتاج وجودها من خلال انحراف ضوء النجوم البعيدة. على سبيل المثال، إذا كان الضوء الصادر من مجرة بعيدة منحرفاً بواسطة حقل الجاذبية لكتلة من المادة المظلمة بيننا وبين المجرة، فإنه من الممكن إنتاج خيالين للمجرة نفسها (**الشكل 25.11**). يُسمى انحناء الضوء بواسطة حقل الجاذبية للمادة بعدسة الجاذبية (المفعول العدسي الثقالي). ينتقل في بعض الحالات ضوء النجوم إلى المراقب عبر عدة مسارات حول المجرة، مما ينتج عنه حلقة (**الشكل 26.11**).

بناءً على الأبحاث الحالية، يعرف العالم فقط أن المادة المظلمة باردة وبطيئة الحركة وتتفاعل بشكل ضعيف مع المادة العادية. يشتمل ممثلو المادة المظلمة على النوترالينووات (شركاء البوزونات  $Z$  والفوتونات وبوزونات هيغنز في "نظرية التناظر الفائق") والجسيمات التي تدور في حلقات صغيرة مضبوطة بأبعاد مكانية إضافية.





**الشكل 25.11** ينحني الضوء الصادر عن النجم البعيد حول المجرة. في ظل الظروف المناسبة، يمكن رؤية خيالين مكررين للنجم نفسه.



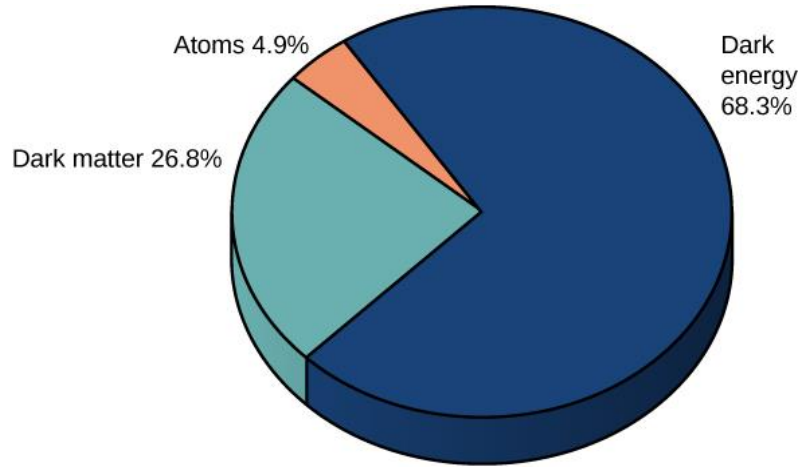
**الشكل 26.11** ينحني الضوء الصادر عن النجم البعيد حول المجرة. في ظل الظروف المناسبة، يمكننا رؤية حلقة من الضوء بدلاً من نجمة واحدة.

تكشف القياسات الفلكية المتزايدة الدقة للكون المتوسع أيضاً عن وجود شكل جديد من الطاقة يُسمى **الطاقة المظلمة**. ويُعتقد أن هذه الطاقة تُفسر القيم الفائقة للتوقعات للانزياح الأحمر المجرية الملاحظة للمجرات البعيدة. وتُشير هذه الانزياحات الحمراء إلى أن الكون لا يتوسع فحسب، بل إنه يتوسع بمعدل متزايد.

لا شيء معروف عن طبيعة الطاقة المظلمة وخصائصها. كما أن الطاقة المظلمة والمادة المظلمة تمثلان معاً اثنين من الألغاز الأكثر إثارة للاهتمام، والتي لم تُحل في الفيزياء الحديثة. يعزو العلماء 68.3% من طاقة الكون إلى الطاقة المظلمة و 26.8% إلى المادة المظلمة و 4.9% فقط إلى طاقة الكتلة للجسيمات العادية (**الشكل 27.11**).

بالنظر إلى اللغز الكبير الحالي حول طبيعة المادة المظلمة والطاقة المظلمة، فإن كلمات إسحاق نيوتن المتواضعة أصبحت صحيحة الآن كما كانت منذ قرون:

"أنا لا أعرف كيف أبدو للعالم، غير أنني أرى نفسي كصبي يلعب على شاطئ البحر، أتسلى من حين لآخر بإيجاد حصاة ناعمة أو قوقعة جميلة للغاية، لكنني في الواقع هناك محيط كبير من الحقائق غير المكتشفة ما زال خلفي".



**الشكل 27.11** التوزيع المقدر للمادة والطاقة في الكون.

## مراجعة الفصل الحادي عشر:

### الكلمات المفتاحية

**الجسيم المضاد:** هو جسيم دون ذري له نفس كتلة وعمر الجسيم المرتبط به، ولكن شحنته الكهربائية معاكسة.  
**رقم الباريون:** يأخذ رقم الباريون القيمة  $B=+1$  للباريونات،  $-1$  لمضادات الباريونات، و  $0$  لجميع الجسيمات الأخرى ويكون مصاناً في تفاعلات الجسيمات.

**الباريونات:** مجموعة من ثلاثة كواركات.

**الانفجار الكبير:** التوسع السريع للفضاء الذي يمثل بداية الكون.

**البوزون:** هو جسيم ذو سبين متكامل ويكون متناظراً في التبادل.

**اللون:** خاصية الجسيمات والتي تؤدي الدور نفسه في التفاعلات النووية القوية كما تؤدي الشحنة الكهربائية في التفاعلات الكهرومغناطيسية.

**إشعاع الخلفية الكونية الميكروني (CMBR):** الإشعاع الحراري الذي ينتج عن حدث الانفجار الكبير.

**علم الكونيات:** دراسة أصل الكون وتطوره ومصيره النهائي.

**الطاقة المظلمة:** شكل من الطاقة يُعتقد أنه مسؤول عن تسارع الكون الملحوظ.

**المادة المظلمة:** مادة في الكون لا تتفاعل مع جزيئات أخرى، ولكن يمكن استنتاجها عن طريق انحراف ضوء النجم البعيد.

**القوة الكهروضعيفة:** توحيد تفاعلات القوة الكهرومغناطيسية والقوة النووية الضعيفة.

**تناظر التبادل:** خاصية نظام من الجسيمات التي لا يمكن تمييزها والتي تتطلب تبادل أي جزيئين لتكون غير قابلة للرصد.

**الفرميون:** هو جسيم ذو نصف سبين متكامل ويكون غير متناظر عند التبادل.

**مخطط فاينمان:** مخطط الزمكان الذي يصف كيفية حركة الجزيئات وتفاعلها.

**القوة الأساسية:** واحدة من القوى الأربع التي تعمل بين أجسام المادة: القوى النووية القوية والكهرومغناطيسية والنووية الضعيفة والجاذبية.

**الغلون:** هو جسيم يحمل القوة النووية القوية بين الكواركات داخل النواة الذرية.

**النظرية الموحدة الكبرى:** نظرية تفاعلات الجسيمات، التي توحد القوى النووية القوية والكهرومغناطيسية والنووية الضعيفة.

**الهادران:** ميزون أو باريون.

**ثابت هابل:** ثابت يرتبط بالسرعة والمسافة في قانون هابل.

**قانون هابل:** العلاقة بين السرعة والمسافة بين النجوم والمجرات.

**لبتون:** فرميون يشارك في القوة الكهربائية.

**رقم اللبتون:** يتم حفظ رقم الإلكترون-لبتون  $L_e$ ، ورقم الميون - لبتون  $L_\mu$ ، ورقم التاو لبتون  $L_\tau$ ، جميعها أرقام مصانة بشكل منفصل في كل تفاعل جسيمي.

**الميزونات:** مجموعة من اثنين من الكواركات.

**الاصطناع النووي:** إنشاء عناصر ثقيلة وحدث خلال الانفجار الكبير.

**مسرّع الجسيمات:** آلة مصممة لتسريع الجسيمات المشحونة. وعادة ما يتم تحقيق هذا التسارع باستخدام الحقول الكهربائية والحقول المغناطيسية القوية، أو كليهما.

كاشف الجسيمات: كاشف مصمم لقياس نتائج الاصطدامات الناتجة عن مسرع الجسيمات بدقة؛ كواشف الجسيمات محكمة الإغلاق ومتعددة الأغراض.

البوزيترون: مضاد الإلكترون.

الديناميك الكمي (QCD): نظرية تصف التفاعلات القوية بين الكواركات.

الديناميك الكهربائي الكمي (QED): نظرية تصف تفاعل الإلكترونات مع الفوتونات.

الكوارك: فرميون يشارك في القوة الكهربائية والقوة النووية القوية.

الانزياح الأحمر: إطالة الطول الموجي للضوء (أو الاحمرار) بسبب التمدد الكوني.

النموذج القياسي: نموذج للتفاعلات الجسيمية التي تحتوي على نظرية الكهضعيف وديناميك الكم (QCD).

الغرابية: خاصية الجسيمات المرتبطة بوجود كوارك غريب.

القوة النووية القوية: قوة جاذبة قوية نسبياً تعمل على مسافات قصيرة (نحو  $10^{-15}$  m) مسؤولة عن ترابط البروتونات والنيوترونات في النوى الذرية.

السنكروترون: مسرع دائري يستخدم الكمون المتناوب وشدة الحقل المغناطيسي المتزايدة لتسريع الجسيمات إلى طاقات أعلى.

إشعاع السنكروترون: إشعاع عالي الطاقة ينتج في مسرع السنكروترون عن طريق الحركة الدائرية لحزمة مشحونة.

نظرية كل شيء: نظرية للتفاعلات الجسيمية التي توحد جميع القوى الأساسية الأربع.

الجسيم الافتراضي: جسيم موجود لفترة قصيرة جداً بحيث لا يمكن ملاحظته.

بوزونات W و Z: جسيم ذو كتلة كبيرة نسبياً يحمل القوة النووية الضعيفة بين اللبتونات والكواركات.

القوة النووية الضعيفة: قوة ضعيفة نسبياً (نحو  $10^{-6}$  من القوة النووية القوية) مسؤولة عن تحلل الجزيئات الأولية وتفاعلات النترينو.

### المعادلات الرئيسية

$p = 0.3 Br$	عزم الجسيمات المشحونة في السيكلوترون
$W^2 = 2[E_1 E_2 + (p_1 c)(p_2 c)] + (m_1 c^2)^2 + (m_2 c^2)^2$	طاقة مركز الكتلة لألة الحزم المتصادمة
$\Delta t = \frac{h}{E}$	الزمن التقريبي لتبادل الجسيمات الافتراضية بين اثنين من الجسيمات الأخرى
$v = H_0 d$	قانون هابل
$ds^2 = c^2 dt^2 - a(t)^2 d\Sigma^2$	المقياس الزمكاني الكوني

### الملخص

#### 1.11 مقدمة فيزياء الجسيمات

- إن القوى الأساسية الأربع في الطبيعة هي: النووية القوية والكهرطيسية والنووية الضعيفة والجاذبية، مرتبة حسب شدتها. بخلاف اللبتونات فإن الكواركات تتفاعل عبر القوة القوية. ولكن كلاً من الكواركات واللبتونات تتفاعل عبر القوى الكهرطيسية والضعيفة والجاذبية.

- تصنف الجسيمات الأولية إلى فرمونات وبيوزونات. الفرمونات لها سبين نصف متكامل وتحقق مبدأ الاستبعاد. للبيوزونات سبين متكامل ولا تحقق هذا المبدأ. البيوزونات هي حاملات القوة للتفاعلات الجسيمية.
- تصنف الجسيمات الأولية إلى فرمونات وبيوزونات. الفرمونات لها سبين نصف متكامل وتحقق مبدأ الاستبعاد. للبيوزونات سبين متكامل ولا تحقق هذا المبدأ. البيوزونات هي حاملات القوة للتفاعلات الجسيمية.
- تنتمي الكواركات واللبتونات إلى عائلات جسيمية مكونة من ثلاثة أعضاء لكل منهما. يشترك أفراد الأسرة في العديد من الخصائص (الشحنة والسبين والمشاركة في القوى)، أما الكتلة فلا.
- جميع الجسيمات لها جسيمات مضادة. تشترك الجسيمات مع جسيمات المادة المضادة بنفس الخصائص، ولكنها تحمل شحنة معاكسة.

## 2.11 قوانين مصونية الجسيمات

- تخضع تفاعلات الجسيمات الأولية لقوانين مصونية الجسيمات، والتي يمكن استخدامها لتحديد ماهي التفاعلات والتحولات الجسيمية الممكنة (أو المحظورة).
- قانون مصونية رقم الباريون وقانون مصونية أرقام اللبتون الثلاثة يصلحان لجميع العمليات المادية. ومع ذلك، فإن قانون مصونية الغرابة لا يصلح إلا للتفاعلات النووية القوية والتفاعلات الكهروضعيفية.

## 3.11 الكواركات

- يوجد ست كواركات معروفة: العلوي ( $u$ ) والسفلي ( $d$ ) والساحر ( $c$ ) والغريب ( $s$ ) والقمة ( $t$ ) والقاعدة ( $b$ ). هذه الجسيمات هي فرمونات لها سبين نصف متكامل وشحنة كسرية.
- تتكون الباريونات من ثلاث كواركات، وتتكون الميزونات من زوج كوارك - مضاد الكوارك. بسبب القوة القوية، لا يمكن أن توجد الكواركات بمعزل عن غيرها.
- تم العثور على أدلة على الكواركات في تجارب التبعثر.

## 4.11 مسرعات الجسيمات والكواشف

- تم تطوير العديد من أنواع مسرعات الجسيمات لدراسة الجسيمات وتفاعلاتها. وتشمل المسرعات الخطية، والسيكلوترونات والسنكروترونات مصادمات الحزم.
- تستخدم آلات الحزم المتصادمة لإنشاء جسيمات ضخمة تتحلل بسرعة إلى جزيئات أخف وزناً.
- تستخدم الكواشف متعددة الأغراض لتصميم جميع جوانب التصادمات عالية الطاقة. وتضم كواشف لقياس العزم وطاقت الجسيمات المشحونة والفوتونات.
- يتم قياس الجسيمات المشحونة عن طريق حني هذه الجسيمات وفق مسار دائري باستخدام حقل مغناطيسي.
- يتم قياس الجسيمات باستخدام المسرعات التي تمتص الجسيمات.

## 5.11 النموذج القياسي

- يصف النموذج القياسي التفاعلات بين الجسيمات من خلال القوة النووية القوية والقوة الكهروضعيفية والقوة النووية الضعيفة.
- يتم تمثيل تفاعلات الجسيمات بواسطة مخططات فاينمان. يمثل مخطط فاينمان التفاعلات بين الجسيمات على رسم بياني زمكاني.
- تعمل القوى الكهروضعيفية على مدى طويل، ولكن القوى القوية والضعيفة تعملان على مدى قصير. تنتقل هذه القوى بين الجسيمات عن طريق إرسال واستقبال البيوزونات.

- تسعى النظريات الكبرى الموحدة لفهم الكون بدلالة قوة واحدة فقط.

## 6.11 الانفجار الكبير

- الكون يتوسع كالبالون - كل نقطة فيه تنحسر عن جميع النقاط الأخرى.
- تبعد المجرات البعيدة عنا بسرعة تتناسب مع مسافتها. يقاس هذا المعدل بنحو  $70 \text{ km/s/Mpc}$ . وبالتالي، كلما كانت المجرات بعيدة عنا أكثر، كلما زادت سرعتها. يمكن قياس "سرعات الانحسار" هذه باستخدام إنزياح دوبلر للضوء.
- وفقاً للنماذج الكونية الحالية، فقد بدأ الانفجار الكبير للكون منذ نحو 13.7 مليار سنة.

## 7.11 تطور الكون المبكر

- كان الكون المبكر حاراً وكثيفاً.
- الكون موحد الخواص ومتوسع.
- إشعاع الخلفية الكونية هو دليل على الانفجار الكبير.
- جزء هائل من كتلة وطاقة الكون مازال مبهماً.

## أسئلة نظرية

### 1.11 مقدمة فيزياء الجسيمات

1. ما هي القوى الأساسية الأربع؟ صفها بإيجاز.
2. قارن بين الفرمونات والبوزونات باستخدام مفاهيم الغموض وتناظر التبادل.
3. اكتب قائمة بعائلات الكواركات واللبتونات.
4. قارن بين الجسيمات الأولية والجسيمات المضادة. وصف تفاعلاتها.

### 2.11 قوانين مصونية الجسيمات

5. ما هي قوانين مصونية الجسيمات الستة؟ صفهم بإيجاز.
6. كيف يمكننا عموماً تحديد فيما إذا كان تفاعل أو تحلل الجسيمات ممكن الحدوث؟
7. لماذا يعتبر الكشف عن تفاعل الجسيمات المخالف لقانون مصونية الجسيمات شيئاً جيداً لأحد العلماء؟

### 3.11 الكواركات

8. ما هي الكواركات الستة المعروفة؟ اشرح خصائصها بإيجاز.
9. ما هو التركيب الكواركي العام لكل من الباريون والميزون؟
10. ما هو الدليل على وجود الكواركات؟
11. لماذا تختلف الباريونات التي لها نفس التركيب الكواركي أحياناً في قيم طاقة الكتلة الساكنة؟

### 4.11 مسرعات الجسيمات والكواشف

12. قارن باختصار بين كل من: مسرع فان دي غراف والمسرّع الخطي والسيكلوترون ومسرّع السنكروترون.
13. صف المكونات الأساسية وآلية عمل آلة الحزم المتصادمة النموذجية.
14. ما هي وحدات الكشف الفرعية لتجربة ملف الميون المضغوط؟ صفهم بإيجاز.
15. ما الذي يميز مسرع الحزم المتصادمة عن ذلك الذي يُطلق الجسيمات باتجاه هدف ثابت؟
16. يظهر إلكترون في كواشف الميون CMS. كيف يمكن أن يحدث ذلك؟

## 5.11 النموذج القياسي

17. ما هو النموذج القياسي؟ عبر عن إجابتك بدلالة القوى الأساسية الأربع وتبادل الجسيمات.
18. ارسم مخطط فاينمان لعملية فناء الإلكترون والبوزيترون والتي تعطي فوتونين.
19. ما هو الدافع وراء نظريات التوحيد الكبرى؟
20. إذا تم تطوير نظرية توحد كل القوى الأربع، فهل سيكون من الصحيح القول أن مدار القمر تحدده قوة الجاذبية؟ اشرح السبب.
21. إذا تم اكتشاف بوزون هيغز ووجد أن له كتلة، فهل يمكن اعتباره الحامل النهائي للقوة الضعيفة؟ اشرح الإجابة.
22. أحد أنماط التحلل المشعة  $\Lambda^0$  هي:  $\Lambda^0 \rightarrow \pi^- + p$ . على الرغم من دخول الهادرونات فقط في هذا التحلل، إلا أنه يحدث من خلال القوة النووية الضعيفة. كيف نعرف أن هذا التحلل لا يحدث من خلال القوة النووية القوية؟

## 6.11 الانفجار الكبير

23. ما هو المقصود بالتوسع الكوني؟ عبر عن إجابتك بدلالة منحني هابل والانزياح الأحمر لضوء النجوم البعيدة.
24. صف تشبيه التوسع الكوني بالبالون. اشرح لماذا يبدو فقط وكأننا في مركز تمدد الكون.
25. يتم تحديد بعد المجرات المحلية عن طريق قياس سطوع النجوم، والتي تُسمى بالمتغيرات السيفيدية، والتي يمكن ملاحظتها بشكل فردي ولها سطوع مطلق على مسافة قياسية معروفة جيداً. اشرح كيف يختلف السطوع المقاس باختلاف المسافة، بالمقارنة مع السطوع المطلق.

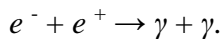
## 7.11 تطور الكون المبكر

26. ما المقصود بعبارة "النموذج الكوني للكون المبكر"؟ صف بإيجاز هذا النموذج بدلالة القوى الأساسية الأربع.
27. صف اثنين من الأدلة التي تدعم نموذج الانفجار الكبير.
28. ما الذي قصده نيوتن حين قال ذات مرة، "فتى يلعب على شاطئ البحر"؟ عبر عن إجابتك بدلالة مفاهيم المادة المظلمة والطاقة المظلمة.
29. إذا تم اكتشاف السبب المجهول للانزياح الأحمر - كأن تقول بأن الضوء "يتعب" من السفر لمسافات طويلة عبر الفضاء الخالي مثلاً - فما تأثير ذلك على علم الكونيات؟
30. في الماضي، اعتقد العديد من العلماء أن الكون لا نهائي. ومع ذلك، فإذا كان الكون لا حصر له، فإن أي خط نظر يجب أن يسقط في النهاية على سطح نجم ويجب أن تكون السماء في الليل ساطعة جداً. كيف يتم حل هذه المفارقة في علم الكونيات الحديث؟

## مسائل

### 1.11 مقدمة فيزياء الجسيمات

31. ما مقدار الطاقة التي يتم إطلاقها عندما يكون الإلكترون والبوزيترون في حالة السكون ويفني بعضها بعضاً؟ (لمعرفة كتل الجسيمات، انظر إلى الجدول 1.11).
32. إذا تم إطلاق  $1.0 \times 10^{30}$  MeV من الطاقة عند الإفناء المتبادل لكرة من المادة وكرة من المادة المضادة، وكانت كتل الكرتين متساوية، فما هي كتلة الكرة الواحدة؟
33. عندما يكون كل من الإلكترون والبوزيترون في حالة سكون، فإنه من الممكن أن يفني بعضها بعضاً وفقاً للتفاعل التالي:



في هذه الحالة، احسب طاقة وعزم وتردد كل من الفوتونات؟

34. ما هي الطاقة الحركية الكلية التي تحملها الجسيمات في عمليات التحلل التالية؟

- (a)  $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$   
 (b)  $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$   
 (c)  $\Sigma^+ \rightarrow n + \pi^+$   
 (d)  $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$ .

### 2.11 قوانين مصونية الجسيمات

35. أي من التحللات التالية لا يمكن أن يحدث بسبب انتهاك قانون مصونية رقم اللبتون؟

- (a)  $n \rightarrow p + e^-$  (e)  $\pi^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$   
 (b)  $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$  (f)  $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$   
 (c)  $\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$  (g)  $\Lambda^0 \rightarrow \pi^- + p$   
 (d)  $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$  (h)  $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$

36. أي من التفاعلات التالية لا يمكن حدوثه بسبب انتهاك قانون مصونية الغرابة؟

- (a)  $p + n \rightarrow p + p + \pi^-$  (e)  $K^- + p \rightarrow \Xi^0 + K^+ + \pi^-$   
 (b)  $p + n \rightarrow p + p + K^-$  (f)  $K^- + p \rightarrow \Xi^0 + \pi^- + \pi^-$   
 (c)  $K^- + p \rightarrow K^- + \Sigma^+$  (g)  $\pi^+ + p \rightarrow \Sigma^+ + K^+$   
 (d)  $\pi^- + p \rightarrow K^+ + \Sigma^-$  (h)  $\pi^- + n \rightarrow K^- + \Lambda^0$

37. حدّد تحللاً واحداً ممكناً لكل من الجسيمات المضادة التالية:

- (a)  $\bar{n}$ ، (b)  $\bar{\Lambda}^0$ ، (c)  $\Omega^+$ ، (d)  $K^-$ ، (e)  $\bar{\Sigma}^-$ .

38. جميع التفاعلات النووية القوية التالية ممنوعة الحدوث. حدد قانون المصونية الذي ينتهكه كل منها.

- (a)  $p + \bar{p} \rightarrow p + n + \bar{p}$   
 (b)  $p + n \rightarrow p + \bar{p} + n + \pi^+$   
 (c)  $\pi^- + p \rightarrow \Sigma^+ + K^-$   
 (d)  $K^- + p \rightarrow \Lambda^0 + n$

### 3.11 الكواركات

39. استناداً إلى التركيب الكواركي للبروتون، أثبت أن شحنته هي +1.

40. استناداً إلى التركيب الكواركي للنترون، أثبت أن شحنته هي 0.

41. بين أن التركيب الكواركي الواردة في الجدول 5.11 للكاون الموجب تتوافق مع القيم المعروفة لهذا الباريون من حيث الشحنة والسبين والغرابة.

42. يتم تشكيل الميزونات من مجموعات الكواركات التالية (تشير الحروف إلى اللون  $AR = \text{antired}$  أي مضاد الأحمر):  
 ( $d_R, \bar{d}_{AR}$ ) و ( $s_R, \bar{s}_{AR}$ ) و ( $u_{AG}, \bar{u}_{AG}$ ) و ( $s_R, \bar{s}_{AR}$ ).

(a) حدد شحنة وغرابة كل مجموعة. (b) حدد واحداً أو أكثر من الميزونات المتشكلة من كل تركيبة من الكوارك - الكوارك المضاد.

43. لماذا لا يمكن لأي مجموعة من الكواركات الموضحة أدناه تشكيل هادرون؟





(a)



(b)

44. تشير النتائج التجريبية إلى وجود جسيم معزول شحنته  $+2/3$  - كوارك معزول. أي من الكوارك يمكن أن يكون هذا الجسيم؟ ولماذا يعتبر هذا الاكتشاف مهماً؟

45. عبر عن تحللات  $\beta$  التالية:  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$  و  $p \rightarrow n + e^+ + \nu$  بدلالة تحللات  $\beta$  للكواركات. تحقق لمعرفة فيما إذا كانت قوانين مصونية الشحنة ورقم اللبتون ورقم الباريون محققة في تحللات  $\beta$  للكواركات.

#### 4.11 سرعات الجسيمات والكواشف

46. جسيم مشحون في حقل مغناطيسي شدته 2.0 Tesla ينحني في دائرة نصف قطرها 75 cm. ما هو عزم الجسيم؟  
47. مسار بروتون يمر عبر حقل مغناطيسي نصف قطره 50 cm. شدة الحقل المغناطيسي هي 1.5 Tesla. ما هي الطاقة الكلية للبروتون؟

48. استنبط المعادلة  $p = 0.3 Br$  باستخدام مفاهيم التسارع المركزي (الحركة في البعدين وثلاثة الأبعاد <http://cnx.org/content/m58288/latest/>) والعزم النسبي (النسبية).

49. بفرض أن طاقة الحزمة لمصادم الإلكترون - بوزيترون تبلغ 4.73 GeV تقريباً. ما هي الكتلة الكلية ( $W$ ) من الجسيمات المنتجة في فناء الإلكترون والبوزيترون في هذا المصادم؟ ما هو الميزون الذي قد ينتج؟

50. عند الطاقة الكاملة لسنكروترون مختبر فيرمي والذي يبلغ قطره 2.00 km تتحرك البروتونات بسرعة تقارب سرعة الضوء، ذلك أن طاقتها تبلغ نحو 1000 مرة من طاقتها الكتلية الساكنة. (a) كم من الوقت يستغرق البروتون لإكمال رحلة واحدة؟ (b) كم مرة في الثانية سيمر عبر المنطقة المستهدفة؟

51. بفرض أن  $W^-$  الذي تم تشكيله في كاشف الجسيمات يعيش لمدة  $5.00 \times 10^{-25}$  ثانية. ما هي المسافة التي يقطعها خلال هذا الزمن إذا كان يتحرك بسرعة  $0.900c$ ؟ (لاحظ أن الزمن أطول من العمر المعطى للجسيم  $W^-$ ، والذي يمكن أن يكون بسبب الطبيعة الإحصائية لتمدد الزمن أو التحلل)

52. ما هو طول المسار الذي يخلفه  $\pi^+$  يتحرك بسرعة  $0.100c$  في الحجرة الفقاعية إذا كان قد تشكل وعاش هناك لمدة  $2.60 \times 10^{-8}$  s؟ (أولئك الذين يتحركون بسرعة أكبر أو يعيشون حياة أطول قد يهربون من الكاشف قبل التحلل).

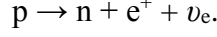
53. ينتج SLAC الذي يبلغ طوله 3.20 km حزمة من الإلكترونات طاقتها 50.0 GeV. فإذا كان هناك 15000 أنبوب تسريع، فما هو متوسط الكمون الذي يجب أن يكون على طرفي الفجوات المتشكلة بين الأنابيب لتحقيق هذه الطاقة؟

#### 5.11 النموذج القياسي

54. باستخدام مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ، حدد مدى القوة الضعيفة إذا تم إنتاج هذه القوة عن طريق تبادل بوزون  $Z$ .

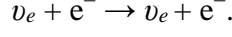
55. استخدم مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ لتقدير مدى التحلل النووي الضعيف الذي يستخدم الجاذبية.

56. (a) يتم تعديل التحلل التالي بواسطة القوة الكهروضعيفة:



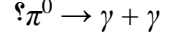
ارسم مخطط فاينمان للتحلل.

(b) يتم تعديل الانتثار التالي بواسطة القوة الكهروضعيفة:



ارسم مخطط فاينمان للتبعثر.

57. بفرض أن العزم مصان، ما هي طاقة كل شعاع  $\gamma$  ناتج عن تحلل بيون محايد في حالة السكون، في التفاعل التالي:



58. ما هو الطول الموجي لإلكترون طاقته 50 GeV، والذي يتم إنتاجها في SLAC؟ هذا يعطينا فكرة عن الحد الأقصى للتفاصيل التي يمكن كشفها بالمجس.

59. نموذج التحلل الأساسي للبيون السالب هو  $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ . (a) ما هي الطاقة المحررة مقدرتها بوحدة MeV في هذا التحلل؟

(b) باستخدام قانون مصونية العزم، احسب مقدار الطاقة التي يتلقاها كل من نواتج التحلل، إذا علمت أن  $\pi^-$  يكون في حالة سكون عندما يتحلل؟ يمكنك اعتبار أن الميون مضاد النترينو عديم الكتلة وأن عزمه  $p = E/c$ ، مساو لعزم الفوتون.

60. لنفترض أنك تقوم بتصميم تجربة تحلل البروتون وأنت تستطيع اكتشاف 50% من تحللات البروتونات في خزان الماء. (a) كم كيلوجراماً من الماء ستحتاج لرؤية تحلل واحد كل شهر، بفرض أن عمر الماء 1031 سنة؟ (b) ماهي كمية الماء مقدرتها بالأمتار المكعبة؟ (c) إذا كان العمر الفعلي هو 1033 سنة، فكم من الزمن يجب أن تنتظر وسطياً لرؤية تحلل بروتون واحد؟

## 6.11 الانفجار الكبير

61. إذا كانت سرعة إحدى المجرات البعيدة هي  $0.99c$ ، فما هو بعد هذه المجرة عن مراقب أرضي؟

62. تبعد إحدى المجرات عن نظامنا الشمسي مسافة قدرها 10 Mpc. (a) ما هي سرعة انحسار المجرة؟ (b) ماهي القيمة الكسرية لانزياح ضوء النجوم عن هذه المجرة نحو اللون الأحمر (أي، ما هي القيمة  $z$  له)؟

63. إذا كانت إحدى المجرات تبعد عنا مسافة 153 Mpc، فبأي سرعة يتوقع أنها تتحرك وفي أي اتجاه؟

64. كم تبعد عنا وسطياً المجرات التي تتحرك مبتعدة عنا بسرعة تبلغ 2.0% من سرعة الضوء؟

65. يدور نظامنا الشمسي حول مركز مجرة درب التبانة. فإذا افترضنا أن هذا المدار دائري ويبلغ نصف قطره 30000 سنة ضوئية وسرعته المدارية تبلغ 250 km/s، فكم سنة تستغرق الدورة الواحدة؟ لاحظ أن هذا الرقم تقريبي، بافتراض سرعة ثابتة ومدار دائري، ولكنه يمثل الوقت المناسب الذي يستغرقه نظامنا الشمسي ونجومنا المحلية لإتمام دورة واحدة حول المجرة.

66. (a) ما هي السرعة التقريبية - بالنسبة لنا - التي تتحرك بها مجرة تقع بالقرب من حافة الكون المعروف، أي تبعد نحو 10 جيغا سنة ضوئية؟ (b) ما هي هذه السرعة مقارنة بسرعة الضوء؟ لاحظ أننا يمكننا من مشاهدة مجرات تتحرك مبتعدةً عنا بسرعة تزيد على  $0.9c$ .

67. (a) احسب العمر التقريبي للكون من متوسط قيمة ثابت هابل،  $H_0 = 20 \text{ km/s} \cdot \text{Mly}$ . للقيام بذلك، احسب الزمن الذي يستغرقه لقطع مسافة 0.307 Mpc بمعدل توسع ثابت قدره 20 km/s. (b) في حالة حدوث تسارع بطريقة ما، هل سيكون العمر الفعلي للكون أكبر أم أقل من العمر المحسوب في هذه المسألة؟ اشرح الإجابة.

68. مجرة أندروميديا هي أقرب مجرة كبيرة ومرئية للعين المجردة. قدر سطوعها بالنسبة للشمس، بفرض أن لمعاً 10<sup>12</sup> ضعف لمعان الشمس وتقع على بعد 0.613 Mpc.

69. بين أن سرعة النجم الذي يدور حول مجرته في مدار دائري يتناسب عكسياً مع الجذر التربيعي لنصف قطره المداري، بفرض أن كتلة النجوم داخل مداره تعمل ككتلة واحدة في مركز المجرة. يمكنك استخدام معادلة من الفصل السابق لدعم استنتاجك، ولكن يجب عليك تسوية استخدامها وتحديد جميع المصطلحات المستخدمة.

## مسائل إضافية

70. تشير النتائج التجريبية إلى أن الميون يتحلل إلى إلكترون وفوتون. كيف يمكن لهذا أن يحدث؟

71. كل التفاعلات التالية تفتقد جسيم واحد. حدد الجسيمات المفقودة لكل تفاعل.

$$(a) p + \bar{p} \rightarrow n + ?$$

$$(b) p + p \rightarrow p + \Lambda^0 + ?$$

$$(c) \pi^+ + p \rightarrow \Sigma^- + ?$$

$$(d) K^- + n \rightarrow \Lambda^0 + ?$$

$$(e) \tau^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + ?$$

$$(f) \bar{\nu}_e + p \rightarrow n + ?$$

72. بسبب ضياعات الطاقة الناتجة عن الإشعاع السنكروتروني في LHC في CERN، تتم إضافة 5.00 MeV فقط إلى طاقة كل بروتون أثناء كل دورة حول الحلقة الرئيسية. كم عدد الدورات اللازمة لإنتاج بروتونات بطاقة 7.00 TeV (7000 GeV)، إذا تم حقنها بطاقة مبدئية قدرها 8.00 GeV؟

73. بروتون ومضاد بروتون يصطدمان رأسياً (وجهاً لوجه)، الطاقة الحركية لكل منهما تبلغ 7.00 TeV (كما هو الحال في LHC في CERN). ما هو مقدار طاقة الاصطدام المتاحة، مع الأخذ بالحسبان فناء الكتلتين؟ (لاحظ أن هذا ليس أكبر بكثير من الطاقة الحركية النسبية القصوى).

74. عندما يصطدم إلكترون وبوزيترون في منشأة SLAC، تكون الطاق الحركية لكل منهما 50.0 GeV. ما هي طاقة الاصطدام الكلية المتاحة، مع مراعاة طاقة الفناء؟ لاحظ أن طاقة الفناء ضئيلة، لأن الإلكترونات نسبية بشكل مرتفع.

75. تنهار نواة أحد النجوم خلال المستعر الأعظم، مشكلةً نجماً نوترونياً. العزم الزاوي للنواة مصان، وبالتالي فإن النجم النوتروني يدور بسرعة. فإذا كان نصف قطر النواة الأولي هو  $5.0 \times 10^5$  km وانهار إلى 10.0 km، أوجد السرعة الزاوية للنجم النوتروني مقدرة بعدد الدورات في الثانية، إذا علمت أن السرعة الزاوية الأساسية كانت في الأصل دورة واحدة لكل 30.0 يوم.

76. باستخدام الحل من المسألة السابقة، أوجد الزيادة في الطاقة الحركية السبينية، إذا علمت أن كتلة النواة تبلغ 1.3. ضعف كتلة الشمس. من أين تأتي هذه الزيادة في الطاقة الحركية؟

77. (a) ما هو ثابت هابل الذي يوافق العمر التقريبي للكون  $10^{10}$  سنة؟ للحصول على قيمة تقريبية، افترض أن معدل التمدد ثابت واحسب السرعة التي يجب أن تتحرك بها مجرتان بشكل منفصل لكي يبلغ البعد الفاصل بينهما مليون سنة ضوئية 1 Mly (وهو متوسط الفصل المجري الحالي) عند الزمن  $10^{10}$  سنة. (b) وبالمثل، ما هو ثابت هابل الذي يوافق كونا يبلغ عمره  $2 \times 10^{10}$  سنة؟

## مسائل للتحدي

78. تتصادم الإلكترونات والبوزيترونات في مسرع سبيني. استنتج علاقة طاقة مركز الكتلة للجسيم.

79. شدة الإشعاع الكوني تتناقص بشكل سريع مع زيادة الطاقة، ولكن في بعض الأحيان توجد أشعة كونية نشطة جداً تشكل سبلاً من الإشعاعات من جميع الجسيمات التي تنشأ عن طريق ضرب النواة في الغلاف الجوي. بفرض أن جسيم الأشعة الكونية طاقته  $10^{10}$  GeV ويجول طاقته إلى جسيمات يبلغ متوسط كتلتها  $200 \text{ MeV}/c^2$ .

(a) كم عدد الجسيمات التي يتم إنشاؤها؟ (b) إذا أمطرت الجسيمات على مساحة قدرها  $1.00 \text{ km}^2$ ، فكم عدد الجسيمات لكل متر مربع؟

80. (a) احسب الكمية النسبية  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$  لبروتونات تبلغ طاقتها  $1.00 \text{ TeV}$  وتم إنتاجها في مسرع مختبر فيرمي. (b) إذا كان مثل هذا البروتون قد شكل  $\pi^+$  له نفس السرعة، فكم من الوقت ستبقى في المختبر؟ (c) ماهي المسافة التي يمكن أن يقطعها خلال هذا الزمن؟

81. الخطط المتعلقة بمسرع ينتج حزمة ثانوية من الميزونات K للانتشار من النوى، بهدف دراسة القوة القوية، تدعو إلى امتلاك طاقة حركية تبلغ  $500 \text{ MeV}$ . (a) ما هي الكمية النسبية  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$  لهذه الجزيئات؟ (b) كم سيكون متوسط عمرها في المختبر؟ (c) ماهي المسافة التي يمكن أن تقطعها خلال هذا الزمن؟

82. في المستعرات الأعظمية، يتم إنتاج النترينوهات بكميات هائلة. وقد تم اكتشافها من المستعر الأعظم 1987A في مجرة ماجيلان، التي تبعد نحو  $120000$  سنة ضوئية عن الأرض (قريبة نسبياً من مجرة درب التبانة). إذا كانت النترينوهات ذات كتلة، فإنها لا تستطيع السفر بسرعة الضوء، ولكن إذا كانت كتلتها صغيرة، فستكون سرعتها قريبة من سرعة الضوء. (a) بفرض أن نترينو كتلته  $7\text{eV}/c^2$  لديه طاقة حركية تبلغ  $700 \text{ keV}$ . أوجد الكمية النسبية  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$  له. (b) إذا غادر النترينو المستعر الأعظم 1987A في الوقت نفسه الذي انطلق فيه الفوتون من هناك وسافرا معا إلى الأرض، فما هو الفارق الزمني بين وصولهما؟ لا يُعد هذا الفارق الزمني كبيراً، نظراً لأنه من المستحيل معرفة أي من النترينوهات قد انطلق مع أي من الفوتونات وبسبب الكفاءة الضعيفة لأجهزة الكشف عن النترينو. وبالتالي، فإن حقيقة أن النترينوهات قد لوحظت في غضون ساعات من إشراق المستعر الأعظم تضع حداً أقصى على كتلة النترينو. (تلميح: قد تحتاج إلى استخدام توسع السلسلة لحساب  $v$  للنترينو، حيث أن  $\gamma$  له كبيرة جداً).

83. بفرض وجود مدار دائري للشمس بالقرب من مركز مجرة درب التبانة، احسب سرعتها المدارية باستخدام المعلومات التالية: كتلة المجرة تعادل كتلة تبلغ  $1.5 \times 10^{11}$  ضعف كتلة الشمس (أو  $3 \times 10^{41} \text{ kg}$ )، وتقع على بعد  $30000$  سنة ضوئية.

84. (a) ما هي قوة الجاذبية التقريبية على شخص وزنه  $10 \text{ kg}$  والناتجة عن مجرة أندروميديا، بفرض أن كتلتها الكلية هي  $10^{13}$  ضعف كتلة الشمس وتعمل ككتلة واحدة تبعد  $0.613 \text{ Mpc}$ ؟ (b) ما هي نسبة هذه القوة إلى وزن الشخص؟ لاحظ أن أندروميديا هي أقرب مجرة كبيرة.

85. (a) بفرض أن جسيم والجسيم المضاد له في حالة سكون بالنسبة لمراقب ويفني الواحد الآخر (يدمر كل منهما كتلة الآخر تماماً)، مشكلين شعاعي غاما متساويي الطاقة. ما هي خاصية أشعة غاما الواجب إيجادها كدليل على حدوث عملية فناء البروتون - مضاد البروتون؟ (حقيقة أن هذا الإشعاع نادراً ما يتم ملاحظته هي دليل على وجود القليل جداً من المادة المضادة في الكون). (b) كيف يمكن مقارنة ذلك مع الطاقة التي تبلغ  $0.511 \text{ MeV}$  والمرتبطة بفناء الإلكترون - البوزيترون؟

86. تحدث ذروة شدة CMBR عند طول موجة يبلغ  $1.1 \text{ mm}$ . (a) ما هي الطاقة مقدرة بوحدة  $\text{eV}$  لفوتون طول موجته  $1.1 \text{ mm}$ ؟ (b) يوجد ما يقرب من  $10^9$  فوتون لكل جسيم كبير في الفضاء السحيق. احسب طاقة  $10^9$  من هذه الفوتونات. (c) إذا كان متوسط كتلة الجسيمات الضخمة في الفضاء يساوي نصف كتلة البروتون، فما هي الطاقة التي يمكن أن تنتج عن تحويل كتلتها إلى طاقة؟ (d) هل هذا يعني أن الفضاء "مهيمن عليه من قبل المادة"؟ اشرح بإيجاز.

87. (a) استخدم مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ لحساب عدم اليقين في طاقة توافق فترة زمنية قدرها  $10^{-43} \text{ s}$ . (b) قارن هذه الطاقة مع طاقة توحيد القوى والتي تبلغ  $10^{19} \text{ GeV}$  وناقش سبب تشابههما.

## الملحق (A) | APPENDIX

الجدول A الواحدات المستخدمة في الفيزياء (الواحدات الأساسية بالخط العريض) (SI)

المقدار	الرمز الشائع	الواحدة	الواحدة في الجملة الدولية (SI)
التسارع	$\vec{a}$	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>
كمية المادة	$n$	mole	Mol
الزاوية	$\theta, \phi$	radian (rad)	
التسارع الزاوي	$\vec{\alpha}$	rad/s <sup>2</sup>	s <sup>-2</sup>
التواتر الزاوي	$\omega$	rad/s	s <sup>-1</sup>
العزم الزاوي	$\vec{L}$	kg·m <sup>2</sup> /s	kg·m <sup>2</sup> /s
السرعة الزاوية	$\vec{\omega}$	rad/s	s <sup>-1</sup>
المساحة	$A$	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>
العدد الذري	$Z$		
السعة	$C$	farad (F)	A <sup>2</sup> ·s <sup>4</sup> /kg·m <sup>2</sup>
الشحنة	$q, Q, e$	coulomb (C)	A·s
كثافة الشحنة:			
الخطية	$\lambda$	C/m	A·s/m
السطحية	$\sigma$	C/m <sup>2</sup>	A·s/m <sup>2</sup>
الحجمية	$\rho$	C/m <sup>3</sup>	A·s/m <sup>3</sup>
الناقلية	$\sigma$	1/Ω·m	A <sup>2</sup> ·s <sup>3</sup> /kg·m <sup>3</sup>
شدة التيار	$I$	ampere	A
كثافة التيار	$\vec{J}$	A/m <sup>2</sup>	A/m <sup>2</sup>
الكثافة	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
ثابت العزل	$\kappa$		
العزم ثنائي القطب الكهربائي	$\vec{p}$	C·m	A·s·m
الحقل الكهربائي	$\vec{E}$	N/C	kg·m/A·s <sup>3</sup>
الحريان الكهربائي	$\Phi$	N·m <sup>2</sup> /C	kg·m <sup>3</sup> /A·s <sup>3</sup>
القوة المحركة الكهربائية	$\epsilon$	volt (V)	kg·m <sup>2</sup> /A·s <sup>3</sup>
الطاقة	$E, U, K$	joule (J)	kg·m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
الانتروبي	$S$	J/K	kg·m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ·K
التواتر	$f$	hertz (Hz)	s <sup>-1</sup>
كمية الحرارة	$Q$	joule (J)	kg·m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
الممانعة	$L$	henry (H)	kg·m <sup>2</sup> /A <sup>2</sup> ·s <sup>2</sup>
الطول	$l, L$	meter	m
الإزاحة	$\Delta x, \Delta \vec{r}$		
البعد	$d, h$		
الإحداثيات (الموقع)	$x, y, z, \vec{r}$		

$A \cdot m^2$	$N \cdot J/T$	$\vec{\mu}$	عزم ثنائي القطب المغناطيسي
$kg/A \cdot s^2$	tesla(T) = (Wb/m <sup>2</sup> )	$\vec{B}$	الحقل المغناطيسي
$kg \cdot m^2 / A \cdot s^2$	weber (Wb)	$\Phi_m$	التدفق المغناطيسي
kg	kilogram	$m, M$	الكتلة
$kg \cdot m^2 / s^2 \cdot mol \cdot K$	J/mol · K	$C$	الحرارة النوعية الجزيئية
$kg \cdot m^2$	$kg \cdot m^2$	$I$	عزم القصور الذاتي
$kg \cdot m/s$	$kg \cdot m/s$	$\vec{p}$	العزم
s	s	$T$	الدور
$kg \cdot m/A^2 \cdot s^2$	$N/A^2 = (H/m)$	$\mu_0$	نفوذية الخلاء
$A^2 \cdot s^4 / kg \cdot m^3$	$C^2 / N \cdot m^2 = (F/m)$	$\epsilon_0$	سماحية الخلاء
$kg \cdot m^2 / A \cdot s^3$	volt(V) = (J/C)	$V$	الكمون
$kg \cdot m^2 / s^3$	watt(W) = (J/s)	$P$	الاستطاعة
$kg/m \cdot s^2$	pascal(Pa) = (N/m <sup>2</sup> )	$p$	الضغط
$kg \cdot m^2 / A^2 \cdot s^3$	ohm( $\Omega$ ) = (V/A)	$R$	المقاومة
$m^2 / s^2 \cdot K$	J/kg · K	$c$	الحرارة النوعية
m/s	m/s	$v$	السرعة
K	kelvin	$T$	درجة الحرارة
s	second	$t$	الزمن

## الملحق (B) | معاملات التحويل

الجدول B1 معاملات التحويل بين وحدات الأطوال

كيلومتر Km	سنتيمتر cm	متر m	
$10^{-3}$	$10^2$	1	meter 1 متر
$10^{-5}$	1	$10^{-2}$	centimeter 1 سنتيمتر
1	$10^5$	$10^3$	kilometer 1 كيلومتر
$2.540 \times 10^{-5}$	2.540	$2.540 \times 10^{-2}$	inch 1 انش
$3.048 \times 10^{-4}$	30.48	0.3048	foot 1 قدم
1.609	$1.609 \times 10^4$	1609	mile 1 ميل
		$10^{-10}$	angstrom 1 انغستروم
		$10^{-15}$	fermi 1 فمتو متر
$9.460 \times 10^{12}$			light-year 1 سنة ضوئية
mi 1 ميل	ft 1 قدم	in 1 انش	
$6.214 \times 10^{-4}$	3.281	39.37	meter 1 متر
$6.214 \times 10^{-6}$	$3.281 \times 10^{-2}$	0.3937	centimeter 1 سنتيمتر
0.6214	$3.281 \times 10^3$	$3.937 \times 10^4$	kilometer 1 كيلومتر
$1.578 \times 10^{-5}$	$8.333 \times 10^{-2}$	1	inch 1 انش
$1.894 \times 10^{-4}$	1	12	foot 1 قدم
1	5280	$6.336 \times 10^4$	mile 1 ميل

## المساحة

$$1 \text{ سنتيمتر مربع (cm}^2\text{)} = 0.155 \text{ انش مربع (in}^2\text{)}$$

$$1 \text{ متر مربع (m}^2\text{)} = 10^4 \text{ سنتيمتر مربع (cm}^2\text{)} = 10.76 \text{ قدم مربع (ft}^2\text{)}$$

$$1 \text{ انش مربع (in}^2\text{)} = 6.452 \text{ سنتيمتر مربع (cm}^2\text{)}$$

$$1 \text{ قدم مربع (ft}^2\text{)} = 1.44 \text{ انش مربع (in}^2\text{)} = 0.0929 \text{ متر مربع (m}^2\text{)}$$

## الحجم

$$1 \text{ لتر (liter)} = 1000 \text{ سنتيمتر مكعب (cm}^3\text{)} = 10^{-3} \text{ متر مكعب (m}^3\text{)} = 0.03531 \text{ قدم مكعب (ft}^3\text{)} = 61.02 \text{ انش مكعب (in}^3\text{)}$$

$$1 \text{ قدم مكعب (ft}^3\text{)} = 0.02832 \text{ متر مكعب (m}^3\text{)} = 28.32 \text{ لتر (liters)} = 7.477 \text{ غالون (gallons)}$$

$$1 \text{ غالون (gallon)} = 3.788 \text{ لتر (liters)}$$

## الجدول B2 معاملات التحويل بين وحدات الزمن

سنة	يوم	ساعة	دقيقة	ثانية	
$3.169 \times 10^{-8}$	$1.157 \times 10^{-5}$	$2.778 \times 10^{-4}$	$1.667 \times 10^{-2}$	1	1 ثانية (second)
$1.901 \times 10^{-6}$	$6.944 \times 10^{-4}$	$1.667 \times 10^{-2}$	1	60	1 دقيقة (minute)
$1.141 \times 10^{-4}$	$4.167 \times 10^{-2}$	1	60	3600	1 ساعة (hour)
$2.738 \times 10^{-3}$	1	24	1440	$8.640 \times 10^4$	1 يوم (day)
1	365.25	$8.766 \times 10^3$	$5.259 \times 10^5$	$3.156 \times 10^7$	1 سنة (year)

## الجدول B3 معاملات التحويل بين وحدات السرعة

ميل \ ساعة (mi/h)	قدم \ ثانية (ft/s)	سنتيمتر \ ثانية (cm/s)	متر \ ثانية (m/s)	
2.237	3.281	$10^2$	1	1 متر \ ثانية meter/second
$2.237 \times 10^{-2}$	$3.281 \times 10^{-2}$	1	$10^{-2}$	1 سنتيمتر \ ثانية centimeter/second
0.6818	1	30.48	0.3048	1 قدم \ الثانية foot/second
1	1.467	44.70	0.4470	1 ميل \ الثانية mile/hour



## التسارع

- 1 متر \ ثانية مربع (m/s<sup>2</sup>) = 100 سنتيمتر \ ثانية مربع (cm/s<sup>2</sup>) = 3.281 قدم \ ثانية مربع (ft/s<sup>2</sup>)  
 1 سنتيمتر \ ثانية مربع (cm/s<sup>2</sup>) = 0.01 متر \ ثانية مربع (m/s<sup>2</sup>) = 0.03281 قدم \ ثانية مربع (ft/s<sup>2</sup>)  
 1 قدم \ ثانية مربع (ft/s<sup>2</sup>) = 0.3048 متر \ ثانية مربع (m/s<sup>2</sup>) = 30.84 سنتيمتر \ ثانية مربع (cm/s<sup>2</sup>)  
 1 ميل \ ساعة . ثانية (mi/h · s) = 1.467 قدم \ ثانية مربع (ft/s<sup>2</sup>)

### الجدول B4 معاملات التحويل بين وحدات الكتلة

وحدة الكتلة الذرية u	slug	غرام g	كيلو غرام Kg	
$6.852 \times 10^{-2}$	$6.852 \times 10^{-2}$	$10^3$	1	1 كيلو غرام kilogram
$6.852 \times 10^{-5}$	$6.852 \times 10^{-5}$	1	$10^{-3}$	1 غرام gram
$8.789 \times 10^{27}$	1	$1.459 \times 10^4$	14.59	1 سلج slug
1	$1.138 \times 10^{-28}$	$1.661 \times 10^{-24}$	$1.661 \times 10^{-27}$	1 وحدة الكتلة الذرية atomic mass unit
			1000	1 طن metric ton

### الجدول B5 معاملات التحويل بين وحدات القوة

رطل lb	دين dyne	نيوتن N	
0.2248	$10^5$	1	1 نيوتن newton
$2.248 \times 10^{-6}$	1	$10^{-5}$	1 دين dyne
1	$4.448 \times 10^5$	4.448	1 رطل pound

### الجدول B6 معاملات التحويل بين وحدات الضغط

حيث تسارع الجاذبية الارضية  $9.80665 \text{ m/s}^2$  ودرجة الحرارة  $0^\circ\text{C}$

رطل \ انش مربع lb/in <sup>2</sup>	سنتيمتر زئبقي cmHg	1 ضغط جوي atm	دين \ سنتيمتر مربع dyne/cm <sup>2</sup>	باسكال pa	
$1.450 \times 10^{-4}$	$7.501 \times 10^{-4}$	$9.869 \times 10^{-6}$	10	1	1 باسكال pascal
$1.450 \times 10^{-5}$	$7.501 \times 10^{-5}$	$9.869 \times 10^{-7}$	1	$10^{-1}$	1 دين \ سنتيمتر مربع dyne/centimeter <sup>2</sup>
14.70	76	1	$1.013 \times 10^6$	$1.013 \times 10^5$	1 ضغط جوي atmosphere

0.1934	1	$1.316 \times 10^{-2}$	$1.333 \times 10^4$	$1.333 \times 10^3$	1 سنتمتر زئبقي centimeter mercury
1	5.171	$6.805 \times 10^{-2}$	$6.895 \times 10^4$	$6.895 \times 10^3$	1 رطل / انش مربع pound/inch <sup>2</sup>
				$10^5$	1 بار bar
	1 (mmHg)				1 تورر torr

**الجدول B7 معاملات التحويل بين وحدات العمل والطاقة والحرارة**

ft.lb	رطل . قدم	erg	ارغ	جول J	
	0.7376		$10^7$	1	1 جول joule
	$7.376 \times 10^{-8}$		1	$10^{-7}$	1 ارغ erg
	1	$1.356 \times 10^7$		1.356	1 رطل - قدم foot-pound
	$1.182 \times 10^{-19}$	$1.602 \times 10^{-12}$		$1.602 \times 10^{-19}$	1 إلكترون فولت electron-volt
	3.088	$4.186 \times 10^7$		4.186	1 حريرة calorie
	$7.779 \times 10^2$	$1.055 \times 10^{10}$		$1.055 \times 10^3$	1 وحدة الحرارة البريطانية British thermal unit
				$3.600 \times 10^6$	1 كيلو واط - ساعي kilowatt-hour
	<b>Btu</b>	<b>cal</b>		<b>eV</b>	
	$9.481 \times 10^{-4}$	0.2389		$6.242 \times 10^{18}$	1 جول joule
	$9.481 \times 10^{-11}$	$2.389 \times 10^{-8}$		$6.242 \times 10^{11}$	1 ارغ erg

$1.285 \times 10^{-3}$	0.3239	$8.464 \times 10^{18}$	1 رطل - قدم foot-pound
$1.519 \times 10^{-22}$	$3.827 \times 10^{-20}$	1	1 الكترون فولت electron-volt
$3.968 \times 10^{-3}$	1	$2.613 \times 10^{19}$	1 حريرة calorie
1	$2.520 \times 10^2$	$6.585 \times 10^{21}$	1 وحدة الحرارة البريطانية British thermal unit

### الاستطاعة

1 واط (W) = 1 جول \ ثانية (J/s)  
 1 حصان بخاري (hp) = 746 واط (W) = 550 رطل . قدم \ ثانية (ft · lb/s)  
 1 وحدة الطاقة البريطانية \ ساعة (Btu/h) = 0.293 واط (W)

### الزواوية

1 راديان (rad) = 57.30 درجة = 180 درجة \  $\pi$  ( $180^\circ/\pi$ )  
 1 درجة = 0.01745 راديان (rad) =  $\pi$  \ 180 راديان ( $\pi/180$  rad)  
 1 دورة (revolution) = 360 درجة =  $2\pi$  راديان ( $2\pi$  rad)  
 1 دورة في الدقيقة (rpm) = rev/min. = 0.1047 راديان \ ثانية (rad/s)

## الملحق (C) | الثوابت الأساسية

**الجدول C1 الثوابت الأساسية** ملاحظة: هذه الثوابت هي القيم الموصى بها في عام 2006 من قبل CODATA ، بناءً على معالجة القياسات المختلفة بطريقة أصغر المربعات. تمثل الأرقام الموجودة بين قوسين قيم عدم اليقين.

المقدار	الرمز	القيمة
وحدة الكتلة الذرية Atomic mass unit	u	$1.660\,538\,782\,(83) \times 10^{-27} \text{ kg}$ $931.494\,028\,(23) \text{ MeV}/c^2$
عدد أفوغادرو Avogadro's number	$N_A$	$6.022\,141\,79\,(30) \times 10^{23} \text{ particles/mol}$
مغنتون بور Bohr magneton	$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$	$9.274\,009\,15\,(23) \times 10^{-24} \text{ J/T}$
نصف قطر بور Bohr radius	$a_0 = \frac{\hbar^2}{m_e e^2 k_e}$	$5.291\,772\,085\,9\,(36) \times 10^{-11} \text{ m}$
ثابت بولتزمان Boltzmann's constant	$k_B = \frac{R}{N_A}$	$1.380\,650\,4\,(24) \times 10^{-23} \text{ J/K}$
طول موجة كومبتون Compton wavelength	$\lambda_C = \frac{h}{m_e c}$	$2.426\,310\,217\,5\,(33) \times 10^{-12} \text{ m}$
ثابت كولون Coulomb constant	$k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$	$8.987\,551\,788\dots \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2 \text{ (exact)}$
كتلة الدتريون Deuteron mass	$m_d$	$3.343\,583\,20\,(17) \times 10^{-27} \text{ kg}$ $2.013\,553\,212\,724(78) \text{ u}$ $1875.612\,859 \text{ MeV}/c^2$
كتلة الإلكترون Electron mass	$m_e$	$9.109\,382\,15\,(45) \times 10^{-31} \text{ kg}$ $5.485\,799\,094\,3(23) \times 10^{-4} \text{ u}$ $0.510\,998\,910\,(13) \text{ MeV}/c^2$
إلكترون فولت Electron volt	eV	$1.602\,176\,487\,(40) \times 10^{-19} \text{ J}$

$1.602\ 176\ 487\ (40) \times 10^{-19}\ \text{C}$	$e$	شحنة الإلكترون Elementary charge
$8.314\ 472\ (15)\ \text{J/mol} \cdot \text{K}$	$R$	ثابت الغاز Gas constant
$6.674\ 28\ (67) \times 10^{-11}\ \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$	$G$	ثابت الجاذبية Gravitational constant

**الجدول C1 الثوابت الأساسية** ملاحظة: هذه الثوابت هي القيم الموصى بها في عام 2006 من قبل CODATA ، بناءً على معالجة القياسات المختلفة بطريقة أصغر المربعات. تمثل الأرقام الموجودة بين قوسين قيم عدم اليقين.

القيمة	الرمز	المقدار
$1.674\ 927\ 211\ (84) \times 10^{-27}\ \text{kg}$ $1.008\ 664\ 915\ 97\ (43)\ \text{u}$ $939.565\ 346\ (23)\ \text{MeV}/c^2$	$m_n$	كتلة النوترون Neutron mass
$5.050\ 783\ 24\ (13) \times 10^{-27}\ \text{J/T}$	$\mu_n = \frac{e\hbar}{2m_p}$	المغنتون النووي Nuclear magneton
$4\pi \times 10^{-7}\ \text{T} \cdot \text{m/A}(\text{exact})$	$\mu_0$	نفوذية الخلاء Permeability of free space
$8.854\ 187\ 817\dots \times 10^{-12}\ \text{C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2(\text{exact})$	$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2}$	سماحية الخلاء Permittivity of free space
$6.626\ 068\ 96\ (33) \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}$ $1.054\ 571\ 628\ (53) \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}$	$h$ $\hbar = \frac{h}{2\pi}$	ثابت بلانك Planck' s constant
$1.672\ 621\ 637\ (83) \times 10^{-27}\ \text{kg}$ $1.007\ 276\ 466\ 77\ (10)\ \text{u}$ $938.272\ 013\ (23)\ \text{MeV}/c^2$	$m_p$	كتلة البروتون Proton mass

$$1.097\,373\,156\,852\,7(73) \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

 $R_H$ 

ثابت ريدبيرغ  
Rydberg constant

$$2.997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m/s (exact)}$$

 $c$ 

سرعة الضوء في الخلاء  
Speed of light in vacuum

مجموعة ثوابت مفيدة للحسابات:

$$hc = 12,400 \text{ eV} \cdot \text{\AA} = 1240 \text{ eV} \cdot \text{nm} = 1240 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$$

$$\hbar c = 1973 \text{ eV} \cdot \text{\AA} = 197.3 \text{ eV} \cdot \text{nm} = 197.3 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$$

$$k_e e^2 = 14.40 \text{ eV} \cdot \text{\AA} = 1.440 \text{ eV} \cdot \text{nm} = 1.440 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$$

$$k_B T = 0.02585 \text{ eV} \quad \text{at} \quad T = 300 \text{ K}$$

## الملحق (D) | البيانات الفلكية

### الجدول D1 أهم البيانات الفلكية

لا مركزية المدار	فترة الدوران حول خط الاستواء	فترة الدوران (d : يوم) (y : سنة)	المسافة الوسطية من الشمس (مليون كيلومتر)	الجسم السماوي
-	27 d	-	-	Sun الشمس
0.206	59 d	88 d	57.9	Mercury عطارد
0.007	243 d	224.7 d	108.2	Venus الزهرة
0.017	23 h 56 min 4 s	365.26 d	149.6	Earth الأرض
0.093	24 h 37 min 23 s	687 d	227.9	Mars المريخ
0.048	9 h 50 min 30 s	11.9 y	778.4	Jupiter المشتري
0.054	10 h 14 min	29.5 6	1426.7	Saturn زحل
0.047	17 h 14 min	84.0 y	2871.0	Uranus أورانوس
0.009	16 h	164.8 y	4498.3	Neptune نبتون
0.055	27.3 d	27.3 d	149.6 (0.386 من الأرض)	قمر الأرض Earth's Moon
الكثافة (غرام/سنتمتر مكعب) (g/cm <sup>3</sup> )	الكتلة (الأرض=1)	القطر الإستوائي (كيلومتر)	الجسم السماوي	

1.4	333,000.00	1,392,000	الشمس Sun
5.4	0.06	4879	عطارد Mercury
5.2	0.82	12,104	الزهرة Venus
5.5	1.00	12,756	الأرض Earth
3.9	0.11	6794	المريخ Mars
1.3	317.83	142,984	المشتري Jupiter
0.7	95.16	120,536	زحل Saturn
1.3	14.54	51,118	أورانوس Uranus
1.6	17.15	49,528	نبتون Neptune
3.3	0.01	3476	قمر الأرض Earth's Moon

#### معلومات أخرى:

كتلة الأرض :  $5.97 \times 10^{24}$  [kg] (كيلو غرام)

كتلة القمر :  $7.36 \times 10^{22}$  [kg] (كيلو غرام)

كتلة الشمس :  $1.99 \times 10^{30}$  [kg] (كيلو غرام)



## الملحق (E) | العلاقات الرياضية

العلاقات من الدرجة الثانية

إذا كانت وفق الشكل:  $ax^2 + bx + c = 0$

عندها تكون قيمة  $x$  هي:  $x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$

مثلث له القاعدة  $b$  والارتفاع  $h$  ، تكون مساحته  $Area = \frac{1}{2}bh$

### الجدول E أهم العلاقات الهندسية

مساحتها $\pi r^2 =$	محيطها $2\pi r =$	دائرة لها نصف القطر $r$
حجمه $\frac{4}{3}\pi r^3 =$	مساحة سطحه $4\pi r^2 =$	جسم كروي لها نصف القطر $r$
حجمها $\pi r^2 h =$	مساحة سطحها $2\pi r h =$	أسطوانة نصف قطرها $r$ وارتفاعها $h$

### علم المثلثات

$$\sin \theta = 1/\csc \theta$$

$$\cos \theta = 1/\sec \theta$$

$$\tan \theta = 1/\cot \theta$$

$$\sin(90^\circ - \theta) = \cos \theta$$

$$\cos(90^\circ - \theta) = \sin \theta$$

$$\tan(90^\circ - \theta) = \cot \theta$$

$$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$$

$$\sec^2 \theta - \tan^2 \theta = 1$$

$$\tan \theta = \sin \theta / \cos \theta$$

$$\sin(\alpha \pm \beta) = \sin \alpha \cos \beta \pm \cos \alpha \sin \beta$$

$$\cos(\alpha \pm \beta) = \cos \alpha \cos \beta \mp \sin \alpha \sin \beta$$

$$\tan(\alpha \pm \beta) = \frac{\tan \alpha \pm \tan \beta}{1 \pm \tan \alpha \tan \beta}$$

$$\sin 2\theta = 2\sin \theta \cos \theta$$

$$\cos 2\theta = \cos^2 \theta - \sin^2 \theta = 2\cos^2 \theta - 1 = 1 - 2\sin^2 \theta$$

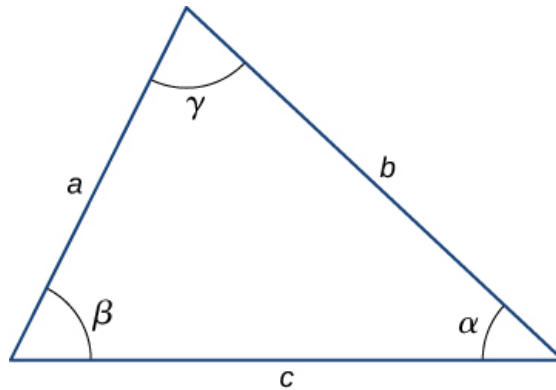
$$\sin \alpha + \sin \beta = 2\sin \frac{1}{2}(\alpha + \beta) \cos \frac{1}{2}(\alpha - \beta)$$

$$\cos \alpha + \cos \beta = 2\cos \frac{1}{2}(\alpha + \beta) \cos \frac{1}{2}(\alpha - \beta)$$

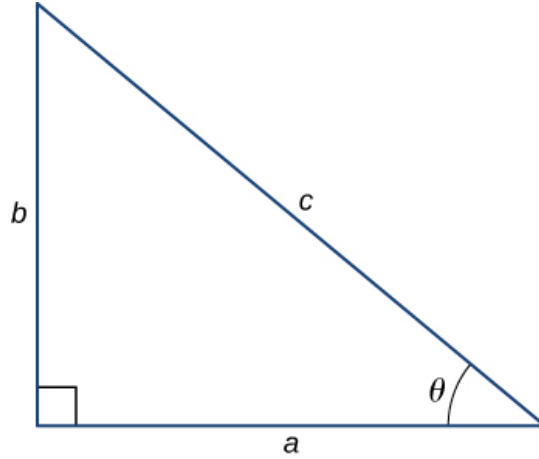
المثلثات:

$$\frac{a}{\sin \alpha} = \frac{b}{\sin \beta} = \frac{c}{\sin \gamma} \quad \text{قانون الجيب}$$

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \gamma \quad \text{قانون التنجيب}$$



$$a^2 + b^2 = c^2 \quad \text{نظرية فيثاغورث}$$



نشر السلاسل:

نظرية ثنائي الحد:

$$(a + b)^n = a^n + na^{n-1}b + \frac{n(n-1)a^{n-2}b^2}{2!} + \frac{n(n-1)(n-2)a^{n-3}b^3}{3!} + \dots$$

$$(1 \pm x)^n = 1 \pm \frac{nx}{1!} + \frac{n(n-1)x^2}{2!} \pm \dots \quad (x^2 < 1)$$

$$(1 \pm x)^{-n} = 1 \mp \frac{nx}{1!} + \frac{n(n-1)x^2}{2!} \mp \dots \quad (x^2 < 1)$$

$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \dots$$

$$\cos x = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \dots$$

$$\tan x = x + \frac{x^3}{3} + \frac{2x^5}{15} + \dots$$

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \dots$$

$$\ln(1 + x) = x - \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{3}x^3 - \dots \quad (|x| < 1)$$

الاشتقاقات:

$$\frac{d}{dx}[af(x)] = a \frac{d}{dx}f(x)$$

$$\frac{d}{dx}[f(x) + g(x)] = \frac{d}{dx}f(x) + \frac{d}{dx}g(x)$$

$$\frac{d}{dx}[f(x)g(x)] = f(x) \frac{d}{dx}g(x) + g(x) \frac{d}{dx}f(x)$$

$$\frac{d}{dx}f(u) = \left[ \frac{d}{du}f(u) \right] \frac{du}{dx}$$

$$\frac{d}{dx}x^m = mx^{m-1}$$

$$\frac{d}{dx} \sin x = \cos x$$

$$\frac{d}{dx} \cos x = -\sin x$$

$$\frac{d}{dx} \tan x = \sec^2 x$$

$$\frac{d}{dx} \cot x = -\csc^2 x$$

$$\frac{d}{dx} \sec x = \tan x \sec x$$

$$\frac{d}{dx} \csc x = -\cot x \csc x$$

$$\frac{d}{dx} e^x = e^x$$

$$\frac{d}{dx} \ln x = \frac{1}{x}$$

$$\frac{d}{dx} \sin^{-1} x = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$$

$$\frac{d}{dx} \cos^{-1} x = -\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$$

$$\frac{d}{dx} \tan^{-1} x = \frac{1}{1+x^2}$$

$$\int af(x)dx = a \int f(x)dx$$

$$\int [f(x) + g(x)]dx = \int f(x)dx + \int g(x)dx$$

$$\int x^m dx = \frac{x^{m+1}}{m+1} (m \neq -1)$$

$$= \ln x \quad (m = -1)$$

$$\int \sin x dx = -\cos x$$

$$\int \cos x dx = \sin x$$

$$\int \tan x dx = \ln|\sec x|$$

$$\int \sin^2 ax dx = \frac{x}{2} - \frac{\sin 2ax}{4a}$$

$$\int \cos^2 ax dx = \frac{x}{2} + \frac{\sin 2ax}{4a}$$

$$\int \sin ax \cos ax dx = -\frac{\cos 2ax}{4a}$$

$$\int e^{ax} dx = \frac{1}{a} e^{ax}$$

$$\int xe^{ax} dx = \frac{e^{ax}}{a^2} (ax - 1)$$

$$\int \ln ax dx = x \ln ax - x$$

$$\int \frac{dx}{a^2+x^2} = \frac{1}{a} \tan^{-1} \frac{x}{a}$$

$$\int \frac{dx}{a^2-x^2} = \frac{1}{2a} \ln \left| \frac{x+a}{x-a} \right|$$

$$\int \frac{dx}{\sqrt{a^2+x^2}} = \sinh^{-1} \frac{x}{a}$$

$$\int \frac{dx}{\sqrt{a^2-x^2}} = \sin^{-1} \frac{x}{a}$$

$$\int \sqrt{a^2+x^2} dx = \frac{x}{2} \sqrt{a^2+x^2} + \frac{a^2}{2} \sinh^{-1} \frac{x}{a}$$

$$\int \sqrt{a^2-x^2} dx = \frac{x}{2} \sqrt{a^2-x^2} + \frac{a^2}{2} \sin^{-1} \frac{x}{a}$$

# الملحق (F) | علم الكيمياء

**Periodic Table of the Elements**

Period	Group	1	2	13	14	15	16	17	18										
1		1 <b>H</b> 1.008 hydrogen							2 <b>He</b> 4.003 helium										
2		3 <b>Li</b> 6.94 lithium	4 <b>Be</b> 9.012 beryllium																
3		11 <b>Na</b> 22.99 sodium	12 <b>Mg</b> 24.31 magnesium																
4		19 <b>K</b> 39.10 potassium	20 <b>Ca</b> 40.08 calcium	21 <b>Sc</b> 44.96 scandium	22 <b>Ti</b> 47.87 titanium	23 <b>V</b> 50.94 vanadium	24 <b>Cr</b> 52.00 chromium	25 <b>Mn</b> 54.94 manganese	26 <b>Fe</b> 55.85 iron	27 <b>Co</b> 58.93 cobalt	28 <b>Ni</b> 58.69 nickel	29 <b>Cu</b> 63.55 copper	30 <b>Zn</b> 65.38 zinc	31 <b>Ga</b> 69.72 gallium	32 <b>Ge</b> 72.63 germanium	33 <b>As</b> 74.92 arsenic	34 <b>Se</b> 78.97 selenium	35 <b>Br</b> 79.90 bromine	36 <b>Kr</b> 83.80 krypton
5		37 <b>Rb</b> 85.47 rubidium	38 <b>Sr</b> 87.62 strontium	39 <b>Y</b> 88.91 yttrium	40 <b>Zr</b> 91.22 zirconium	41 <b>Nb</b> 92.91 niobium	42 <b>Mo</b> 95.95 molybdenum	43 <b>Tc</b> [97] technetium	44 <b>Ru</b> 101.1 ruthenium	45 <b>Rh</b> 102.9 rhodium	46 <b>Pd</b> 106.4 palladium	47 <b>Ag</b> 107.9 silver	48 <b>Cd</b> 112.4 cadmium	49 <b>In</b> 114.8 indium	50 <b>Sn</b> 118.7 tin	51 <b>Sb</b> 121.8 antimony	52 <b>Te</b> 127.6 tellurium	53 <b>I</b> 126.9 iodine	54 <b>Xe</b> 131.3 xenon
6		55 <b>Cs</b> 132.9 cesium	56 <b>Ba</b> 137.3 barium	57-71 <b>La-Lu</b> *	72 <b>Hf</b> 178.5 hafnium	73 <b>Ta</b> 180.9 tantalum	74 <b>W</b> 183.8 tungsten	75 <b>Re</b> 186.2 rhenium	76 <b>Os</b> 190.2 osmium	77 <b>Ir</b> 192.2 iridium	78 <b>Pt</b> 195.1 platinum	79 <b>Au</b> 197.0 gold	80 <b>Hg</b> 200.6 mercury	81 <b>Tl</b> 204.4 thallium	82 <b>Pb</b> 207.2 lead	83 <b>Bi</b> 209.0 bismuth	84 <b>Po</b> [209] polonium	85 <b>At</b> [210] astatine	86 <b>Rn</b> [222] radon
7		87 <b>Fr</b> [223] francium	88 <b>Ra</b> [226] radium	89-103 <b>Ac-Lr</b> **	104 <b>Rf</b> [267] rutherfordium	105 <b>Db</b> [270] dubnium	106 <b>Sg</b> [271] seaborgium	107 <b>Bh</b> [270] bohrium	108 <b>Hs</b> [277] hassium	109 <b>Mt</b> [276] meitnerium	110 <b>Ds</b> [281] darmstadtium	111 <b>Rg</b> [282] roentgenium	112 <b>Cn</b> [285] copernicium	113 <b>Uut</b> [285] ununtrium	114 <b>Fl</b> [289] flerovium	115 <b>Uup</b> [288] ununpentium	116 <b>Lv</b> [293] livermorium	117 <b>Uus</b> [294] ununseptium	118 <b>Uuo</b> [294] ununoctium
				* 57 <b>La</b> 138.9 lanthanum	58 <b>Ce</b> 140.1 cerium	59 <b>Pr</b> 140.9 praseodymium	60 <b>Nd</b> 144.2 neodymium	61 <b>Pm</b> [145] promethium	62 <b>Sm</b> 150.4 samarium	63 <b>Eu</b> 152.0 europium	64 <b>Gd</b> 157.3 gadolinium	65 <b>Tb</b> 158.9 terbium	66 <b>Dy</b> 162.5 dysprosium	67 <b>Ho</b> 164.9 holmium	68 <b>Er</b> 167.3 erbium	69 <b>Tm</b> 168.9 thulium	70 <b>Yb</b> 173.1 ytterbium	71 <b>Lu</b> 175.0 lutetium	
				** 89 <b>Ac</b> [227] actinium	90 <b>Th</b> 232.0 thorium	91 <b>Pa</b> 231.0 protactinium	92 <b>U</b> 238.0 uranium	93 <b>Np</b> [237] neptunium	94 <b>Pu</b> [244] plutonium	95 <b>Am</b> [243] americium	96 <b>Cm</b> [247] curium	97 <b>Bk</b> [247] berkelium	98 <b>Cf</b> [251] californium	99 <b>Es</b> [252] einsteinium	100 <b>Fm</b> [257] fermium	101 <b>Md</b> [258] mendelevium	102 <b>No</b> [259] nobelium	103 <b>Lr</b> [262] lawrencium	

Atomic number → 1

Symbol → **H**

Atomic mass → 1.008

Name → hydrogen

Color Code	
<span style="background-color: #e0e0e0; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span> Metal	<span style="background-color: #d3d3d3; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span> Solid
<span style="background-color: #c0c0c0; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span> Metalloid	<span style="background-color: #e0e0e0; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span> Liquid
<span style="background-color: #e0e0e0; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span> Nonmetal	<span style="background-color: #e0e0e0; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span> Gas

## الملحق (G) | الأجدية اليونانية

### الجدول G الأجدية اليونانية

حرف صغير	حرف كبير	الاسم	حرف صغير	حرف كبير	الاسم
$\nu$	N	نيو	$\alpha$	A	الفا
$\xi$	$\Xi$	كُسي (زاي)	$\beta$	B	بيتا
$\omicron$	O	أوميكرون	$\gamma$	$\Gamma$	غامما
$\pi$	$\Pi$	پاي	$\delta$	$\Delta$	دلتا
$\rho$	P	رو	$\epsilon$	E	إبسلون
$\sigma$	$\Sigma$	سيغما	$\zeta$	Z	زيتا
$\tau$	T	تاو	$\eta$	H	إيتا
$\upsilon$	$\Upsilon$	إبسلون	$\theta$	$\Theta$	ثيتا
$\phi$	$\Phi$	فاي	$\iota$	I	إيوتا
$\chi$	X	خاي	$\kappa$	K	كيا
$\psi$	$\Psi$	بسي	$\lambda$	$\Lambda$	لامدا
$\omega$	$\Omega$	أوميغا	$\mu$	M	مو

## أجوبة الأسئلة النظرية والمسائل

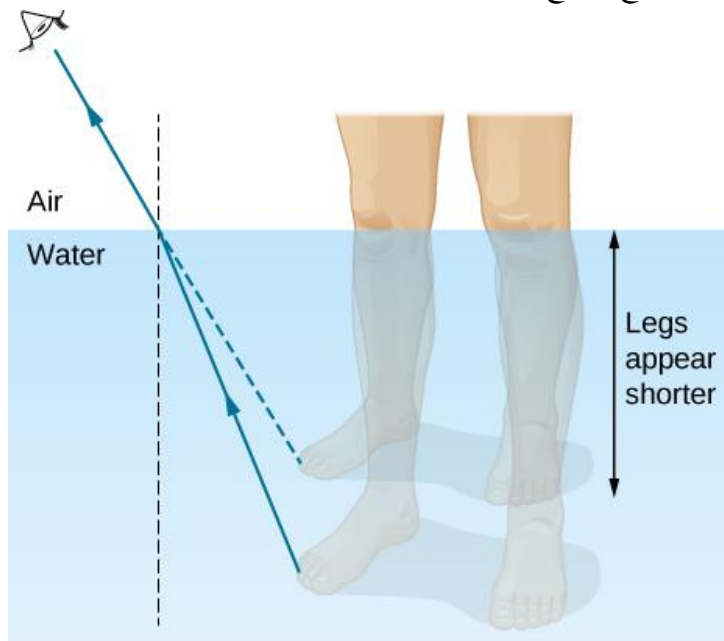
### الفصل الأول

#### أجوبة أسئلة تحقق من فهمك

- 1.1 2.1% (عند الاكتفاء فقط بدقة رقمين )
- 2.1  $15.1^\circ$
- 3.1 الهواء إلى الماء، لأن قرينة انكسار الوسط الثاني ليست نفسها
- 4.1 9.3 cm
- 5.1 يصبح AA' أطول وتميل A'B' بعيداً عن السطح ويميل الشعاع المنكسر بعيداً عن الناظم.
- 6.1 أيضاً 90%
- 7.1 سيكون هناك انكسار فقط ولا يوجد انعكاس

#### أجوبة الأسئلة النظرية

1. يمكن نمذجة الضوء على أنه شعاع عندما تكون الأجسام كبيرة مقارنةً بطول الموجة، وكموجة عندما تكون الأجسام قابلة للمقارنة أو صغيرة مقارنةً بطول الموجة.
3. تثبت هذه الحقيقة ببساطة أن سرعة الضوء أكبر من سرعة الصوت. إذا كان المرء يعرف المسافة إلى موقع البرق وسرعة الصوت، فيمكن، من حيث المبدأ، تحديد سرعة الضوء من هذه البيانات. في الممارسة العملية، نظراً لأن سرعة الضوء كبيرة جداً، يجب أن تكون البيانات عالية الدقة جداً.
5. يتكون المسحوق من العديد من الجزيئات الصغيرة ذات الأسطح الموجهة بشكل عشوائي. هذا يؤدي إلى انعكاس منتشر مما يجد من التآلق (البريق).
7. "في الاتجاه" حيث تزداد القرينة n (الهواء إلى الماء ، الماء إلى الزجاج) ؛ "باتجاه آخر" حيث تقل القرينة n (الزجاج إلى الهواء)
9. يظهر شعاع عن الساق من داخل الماء بعد الانكسار، ويرى المراقب الموجود في الهواء موقعاً ظاهراً للمصدر كما لو أن شعاعاً انتقل وفق خط مستقيم. أنظر الشعاع المتقطع أدناه.



11. تصبح الأحجار الكريمة غير مرئية عندما تكون قرينة الانكسار هي نفسها، أو قريبة من المياه المحيطة بها. نظراً لأن الألماس يتمتع بقرينة عالية للانكسار، فإنه لا يزال بإمكانه التألّق نتيجةً للانعكاس الداخلي الكلي غير المرئي.
13. يمكن للمرء أن يقيس الزاوية الخارجة من خلال البحث عن بداية الانعكاس الداخلي الكلي حيث تتغير زاوية السقوط يمكن عندئذٍ تطبيق المعادلة 1.14 لحساب قرينة الانكسار.
15. بالإضافة إلى الانعكاس الداخلي الكلي، تشتت الأشعة التي تنكسر داخل بلورات الألماس وخارجها، بسبب اختلاف قيم  $n$  عبر الطيف، مما يؤدي إلى ظهور ألوان متألّقة.
17. نعم
19. لا. أمواج الصوت ليست أمواج عرضية.
21. يتم امتصاص الطاقة في المرشحات.
23. يُنظر إلى غروب الشمس كأنه ضوء ينتقل مباشرة من الشمس باتجاهنا عندما يتبعثر الضوء الأزرق خارج هذا المسار، يسيطر الضوء الأحمر المتبقي على المظهر العام لغروب الشمس.
25. تم تدوير محور الاستقطاب للنظارات الشمسية بمقدار 90 درجة

### أجوبة المسائل:

27.  $1.97 \times 10^8 \text{ m/s}$  ;  $2.99705 \times 10^8 \text{ m/s}$

29. الجليد عند الدرجة  $0^\circ$

31. 1.03 ns

33. 337 m

35. لا يتأثر

37. لا يتأثر

39. الانعكاس  $70^\circ$  , الانكسار  $45^\circ$

41.  $42^\circ$

43. 1.53

45. a . 2.9 m . b . 1.4 m

47. a .  $24.42^\circ$  . b .  $31.33^\circ$

49.  $79.11^\circ$

51. a . 1.43 , الغلوريت . b .  $44.2^\circ$

53. a .  $48.2^\circ$  . b .  $27.3^\circ$

55.  $46.5^\circ$  لأجل الأحمر.  $46.0^\circ$  لأجل البنفسجي

57. a .  $0.04^\circ$  . b . 1.3 m

59.  $72.8^\circ$

61.  $53.5^\circ$  لأجل الأحمر ,  $55.2^\circ$  لأجل البنفسجي

63. 0.500

0.125 or 1/8 .65

84.3° .67

0.250 I<sub>0</sub> .69

a. 0.500 ; b. 0.250 ; c. 0.187 .71

67.54° .73

53.1° .75

### أجوبة المسائل الإضافية

114 radian/s .77

3.72 mm .79

41.2° .81

.83 a. 1.92 الجوهرة ليست الألماس (بل هو الزركون) b. 55.2°

.85 a. 0.898 b. لا يمكننا الحصول على قيمة أصغر من 1.00 نظراً لأن ذلك ينطوي على سرعة أكبر من c، c. الزاوية المنكسرة كبيرة جداً بالنسبة لزاوية ورود.

0.707 B<sub>1</sub> .87

.89 a.  $1.69 \times 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C/s}$  b. نعم.

### أجوبة مسائل للتحدي:

.91 الجزء الأول 88.6°. يعتمد الباقي على تعقيد الحل الذي يقوم القارئ ببنائه.

.93 لا يتأثر ، 1.33

.95 a. 0.750 b. 0.563 c. 1

## الفصل الثاني

### أجوبة الأسئلة النظرية

1. لا يمكن عرض الخيال الافتراضي على الشاشة. لا يمكنك التمييز بين الخيال الحقيقي والصورة الوهمية ببساطة عن طريق الحكم على الخيال الذي تتصوره بعينيك.

3. نعم، يمكنك تشكيل خيال وهمي. على سبيل المثال، إذا قمت بتصوير انعكاسك من مرآة مستوية، فستحصل على صورة لخيال وهمي. تركز الكاميرا الضوء الذي يدخل العدسة لتشكيل خيال؛ فيما إذا كان مصدر الضوء جسماً حقيقياً أو انعكاس عن المرآة (أي خيال وهمي) لا يهم.

5. لا، يمكنك رؤية الخيال الحقيقي بالطريقة نفسها التي يمكنك بها رؤية الخيال الوهمي. تعمل شبكية العين بشكل فعال كشاشة.

7. يجب أن يكون طول المرآة نصف طولك، وأن تكون حافتها العلوية عند مستوى عينيك. لا يعتمد الحجم على المسافة بينك وبين المرآة.

9. عندما يكون الجسم في اللانهاية؛ راجع معادلة المرآة.



11. نعم، التكبير السليبي يعني ببساطة أن الخيال مقلوب؛ هذا لا يمنع الخيال من أن يكون أكبر من الجسم. على سبيل المثال، بالنسبة إلى المرآة المقعرة، إذا كانت المسافة إلى الجسم أكبر من بعد محرق واحد، ولكن أصغر من بعدين محرقين، فسيتم عكس الصورة وتكبيرها.

13. قد تختلف الإجابات

15. البعد المحرق للعدسة ثابت، وبالتالي فإن مسافة الصورة تتغير كتابع للمسافة عن الجسم.

17. نعم، سيتغير بعدها المحرق. توضح معادلة صانع العدسة أن البعد المحرق يعتمد على قرينة انكسار الوسط المحيط بالعدسة. لأن

قرينة انكسار الماء تختلف عن قرينة الهواء، فإن البعد المحرق للعدسة سوف يتغير عندما تغمره المياه.

19. العين في حالة الاسترخاء، ذات الرؤية الطبيعية، ستتركز أشعة الضوء المتوازية على شبكيتها.

21. سيحتاج الشخص ذو العدسة الداخلية إلى نظارة للقراءة لأن عضلاته لا يمكن أن تشوه العدسة كما تفعل مع العدسة

البيولوجية، لذلك لا يمكنها التركيز على الأشياء القريبة. لتصحيح قصر النظر، يجب أن تكون قوة العدسة داخل العين أقل من

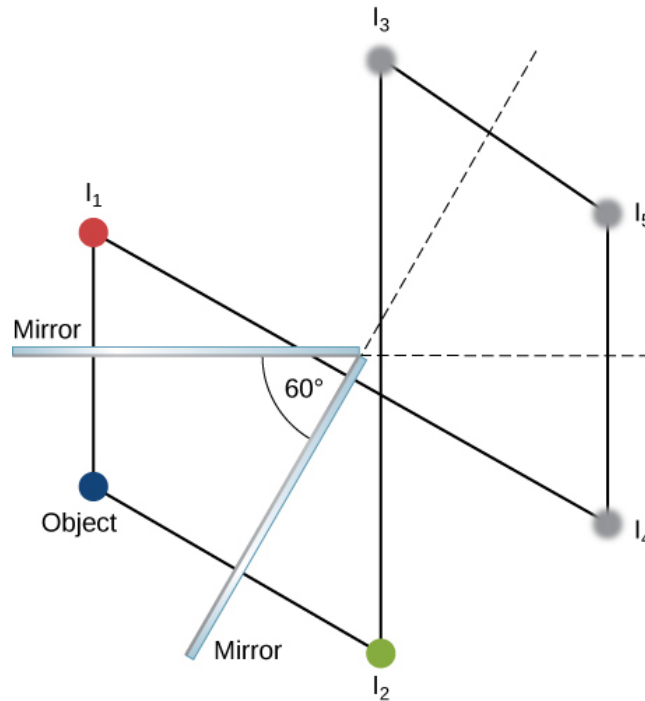
العدسة التي تمت إزالتها.

23. تقوم المجاهر بإنشاء أحياء ذات حجم مجهري، لذلك تطبق البصريات الهندسية.

25. سيتم تحريك العدسة بعيداً قليلاً عن الهدف بحيث يتعدى الخيال المتشكل البعد المحرق للعين.

### أجوبة المسائل:

27.



29. إنحرف في محرق المرآة الكبيرة وفي مركز انحناء المرآة الصغيرة.

$$f = \frac{R}{Z} \rightarrow R = +1.60 \text{ m} \quad .31$$

$$d_o = 27.3 \text{ cm} \quad .33$$

35. الخطوة 1: تكوين الخيال بواسطة مرآة.

الخطوة 2: رسم المشكلة التي تم إعدادها عندما يكون ذلك ممكناً

الخطوة 3: استخدام معادلات العدسة الرقيقة لحل هذه المشكلة.

الخطوة 4 : إيجاد  $f$  .

الخطوة 5 : خذ  $d_o = 0.120 \text{ m}$  ,  $m = 1.50$

الخطوة 6 : لا حاجة إلى تتبع الشعاع

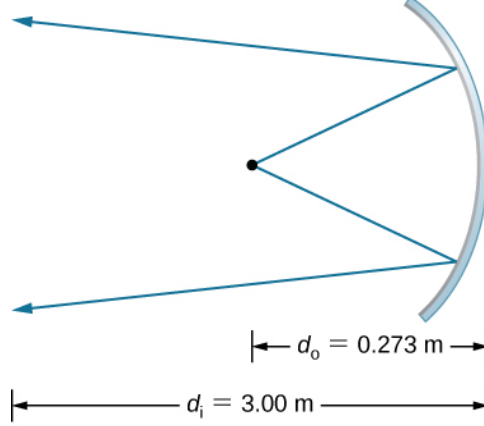
الخطوة 7 : استخدام  $d_i = -0.180 \text{ m}$  ,  $m = d_i / d_o$  , ثم  $f = 0.360 \text{ m}$

الخطوة 8 : الخيال وهمي لأن مسافة الخيال سالبة. البعد المحرقى إيجابي، و لتالي فإن المرآة مقعرة.

37. a. للحصول على مرآة محدبة;  $m = +0.111$ ;  $d_i < 0 \Rightarrow m > 0$  . b  $d_i = -0.334 \text{ cm}$  (وراء القرنية)  $cf = -0.376 \text{ cm}$

و لتالي  $R = -0.752 \text{ cm}$

$$m = \frac{h_i}{h_o} = -\frac{d_i}{d_o} = -\frac{-d_o}{d_o} = 1 \rightarrow h_i = h_o \quad .39$$



.41

$$m = -11.0$$

$$A' = 0.110 \text{ m}^2$$

$$I = 6.82 \text{ kW/m}^2$$

$$x_{2m} = -x_{2m-1} , (m = 1, 2, 3, \dots), \quad .43$$

$$x_{2m} + 1 = b - x_{2m} , (m = 0, 1, 2, \dots) , \text{ with } x_0 = a.$$

$$d_i = -55 \text{ cm}; m = +1.8 \quad .5$$

$$d_i = -41 \text{ cm} , m = 1.4 \quad .47$$

.49 لا يتأثر

$$\frac{1}{d_i} + \frac{1}{d_o} = \frac{1}{f} \rightarrow d_i = 3.43 \text{ m} \quad .a \quad .51$$

.b  $m =$

$$(2.40 \times 10^{-2} \text{ m})(33.33) = 80.0 \text{ cm}, \text{ and}$$

$$-33.33, \text{ so that } (3.60 \times 10^{-2} \text{ m})(33.33) = 1.20 \text{ m} \rightarrow 0.800 \text{ m} \times 1.20 \text{ m or } 80.0 \text{ cm} \times 120 \text{ cm}$$

$$\frac{1}{d_i} + \frac{1}{d_o} = \frac{1}{f} \rightarrow d_i = 5.08 \text{ cm} \quad .a \quad .53$$

$$\frac{0.036 \text{ m}}{1.695 \times 10^{-2}} = 2.12 \text{ m} \rightarrow 100\% \text{ ارتفاع يكون أقصى ارتفاع } m = -1.695 \times 10^{-2} \quad .b$$

.c هذا يبدو معقولاً تماماً، لأنه عند 3.00 m من الممكن الحصول على صورة كاملة للشخص.

$$\frac{1}{d_i} + \frac{1}{d_o} = \frac{1}{f} \rightarrow d_o = 2.55 \text{ m} \quad .a \quad .55$$

$$\frac{h_i}{h_o} = -\frac{d_i}{d_o} \rightarrow h_o = 1.00 \text{ m} \quad .b$$

57. a. باستخدام  $\frac{1}{d_0} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f}$  فيكون  $d_i = -56.67 \text{ cm}$  , ثم يمكننا تحديد مقدار التكبير ,  $m = 6.67$  .

b.  $d_i = -190 \text{ cm}$  and  $m = +20.0$  .

c. يزداد مقدار التكبير  $m$  بسرعة مع زيادة مسافة الجسم باتجاه البعد المحوري  $\frac{1}{d_0} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f}$

$$d_i = \frac{1}{\left(\frac{1}{f}\right) - \left(\frac{1}{d_0}\right)}$$

59.  $h_i = -0.933 \text{ mm}$  وبالتالي تكون  $\frac{d_i}{d_0} = 6.667 \times 10^{-13} = \frac{h_i}{h_0}$  .

61.  $h_i = 4.0 \text{ cm}$  ;  $d_i = 6.7 \text{ cm}$  .

63.  $83 \text{ cm}$  إلى يمين العدسة المقوية ,  $m = -2.3$  ,  $h_i = 6.9 \text{ cm}$  .

65.  $p = 52.0 \text{ D}$  .

67.  $\frac{h_i}{h_0} = -\frac{d_i}{d_0} \rightarrow h_i = -h_0 \left(\frac{d_i}{d_0}\right) = -(3.50 \text{ mm}) \left(\frac{2.00 \text{ cm}}{30.0 \text{ cm}}\right) = -0.233 \text{ mm}$  .

69. a.  $p = \frac{1}{d_0} + \frac{1}{d_i} \rightarrow d_0 = 28.6 \text{ cm}$  .

b.  $\frac{h_i}{h_0} = -\frac{d_i}{d_0} \rightarrow h_i = -0.250 \text{ mm}$  .

c.  $h_i = -0.0800 \text{ mm}$  .

71.  $p = \frac{1}{d_0} + \frac{1}{d_i} \rightarrow d_0 = 28.6 \text{ cm}$  .

73. في الأصل كانت الرؤية قريبة 51.0 D ، وبالتالي ،  $p = \frac{1}{d_0} + \frac{1}{d_i} \rightarrow d_0 = 1.00 \text{ m}$  .

75. في الأصل ،  $p = 70.0 \text{ D}$  ، نظراً لأن قوة الرؤية البعيدة العادية هي 50.0 D ، فيجب تقليل الطاقة بمقدار 20.0 D

77.  $p = \frac{1}{d_0} + \frac{1}{d_i} \rightarrow d_0 = 0.333 \text{ m}$  .

79. a.  $p = 56.16 \text{ D}$  ;  $p = 52.0 \text{ D}$  .

b.  $p = \frac{1}{d_0} + \frac{1}{d_i} \rightarrow d_0 = 16.2 \text{ cm}$  .

81. نحتاج  $d_i = -18.5 \text{ cm}$  عندما  $d_0 = \infty$  ، وبالتالي  $p = -5.41 \text{ D}$  .

83. لنأخذ ( نقطة بعيدة )  $x = \text{far point}$  .

$$\rightarrow P = \frac{1}{-(x-0.0175 \text{ m})} + \frac{1}{\infty} \rightarrow -xP + (0.0175 \text{ m})P = 1$$

$$\rightarrow x = 26.8 \text{ cm}$$

85.  $M = 6 \times$  .

87.  $M = \left(\frac{25 \text{ cm}}{L}\right) \left(1 + \frac{L-l}{f}\right)$  .

$$L - l = d_0$$

$$d_0 = 13 \text{ cm}$$

89.  $M = 2.5 \times$  .

91.  $M = -2.1 \times$  .

93.  $M = \frac{25 \text{ cm}}{f}$  .

$$M_{\max} = 5$$

95.  $M_{\max}^{\text{young}} = 1 + \frac{18 \text{ cm}}{f} \rightarrow f = \frac{18 \text{ cm}}{M_{\max}^{\text{young}} - 1}$  .

$$M_{\max}^{\text{old}} = 9.8 \times$$

97. a.  $\frac{1}{d_0} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} \rightarrow d_i = 46.5 \text{ cm}$  .

$$\rightarrow m = -30.0$$

b.  $M_{\text{net}} = -240$  .

99. a. خلف العدسة الجسيمية  $\frac{1}{d_0^{obj}} + \frac{1}{d_i^{obj}} = \frac{1}{f^{obj}} \rightarrow d_i^{obj} = 18.3 \text{ cm}$

b.  $m^{obj} = -60.0$

c.  $d_0^{eye} = 1.70 \text{ cm}$

$d_i^{eye} = -11.3 \text{ cm}$

أمام العدسة

d.  $M^{eye} = 13.5$

e.  $M_{net} = -810$

101.  $M = -40.0$

103.  $f^{obj} = \frac{R}{2}$  ;  $M = -16.7$

105.  $M = -\frac{f^{obj}}{f^{eye}}$  ;  $f^{eye} = +10.0 \text{ cm}$

107. قد تختلف الإجابات.

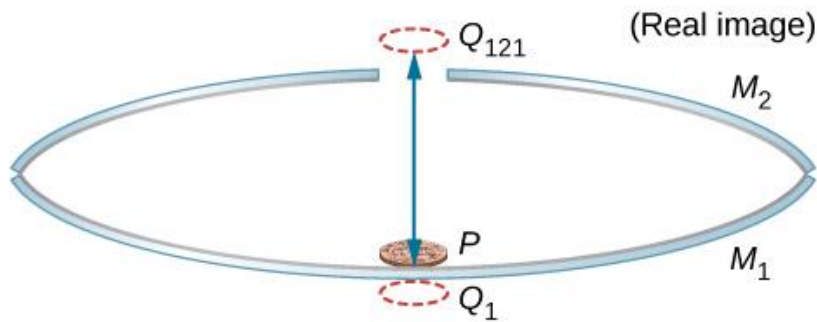
109.  $m = \frac{3}{5}$  ، 12 cm على يسار المرآة ،

111. 27 cm أمام المرآة ،  $h_i = 1.76 \text{ cm}$  ;  $m = 0.6$  ، التوجيه عمودياً

113. يعرض الشكل التالي ثلاثة أحيلة متتالية تبدأ بالخيال  $Q_1$  في المرآة  $M_1$ .  $Q_1$  هو الخيال في  $M_1$ ، الذي يكون خياله في المرآة

$M_2$  هو  $Q_{12}$  ، الذي يكون خياله في المرآة  $M_1$  هو الخيال الحقيقي  $Q_{121}$  .

$Q_{12}$

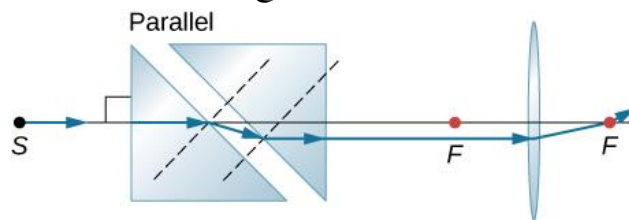


115. 5.4 cm عن المحور

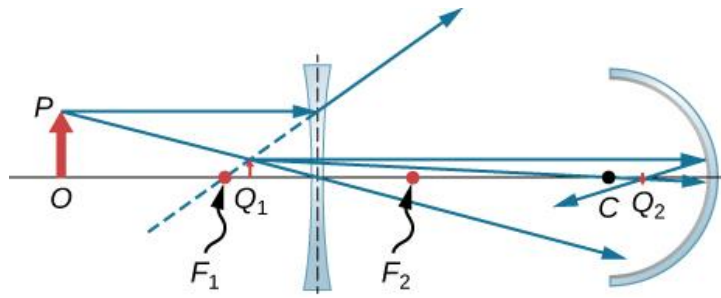
117. افترض أن رأس المرآة المقعرة هو أصل جملة الإحداثيات. الخيال 1 سيكون عند مسافة  $-10/3 \text{ cm}$  ( $-3.3 \text{ cm}$ )، الخيال الثاني

سيكون عند المسافة  $-40/11 \text{ cm}$  ( $-3.6 \text{ cm}$ ). وهم أجسام للأحيلة اللاحقة، التي هي عند المسافة  $-310/83 \text{ cm}$  ( $-3.7 \text{ cm}$ ) ، -

جميع الأحيلة المتبقية تكون تقريباً على مسافة  $-3.7 \text{ cm}$ . 119.  $9340/2501 \text{ cm}$  ( $-3.7 \text{ cm}$ ) ،  $-140,720/37,681 \text{ cm}$  ( $-3.7 \text{ cm}$ ) .



.121

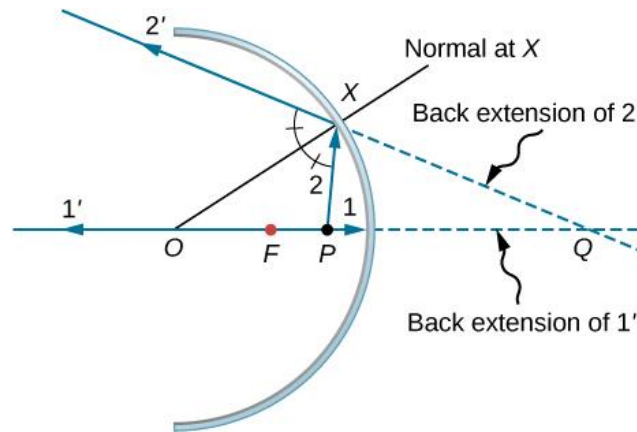


-5D .123

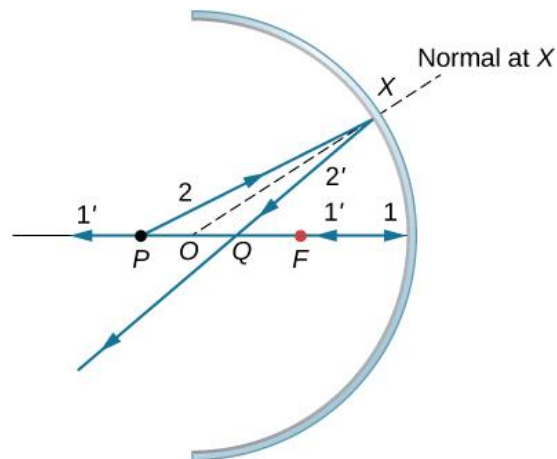
11 .125

### أجوبة المسائل الإضافية:

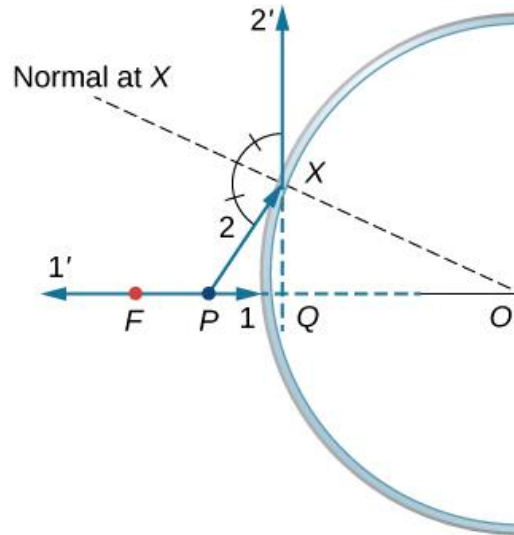
.a .127



.b

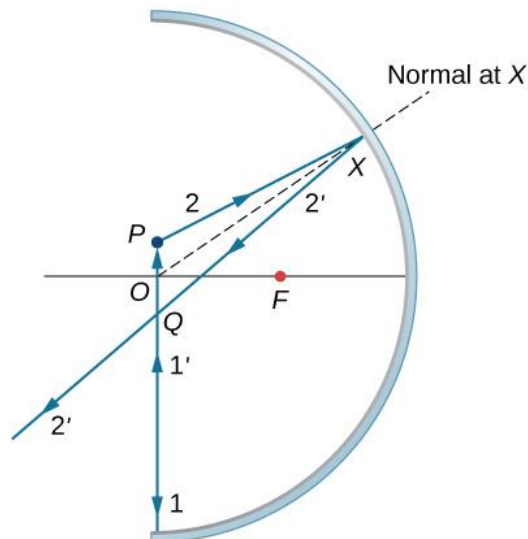
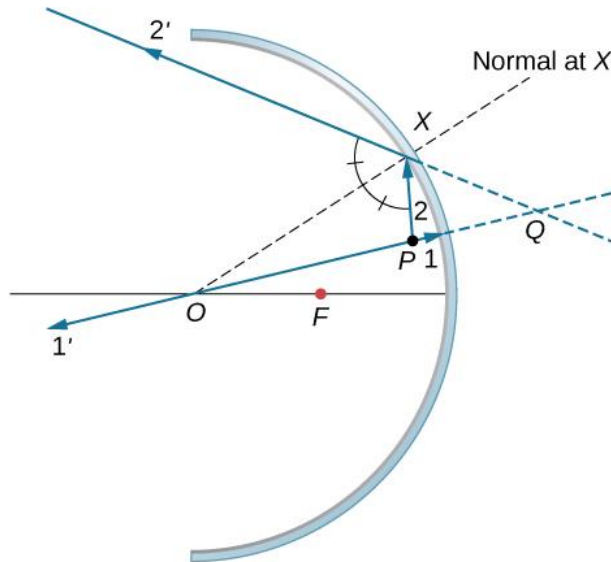


.c



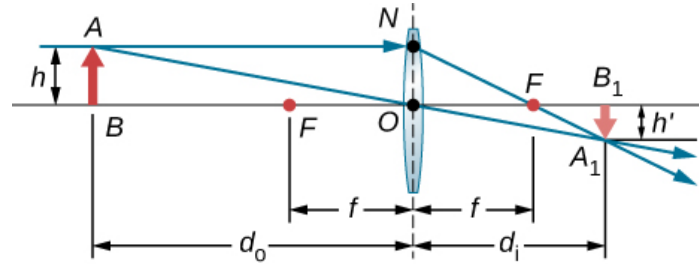
d. مشاهدة للصورة السابقة لكن بالنقطة P خارج البعد الحرجي

e. أعد الطلبات من (a)–(d) لأجل جسم نقطي خارج المحور، من أجل جسم نقطي يوضع خارج المحور أمام المرآة المقعرة المقابلة للأجزاء (أ) و (ب)، تُترك حالة المرآة المحدبة كسمايين.



129.  $d_i = -\frac{10}{3} \text{ cm}$  ;  $h_i = 2 \text{ cm}$  عمودياً ،

131. لا يتأثر



133. المثلثان BAO و B1A1O1 هما مثلثان متشابهان، وبالتالي  $\frac{A_1B_1}{AB} = \frac{d_i}{d_o}$ . المثلثان NOF و B1A1F هما مثلثان متشابهان،

وبالتالي  $\frac{NO}{f} = \frac{A_1B_1}{d_i-f}$ . مع ملاحظة أن  $NO = AB$ ، هذا يعطي  $\frac{AB}{f} = \frac{A_1B_1}{d_i-f}$ ، أو بشكل آخر  $\frac{AB}{A_1B_1} = \frac{f}{d_i-f}$ . عكس هذا

يعطي  $\frac{A_1B_1}{AB} = \frac{d_i-f}{f}$ . بالمساواة بين المعادلتين المعبرتين عن النسبة  $\frac{A_1B_1}{AB}$  هذا يعطي  $\frac{d_i}{d_o} = \frac{d_i-f}{f}$ . بالتقسيم على  $d_i$  نحصل على

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} \text{ أو بشكل آخر } \frac{1}{d_o} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d_i}$$

135. 70 cm

137. مرآة مستوية لديها نقطة محرفية لا نهائية، بحيث  $d_i = -d_o$ ، ستكون المسافة الظاهرية الإجمالية للرجل في هذه المرآة هي المسافة

الفعلية، بالإضافة إلى مسافة الخيال الظاهر، أو  $d_o + (-d_i) = 2d_o$ . فإذا كان يجب أن تكون هذه المسافة أقل من 20 cm، فعليه

أن يقف عند 10cm.

139. هنا نريد أن  $d_o = 25 \text{ cm} - 2.20 \text{ cm} = 0.228 \text{ m}$ . إذا كانت  $x =$  نقطة قريبة) ،  $d_i = -(x - 0.0220 \text{ m})$ .

وبالتالي  $P = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{0.228 \text{ m}} + \frac{1}{x-0.0220 \text{ m}}$ ، وباستخدام  $P = 0.75 \text{ D}$ ، هذا يؤدي إلى أن:  $x = 0.253 \text{ m}$ ، وبالتالي النقطة

القريبة 25.3 cm.

141. بافتراض وجود عدسة على بعد 2.00cm من عين الطفل، يجب أن تكون مسافة الصورة  $d_i = -(500\text{cm} - 2.00\text{cm}) = -498 \text{ cm}$

من أجل جسيم عند مسافة لا نهائية، تكون القوة المطلوبة  $P = \frac{1}{d_i} = -0.200 \text{ D}$ ، لذلك،  $-4.00 \text{ D}$ ، فإن العدسة ستقوم

بتصحيح قصر النظر.

143. 87  $\mu \text{ m}$

145. باستخدام  $M_{net} = \frac{d_i^{obj}(f_{eye}+25\text{cm})}{f_{obj}f_{eye}}$ ، تكون مسافة الخيال للجسم  $d_i^{obj} = -\frac{M_{net}f_{obj}f_{eye}}{f_{eye}+25\text{cm}}$ . باستخدام  $f_{obj} =$

$3.0\text{cm}$  ،  $f_{eye} = 10 \text{ cm}$  ،  $M = -10$ ، نحصل على أن  $d_i^{obj} = 8.6 \text{ cm}$ ، نريد أن يكون هذا الخيال في النقطة المحرفية للعين

بحيث تشكل العدسة خيالاً عند اللانهاية للعرض المريح، وبالتالي ينبغي أن تكون المسافة  $d$  بين العدسات:

$$d = f_{eye} + d_i^{obj} = 10 \text{ cm} + 8.6 \text{ cm} = 19 \text{ cm}$$

147. a البعد المحرفي للعدسة التصحيحية  $f_c = -80 \text{ cm}$

b -1.25 D

149.  $2 \times 10^{16} \text{ km}$

151. 105 m

## الفصل الثالث

### أجوبة أسئلة تحقق من فهمك

1.3.  $3.63^\circ$  و  $7.27^\circ$  ، على التوالي

2.3. a. 853 nm ، 1097 nm ، b. 731 nm ، 975 nm

3.3. a. صغير جداً ، b. يصل إلى  $8 \times 10^{-5}$

### أجوبة الأسئلة النظرية

1. خطأ، مصدران للضوء مستقلان لا يتمتعان بالطور نفسه.
3. لأن مصباحي الصوديوم ليسا منبعين ضوئيين متماسكين. كما أن الليزرين اللذين يعملان بشكل مستقل هما أيضاً غير متماسكين لذا لا ينتج أي نمط من التداخل.
5. تنتج المصادر أحادية اللون أهداباً عند الزوايا وفقاً للمعادلة:  $d \sin \theta = m\lambda$ . مع الضوء الأبيض فإن طول موجي منه سوف ينتج هدباً عند زاوية خاصة. تمتزج بين أطراف الأهداب المجاورة مما يعطي طيف قوس قزح.
7. يؤدي اختلاف أطوال المسار إلى مراحل مختلفة في الوجهة مما يؤدي إلى تداخل بناءً أو هداماً وفقاً لذلك. يمكن أن يؤدي الانعكاس إلى تغيير الطور 180 درجة، مما يؤثر أيضاً على كيفية تداخل الأمواج. يغير الانكسار في وسط آخر الطول الموجي داخل ذلك الوسط، بحيث يمكن أن تنشأ موجة في هذا الوسط مع طور مختلف مقارنةً مع موجة أخرى قطعت المسافة نفسها في وسط مختلف.
9. تحدث تغيرات بالطور عند الانعكاس أعلى الغطاء الزجاجي وإلى الشريحة الزجاجية فقط.
11. يعني سطح لحم الخنزير المبلل وجود طبقة رقيقة (فيلم) من السوائل، مما يؤدي إلى تداخل عند هذا الفيلم الرقيق. نظراً لأن ثخانة الفيلم تختلف باختلاف قطعة لحم الخنزير المضاء بالضوء الأبيض، تنتج الأطوال الموجية المختلفة هدباً مضيئاً في مواقع مختلفة، مما ينتج عنه ألوان قوس قزح.
13. لا تلي الأطوال الموجية الأخرى  $t = \frac{\lambda/n}{4}$  من أجل القيمة نفسها من  $t$ ، حتى الانعكاسات سوف تؤدي إلى تداخل هدام تماماً. بالنسبة لزاوية الورود  $\theta$ ، سيتم زيادة طول المسار داخل الطلاء بعامل  $1/\cos \theta$ ، بحيث تصبح الحالة الجديدة لتداخل هدام  $\frac{t}{\cos \theta} = \frac{\lambda/n}{4}$
15. ضع في أحد الأذرع حجرة شفافة ليتم ملؤها بالغاز، راجع المثال 6.3 .

### أجوبة المسائل:

17.  $0.997^\circ$

19.  $0.290 \mu\text{m}$

21.  $5.77 \times 10^{-7} \text{ m} = 577 \text{ nm}$

23. 62.5 ، حيث  $m$  يجب أن تكون عدداً صحيحاً، الرتبة الأعلى هي  $m = 62$

25.  $1.44 \mu\text{m}$

27. a.  $20.3^\circ$  ، b.  $4.98^\circ$  ، c. 5.76 ، تكون الرتبة الأعلى  $m = 5$

29. a. 2.37 cm ، b. 1.78 cm

31. 560 nm



1.2 mm .33

4.6 × 10<sup>-3</sup> m .b ، 0.53°،0.40° .a .35

1:9 .37

532 nm (green) (أخضر) .39

8.39 × 10<sup>-8</sup> m = 83.9 nm .41

620 nm (orange) (برتقالي) .43

380 nm .45

47. a. بافتراض أن n للطائرة أكبر من 1.20، فهناك تغيران في الطور 0.833cm .b. إنها ثخينة جداً، والطائرة ستكون ثقيلة جداً

c. من غير المعقول التفكير في أن طبقة المادة قد تكون بأي ثخانة عند استخدامها على طائرة حقيقية.

4.55 × 10<sup>-4</sup> m .49

D = 2.53 × 10<sup>-6</sup> m .51

### أجوبة المسائل الإضافية:

0.29° and 0.86° .53

2.84 cm .b 4.26 cm .a .55

6 .57

0.20 m .59

0.0839 mm .61

3.9 cm .b 9.8, 10.4, 11.7, and 15.7 cm .a .63

0.0575° .65

700 nm .67

189 nm .69

71. a. green (504 nm) (أخضر) .b. magenta (white minus green) (قرمزي)

1.29 .73

52.7 μm and 53.0 μm .75

160 nm .77

413 nm and 689 nm .79

73.9 μm .81

47 .83

8.5 μm .85

0.013°C .87

### أجوبة مسائل للتحدي:

89. تتبادل الأهداب المضيئة والمظلمة الأماكن

91. يجب أن يكون طول المسار أقل من ربع أقصر طول موجة الضوء المرئي في الزيت، تبلغ ثخانة النفط نصف طول المسار، لذا يجب أن يكون أقل من ثمن أقصر طول موجة الضوء المرئي في النفط. إذا كنا نأخذ 380 nm لتكون أقصر طول موجة ضوء مرئي في الهواء، فستبلغ الثخانة 33.9 nm.

$$4.42 \times 10^{-5} \text{ m} \quad 93$$

95. لأجل تغير طور واحد: 950 nm ( الأشعة تحت الحمراء )، ولأجل تغير ثلاثة أطوار: 317nm (الأشعة فوق البنفسجية)، لذلك سوف يظهر غشاء النفط أسود ، لأن الضوء المنعكس ليس في الجزء المرئي من الطيف

## الفصل الرابع

### أجوبة أسئلة تحقق من فهمك

$$1.4. \quad 17.8^\circ, 37.7^\circ, 66.4^\circ, \text{ لا}$$

$$2.4. \quad 74.3^\circ, 0.0083I_0$$

3.4. من  $d \sin \theta = m\lambda$ ، تحدث القمة العظمى للتداخل عند  $2.87^\circ$  لأجل  $m=20$ . من المعادلة 4.1 هذه أيضاً زاوية القمة الصغرى للحيود الثانية (ملاحظة: كلتا المعادلتين تستخدم المؤشر  $m$  ولكنها تشير إلى ظواهر مختلفة).

$$4.4. \quad 3.332 \times 10^{-6} \text{ m} \text{ أو } 300 \text{ خط لكل ميليمتر}$$

$$5.4. \quad 8.4 \times 10^{-4} \text{ rad} \text{ ، } 3000 \text{ مرة أوسع من تلسكوب هابل.}$$

$$6.4. \quad 38.4^\circ \text{ و } 68.8^\circ \text{ ، خلال } 90^\circ \rightarrow \theta = 0^\circ \text{ ، الرتبة } 1, 2, 3 \text{ هي كل ما هو موجود.}$$

### أجوبة الأسئلة النظرية

1. يصبح نمط الحيود أوسع

3. تستخدم أجهزة الاتصالات اللاسلكية أمواج راديوية، التي أطوالها الموجية ماثلة لأبعاد التلة، وبالتالي فهي قادرة على الحيود حول التلة. تنتقل الأطوال الموجية المرئية من المصباح كأشعة عند هذه الأبعاد.

5. يصبح نمط الحيود ثنائي الأبعاد، مع هدب رئيس، التي هي الآن بُقع، تسير في اتجاهات متعامدة، وبقع باهتة في الوسط.

7. الوسيط  $\beta = \phi / 2$  هو زاوية القوس الموضحة في مخطط الطور في الشكل 7.4. فرق الطور بين أمواج هيغنز الأولى والأخيرة عبر شق واحد هو  $2\beta$ ، ويرتبط بانحناء القوس الذي يشكل المرحلة الناتجة التي تحدد شدة الضوء.

9. ينتج الأزرق عن طول الموجة الأقصر للضوء الأزرق، زاوية أصغر للحد من الحيود.

11. لا، هذه المسافات هي أصغر بثلاث رتب مقارنةً مع طول موجة الضوء المرئي، لذلك الضوء المرئي مسير سيئ لفحص الذرات.

13. إن الأطوال الموجية للأشعة فوق البنفسجية أكبر بكثير من أبعاد الشبكية في البلورات، بحيث لا يكون هناك حيود. تدل معادلة براغ في هذه الحالة على أن قيمة  $\sin \theta$  أكبر من الواحد، وبالتالي ليس لهذه المعادلة حل.

15. سيظهر الخيال في موقع مختلف قليلاً عند عرضه باستخدام طول موجي أقصر بنسبة 10%، ولكن عند نصف الطول الموجي بالضبط سيعيد تداخل المرتبة الأعلى إنشاء الخيال الأصلي بلون مختلف.

### أجوبة المسائل:

$$17. \quad a. \quad 33.4^\circ \text{ ، } b. \quad \text{ لا}$$

$$19. \quad a. \quad 1.35 \times 10^{-6} \text{ m} \quad b. \quad 69.9^\circ$$

21. 750 nm
23. 4.7 mm ، 2.4 mm
25. 1000λ .c ، 50.0λ .b ، 1.00λ .a
27. 1.92 m
29. 45.1°
31.  $I/I_0 = 2.2 \times 10^{-5}$
33. 0.00088I<sub>0</sub> ، 0.0062I<sub>0</sub> ، 0.0067I<sub>0</sub> ، 0.11I<sub>0</sub> ، 0.63I<sub>0</sub>
35. 0.200
37. 3
39. 9
41. 5.97°
43.  $8.99 \times 10^3$
45. 707 nm
47. a. 11.8° ، 12.5° ، 14.1° ، 19.2° .b. 24.2° ، 25.7° ، 29.1° ، 41.0° .c. إن تقليل عدد الخطوط لكل سنتيمتر بمعامل x يعني أن زاوية القمة العظمى لرتبة x هي ذاتها الزاوية الأصلية للقمة الدنيا للرتبة الأولى.
49. a. باستخدام  $\lambda = 700 \text{ nm}$  ،  $\theta = 5.0^\circ$  .b. باستخدام  $\lambda = 460 \text{ nm}$  ،  $\theta = 3.3^\circ$  .
51. a. 26,300 lines/cm ، b. نعم ، c. لا
53.  $1.13 \times 10^{-2} \text{ m}$
55. 107 m
57. a.  $7.72 \times 10^{-4} \text{ rad}$  ، b. 23.2 m ، c. 590 km
59. a.  $2.24 \times 10^{-4} \text{ rad}$  ، b. 5.81 km ، c. 0.179 mm ، d. يمكن حل التفاصيل 0.2mm على امتداد الذراع.
61. 2.9 μm
63. 6.0 cm
65. 7.71 km
67. 1.0 m
69. 1.2 cm or closer
71. لا
73. 0.120 nm
75. 4.51°
77. 13.2°

### أجوبة المسائل الإضافية:

79. a. 2.2 mm ، b. 0.172° ، الحد الثاني الأصفر والحد الثالث البنفسجي المتزامن.

81 . 2.2 km

83 . 1.3 cm

85 . a . 0.28 mm ، b . 0.28 m ، c . 280 m ، d . 113 km

87 . 33 m

89 . a . عمودي ، b .  $\pm 20^\circ$  ،  $\pm 44^\circ$  ، c . 0 ،  $\pm 31^\circ$  ،  $\pm 60^\circ$  ، d . 89 cm ، e . 71 cm

91 . 0.98 cm

93 .  $I/I_0 = 0.041$

95 . 340 nm

97 . a . 0.082 rad و 0.087 rad ، b . 480 nm و 660 nm

99 . رتبتان

101 . نعم و N/A

103 . 600 nm

105 . a .  $3.4 \times 10^{-5}^\circ$  ، b .  $51^\circ$

107 . 0.63 m

109 . 1

111 .  $0.17 \text{ mW/cm}^2$  لأجل  $m = 1$  فقط، لا حد أقصى.

113 .  $28.7^\circ$

115 . a . 42.3 nm ، b . هذا الطول الموجي ليس في الطيف المرئي . c . عدد الشقوق في شبكة الحيود كبير جداً يمكن إجراء الحفر في دوائر مدججة بدقة 50nm ، لذلك تكون الفواصل بين الشقوق نحو 400nm وهي في حدود ما يمكننا القيام به اليوم. تباعد الشقوق صغير جداً، بحيث لا ينتج حيود للضوء.

117 . a . 549 km ، b . هو تلسكوب كبير بشكل غير معقول . c . من غير المعقول أن نفترض حد الحيود للتلسكوبات البصرية ما لم يكن في الفضاء بسبب تأثيرات الغلاف الجوي.

### أجوبة مسائل للتحدي:

119 . a .  $I = 0.00500 I_0$  ،  $I = 0.00335 I_0$  ، b .  $I = 0.00500 I_0$  ،  $I = 0.00335 I_0$

121 . 12,800

123 .  $1.58 \times 10^{-6} \text{ m}$

## الفصل الخامس

### أجوبة أسئلة تحقق من فهمك

1.5 . تنطبق النسبية الخاصة فقط على الأجسام التي تتحرك بسرعة ثابتة، بينما تنطبق النسبية العامة على الأجسام التي تخضع للتسارع.

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(0.650c)^2}{c^2}}} = 1.32 \quad 2.5$$

$$\Delta t = \frac{\Delta \tau}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{2.10 \times 10^{-8} \text{ s}}{\sqrt{1 - \frac{(1.90 \times 10^8 \text{ m/s})^2}{(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})^2}}} = 2.71 \times 10^{-8} \text{ s} \quad \text{a. 3.5}$$

b. فقط السرعة النسبية لاثنين من المركبات الفضائية، لأنه لا توجد حركة مطلقة عبر الفضاء. تنبعث الإشارة من موقع ثابت في الإطار المرجعي A، وبالتالي فإن الفاصل الزمني المناسب لبثه هو  $\tau = 1.00 \text{ s}$ . تكون مدة الإشارة المقاسة في إطار المرجع B هي:

$$\Delta t = \frac{\Delta \tau}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1.00 \text{ s}}{\sqrt{1 - \frac{(4.00 \times 10^7 \text{ m/s})^2}{(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})^2}}} = 1.01 \text{ s}$$

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = (2.50 \text{ Km}) \sqrt{1 - \frac{(0.750c)^2}{c^2}} = 1.65 \text{ Km} \quad \text{4.5}$$

5.5. ابدأ بتعريف الزيادة الزمنية المناسبة:

$$d\tau = \sqrt{-(ds)^2/c^2} = \sqrt{dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2)/c^2}$$

حيث يتم قياس  $(dx, dy, dz, cdt)$  في إطار القصور الذاتي لمراقب لا يرى بالضرورة أن الجسيمات في وضع سكون. وهذا بالتالي يصبح:

$$\begin{aligned} d\tau &= \sqrt{-(ds)^2/c^2} = \sqrt{dt^2 - [(dx)^2 + (dy)^2 + (dz)^2]/c^2} \\ &= dt \sqrt{1 - \left[ \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2 \right] / c^2} \\ &= dt \sqrt{1 - v^2/c^2} \\ dt &= \gamma d\tau \end{aligned}$$

6.5. على الرغم من أن عمليات الإزاحة العمودية على الحركة النسبية هي نفسها في كلا الإطارين المرجعيين، فإن الفاصل الزمني بين الأحداث يختلف. وتؤدي الاختلافات في  $dt$  و  $dt'$  إلى سرعات مختلفة تراها من الإطارين.

7.5. يمكننا استبدال البيانات مباشرة في المعادلة لتردد دوبلر النسبي:

$$f_{obs} = f_s \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}} = (1.50 \text{ GHz}) \sqrt{\frac{1 - \frac{0.350c}{c}}{1 + \frac{0.350c}{c}}} = 1.04 \text{ GHz}$$

8.5. باستبدال البيانات في المعادلة المحددة:

$$\begin{aligned} P = \gamma mu &= \frac{mu}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} = \frac{(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}) (0.985) (3.00 \times 10^8 \text{ m/s})}{\sqrt{1 - \frac{(0.985c)^2}{c^2}}} \\ &= 1.56 \times 10^{-21} \text{ kg} \cdot \text{m/s} \end{aligned}$$

$$K_{rel} = (\gamma - 1)mc^2 = \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} - 1 \right) mc^2 \quad \text{9.5}$$

$$\left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(0.992c)^2}{c^2}}} - 1 \right) (9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}) (3.00 \times 10^8 \text{ m/s}) = 5.67 \times 10^{-13} \text{ J}$$

### أجوبة الأسئلة النظرية

1. الافتراض الثاني، الذي ينطوي على سرعة الضوء، تضمنت الفيزياء الكلاسيكية بالفعل فكرة أن قوانين الميكانيك، على الأقل، كانت هي نفسها في جميع الإطارات بالقصور الذاتي، ولكن كانت سرعة النبضة الخفيفة مختلفة في إطارات مختلفة تتحرك فيما يتعلق ببعضها البعض.

3. نعم، شريطة أن تطير الطائرة بسرعة ثابتة بالنسبة إلى الأرض. في هذه الحالة لا يوجد أي تغيير في السرعة بالنسبة إلى الجسم الذي لا تؤثر عليه قوة داخل هذه الطائرة، ولا تغيير في سرعة الجسم بالنسبة للطائرة، ولا تغيير في السرعة النسبية للجسم بالنسبة للأرض، وكل من الطائرة والأرض هي إطارات بالقصور الذاتي لوصف حركة الجسم.
5. يرى المراقب الذي يتحرك في العملية الفاصل الزمني للوقت المناسب، وهو أقصر ما يراه أي مراقب.
7. طول الجسم هو الأكبر للمراقب الذي يتحرك مع الجسم، وبالتالي يقيس طوله الصحيح.
9. a. لا، ليس في الإطار المرجعي الخاص برائد الفضاء. b. إنه يرى أن ساعات الأرض تكون في إطارها الساكن تتحرك بواسطته، وبالتالي يرى أنها تباطأت. c. لا، ليس في الإطار المرجعي الخاص برائد الفضاء. d. نعم، يقيس المسافة بين النجمين تكون أقصر. e. يتفق المراقبان على سرعتهم النسبية.
11. لا يوجد تغيير ملموس في الطول الموجي أو التردد في هذه الحالة. يعتمد تأثير دوبلر النسبي فقط على السرعة النسبية للمصدر والمراقب، وليس على أي سرعة بالنسبة إلى الوسط لأموال الضوء.
13. يظهر أن النجوم تزداد بعداً عن الأرض، وأن الكون يتوسع. ويفعل ذلك بوتيرة متسارعة، وبسرعات أكبر للنجوم البعيدة.
15. نعم، يمكن أن يحدث هذا إذا كانت القوة الخارجية متوازنة مع القوى الخارجية الأخرى المطبقة، بحيث تكون محصلة القوة الخارجية صفراً.
17. لأنه يفقد الطاقة الحرارية، والتي هي الطاقة الحركية للحركة العشوائية للجزيئات المكونة لها، وتتناقص كتلتها بكمية صغيرة للغاية كما هو موضح في معادلة كتلة - طاقة.
19. نعم، من حيث المبدأ سيكون هناك تأثير مماثل على الكتلة لأي انخفاض في الطاقة. ولكن سيكون التغيير صغيراً للغاية بالنسبة لتغيرات الطاقة في تفاعل كيميائي بحيث يكون غير قابل للكشف عملياً.
21. ليس وفق النسبية الخاصة. لا شيء مع الكتلة يمكن أن يصل إلى سرعة الضوء.

### أجوبة المسائل:

23. a. 1.0328 ، b. 1.15
25.  $5.96 \times 10^{-8} \text{ s}$
27. 0.800c
29. 0.140c
31. 48.6 m
33. باستخدام القيم الموجودة في المثال 3.5: a. 1.39 km ، b. 0.433 km ، c. 0.433 km
35. a. 10.0c ، b. السرعة الناتجة للطائرة أكبر من c ، وهذا مستحيل، c. من غير المعقول أن نفترض أن الطائرة سوف يتحرك نحو الأرض بسرعة 1.20c .
37. تقترب الزاوية  $\alpha$  من 45 درجة، وتدور المحاور  $t'$  و  $x'$  نحو حافة مخروط الضوء
39. 15 m/s east
41. 32 m/s
43. a. تقترب الكرة الثانية من السرعة  $-v$  وتصبح ساكنة بينما تستمر الكرة الأخرى بالسرعة  $-v$  ، b. هذا يحافظ على العزم.
45. a.  $\dot{t}_1 = 0$  ;  $\dot{x}_1 = 0$  ;  
b.  $\dot{t}_2 = \frac{\tau}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$  ;  $\dot{x}_2 = \frac{-v\tau}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$  ;  
a.  $\dot{t}_2 = \tau$  ;  $\dot{x}_2 = 0$  ;

0.615c .47

0.696c .49

.51 (لا يتأثر)

$4.09 \times 10^{-19} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$  .53

.a .55  $3.000000015 \times 10^{13} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$  ، .b .1.000000005

$2.988 \times 10^8 \text{ m/s}$  .57

.59 0.512 MeV وفقاً لعدد الأرقام المهمة (الدقة) المذكورة. القيمة الدقيقة هي أقرب إلى 0.511 MeV

.61  $2.3 \times 10^{-30} \text{ kg}$  ، إلى رقمين لأن الفرق في طاقة الكتلة الساكنة موجود بدقة رقمين فقط.

.a .63  $1.11 \times 10^{27} \text{ kg}$  ، .b  $5.56 \times 10^{-5}$

.65 .a  $7.1 \times 10^{-3} \text{ kg}$  ، .b  $7.1 \times 10^{-3} = 7.1 \times 10^{-3}$  ، .c  $\frac{\Delta m}{m}$  هو الأكبر للهدروجين.

.67 .a 208 ، .b 0.999988c ، يستخدم ستة أرقام (للدقة) لتوضيح الاختلاف من c .

.a .69  $6.92 \times 10^5 \text{ J}$  .b 1.54

.71 .a 0.914c ، .b طاقة الكتلة السكونية للإلكترون هي 0.511 MeV ، لذا فإن الطاقة الحركية هي نحو 150% من الطاقة

السكونية، ويجب أن يتحرك الإلكترون بالقرب من سرعة الضوء.

### أجوبة المسائل الإضافية:

.73 .a 0.866c ، .b 0.995c

.75 .a 4.303y إلى أربعة أرقام لإظهار أي تأثير، .b 0.1434y ، .c  $1 / \sqrt{(1 - v^2 / c^2)} = 29.88$

.77 .a 4.00 ، .b  $v = 0.867c$

.79 .a يرسل A نبضة راديوية عند كل نبضة قلب إلى B، والذي يعرف سرعتها النسبية ويستخدم صيغة التمدد الزمني لحساب

الفاصل الزمني المناسب بين نبضات القلب من الإشارة المرصودة

.b  $(66 \text{ beats/min}) \sqrt{1 - v^2 / c^2} = 57.1 \text{ beats/min}$

.81 .a الفوتون الأول: (0, 0, 0) عندما  $t = t'$

الفوتون الثاني :

$$\dot{t} = \frac{-vx / c^2}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} = \frac{-(c/2)(1.00 \text{ m})/c^2}{\sqrt{0.75}} = -\frac{0.577 \text{ m}}{c} = 1.93 \times 10^{-9} \text{ s}$$

$$\dot{x} = \frac{x}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} = \frac{1.00 \text{ m}}{\sqrt{0.75}} = 1.15 \text{ m}$$

.b في وقت واحد في A، وليس في وقت واحد في B

$$\dot{t} = \frac{t - vx / c^2}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} = \frac{(4.5 \times 10^{-4} \text{ s}) - (0.6c)(\frac{150 \times 10^3 \text{ m}}{c^2})}{\sqrt{1 - (0.6)^2}} = 1.88 \times 10^{-4} \text{ s}$$

$$\dot{x} = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} = \frac{150 \times 10^3 \text{ m} - (0.60)(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})(4.5 \times 10^{-4} \text{ s})}{\sqrt{1 - (0.6)^2}} = -1.01 \times 10^5 \text{ m} = -101 \text{ Km} \quad .83$$

$$y = \dot{y} = 15 \text{ Km}$$

$$z = \dot{z} = 1 \text{ Km}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t + v \Delta x / c^2}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} \quad .85$$

$$0 = \frac{\Delta t + v(500 \text{ m}) / c^2}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

بما أن  $v \ll c$  ، يمكننا إهمال الحد  $v^2/c^2$  وبالتالي نجد :

$$\Delta t = -\frac{(50 \text{ m/s})(500 \text{ m})}{(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})^2} = -2.78 \times 10^{-13} \text{ s}$$

إن انهمار التزامن النيوتوني ضئيل للغاية، ولكنه ليس صفراً، بسرعات قافلة واقعية تبلغ 50 m/s .

$$\Delta t = \frac{\Delta t - v\Delta x / c^2}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} \quad .87$$

$$0 = \frac{(0.30 \text{ s}) - \frac{(v)(2.0 \times 10^9 \text{ m})}{(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})^2}}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

$$v = \frac{(0.30 \text{ s})}{(2.0 \times 10^9 \text{ m})} (3.00 \times 10^8 \text{ m/s})^2 = 1.35 \times 10^7 \text{ m/s}$$

.89 لاحظ أنه يتم الإبلاغ عن جميع الإجابات عن هذه المسألة إلى خمسة أرقام مهمة (دقة) للتمييز بين النتائج.

$$1.2058 \times 10^{11} \text{ y} \quad .c \quad , \quad 1.2064 \times 10^{11} \text{ y} \quad .b \quad , \quad 0.99947c \quad .a$$

$$-0.909c \quad .b \quad , \quad -0.400c \quad .a \quad .91$$

.93 a. 1.65 Km/s ، b. نعم، إذا كانت سرعة الضوء صغيرة، فإن السرعات التي يمكن أن نحققها في الحياة اليومية تكون أكبر من

1% من سرعة الضوء، ويمكننا ملاحظة التأثيرات النسبية في كثير من الأحيان .

$$775 \text{ MHz} \quad .95$$

.97 a.  $1.12 \times 10^{-8} \text{ m/s}$  ، b. تخبرنا السرعة الصغيرة أن كتلة البروتين أصغر بكثير من كتلة صغيرة من المادة العيانية المكروسكوبية

(الجزئية).

.a .99

$$\begin{aligned} F &= \frac{dP}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{mu}{\sqrt{1-u^2/c^2}} \right) \\ &= \frac{du}{dt} \left( \frac{m}{\sqrt{1-u^2/c^2}} \right) - \frac{1}{2} \frac{mu^2}{(1-u^2/c^2)^{3/2}} 2 \frac{du}{dt} \\ &= \frac{m}{(1-u^2/c^2)^{3/2}} \frac{du}{dt} \end{aligned}$$

.b

$$\begin{aligned} F &= \frac{m}{(1-u^2/c^2)^{3/2}} \frac{du}{dt} \\ &= \frac{1 \text{ kg}}{\left(1 - \left(\frac{1}{2}\right)^2\right)^{3/2}} (1 \text{ m/s}^2) = 1.53 \text{ N} \end{aligned}$$

$$90.0 \text{ MeV} \quad .101$$

$$\gamma^2 - 1 \quad .a \quad , \quad \gamma^2 - 1 \quad .b \quad \text{نعم} \quad .103$$

$$1.07 \times 10^3 \quad .105$$

.108 a.  $6.56 \times 10^{-8} \text{ kg}$  .b  $m = (200 \text{ L})(1 \text{ m}^3 / 1000 \text{ L})(750 \text{ kg} / \text{m}^3) = 150 \text{ kg}$  ، لذا  $\frac{\Delta m}{m} = 4.37 \times 10^{-10}$

.109 a. 0.314c ، b. 0.99995c (يستعمل خمسة أرقام لتبيان الاختلاف عن c)

.111 a. 1.00 kg ، b. قد تكون هذه الكتلة كبيرة وقابلة للقياس، ولكن ربما لا يمكن ملاحظتها بمجرد النظر إليها لأنها 0.01%

من الكتلة الكلية.

$$.113 \quad .a \quad , \quad 6.06 \times 10^{11} \text{ kg/s} \quad .b \quad , \quad 4.67 \times 10^{10} \text{ y} \quad .c \quad , \quad 4.27 \times 10^9 \text{ kg} \quad .d \quad , \quad 0.32\% \quad .$$



## الفصل السادس

### أجوبة أسئلة تحقق من فهمك

- 1.6 . موقد بنسن (Bunsen's burner)
- 2.6 . ينخفض الطول الموجي للإشعاع الأقصى مع زيادة درجة الحرارة.
- 3.6 .  $T_a/T_\beta = 1\sqrt{3} = 0.58$  ، وبالتالي النجم  $\beta$  أكثر سخونة
- 4.6 .  $3.3 \times 10^{-19} \text{ J}$
- 5.6 . لا ، لأن  $\Delta E / E \approx 10^{-21}$
- 6.6 .  $1040 \text{ nm}$  ،  $-0.91 \text{ V}$
- 7.6 .  $h = 6.40 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 4.0 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$  ،  $-3.5 \%$
- 8.6 .  $71.0 \text{ pm} + 0.5\lambda_c = 72.215 \text{ pm}$  ،  $(\Delta\lambda)_{\min} = 0 \text{ m at } 0^\circ \text{ angle}$
- 9.6 .  $121.5 \text{ nm}$  و  $91.1 \text{ nm}$  ، لا ، هذه العصابت الطيفية في الأشعة فوق البنفسجية.
- 10.6 .  $L_2 = 2 \hbar K_2 = 3.4 \text{ eV}$  ،  $v_2 = 1.1 \times 10^6 \text{ m/s} \approx 0.0036c$
- 11.6 .  $29 \text{ pm}$
- 12.6 .  $\lambda = 2\pi na_0 = 2(3.324 \text{ \AA}) = 6.648 \text{ \AA}$
- 13.6 .  $K = 261.56 \text{ keV}$  ،  $\lambda = 2.14 \text{ pm}$
- 14.6 .  $0.052^\circ$
- 15.6 . يضاعفها

### أجوبة الأسئلة النظرية:

1. أصفر
3. ينتقل من الأحمر إلى البنفسجي من خلال قوس قزح من الألوان.
5. لن تختلف.
7. لا ترى العين البشرية الأشعة تحت الحمراء.
9. لا
11. من الميل.
13. قد تختلف الإجابات.
15. ميزات الجسيمات.
17. قد تختلف الإجابات.
19. لا ، نعم
21. لا
23. الزاوية اليمنى.
25. لا
27. هم في الحالة الأساس (الأرضية).

29. قد تختلف الإجابات .
31. الزيادة
33. لأجل أكبر n
35. نعم ، والزيادة 13.6 eV ستصبح طاقة حركية للإلكترون الحر .
37. لا
39. الأشعة السينية، مقدرة فصل أفضل.
41. بروتون
43. من خلال إهمال أطوال أمواج دي بروي الصغيرة.
45. لتجنب الاصطدام مع جزيئات الهواء.
47. قد تتفاوت الأجوبة.
49. قد تتفاوت الأجوبة.
51. نعم
53. نعم

### أجوبة المسائل:

55. a. 0.81 eV ، b.  $2.1 \times 10^{23}$  ، c. 2 min 20 sec
57. a. 7245 K ، b.  $3.62 \mu\text{m}$  .
59. حوالي 3K
61.  $4.835 \times 10^{18}$  Hz ، 0.620 A
63. لا ، 263 nm
65. 3.68 eV
67. 4.09 eV
69. 5.54 eV
71. a. 1.89 eV ، b. 459 THz ، c. 1.21 V
73. 264 nm ، فوق البنفسجي UV.
75.  $1.95 \times 10^6$  m/s
77.  $1.66 \times 10^{-32}$  kg · m/s
79. 56.21 eV
81. 124 keV ،  $6.63 \times 10^{-23}$  kg · m/s
83. 15 MeV ، 82.9 fm
85. (لا يتأثر)
87.  $\Delta\lambda_{30} / \Delta\lambda_{45} = 45.74\%$
89. 121.5 nm

- .91 .a 0.661 eV ، .b -10.2 eV ، .c 1.511 eV  
.93 3038 THz  
.95 97.33 nm  
.97 .a  $h/\pi$  ، .b 3.4 eV ، .c -6.8 eV ، .d -3.4 eV  
.99  $n = 4$   
.101 365 nm ، فوق البنفسجي UV  
.103  $\lambda$   
.105 7  
.107 145.5 pm  
.109 9 fm ، 20 fm  
.111 .a 2.103 eV ، .b 0.846 nm  
.113 80.9 pm  
.115  $2.21 \times 10^{-19}$  m/s  
.117  $9.929 \times 10^{32}$   
.119  $\gamma = 1060$  ، 0.00124 fm  
.121 24.11 V  
.123 .a  $P = 2I/c = 8.67 \times 10^{-6}$  N/m<sup>2</sup> ، .b  $a = PA/m = 8.67 \times 10^{-4}$  m/s<sup>2</sup> ، .c 74.91 m/s  
.125  $x = 4.965$

### أجوبة مسائل للتحدي:

- .127  $7.124 \times 10^{16}$  W/m<sup>3</sup>  
.129 1.034 eV  
.131  $5.93 \times 10^{18}$   
.133 387.8 nm  
.135 .a  $4.02 \times 10^{15}$  ، .b 0.533 mW  
.137 .a  $4.02 \times 10^{15}$  ، .b 0.533 mW ، .c 0.644 mA ، .d 2.57 ns  
.139 .a 0.132 pm ، .b 9.39 MeV ، .c 0.047 MeV  
.141 .a 2 kJ ، .b  $1.33 \times 10^{-5}$  kg · m/s ، .c  $1.33 \times 10^{-5}$  N ، .d نعم  
.143 .a 0.003 nm ، .b 105.56°  
.145  $n = 3$   
.147 .a  $a_0/2$  ، .b  $-54.4$  eV/n<sup>2</sup> ، .c  $a_0/3$  ،  $-122.4$  eV/n<sup>2</sup>  
.149 .a 36 ، .b 18.2 nm ، .c فوق البنفسجي UV  
.151 5.23 neV ، 396 nm

7.3 keV .153

1.5μV ، 728 m/ .155

$$\lambda = hc / \sqrt{K(2E_0 + K)} = 3.705 \times 10^{-12} \text{ m} , \quad K = 100 \text{ KeV} .157$$

$$\Delta\lambda_c^{(electron)} / \Delta\lambda_c^{(proton)} = m_p / m_e = 1836 .159$$

.161 لا يتأثر

5.1 × 10<sup>17</sup> Hz .163

## الفصل السابع

### أجوبة أسئلة تحقق من فهمك

$$(3 + 4i)(3 - 4i) = 9 - 16i^2 = 25 .1.7$$

$$A = \sqrt{2/L} .2.7$$

$$(1/2 - 1/\pi)/2 = 9\% .3.7$$

$$1.1 \times 10^{-5} \text{ nm} , \quad 4.1 \times 10^{-8} \text{ eV} .4.7$$

$$0.5m\omega^2 x^2 \psi(x)^* \psi(x) .5.7$$

.6.7 لا يوجد. التابع الأول به عدم استمرارية، وللتابع الثاني قيمة مزدوجة، والتابع الثالث متباعد، بحيث هو غير قابل للتطبيع.

$$25\% .b , \quad 9.1\% .a .7.7$$

$$0.277 \text{ eV} .b , \quad 295 \text{ N/m} .a .8.7$$

$$\langle x \rangle = 0 .9.7$$

$$\frac{L_{proton}}{L_{electron}} = \sqrt{\frac{m_e}{m_p}} = 2.3\% .10.7$$

### أجوبة الأسئلة النظرية:

$$.1 \quad 1/\sqrt{L} , \quad L = \text{الطول} , \quad 1/L .$$

.3 لا يتوافق تابع الموجة مباشرة مع أي كمية مقاسة. إنها أداة للتنبؤ بقيم الكميات المادية.

.5 متوسط قيمة الكمية الفيزيائية لعدد كبير من الجزئيات ذات التابع الموجي نفسه.

.7 نعم ، إذا كان موقعه غير معروف تماماً. نعم، إذا كان عزمه غير معروف تماماً

.9 لا. وفقاً لمبدأ عدم اليقين، إذا كان عدم اليقين بشأن موضع الجسيم صغيراً، فإن عدم اليقين بشأن عزمه صغير.

.11 لا، هذا يعني أن التنبؤات حول الجسيمات (المعبر عنها من حيث الاحتمالات) مستقلة عن الزمن.

.13 لا، لأن احتمال وجود جسيم موجود في فترة ضيقة (لا متناهية في الصغر) عند التوقف غير معروف

.15 لا، بالنسبة إلى بئر كموني لا نهائي (جسيم ضمن صندوق) ، يزداد التباعد بين سويات الطاقة مع الرقم الكمي n. تقابل أصغر

طاقة تم قياسها الانتقال من n = 2 إلى n = 1 ، أي ثلاثة أضعاف طاقة الحالة الأساس (الأرضية). تقابل الطاقة الأكبر المقاسة

الانتقال من n = ∞ إلى n = 1 ، وهو اللاهائية. (ملاحظة حتى الجزئيات ذات الطاقات الكبيرة للغاية تظل مرتبطة ببئر كموني لا

نهائي، ولا يمكنها "الهروب")

.17 لا. هذه الطاقة تقابل n = 0.25 ، لكن يجب أن تكون n عدداً صحيحاً.

19. لأن القيمة الأصغر المسموح بها للرقم الكم  $n$  للهزاز التوافقي البسيط هي 0. لا، ولأن ميكانيك الكم يتفق مع الميكانيك الكلاسيكي فقط في الحد  $n$ .

21. نعم، ضمن القيود التي يفرضها مبدأ عدم اليقين. إذا اهتزاز الجسيمات موضعي، يتم توزيع العزم، وبالتالي طاقة الاهتزاز.

23. مضاعفة عرض الحاجز.

25. لا، إن القوة على الجسيم عند حدران بئر كموني لا نهائي هي لا نهائية.

### أجوبة المسائل:

$$|\psi(x)|^2 \sin^2 \omega t \quad .27$$

29. (a) و (e) ، يمكن تطبيعها

$$\langle K \rangle = \alpha^2 \hbar^2 / 2m \quad .e \quad \langle p \rangle = 0 \quad .d \quad \langle x \rangle = 0 \quad .c \quad \text{probability} = 29.3\% \quad .b \quad \sqrt{2a/\pi} \quad .a \quad .31$$

$$\Delta v / \sqrt{K_b T / m_a} \quad 5.94 \times 10^{-11} \quad .c \quad \Delta v \geq 6.31 \times 10^{-8} \text{ m} \quad .b \quad \Delta p \geq 2.11 \times 10^{-34} \text{ N} \cdot \text{s} \quad .a \quad .33$$

$$\Delta \tau \geq 1.6 \times 10^{-25} \text{ s} \quad .35$$

$$\Delta \omega / \omega_0 = 3.135 \times 10^{-9} \quad .b \quad \Delta f \geq 1.59 \text{ MHz} \quad .a \quad .37$$

$$K^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \quad .39 \quad \text{بتنفيذ محاصيل الاشتقاقات}$$

41. إن تنفيذ الاشتقاقات (على النحو الوارد أعلاه) لتابع الجيب يعطي تمام الجيب على الجانب الأيمن من المعادلة، وبالتالي فإن المساواة تفشل. يحدث الشيء نفسه لحل تمام جيب.

$$E = \hbar^2 k^2 / 2m \quad .43$$

45. الجسيم له عزم معروف (محدد)، وبالتالي فإن مربع العزم الزاوي معروف (محدد)

$$64\% \quad , \quad 9.4 \text{ eV} \quad .47$$

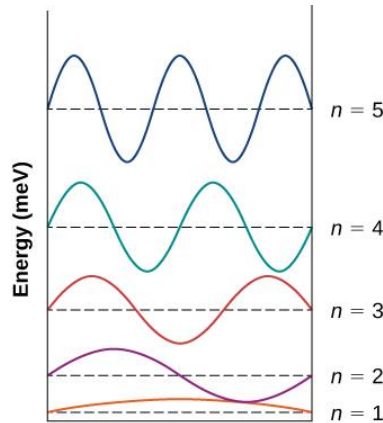
$$0.38 \text{ nm} \quad .49$$

$$1.82 \text{ MeV} \quad .51$$

$$24.7 \text{ nm} \quad .53$$

$$6.03 \text{ \AA} \quad .55$$

$$.a \quad .57$$



$$\lambda_{4 \rightarrow 3} = 29.4 \text{ nm} \quad , \quad \lambda_{3 \rightarrow 1} = 25.8 \text{ nm} \quad , \quad \lambda_{5 \rightarrow 3} = 12.9 \text{ nm} \quad .b$$

59. لا يتأثر

61.  $6.662 \times 10^{14} \text{ Hz}$

63.  $n \approx 2.037 \times 10^{30}$

65.  $\langle K \rangle = \langle E \rangle - \langle U \rangle = \hbar\omega/4$  ،  $\langle x \rangle = 0.5m\omega^2 \langle x^2 \rangle = \hbar\omega/4$

67. لا يتأثر

69. يلي التابع العقدي من الشكل  $Ae^{i\phi}$  معادلة شرودنغر المستقلة عن الزمن . المؤثرات الخاصة بالطاقة الحركية والكلية هي خطية، لذلك فإن أي مجموعة خطية من مثل هذه التوابع الموجية هي أيضاً حل صالح لمعادلة شرودنغر. وبالتالي، نستنتج أن: تتوافق المعادلة 7.113 مع المعادلة 7.106 ، وتتوافق المعادلة 7.114 مع المعادلة 7.108.

71. a. 4.21% .b. 0.84% .c. 0.06%

73. a. 0.13% .b. قريب من 0%

75. 0.38 nm

### أجوبة المسائل الإضافية:

77. لا يتأثر

79. a. 4.0% .b. 1.4% .c. 4.0% .d. 1.4%

81. a.  $t = mL^2/h = 2.15 \times 10^{26} \text{ years}$  .b.  $E_1 = 1.46 \times 10^{-66} \text{ J}, K = 0.4 \text{ J}$

83. لا يتأثر

85. 1.2 N/m

87. 0

### أجوبة مسائل للتحدي:

89.  $11.5 \mu\text{m}$  ،  $19.2 \mu\text{m}$

91. 3.92%

93. لا يتأثر

### الفصل الثامن

#### أجوبة أسئلة تحقق من فهمك

1.8. لا. رقم الكم  $l, l-1, \dots, 0, \dots, -l+1, -l$  ، وبالتالي المقدار  $L_z$  دائماً أصغر من المقدار  $L$  لأن  $\sqrt{l(l+1)}$

2.8.  $s = 3/2 <$

3.8. أربعة أضعاف التردد

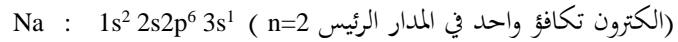
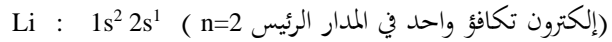
#### أجوبة الأسئلة النظرية:

1. الطاقة الكلية  $\rightarrow n$  (رقم الكم الرئيس)

المقدار الكلي المطلق للزخم الزاوي المداري  $\rightarrow l$  (رقم الكم الزاوي المداري)

المركبة  $z$  للزخم الزاوي المداري  $\rightarrow m$  (رقم الكم لمسقط الزاوي المداري)

3. يوصف الإلكترون في نموذج بور على أنه جسيم يدور حول البروتون بمدار معروف، بينما في نموذج شرودنجر فهو موجة. والمعلومات حول موضع الإلكترون تقتصر على عبارة الاحتمال. الطاقة الكلية للإلكترون في الحالة الأساس (الأرضية) (وجميع الحالات المثارة) هي نفسها في كلا النموذجين، ومع ذلك يختلف العزم الزاوي المداري للحالة الأساس (الأرضية) بالنسبة لهذين النموذجين. في نموذج بور  $L=1$  (الحالة الأساس)، وفي نموذج شرودنجر  $L=0$  (الحالة الأساس).
5.  $a, c, d$ ، يتم تغير الطاقة الكلية (تأثير زيمان). يؤدي العمل المنجز على ذرة الهدروجين إلى تدوير الذرة، وبالتالي تتأثر المركبة  $z$  من العزم الزاوي والزاوية القطبية. ومع ذلك لا يتأثر العزم الزاوي.
7. حتى في الحالة الأساس (الأرضية) ( $l=0$ )، تتمتع ذرة الهدروجين بخواص مغناطيسية بسبب سبين الإلكترون. يتناسب العزم المغناطيسي للإلكترون مع سبينه.
9. من أجل الإلكترونات  $m_s = \pm 1/2$  and  $s = 1/2$ . كما سنرى ليس جميع الجسيمات لها عدد السبين نفسه. على سبيل المثال للفوتون سبين 1 أي ( $s=1$ )، وبوزون هيغز له سبين 0 أي ( $s=0$ ).
11. للإلكترون عزم مغناطيسي مرتبط بالسبين. يحدث الترابط المداري - الدوراني عندما يتفاعل هذا مع الحقل المغناطيسي الناتج عن العزم الزاوي المداري للإلكترون.
13. العناصر التي تنتمي إلى العمود نفسه في الجدول الدوري للعناصر لها التعبئة نفسها لمداراتها الخارجية، وبالتالي عدد إلكترونات التكافؤ نفسه، فمثلاً:



كل من  $\text{Na}$  ,  $\text{Li}$  ينتميان إلى العمود الأول.

15. يقال إن الأطياف الذرية والجزيئية "منفصلة"، لأنه لا يتم ملاحظة سوى خطوط طيفية معينة. في المقابل، فإن أطياف مصدر الضوء الأبيض (الذي يتألف من العديد من تواترات الفوتون) مستمرة نظراً لملاحظة "قوس قزح" المستمر.
17. يكون ضوء الأشعة فوق البنفسجية من فوتونات ذات تواتر مرتفع نسبياً (الطول الموجي قصير). حتى طاقة الفوتون الممتص وانتقال الطاقة ( $\Delta E$ ) في الذرة كبير نسبياً. بالمقارنة يتكون الضوء المرئي من فوتونات منخفضة التواتر نسبياً.
19. بالنسبة للأنظمة المكروسكوبية (الجهرية)، تكون أعداد الكم كبيرة للغاية، وبالتالي فإن فرق الطاقة ( $\Delta E$ ) بين سويات الطاقة المجاورة (المدارات) صغير جداً. الطاقة المنبعثة خلال الانتقال بين سويات الطاقة المتقاربة هي طاقة صغيرة للغاية بحيث لا يمكن اكتشافها.
21. يعتمد ضوء الليزر على عملية الإصدار المحثوث. في هذه العملية يجب أن يتم تحضير الإلكترونات في حالة مثارة (علوية) شبه مستقرة، بحيث يؤدي مرور فوتون عبر هذا النظام إلى إزالة الإثارة، وبالتالي إصدار ضوء إضافي.
23. يستخدم مشغل Blu-Ray ضوء الليزر الأزرق لاستكشاف المطبات وحفر القرص، بينما يستخدم مشغل الأقراص المضغوطة ضوء الليزر الأحمر. يعد الضوء الأزرق ذا الطول الموجي نسبياً ضرورياً لفحص الحفر الصغيرة والمطبات على قرص Blu-ray؛ وتوافق الحفر الصغيرة والمطبات مع كثافة تخزين أعلى.

### أجوبة المسائل:

$$(r, \theta, \phi) = (\sqrt{6}, 66^\circ, 27^\circ) \quad 25$$

$$0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \quad 27 \text{ , ممكنة}$$

29.  $\pm 3$  ،  $\pm 2$  ،  $\pm 1$  ،  $0$  ، ممكنة

$$F = -k \frac{Qq}{r^2} \quad .31$$

$$(1, 1, 1) \quad .33$$

35. بالنسبة إلى عدد العزم الزاوي المداري،  $l$  ، القيم المسموح بها :  $l - 1, l, l + 1, \dots, 0, \dots, -l + 1, -l$  ، باستثناء  $m=0$  ، العدد الإجمالي هو  $2l$  ، فقط لأن عدد الحالات على الجانبين  $m=0$  هو  $l$  فقط . بما فيها  $m=0$  ، إجمال عدد حالات العزم الزاوي المداري لرقم العزم الزاوي المداري،  $l$  ، هو :  $2l + 1$  . في وقت لاحق، عندما نفكر في دوران الإلكترون، ستيم العثور على العدد الإجمالي لحالات العزم الزاوي لمضاعفة هذه القيمة لأن كل حالات العزم الزاوي المداري يرتبط بحالتين من دوران الإلكترون: دوران علوي، دوران سفلي.

$$\int_{a_0}^{\infty} P(r) dr \approx 0.68 \quad .37$$

$$.39 \quad \text{لأجل } n=2 \quad \text{و } l=0 \quad (1 \text{ حالة}) \quad \text{و } l=1 \quad (3 \text{ حالات}) \quad \text{الإجمالي يكون } 4$$

$$.41 \quad \text{الحالة } 3P \quad \text{تتوافق مع } n=3 \quad ، \quad l=2 \quad ، \quad \text{وبالتالي } \mu = \mu_B \sqrt{6}$$

43. نسبة كتلتهم هي  $1/207$  ، وبالتالي فإن نسبة عزومهم المغناطيسية هي  $207$  ، والعزم المغناطيسي للإلكترون أكبر  $200$  من الميون.

$$.45 \quad \text{a. الحالة } 3d \quad \text{تتوافق مع } n=3 \quad ، \quad l=2 \quad . \quad \text{وبالتالي } I = 4.43 \times 10^{-7} \text{ A}$$

b. يحدث عزم الفتل الأقصى عندما يكون العزم المغناطيسي ومتجهات الفتل المغناطيسي الخارجية بزوايا قائمة

$$\tau = 5.70 \times 10^{-26} \text{ N.m} \quad \text{وبالتالي } |\vec{\tau}| = \mu B \quad (\sin \theta = 1)$$

47. إلكترون موجود في المدار  $3p$  أي في الحالة  $n=3$  ،  $l=1$  ، يحدث الحد الأدنى لقيمة عزم الفتل عندما يكون العزم المغناطيسي ومتجهات الفتل المغناطيسي الخارجي متوازية (مضادة للتوازي). يحدث ذلك عندما يكون  $m = \pm 1$  . يتم إعطاء قيمة عزم الفتل بواسطة

$$|\vec{\tau}| = \mu B \sin \theta \quad \text{حيث } \mu = (1.31 \times 10^{-24} \text{ J/T}) \quad ، \quad \text{لأجل } m = \pm 1 \quad ، \quad \text{وبالتالي نحصل على:}$$

$$|\vec{\tau}| = 2.32 \times 10^{21} \text{ N.m}$$

49. يقوم عمل متناهٍ في الصغر  $dW$  من خلال عزم الفتل المغناطيسي  $\tau$  بتدوير العزم المغناطيسي بزوايا مقدارها  $-d\theta$ :

$$dW = \tau(-d\theta)$$

$$\text{حيث: } \tau = |-\vec{\mu} \cdot \vec{B}|$$

يتم تفسير العمل المنجر على أنه انخفاض في الطاقة الكامنة  $U$  وبالتالي:

$$dW = -dU$$

يتم تحديد التغير الكلي في الطاقة من خلال جمع التغيرات غير المحدودة في الطاقة الكامنة:

$$U = -\mu B \cos \theta$$

$$\vec{U} = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$$

51. سبين علوي (بالنسبة إلى المحور  $z$  الموجب)

$$\theta = 55^\circ$$

دوران سفلي (بالنسبة إلى المحور  $z$  الإيجابي)

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{s_z}{s} \right) = \cos^{-1} \left( \frac{-\frac{1}{2}}{\frac{\sqrt{3}}{2}} \right) = \cos^{-1} \left( \frac{-1}{\sqrt{3}} \right) = 125^\circ$$

53. الرقم الكمي لمسقط الدوران هو  $m_s = \pm 1/2$  ، لذلك تكون المركبة  $z$  للعزم المغناطيسي هي:

$$\mu_z = \pm \mu_B$$



الطاقة الكامنة المرتبطة بالتفاعل بين الإلكترون والحقل المغناطيسي الخارجي هي:

$$U = \pm \mu_B B$$

الفرق الطاقي بين هذه الحالات هو  $\Delta E = 2\mu_B B$  ، وبالتالي فإن طول الموجة للضوء الناتج هو:

$$\lambda = 8.38 \times 10^{-5} \text{ m} \approx 84 \mu\text{m}$$

55. يزداد بعامل 2

57. a. 32

b.

$\ell$		$2(\ell + 1)$		
0	s	$2(0 + 1)$	=	2
1	p	$2(2 + 1)$	=	6
2	d	$2(4 + 1)$	=	10
3	f	$2(6 + 1)$	=	14
				32

59. a. و e. يكون مسموحاً ، أما الأخرى فلا يكون مسموحاً.

b.  $1 = 3$  غير مسموح لأجل  $n = 1$  ،  $1 \leq (n - 1)$

c. لا يمكن أن تملك ثلاثة إلكترونات في المدار s لأن  $3 > 2(2l + 1) = 2$

d. لا يمكن أن تملك سبعة إلكترونات في المدار p لأن (بحد أقصى 6)  $2(2l + 1) = 2(2 + 1) = 6$

61. [Ar] 4s2 3d6

63. a. القيمة العظمى للعدد  $\ell$  هي  $1 = 2$  لدينا تسعة إلكترونات فيها.

b. 3d9

65. [He] 2s2 2p2

67. من أجل He<sup>+</sup>، لدينا إلكترون واحد "يدور" حول نواة فيها بروتونان ونيوترونان ( $Z = 2$ ). تشير طاقة التأين إلى الطاقة اللازمة

لإزالة هذا الإلكترون من هذه الذرة. الطاقة اللازمة لإزالة الإلكترون من الحالة الأرضية لأيون He<sup>+</sup> إلى اللانهاية هي قيمة سالبة

لطاقة الحالة الأرضية (الأساسية) وهي:  $E = -54.4 \text{ eV}$

وبالتالي طاقة تأين لإلكترون هي:  $+54.4 \text{ eV}$

وبالمثل فإن الطاقة اللازمة لإزالة إلكترون في الحالة الأولى من أيون Li<sup>2+</sup> إلى اللانهاية هي قيمة سالبة لطاقة الحالة الأولى المثارة، والتي

هي:  $E = -30.6 \text{ eV}$ .

وبالتالي طاقة تأين لإلكترون هي  $30.6 \text{ eV}$ .

69. طول موجة الليزر يعطى من خلال

حيث  $E\gamma$  هي الطاقة للفوتون و  $\Delta E$  هو مقدار الفرق الطاقي. وبحل المعادلة الأخيرة نحصل:

$\Delta E = -2.795 \text{ eV}$ ، تشير إشارة السالب إلى أن الإلكترون فقد الطاقة خلال مرحلة الانتقال.

$$\Delta E_{L \rightarrow K} \approx (Z - 1)^2 (10.2 \text{ eV}) = 3.68 \times 10^3 \text{ eV}. \quad 71$$

73. وفقاً لمبدأ حفظ الطاقة، يتم تحويل الطاقة الكامنة للإلكترون بالكامل إلى طاقة حركية. الطاقة الحركية الأولية للإلكترون هي

صفر (يبدأ الإلكترون من السكون). لذا، فإن الطاقة الحركية للإلكترون قبل أن يصطدم بالهدف هي:  $K = e\Delta V$

إذا تتم تحويل كامل هذه الطاقة إلى إشعاع كبح، يكون تواتر الإشعاع المنبعث هو الحد الأقصى، لذلك:

$$f_{max} = \frac{e\Delta V}{h}$$

حيث: عندما يكون التواتر هو الحد الأقصى ويكون طول الموجة الصادرة هو الحد الأدنى، لذلك:  $\lambda_{min} = 0.1293 \text{ nm}$

75. الميون أثقل بنحو 200 مرة من الإلكترون، ولكن لا يعتمد الحد الأدنى لطول الموجة على الكتلة وبالتالي فإن النتيجة لم تتغير.

$$4.13 \times 10^{-11} \text{ m} \quad .77$$

$$72.5 \text{ keV} \quad .79$$

81. الأرقام الذرية لكل من Cu و Au هي 29 و 79، على التوالي، تواتر فوتون الأشعة السينية للذهب أكبر من النحاس:

$$\left(\frac{f_{Au}}{f_{Cu}}\right)^2 = \left(\frac{79-1}{29-1}\right)^2 \approx 8$$

83. a. إذا كانت كثافة اللحم هي ذاتها كثافة الماء، فأنا استخدمنا  $1.34 \times 10^{23}$  فوتون . b.  $2.52 \text{ MW}$

### أجوبة الأسئلة النظرية:

$$\theta = \cos^{-1} \left( \sqrt{\frac{n-1}{n}} \right) \quad \text{وبالتالي } m = l = n - 1 \text{ و } l = n - 1$$

87. a. وفقاً للمعادلة 8.1. حيث  $r = 0$  يكون  $U(r) = -\infty$ ، وحيث  $r = +\infty$  يكون  $U(r) = 0$ . تشير النتيجة السابقة إلى أن

الإلكترون يمكن أن يكون له طاقة كامنة سالبة غير محدودة. يتجنب نموذج الكم لذرة الهيدروجين هذا الاحتمال، لأن كثافة الاحتمال عند  $r = 0$  تكون صفراً.

89. الحل الرسمي باستخدام المجاميع معقد إلى حد ما. ومع ذلك فإن الإجابة التي تم الحصول عليها بسهولة عن طريق دراسة النمط الرياضي بين العدد الكمي الرئيس وإجمالي عدد حالات العزم الزاوي المداري.

لأجل  $n = 1$ ، فإن العدد الإجمالي لحالات العزم الزاوي المداري هو 1. ومن أجل  $n = 2$ ، يكون العدد الإجمالي 4. وعند  $n = 3$ ، يكون العدد الإجمالي 9، وهكذا. يشير النمط إلى أن إجمالي عدد حالات العزم الزاوي المداري لأجل مدار معين  $n$  هو:  $n^2$ .

(في وقت لاحق، عندما ننظر في سبين الإلكترون، فإن العدد الإجمالي لحالات العزم الزاوي سوف يكون  $2n^2$ ، لأن كل حالة عزم زاوي مداري ترتبط مع حالتين من سبين الإلكترون (سبين علوي وسبين سفلي)

$$50 \quad .91$$

93. الحد الأقصى لعدد حالات إلكترون

95. a. c. e. تكون مسموحة والباقي لا تكون مسموحة. b.  $l > n$  غير مسموح d.  $7 > 2(2l + 1)$

$$f = 1.8 \times 10^9 \text{ Hz} \quad .97$$

99. الأرقام الذرية لكل من Cu و Ag هي 29 و 47، على التوالي وتواتر فوتون الأشعة السينية للذهب أكبر من

النحاس بعامل:  $\left(\frac{f_{Ag}}{f_{Cu}}\right)^2 = \left(\frac{47-1}{29-1}\right)^2 \approx 2.7$ ، فإن طول الموجة للأشعة السينية للفضة Ag أقصر من النحاس بنحو ثلاثة أضعاف.

101. a. 3.24. b.  $n_i$  ليس عدداً صحيحاً c. يجب أن لا يكون طول الموجة عدداً صحيحاً، لأن  $n_i > 2$ ، من الممكن افتراض

أن الخط كان من سلسلة بالمر، ولكن الطول الموجي للضوء لم ينتج قيمة صحيحة لعدد  $n_i$ . إذا كان الطول الموجي صحيحاً، فإن الافتراض بأن الغاز هو الهيدروجين ليس صحيحاً، فقد يكون الصوديوم بدلاً من ذلك.

## الفصل التاسع

### أجوبة أسئلة تحقق من فهمك

- 1.9 وهو يقابل قوة تنافر بين الإلكترونات الأساسية في الأيونات.
- 2.9 عزم العطالة.
- 3.9 أكثر صعوبة.
- 4.9 أنها تخفض.
- 5.9 إن تيار الانحياز الامامي أكبر بكثير. للحصول على تقدير تقريبي جيد، تسمح الصمامات الثنائية بتدفق التيار في اتجاه واحد فقط.
- 6.9 درجة حرارة منخفضة وحقل مغناطيسي منخفض.

### أجوبة الأسئلة النظرية:

1. تشكل الرابطة الأيونية عن طريق جذب أيون إيجابي وسلبي. تشكل الرابطة التساهمية من خلال مشاركة إلكترون واحد أو أكثر بين الذرات. تشكل رابطة فان دير فالس عن طريق جذب جزيئين مستقطبين كهربائياً.
3. 1. تتم إزالة الإلكترون من ذرة واحدة. الذرة الناتجة هي أيون إيجابي. 2. يتم امتصاص الإلكترون من ذرة أخرى. 3. يتم جذب الأيونات الموجبة والسالبة معاً حتى يتم الوصول إلى فصل التوازن.
5. تتوافق الرابطة بتابع مكاني متناظر خلال تبادل الإلكترونات. تكون في هذه الحالة كثافة الإلكترونات أكبر بين الذرات. يجب أن يكون التابع الموجي الكلي غير متناظر (لأن الإلكترونات هي فرميونات)، وبالتالي فإن السبين يجب أن يكون غير متناظر. في هذه الحالة يكون سبين الإلكترونات متعاكساً.
7. الطاقة الدورانية والطاقة الاهتزازية والطاقة الذرية.
9. كل أيون موجود في حقل أيونات متعددة للشحنة المقابلة الأخرى.
11. 6 ، 6
13. 0.399 nm
15. يزيد من خلال العامل  $\sqrt[3]{8^2} = 4$
17. بالنسبة للطاقات الأكبر، يزداد عد الحالات التي يمكن الوصول إليها.
19. (1) حل معادلة شرودنغر للحالات والطاقات المسموح بها. (2) تحديد السويات الطاقية لحالة ثابت شبكة كبير جداً ومن ثم تحديد سويات الطاقة عند تقليل هذا الثابت.
21. بالنسبة إلى عدد  $N$  من الذرات التي تفصل بينها مسافات بعيدة، يوجد عدد  $n$  من تابع موجي مختلف وتكون جميعها بنفس الطاقة (مثل حالة الإلكترون في بئر مزدوج للهيدروجين  $H_2$ ). عندما يتم ضغط الذرات معاً، يتم تقسيم طاقات توابع الموجة  $N$  المختلفة هذه. وفقاً لمبدأ عدم الاستبعاد، يجب أن يكون لكل إلكترون مجموعة فريدة من الأعداد الكمومية، لذا يجب أن تحتوي ذرات  $N$  التي تجمع  $N$  معاً على حالات  $N$  أقل.
23. بالنسبة لأنصاف النواقل، توجد فجوة طاقة كبيرة نسبياً بين أدنى عصابة مملوءة بالكامل والعصابة التالية المتاحة غير المملوءة. وعادة ما يعبر عدد من الإلكترونات الفجوة وبالتالي يكون النقل الكهربائي صغيراً.

خصائص أنصاف النواقل هي الحساسية لدرجة الحرارة: مع زيادة درجة الحرارة، تعزز الإثارة الحرارية على تعزيز حاملات الشحنة. من نطاق التكافؤ عبر الفجوة وفي نطاق الناقلية.

25. a. يحتوي الجرمانيوم أربعة إلكترونات تكافؤ: إذا كان الجرمانيوم مشوباً بالزرنيخ (خمسة إلكترونات تكافؤ)، يتم استخدام أربعة في الربط ويترك إلكترون واحد للنقل. وتنتج مادة من النوع n.

b. إذا كان الجرمانيوم مشوباً بالغاليوم (ثلاثة إلكترونات تكافؤ)، يتم استخدام الإلكترونات الثلاثة في الربط، تاركاً ثقباً واحداً للنقل، وينتج عن ذلك مادة من النوع P.

27. تأثير هول هو إنتاج فرق كمون بسبب حركة الناقل عبر حقل مغناطيسي خارجي.

يمكن استخدام هذا التأثير لتحديد سرعة الانسياب لحاملات الشحنة (الإلكترونات أو الثقوب). إذا تم قياس الكثافة الحالية يمكن لهذا التأثير أيضاً تحديد عدد حاملات الشحنة لكل واحدة حجم.

29. وهو ينتج سويات طاقة جديدة غير مملوءة فوق عصابة التكافؤ الممتلئة مباشرة. تقبل هذه السويات الإلكترونات من عصابة التكافؤ.

31. يقلل الحقل الكهربائي الناتج عن الأيونات غير المكشوفة في الانتشار الإضافي وفي حالة التوازن، يتم إلغاء تيار الانتشار والانسياب، بحيث يكون صافي التيار صفراً، ولذلك فإن مقاومة منطقة النضوب كبيرة.

33. يتم تطبيق القطب الموجب على الجانب n، الذي يكشف عن المزيد من الأيونات بالقرب من الوصلة (يوسع طبقة النضوب)، ويزيد من فرق كمون النقل، وبالتالي يقلل من انتشار الثقوب عبر الوصلة.

35. يحرك الصوت الغشاء للداخل والخارج، والذي يغير المدخلات أو تيار القاعدة لدائرة الترانزستور، ويضخم الترانزستور هذه الإشارة (نصف الناقل p-n-p). يقوم الخرج أو تيار المجمع بتشغيل مكبر الصوت.

37. يشرح نظري BSC الناقلية الفائقة من حيث التفاعلات بين أزواج الإلكترونات (أزواج كوبر). يتفاعل إلكترون واحد في الزوج مع الشبكة والتي تتفاعل مع الإلكترون الثاني. يربط التفاعل بين الإلكترون - الشبكة - الإلكترون والزوج الإلكتروني معاً بطريقة تتغلب على تنافرهما المتبادل.

39. مع زيادة قيمة الحقل المغناطيسي، تنخفض درجة الحرارة الحرجة.

### أجوبة المسائل:

$$U = -5.16 \text{ eV} \quad .41$$

$$U_{\text{ex}} = 0.26 \text{ eV} \quad , \quad -4.43 \text{ eV} = -4.69 \text{ eV} + U_{\text{ex}} \quad .43$$

45. القيمة المقاسة هي 0.484 nm، والقيمة الفعلية قريبة من 0.127 nm، النتائج المخبرية هي بنفس الرتبة من حيث القيمة، ولكن العامل 4 مرتفع.

$$0.110 \text{ nm} \quad .47$$

$$\Delta E = 4.4 \times 10^{-4} \text{ eV} \quad .b \quad E = 2.2 \times 10^{-4} \text{ eV} \quad .a \quad .49$$

$$0.65 \text{ nm} \quad .51$$

$$r_0 = 0.240 \text{ nm} \quad .53$$

$$2196 \text{ kcal} \quad .55$$

$$11.5 \quad .57$$

59. a. 4% . b.  $4.2 \times 10^{-4}$  % ، لأجل قيم كبيرة جداً للأرقام الكمية، يكون التباعد بين سويات الطاقة المجاورة صغيراً جداً ("في السلسلة"). وهذا يتفق مع توقع أنه بالنسبة للأعداد الكمومية الكبيرة، يعطي ميكانيك الكم والميكانيك الكلاسيكي نفس التنبؤات تقريباً.

$$10.0 \text{ eV} \quad .61$$

$$4.55 \times 10^9 \quad .63$$

$$\text{Fermi energy (طاقة فيرمي)}, EF = 7.03 \text{ eV} , \text{ درجة الحرارة } TF = 8.2 \times 10^4 \text{ K} \quad .65$$

.67. لأجل العازل، تكون فجوة الطاقة بين عصابة التكافؤ وعصابة الناقلية أكبر من أنصاف النواقل.

$$4.13 \text{ keV} \quad .69$$

$$n = 1.56 \times 10^{19} \text{ holes/m}^3 \quad .71$$

$$5 \text{ T} \quad .73$$

$$Vb = 0.458 \text{ V} \quad .75$$

$$T = 829 \text{ K} \quad .77$$

$$T = 0.707 Tc \quad .79$$

$$61 \text{ kV} \quad .81$$

### أجوبة المسائل الإضافية:

$$U_{coul} = -5.65 \text{ eV}$$

$$E_{form} = -4.71 \text{ eV} , E_{diss} = 4.71 \text{ eV} \quad .83$$

$$E_{Or} = 7.43 \times 10^{-3} \text{ eV} \quad .85$$

$$Er = 4.46 \times 10^{-2} \text{ eV} , l = 2 , Er = 1.49 \times 10^{-2} \text{ eV} , l = 1 , Er = 0 \text{ eV (no rotation , } l = 0 , E_{Or} = 7.43 \times 10^{-3} \text{ eV} \quad .87$$

$$10^{-2} \text{ eV}$$

.89. i. فهي صعبة إلى حد ما ومستقرة.

.ii. أهما تتبخر عند درجات حرارة عالية نسبياً (1000 to 2000 K).

.iii. تكون شفافة للإشعاع المرئي، لأن الفوتونات الموجودة في الجزء المرئي من الطيف ليست نشطة بما يكفي لإثارة إلكترون من حالته الأرضية إلى حالة مثارة.

.iv. إنها ناقلة كهربائية ضعيفة لأنها لا تحتوي فعلياً على إلكترونات حرة.

.v. عادةً من تكون قابلة للذوبان في الماء، لأن حزيء الماء لديه عزم ثنائي قطب كبير الذي حقله المغناطيسي قوي بما فيه الكفاية لكسر الروابط الكهروساكنة بين الأيونات.

.91. لا، لا تحتوي الذرات على إلكترونات التكافؤ التي يمكن مشاركتها في تكوين رابطة كيميائية

$$\sum_1^{N/2} n^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{N}{2}\right)^3 , \rightarrow \bar{E} = \frac{1}{3} E_F \quad .93$$

.95. سوف تتشكل عصابة من الشوائب عندما تكون كثافة الذرات المانحة عالية بما يكفي لتتراكب المدارات الإلكترونية الإضافية. رأينا في وقت سابق أن نصف القطر المداري يبلغ نحو 50 أنغستروم، لذا فإن الحد الأقصى للمسافة بين الشوائب التي تتكون من عصابة يبلغ 100 أنغستروم. وهكذا إذا استخدمنا 1 أنغستروم كالمسافة بين الذرات السليكون، نجد أن 1 من 100 ذرة على طول سلسلة خطية يجب أن تكون ذرة مانحة، وفي البلورة ثلاثية الأبعاد، يجب استبدال 1 من 106 ذرة تقريباً بذرة مانحة لكي تتكون عصابة الشوائب.

$$EF = 9.46 \text{ eV} \quad .c \quad EF = 3.24 \text{ eV} \quad .b \quad EF = 7.11 \text{ eV} \quad .a \quad 97$$

$$9.15 \approx 9 \quad 99$$

### أجوبة مسائل للتحدي:

101. في حالة ثلاثي البعد، يتم إعطاء طاقة الإلكترون بواسطة:

$$E = R^2 E_1 \quad , \text{ حيث: } R^2 = n_1^2 + n_2^2 + n_3^2$$

( $n_1, n_2, n_3$ ). يتوافق عدد الجسيمات مع عدد العقد في المادة المتفاعلة الأولى، داخل كرة نصف قطرها  $R$ . يتم إعطاء هذا

العدد بواسطة:  $N = 2 \left(\frac{1}{8}\right) \left(\frac{4}{3}\right) \pi R^3$ ، حيث يمثل العامل 2 إلى حالي السبين، تم العثور على كثافة الحالات عن طريق

$$g(E) = \frac{\pi V}{2} \left(\frac{8m_e}{h^2}\right)^{3/2} E^{1/2} \quad . \text{ يعطي التكامل } \bar{E} = \frac{3}{5} E_F$$

## الفصل العاشر

### أجوبة أسئلة تحقق من فهمك

1.10. ثمانية

2.10. أصعب

3.10. يرتبط عمر النصف عكسياً بمعدل التحلل، وبالتالي فإن عمر النصف قصير. يعتمد النشاط على كل من عدد الجزيئات

المتحللة ومعدل التحلل، لذلك يمكن أن يكون النشاط كبيراً أو صغيراً.

4.10. لا هذا ولا ذاك، يبقى كما هو.

5.10. نفس الشيء.

6.10. تحويل الكتلة إلى الطاقة.

7.10. الطاقة

### أجوبة الأسئلة النظرية:

1. تتكون نواة الذرة من واحد أو أكثر من النكليونات، يشير النكلون إلى بروتون أو نوترون. النكلد نواة مستقرة.

3. يجب أن تكون كتلة النظام المرتبط أقل من مكوناته بسبب تكافؤ الطاقة والكتلة ( $E = mc^2$ )، إذا تم تقليل طاقة النظام، يتم

تقليل الكتلة الكلية للنظام. إذا تم وضع اثنين من القرميد بجانب بعضها، فإن الجاذبية بينهما تكون جاذبية بحتة، بافتراض أن القرميد

معتدل كهربائياً. قوة الجاذبية بين القرميد صغيرة نسبياً (مقارنة بالقوة النووية القوية)، وبالتالي فإن نقص الكتلة صغير جداً بحيث لا

ممكن ملاحظته. إذا تم لصق القرميد مع الأسمنت، يكون نقص الكتلة صغيراً أيضاً لأن التفاعلات الكهربائية بين الإلكترونات

المشاركة في الترابط لا تزال صغيرة نسبياً.

5. تتفاعل النكليونات الموجودة على سطح النواة مع عدد أقل من النكليونات. هذا يقلل من طاقة الربط لكل نكلون، والذي يعتمد

على المتوسط على كل نكلون في النواة.

7. هذا ثابت.

9. تنتج أشعة غاما ( $\gamma$ ) عن طريق التفاعلات النووية، ويتم إنتاج الأشعة السينية والضوء عن طريق التفاعلات الذرية. عادةً ما

تكون أشعة غاما أقصر من الطول الموجي مقارنة بالأشعة السينية، والأشعة السينية بطول موجة أقصر من الضوء.

11. بفرض أن جملة الإحداثيات الديكارتية في المستوى  $xy$  تتوقف مع مستوي الورقة، ننحني  $\alpha$  خلال الورقة (مسار قطع مكافئ في

المستوي  $xz$ )، ويتم انحناء  $\beta$  خلال الورقة (مسار قطع مكافئ في المستوي  $xz$ )، و  $\gamma$  تكون مستقيمة.

13. نعم، القنبلة الذرية هي قنبلة انشطارية والقنبلة الانشطارية تحدث عن طريق شطر نواة الذرة.
15. القوى قصيرة المدى بين النكلونات في النواة تشبه القوى بين جزيئات الماء في قطرة الماء. وبشكل خاص، تؤدي القوى بين النكلونات على سطح النواة إلى توتر سطحي مماثل لشد قطر الماء.
17. تحتوي النوى المنتجة بعملية الاندماج على طاقة ربط أكبر لكل نواة من النواة المنصهرة. وهذا يعني أن الاندماج النووي يقلل من متوسط طاقة النكلونات في النظام. ويتم انتقال فرق الطاقة على شكل إشعاع.
19. لا تحترق جسيمات ألفا المواد مثل الجلد والملابس بسهولة. (ولنتذكر أن الإشعاع ألفا يكاد يكون قادراً على المرور عبر ورقة رقيقة) ولكن عندما ينتج داخل الجسم تصبح الخلايا المجاورة معرضة للخطر.

### أجوبة المسائل:

21. باستخدام القاعدة  $A = Z + N$

رقم الكتلة (A) Mass Number (A)	عدد النيوترون (N) Neutron Number (N)	العدد الذري (Z) Atomic Number (Z)	
58	29	29	(a)
24	13	11	(b)
210	126	84	(c)
45	25	20	(d)
206	124	82	(e)

23. a.  $\rho = \frac{3u}{4\pi r_0^3}$  ,  $r = r_0 A^{1/3}$

b.  $\rho = 2.3 \times 10^{17} \text{ Kg/m}^3$

25. الطول الجانبي =  $1.6 \mu\text{m}$

27.  $92.4 \text{ MeV}$

29. قيمة الرسم البياني  $\approx 8.790 \text{ MeV}$

31. a.  $7.570 \text{ MeV}$  . b. قيمة الرسم البياني  $\approx 7.591 \text{ MeV}$

33. يساوي ثابت التحلل القيمة السالبة للميل أو  $-10^{-9}$  s. نصف العمر للنواة، وبالتالي للمادة، يكون  $T_{1/2} = 693 \text{ million years}$ .

35. a. يساوي ثابت التحلل إلى  $-1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$   $\lambda = 1.99 \times 10^{-5}$  . b. لأجل السترونتيوم 91- (strontium-91) لديه كتلة ذرية مساوية

إلى  $90.90 \text{ g}$  , فإن عدد النوى في عينة  $1.00 \text{ g}$  في البداية  $N_0 = 6.63 \times 10^{21} \text{ nuclei}$

النشاط الأولي للسترونتيوم 91- هو (strontium - 91) يكون  $A_0 = \lambda N_0 = 1.32 \times 10^{17} \text{ decays/s}$

النشاط في  $t = 15.0 \text{ h} = 5.40 \times 10^4 \text{ s}$  يكون  $A = 4.51 \times 10^{16} \text{ decays/s}$

37.  $3.75 \times 10^{-4} \text{ mol}$  ,  $6.00 \times 10^{-3} \text{ mol}$  ,  $1.20 \times 10^{-2} \text{ mol}$

39. a.  $0.988 \text{ Ci}$  . b. نصف العمر للنظير  $^{226}\text{Ra}$  معروف بشكل أدق مما كان عليه عندما تم إنشاء الوحدة .ci

41. a.  $2.73 \mu\text{g}$  . b.  $9.76 \times 10^4 \text{ Bq}$

43. a.  $7.46 \times 10^5 \text{ Bq}$  . b.  $7.75 \times 10^5 \text{ Bq}$

45. a. 4.273 MeV .b.  $1.927 \times 10^{-5}$  .c. لأجل  $^{238}\text{U}$  هي مادة تتحلل ببطء , فقط عدد صغير جداً من نوى التحلل على الجداول الزمنية للإنسان، لذلك على الرغم من أن النواة التي تتحلل تفقد جزءاً ملحوظاً من كتلتها، فإن التغير في كتلة العينة لا يمكن اكتشافه لعينة ماكرسكوبية.

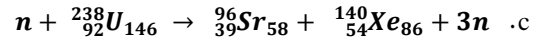
$$0.546 \text{ MeV} \cdot \text{b} \quad {}_{38}^{90}\text{Sr}_{52} \rightarrow {}_{39}^{90}\text{Y}_{51} + \beta^{-1} + \bar{\nu}_e \quad \text{a} \quad .47$$

$${}^3_1\text{H}_2 \rightarrow {}^2_1\text{H}_1 + \beta^{-1} + \bar{\nu}_e \quad .49$$

$$0.862 \text{ MeV} \cdot \text{b} \quad {}^7_4\text{Be}_3 + e^{-} \rightarrow {}^7_3\text{Li}_4 + \nu_e \quad \text{a} \quad .51$$

$$33.05 \text{ MeV} \cdot \text{b} \quad X = {}_{82}^{208}\text{Pb}_{126} \quad \text{a} \quad .53$$

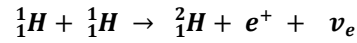
55. a. 177.1 MeV .b. هذه القيمة تكون تقريباً مساوية إلى متوسط BEN لأجل نوى ثقيلة.



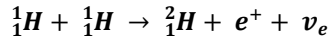
$$A_i = 239 = A_f$$

$$Z_i = 92 = 38 + 54 = Z_f$$

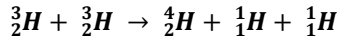
$$991 \text{ kg} \cdot \text{c} \quad 8.04 \times 10^{19} \text{ fissions/} \cdot \text{b} \quad 2.57 \times 10^3 \text{ MW} \quad \text{a} \quad .57$$



$$A_i = 1 + 1 = 2 ; \quad A_f = 2 \quad Z_i = 1 + 1 = 2 ; \quad Z_f = 1 + 1 = 2 \quad \text{i} \quad .59$$



$$A_i = 1 + 2 = 3 ; \quad A_f = 3 + 0 = 3 \quad Z_i = 1 + 1 = 2 ; \quad Z_f = 1 + 1 = 2 \quad \text{ii}$$



$$A_i = 3 + 3 = 6 ; \quad A_f = 4 + 1 + 1 = 6 \quad Z_i = 2 + 2 = 4 ; \quad Z_f = 2 + 1 + 1 = 4 \quad \text{iii}$$

$$26.73 \text{ MeV} \quad .61$$

63. a.  $3 \times 10^{38}$  protons/s .b.  $6 \times 10^{14}$  neutrinos/ $\text{m}^2 \cdot \text{s}$  , وهذا العدد الضخم يدل على أن تفاعل النوترون نادراً ما يحدث، نظراً لأن أجهزة الكشف الكبيرة لا تلاحظ إلا القليل جداً في اليوم.

65. a. الكتلة الذرية للدوتريوم ( $2\text{H}$ ) هي  $2.014102 \text{ u}$  , في حين أن الكتلة من التريتيوم ( $3\text{H}$ ) هي  $3.016049 \text{ u}$  , ليصبح المجموعة  $5.032151 \text{ u}$  لكل تفاعل . لذا فإن كتلة مول واحد من التفاعل لديه كتلة  $5.03 \text{ g}$  , وفي  $1.00 \text{ kg}$  يكون لدينا  $(1000 \text{ g}) / (5.03 \text{ g/mol}) = 198.8 \text{ mol}$  من التفاعلات.

عدد التفاعلات التي تحدث هنا (تفاعل)  $(198.8 \text{ mol})(6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}) = 1.20 \times 10^{26} \text{ reactions}$

إجمالي الطاقة الناتجة هو عدد التفاعلات التي تساوي الطاقة لكل تفاعل  $E = 3.37 \times 10^{14} \text{ J}$

b. الطاقة هي الطاقة لكل وحدة وقت. سنة واحدة هي  $3.16 \times 10^7 \text{ s}$  , لذلك  $P = 10.7 \text{ MW}$  نتوقع أن تسفر العمليات النووية عن كميات كبيرة من الطاقة، وهذا بالتأكيد هو الحال هنا، يبلغ إنتاج الطاقة  $3.37 \times 10^{14} \text{ J}$  من اندماج  $1.00 \text{ Kg}$  من الدوتريوم والتريتيوم ما يعادل 2.6 مليون غالون من البنزين ونحو ثمانية أضعاف الطاقة الناتجة عن القنبلة التي دمرت هيروشيما . ومع ذلك، يحتوي حوض السباحة في الفناء الخلفي المتوسط على نحو  $6 \text{ Kg}$  من الدوتريوم، بحيث يكون الوقود وفيراً إذا كان يمكن استخدامه بطريقة مسيطر عليها .

$$0.16 \text{ Gy} \cdot \text{c} \quad 0.0025 \text{ Gy} \cdot \text{b} \quad 0.01 \text{ Gy} \cdot \text{a} \quad : G_y = \frac{Sv}{RBE} \quad .67$$

$$1.24 \text{ MeV} \quad .69$$

$$1.69 \text{ mm} \quad .71$$

73. بسبب السرطان :  $\left(\frac{10}{10^6} \text{ rem.y}\right) = \frac{30}{10^6}$  , إن خطر الوفاة في كل عام بسبب السرطان يبلغ 30 في المليون.



بسبب العيب الجيني:  $\left(\frac{3.3}{10^6 \text{ rem.y}}\right) = \frac{9.9}{10^6 \text{ y}}$  ، الامكانية في كل عام لوجود عيب جيني هي 10 في المليون.

### أجوبة الأسئلة النظرية:

75. atomic mass (Cl) = 35.5 g/mol (الكتلة الذرية)

77. a.  $1.71 \times 10^{58} \text{ kg}$  . b. هذه الكتلة كبيرة بشكل مستحيل. إنها أكبر من كتلة مجرب درب التبانة بأكملها. c. لا يتم إنتاج 236 U من خلال عمليات طبيعية تعمل على مدار فترات طويلة على الأرض، ولكن من خلال عمليات اصطناعية في مفاعل نووي

79. إذا 10% من الأشعة تركت بعد 2cm، عندها فقط  $1\% = 0.01 = (0.100)^2$  ، تكون سوف تترك بعد 4.00 cm . وهذا أقل كثيراً من نتيجة زميلك في المخبر ( 5% ).

81. a.  $1.68 \times 10^{-5} \text{ Ci}$  . b. من الملحق B ، الطاقة التي يتم اطلاقها لكل تحلل هي  $8.65 \times 10^{10} \text{ J}$  ، so 4.27 MeV . c. القيمة النقدية للطاقة  $2.9 \times 10^3$  \$

83. نحن نعلم أن  $\lambda = 3.84 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1}$  و  $g = 15 \text{ decays/min} \cdot g$  و  $A_0 = 0.25 \text{ decays/s} \cdot g$  ، وهكذا فإن عمر القبر هو:

$$t = - \frac{1}{3.84 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1}} \ln \frac{10 \text{ decays/min.g}}{15 \text{ decays/min.g}} = 1.06 \times 10^{11} \text{ s} \approx 3350 \text{ y.}$$

### أجوبة مسائل للتحدي:

85. a.  $6.97 \times 10^{15} \text{ Bq}$  . b. 6.24 kW . c. 5.67 kW

87. a. بسبب التسرب، ينخفض الضغط في غرفة التوربينات بشكل كبير. فرق الضغط بين غرفة التوربينات ومكثف البخار منخفض للغاية الآن . b. مطلوب فرق ضغط كبير لكي يمر البخار عبر غرفة التوربينات ويدير التوربين.

89. الطاقات هي:

$$E_{4\text{He}} = 5.68 \times 10^{-2} \text{ MeV} , E_{\gamma} = 20.6 \text{ MeV}$$

لاحظ أن معظم الطاقة تذهب إلى الأشعة  $\gamma$

## الفصل الحادي عشر

### أجوبة أسئلة تحقق من فهمك

1.1.11

0.2.11

0.3.11

0.4.11

1 eV .5.11

6.11. يتم قطع نصف قطر المسار إلى النصف

7.11. جسيمات التصادم لها كتلة متطابقة لكن لها متجه عزم متضادة

8.11. انزياح الأزرق

9.11. تقريباً ذاته

## أجوبة الأسئلة النظرية

1. قوة نووية قوية: التفاعل بين الكواركات بواسطة الغلونات .
- القوة الكهرطيسية: التفاعل بين الجسيمات المشحونة بواسطة الفوتونات.
- قوة نووية ضعيفة: التفاعلات بين الفرميونات بواسطة بوزونات ثقيلة.
- قوة الجاذبية: التفاعلات بين الجسيمات (الضخمة) المادية بواسطة الجاذبية الافتراضية.
3. إلكترون وميون وتاو وإلكترون نترينو وميون نترينو وتاو نترينو وكوارك سفلي وكوارك غريب وكوارك قاعدة وكوارك علوي وكوارك ساحر وكوارك قمة.
5. انخفاض الطاقة، العزم، الشحنة (مألوف للميكانيك الكلاسيكي والميكانيك النسبي)، أيضاً انخفاض رقم الباريون، ورقم اللبتون والغرابية، وهي أرقام لا تتغير قبل وبعد التصادم أو التحلل.
7. وهذا يعني أن النظرية التي تتطلب قانون الانحفاظ ليست مفهومة وغالباً ما يؤدي فشل النظرية القديمة إلى فهم أعمق للطبيعة
9. 3 كواركات و 2 كواركات (زوج كوارك-كوارك مضاد)
11. تختلف الباريونات ذات تركيبة الكوارك ذاتها في الطاقة السكونية لأن هذه الطاقة تعتمد على الطاقة الداخلية للكواركات  $(m = E/c^2)$ . لذلك من المتوقع أن يكون الباريون الذي يحتوي على كوارك ذي عزم زاوي كبير أن يكون أضخم من نفس الباريون الذي له عزم زاوي أقل.
13. "linac (مسرّع خطي)" يستخدم لتسريع الجزيئات وفق خط مستقيم: يستخدم لتسريع وتخزين الجزيئات المتحركة في حلقة دائرية وكاشف لقياس نواتج الاصطدامات.
15. في تجربة حزمة الأشعة المتصادمة، تنتقل طاقة الجسيمات المتصادمة إلى طاقة الكتلة السكونية للجسيمات الجديدة. في تجربة محددة الهدف، تُفقد بعض هذه الطاقة بسبب عزم الجسيمات الجديدة لأن مركز كتلة جسيمات الاصطدام غير ثابت.
17. النموذج القياسي هو نموذج لتفاعلات الجسيمات الأولية. يحتوي هذا النموذج على نظرية الضعيف الكهربائي، الديناميك اللوني الكمومي (QCD) .
- يصف تفاعل اللبتونات والكواركات من خلال تبادل الفوتونات (الكهرطيسية) والبوزونات (نظرية ضعيفة) وتفاعل الكوارك من خلال تبادل الغلونات (QCD). لا يصف هذا النموذج تفاعلات الجاذبية.
19. شرح تفاعلات الجسيمات التي تتضمن القوى النووية القوية والكهرطيسية والنووية الضعيفة بطريقة موحدة.
21. لا، مع ذلك، سوف يشرح السبب في كون البوزونات W و Z ضخمة (نظراً لأن بوزون هيغز "يمنح" الكتلة لهذه الجسيمات) وبالتالي لماذا تكون القوة الضعيفة قصيرة المدى.
23. التوسع الكوني هو توسع في الفضاء. وهذا التوسع يختلف عن انفجار قنبلة حيث تمر الجسيمات بسرعة عبر الفضاء، يتناسب رسم السرعة النسبية للمجرة مع مسافتها. يتم قياس هذه السرعة باستخدام الانزياح الأحمر لضوء النجوم البعيدة.
25. مع المسافة، يكون السطوع المطلق هو نفسه، لكن يتناسب السطوع الظاهري عكساً مع مربع المسافة (السرعة النسبية لقانون هابل)
27. التوسع الملحوظ في الكون والطيف الإشعاعي للخلفية الكونية.
29. إذا تباطأ الضوء، فإن الوصول إلى الأرض يستغرق وقتاً أطول مما هو متوقع، ونخلص إلى أن الجسم أقرب كثيراً مما هو عليه بالفعل. وبالتالي فبالنسبة لكل سرعة تجريبية (استناداً إلى تواتر الضوء، الذي نفترض أنه لا يضطرب من خلال التباطؤ)، فإن المسافة أصغر من القيمة "الحقيقية"، وثابت هابل أكبر من القيمة "الحقيقية" وعمر الكون أصغر من القيمة "الحقيقية".

## أجوبة المسائل:

31. 1.022 MeV

33.  $0.511 \text{ MeV}$  ,  $2.73 \times 10^{-22} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$  ,  $1.23 \times 10^{20} \text{ Hz}$

35. a , b , c

37. a.  $\bar{P}_e^+ \nu_e$  . b.  $\bar{P}\pi^+$  or  $\bar{P}\pi^0$  . c.  $\bar{\Lambda}^0 K^+$  or  $\bar{\Xi}^0 \pi^0$  . d.  $\mu^- \bar{\nu}_\mu$  or  $\pi^- \pi^0$

e.  $\bar{P}\pi^0$  or  $\bar{n}\pi^0$

39. يتكون البروتون من كواركين علويين وكوارك سفلي. ولذلك فإن إجمالي شحنة البروتون هي  $+1 = \frac{2}{3} + \frac{2}{3} + \frac{1}{3}$

41. يتكون الميزون  $K^+$  من كوارك علوي وكوارك مضاد غريب ( $\bar{u}s$ ). لما كانت التغيرات في الكوارك والكوارك المضاد هي  $2e/3$

و  $e/3$  على التوالي، فإن شحنة الميزون  $K^+$  هي  $e$ ، وهي متوافقة مع قيمتها المعروفة. اثنين من الجسيمات ذات السبين  $1/2$ - يمكن

أن تتحد لإنتاج جسيم ذي سبين إما  $0$  أو  $1$  يتوافق مع سبين الميزون  $K^+$  الموفق للقيمة  $0$ . الغرابة الصافية للكوارك العلوي والكوارك

المضاد الغريب هي  $0+1=1$ ، وهي تتوافق مع الغرابة المقاسة للميزون  $K^+$ .

43. a. اللون . b. الكواركات والكواركات المضادة

45.  $d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$  ;  $u \rightarrow d + e^+ + \nu_e$

47. 965 GeV

49. بحسب المثال 7.11:

$$W = 2E_{\text{beam}} = 9.46 \text{ GeV},$$

$$M = 9.46 \text{ GeV}/c^2$$

هذه كتلة ميزون إبسلون ( $1s$ ) التي تمت ملاحظتها لأول مرة في مختبر فيرمي في عام 1977. يتكون ميزون إبسلون من كوارك سفلي

وجسيم مضاد له.

51.  $0.135 \text{ fm}$  ، ولما كانت هذه المسافة قصيرة جداً بحيث لا يمكن إنشاء مسار، يجب استنتاج وجود  $W^-$  من نتائج التحلل.

53. 3.33 MV

55. إن الجرافتون عديم الكتلة، لذا مثل الفوتون مترافق مع قوة لانتهائية المدى.

57. 67.5 MeV

59. a. 33.9 MeV . b. عن طريق الحفاظ على العزم،  $|P_\mu| = |P_\nu| = P$  . من خلال الحفاظ الطاقة،  $E_\nu = 29.8 \text{ MeV}$

$E_\mu = 4.1 \text{ MeV}$

$$(0.99) \left( 299792 \frac{\text{km}}{\text{s}} \right) = \left( \left( 70 \frac{\text{km}}{\text{s}} \right) / \text{Mpc} \right) (d) , \quad d = 4240 \text{ Mpc} \quad .61$$

63.  $1.0 \times 10^4 \text{ km/s}$  away from us

65.  $2.26 \times 10^8 \text{ y}$

67. a. 15 billion years =  $1.5 \times 10^{10} \text{ y}$  . b. أكبر، لأنه إذا كان يتحرك ببطء في الماضي فإنه سيستغرق زمناً أقل من ذلك

لاحتياز هذه المسافة.

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}} \quad .69$$

## أجوبة المسائل الإضافية:

71. a.  $\bar{n}$  . b.  $K^+$  . c.  $K^+$  . d.  $\pi^-$  . e.  $\bar{\nu}_\tau$  . f.  $e^+$

73.  $14.002 \text{ TeV} \approx 14.0 \text{ TeV}$

964 rev/s .75

$$H_0 = \frac{15 \text{ Km/s}}{1 \text{ Mly}} = 15 \frac{\text{Km}}{\text{s}} \cdot \text{Mly} \quad .b \quad H_0 = \frac{30 \text{ Km/s}}{1 \text{ Mly}} = 30 \frac{\text{Km}}{\text{s}} \cdot \text{Mly} \quad .a \quad .77$$

### أجوبة مسائل للتحدي:

.79 .a  $5 \times 10^{10}$  .b بتقسيم عدد الجسيمات على المنطقة التي صدموها:  $5 \times 10^4 \text{ particles/m}^2$

.81 .a 2.01 .b  $2.50 \times 10^{-8} \text{ s}$  .c 6.50 m

$$\frac{m v^2}{r} = \frac{GMm}{r^2} \rightarrow .83$$

$$v = \left( \frac{GM}{r} \right)^{1/2} = \left[ \frac{(6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2) (3 \times 10^{41} \text{ kg})}{(30.000 \text{ ly})(9.46 \times 10^{15} \text{ m/ly})} \right] = 2.7 \times 10^5 \text{ m/s}$$

.85 .a 938.27 MeV .b  $1.84 \times 10^3$

.87 .a  $3 \times 10^{18} \text{ GeV} \approx 3.29 \times 10^{18} \text{ GeV}$  .b 0.3، وتنقسم هذه القوى الثلاث بعد فصل الجاذبية عن قوة التوحيد بقليل

(بالقرب من الفاصل الزمني لبلانك) ثم تصبح حالة عدم اليقين في الوقت المناسب أعظم وتصبح الطاقة المتاحة أقل من طاقة التوحيد المطلوبة.

## أهم المصطلحات العلمية

المصطلح	الترجمة	المصطلح	الترجمة
$\alpha$ -particle	جسيم ألفا	$\beta$ -ray	شعاع بيتا
alpha decay	تحلل ألفا	atomic number	الرقم الذري
atom	ذرة	atomic orbital	المدار الذري
antineutrino	نترينو مضاد	atomic mass unit	وحدة الكتلة الذرية
antiparticle	جسيم مضاد	atomic bomb	القنبلة الذرية
atomic mass	كتلة الذرة	angular momentum orbital	العزم الزاوي المداري
beta decay	تحلل بيتا	quantum number	العدد الكمومي
binding energy	طاقة الربط	angular momentum projection	مسقط العزم الزاوي
Bohr	بور	bond length	طول الرابطة
boson	بوزون	Bragg planes	مستويات براغ
aberration	زيوغ	body-centered cubic (BCC)	مكعب مركزي الجسم
absorber	ماص	amorphous	لا بلوري
acceptor impurity	شائبة أخذة	BCS theory	نظرية BCS
base current	تيار القاعدة	blackbody	جسم أسود
birefringent	كاسر ثنائي	breakdown voltage	كمون الانهيار
Bohr magneton	مغنون بور	breeder reactor	مفاعل ولود
Bragg	براغ	chain reaction	تفاعل متسلسل
Brewster's angle	زاوية بروستر	charge-coupled device	جهاز اقتران الشحنة
carbon-14 dating	التأريخ بالكربون 14	coherent light	ضوء متماسك
Chadwick	تشادويك	Compton effect	مفعول كومبتون
Compton shift	إزاحة كومبتون	complex function	تابع عقدي
concave	مقعر	conduction band	عصابة الناقلية
constructive interference	تداخل بناء	Cooper pair	أزواج كوبر
Copenhagen interpretation	تأويل كوبنهاغن	correspondence principle	مبدأ التقابل
radiation	الإشعاع	cosmology	الكون
covalent bond	عصابة التكافؤ	critical angle	الزاوية الحرجة
cyclotron	سيكلترون	de Broglie wave	موجة دي برولي
daughter nucleus	النواة الابنة	depletion layer	طبقة النضوب
decay	التحلل	single slit	شق أحادي
destructive interference	تداخل هدام	diamond	الألماس
deuterium	دوتيريوم	diffraction grating	شبكة الحيود
diffraction	حيود (انعراج)	donor impurity	شائبة مانحة
dispersion	تششتت	double-slit interference	تداخل مزدوج الشق
doping	إشابة	electron affinity	الألفة الإلكترونية
drift velocity	سرعة الانسياب	emission spectrum	طيف الإصدار
electron configuration	التشكيل الإلكتروني	emitter	إصدار
energy gap	فجوة الطاقة	energy levels	سويات طاقة
energy-time uncertainty	مبدأ عدم اليقين طاقة-زمن	exchange symmetry	تناظر التبادل
hydrogen atom	ذرة الهيدروجين	face-centered cubic (FCC)	مكعب مركزي الوجوه
Fermi	فيرمي	Feynman diagram	مخطط فايمان
fine structure	البنية الدقيقة	relativity	النسبية
fission	الانشطار	fluorescence	الفلورة
focal length	البعد المحرق	forward bias	انحياز أمامي

fringes	أهداب	Galileo	غاليليو
ground state	الحالة الأرضية	half-life	عمر النصف
Heisenberg uncertainty	مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ	hole	ثقب
holography	التصوير المجسم	Huygens's principle	مبدأ هيغنز
hybridization	تهجين	impurity atom	ذرة شائبة
incoherent	غير متماسك	index of refraction	قرينة الانكسار
inelastic scattering	تبعثر غير مرن	interference fringes	أهداب التداخل
ionic bond	رابطة أيونية	ionization energy	طاقة التأين
isotopes	نظائر	laser	ليزر
lattice	شبكة	law of reflection	قانون الانعكاس
law of refraction	قانون الانكسار	Length contraction	تقلص الطول
liquid drop model	نموذج القطرة السائلة	linear accelerator	مسرع خطي
Lorentz transformation	تحويل لورانتز	Madelung constant	ثابت مادلونغ
Maxwell's equations	معادلات ماكسويل	mass defect	نقص الكتلة
metallic bonding	رابطة معدنية	mass number	العدد الكتلي
Michelson	ميكلسون	mesons	ميزونات
missing order	مرتبة الفقد	metastable state	حالة شبه مستقرة
nanotechnology	تقنية نانوية	minority carrier	حوامل الشحنة الأقلية
neutrons	نوترونات	monochromatic	موحد لوني
normalization	تطبيع	muons	ميونات
neutrino	نترينو	Newton's rings	حلقات نيوتن
orbital magnetic dipole moment	عزم ثنائي القطب المغناطيسي	nuclear fusion	انشطار نووي
particle accelerator	مسرع جسيمات	nuclide	نكليد
particle detector	كاشف جسيمات	p-n junction	الوصلة p-n
photocurrent	تيار ضوئي	p-type semiconductor	نصف ناقل من P النوع
photoelectric effect	المفعول الكهروضوئي	Pauli's exclusion principle	مبدأ الاستبعاد لباولي
Planck's constant	ثابت بلانك	photon	فوتون
polarization	الاستقطاب	quanta	كم
population inversion	الإسكان المعكوس	polarized	مستقطب
potential barrier	حاجز كموني	positron	بوزيترون
protons	بروتونات	principal quantum number	العدد الكمي الرئيس
quantum number	العدد الكمي	quantum mechanic	الميكانيك الكمومي
qubit	كيوبت	quantized energies	طاقات كممة
redshift	الانزياح الأحمر	quark	كوارك
Relativistic momentum	العزم النسبي	resolution	مقدرة الفصل
rest mass	الكتلة السكونية	rotational energy level	السويات الطاقة الدورانية
scanning electron microscope	المجهر الإلكتروني الماسح	Rydberg formula	علاقة رديبرغ
scattering angle	زاوية التبعثر	scanning tunneling microscope	المجهر النفقي الماسح
Schrodinger's cat	قطعة شرودنغر	selection rules	قواعد الاصطفاء
single-slit diffraction pattern	نمط الحيود أحادي الشق	sievert	سيفرت
speed of light	سرعة الضوء	Snell's law	قانون سنيل
spin quantum number	العدد الكمي السبيني	spherical aberration	الزيوغ الكروي

strong nuclear force	القوة النووية القوية	spin-orbit coupling	الترابط مدار-سبين
synchrotron radiation	إشعاع السنكروترون	subshell	مدار فرعي
thin-film interference	تداخل الأفلام الرقيقة	theory of everything	نظرية كل شيء
transmission electron microscope	المجهر الإلكتروني النافذ	Time dilation	تمدد الزمن
tunnel diode	ثنائي نفقي	tritium	ترتيوم
unpolarized	غير مستقطب	two-slit diffraction pattern	نمط الحيود مزدوج الشق
valence electron	إلكترون تكافؤ	ultraviolet catastrophe	كارثة فوق البنفسجي
vibrational energy level	سوية طاقة اهتزازية	valence band	عصابة التكافؤ
weak nuclear force	القوة النووية الضعيفة	Van de Graaff accelerator	مسرع فاندرغراف
work function	تابع العمل	wave function	التابع الموجي

