KINGDOM OF BAHRAIN

Ministry of Education

مَمْلَكَةُ البَحْرَيْنِ

وَزَارَةُ التَّرْبِيَةِ وَالتَّعْلِيمِ

فيز 218 / فيز 219

الفيزياء 3

للمرحلة الثانوية

فيز 218/فيز 219

قررت وزارة التربية والتعليم بمملكة البحرين تدريس هذا الكتاب بمدارسها الثانوية

إدارة سياسات وتطوير المناهج

الفيزياء 3

للمرحلة الثانوية

الطبعة الثالثة
1445 هـ - 2023 م

منهاجي
متعة التعليم الهادف

التطوير:

فريق متخصص من وزارة التربية والتعليم بمملكة البحرين

www.macmillanmh.com

Education

English Edition Copyright © 2009 the McGraw-Hill Companies, Inc.
All rights reserved.

Arabic Edition is published by Obeikan under agreement with
The McGraw-Hill Companies, Inc. © 2008.

العبيكان Obeikan

حقوق الطبعة الإنجليزية محفوظة لشركة ماجروهل©، ٢٠٠٩م.

الطبعة العربية: مجموعة العبيكان للاستثمار
وفقًا لاتفاقيتها مع شركة ماجروهل© ٢٠٠٨م/ ١٤٢٩هـ.

لا يسمح بإعادة إصدار هذا الكتاب أو نقله في أي شكل أو واسطة، سواءً أكانت إلكترونية أو ميكانيكية، بما في ذلك التصوير بالنسخ «فوتوكوبي»، أو التسجيل، أو التخزين و الاسترجاع، دون إذن خطي من الناشر.

حضرة صاحب الجلالة الملك حمد بن عيسى آل خليفة

ملك مملكة البحرين المعظم

المقدمة

بسم الله الرحمن الرحيم

يأتي اهتمام مملكة البحرين بتطوير مناهج التعليم وتحديثها في إطار الخطة العامة للمملكة، وسعيها إلى مواكبة التطورات العالمية على مختلف الأصعدة.

ويأتي كتاب الفيزياء3 للمرحلة الثانوية في إطار مشروع تطوير مناهج الرياضيات والعلوم، الذي يهدف إلى إحداث تطور نوعي في تعليم وتعلم هاتين المادتين، يكون للطالب فيه الدور الرئيس والمحوري في عمليتي التعليم والتعلّم. وقد جاء هذا الكتاب في ستة فصول شملت: الاهتزازات والموجات، والصوت، وأساسيات الضوء، والانعكاس والمرايا، والانكسار والعدسات، والتداخل والحيود.

وقد جاء عرض محتوى الكتاب بأسلوب مشوق، وتنظيم تربوي فاعل، يعكس توجهات المنهج وفلسفته. وقد كتب بأسلوب يساعد الطالب على تنمية مهارات التحليل والتفسير والاستنتاج والتعبير، وذلك من خلال اهتمامه بالجانب التجريبي. كذلك اشتمل المحتوى على أنشطة متنوعة المستوى، تتسم بإمكانية تنفيذ الطلبة لها، وتراعي في الوقت نفسه مبدأ الفروق الفردية بينهم، بالإضافة إلى تضمينه صورًا وأشكالًا ورسومًا توضيحية معبرة تعكس طبيعة الفصل، مع حرص الكتاب على مبدأ التقويم التكويني في فصوله ودروسه المختلفة.

كما أكدت فلسفة الكتاب أهمية اكتساب الطالب المنهجية العلمية في التفكير والعمل، وتزويده بالمهارات العقلية والعملية الضرورية، ومنها: التجارب الاستهلالية، والتجارب العملية الأخرى، ومختبر الفيزياء، والإثراء، بالإضافة إلى حرصها على ربط المعرفة مع حياة الطالب، إلى جانب التكامل مع المواد الأخرى مثل: الرياضيات، واللغة، والتقنية، والمجتمع.

واللهَ نسأل أن يحقق الكتاب الأهداف المرجوة منه، وأن يوفق الجميع لما فيه خير الوطن وتقدمه وازدهاره.

الفصل 1

الاهتزازات والموجات 8

تجربة استهلالية 9

1-1 الحركة الدورية 9

1-2 خصائص الموجات 15

1-3 سلوك الموجات 21

التقويم 28

الفصل 2

الصوت..... 34

تجربة استهلالية 35

2-1 خصائص الصوت 35

2-2 الرنين 42

التقويم 50

الفصل 3

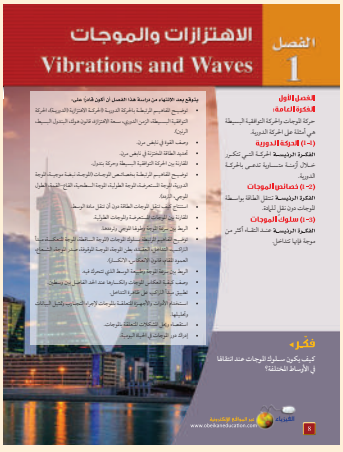
أساسيات الضوء 54

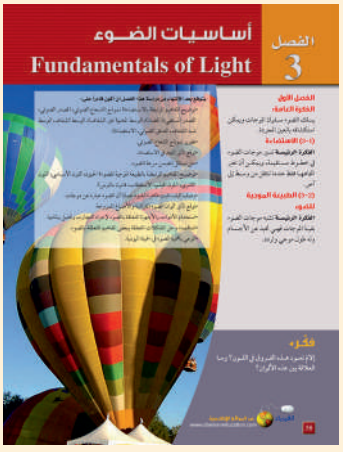
تجربة استهلالية 55

3-1 الاستضاءة 55

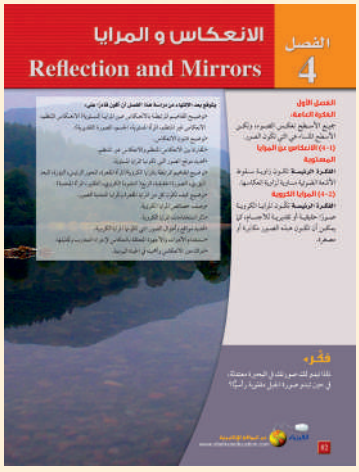
3-2 الطبيعة الموجية للضوء 62

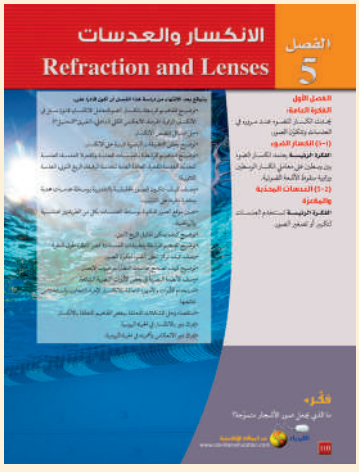
التقويم 72





قائمة المحتويات





الفصل 4

الانعكاس والمرايا 76

تجربة استهلالية 77

4-1 الانعكاس عن المرايا المستوية 77

4-2 المرايا الكروية 84

التقويم 96

الفصل 5

الانكسار والعدسات 102

تجربة استهلالية 103

5-1 انكسار الضوء 103

5-2 العدسات المحدّبة والمقعّرة 111

5-3 تطبيقات العدسات 118

التقويم 124

الفصل 6

التداخل والحيود 128

تجربة استهلالية 129

6-1 التداخل 129

6-2 الحيود 138

التقويم 147

مصادر تعليمية للطالب 151

دليل الرياضيات 152

الجداول 184

المصطلحات 187

الفصل 1

الاهتزازات والموجات
Vibrations and Waves

الفصل الأول

الفكرة العامة:

حركة الموجات والحركة التوافقية البسيطة هي أمثلة على الحركة الدورية.

(1-1) الحركة الدورية

الفكرة الرئيسة الحركة التي تتكرر خلال أزمنة متساوية تدعى بالحركة الدورية.

(1-2) خصائص الموجات

الفكرة الرئيسة تنتقل الطاقة بواسطة الموجات دون نقلٍ للمادة.

(1-3) سلوك الموجات

الفكرة الرئيسة عند التقاء أكثر من موجة فإنها تتداخل.

يتوقع بعد الإنتهاء من دراسة هذا الفصل أن أكون قادرًا على:

- توضيح المفاهيم المرتبطة بالحركة الدورية (الحركة الاهتزازية (الدورية)، الحركة التوافقية البسيطة، الزمن الدوري، سعة الاهتزازة، قانون هوك، البندول البسيط، الرنين).
- وصف القوة في نابض مرن.
- تحديد الطاقة المختزنة في نابض مرن.
- المقارنة بين الحركة التوافقية البسيطة وحركة بندول.
- توضيح المفاهيم المرتبطة بخصائص الموجات (الموجة، نبضة موجية، الموجة الدورية، الموجة المستعرضة، الموجة الطولية، الموجة السطحية، القاع–القمة، الطول الموجي، التردد).
- استنتاج كيف تنقل الموجات الطاقة دون أن تنقل مادة الوسط.
- المقارنة بين الموجات المستعرضة والموجات الطولية.
- الربط بين سرعة الموجة وطولها الموجي وترددها.
- توضيح المفاهيم المرتبطة بسلوك الموجات (الموجة الساقطة، الموجة المنعكسة، مبدأ التراكب، التداخل، العقدة، بطن الموجة، الموجة الموقوفة، صدر الموجة، الشعاع، العمود المقام، قانون الانعكاس، الانكسار).
- الربط بين سرعة الموجة وطبيعة الوسط الذي تتحرك فيه.
- وصف كيفية انعكاس الموجات وانكسارها عند الحد الفاصل بين وسطين.
- تطبيق مبدأ التراكب على ظاهرة التداخل.
- استخدام الأدوات والأجهزة المتعلقة بالموجات لإجراء التجارب وتمثيل البيانات وتحليلها.
- استقصاء وحل المشكلات المتعلقة بالموجات.
- إدراك دور الموجات في الحياة اليومية.

فكّر

كيف يكون سلوك الموجات عند انتقالها في الأوساط المختلفة؟

تجربة استهلالية

كيف تسلك الموجات في النابض الحلزوني؟

سؤال التجربة كيف تسلك النبضات التي ترسل عبر نابض حلزوني عندما يكون طرفه الآخر ثابتًا؟

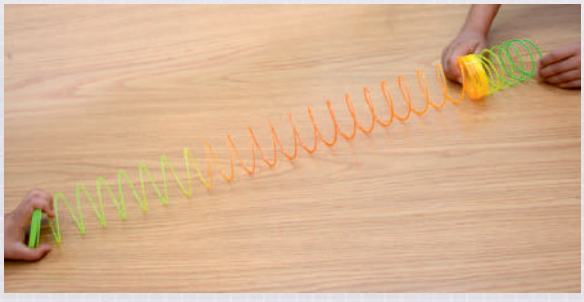
الخطوات

1. اطلب إلى أحد زملاءك تثبيت أحد طرفي النابض، ثم شد الطرف الآخر للنابض على ألا تبالغ فيه، ثم حرك طرف النابض جانبًا مولِّدًا نبضات فيه. راقب النبضات خلال انتقالها إلى أن تصل الطرف المثبت، وسجل ملاحظاتك.
2. كرّر الخطوة 1، بتوليد نبضات أكبر، وسجل ملاحظاتك.
3. ولّد نبضات مختلفة في النابض بضم عدد من لفاته بجوار بعضها بعضًا، ثم اتركه حرًّا، وسجل ملاحظاتك.
4. ولّد نوعًا ثالثًا من النبضات بوساطة ليّ (لف) أحد طرفي النابض، ثم اتركه، وسجل ملاحظاتك.

التحليل

5. ماذا يحدث للنبضات في أثناء انتقالها خلال النابض؟ وماذا يحدث عند وصولها الطرف الثابت من النابض؟ وكيف كانت النبضة المتولّدة في الخطوة 1 مقارنة بالنبضة التي ولّدت في الخطوة 2؟

التفكير الناقد اذكر بعض الخصائص التي تبدو أنها تتحكم في حركة النبضة خلال النابض.



الفيزياء في حياتك

يمكن استخدام الموجات في تحديد عمق البحار والمحيطات، وكذلك تحديد سرعة المركبات في أثناء حركتها.

تساؤلات جوهرية:

- ما الحركة التوافقية البسيطة؟
- ما مقدار الطاقة المختزنة في نابض مرن؟
- ما العوامل المؤثرة في حركة البندول البسيط؟

المفردات:

- الحركة الاهتزازية (الدورية)
- الحركة التوافقية البسيطة
- الزمن الدوري
- سعة الاهتزازة
- قانون هوك
- البندول البسيط
- الرنين

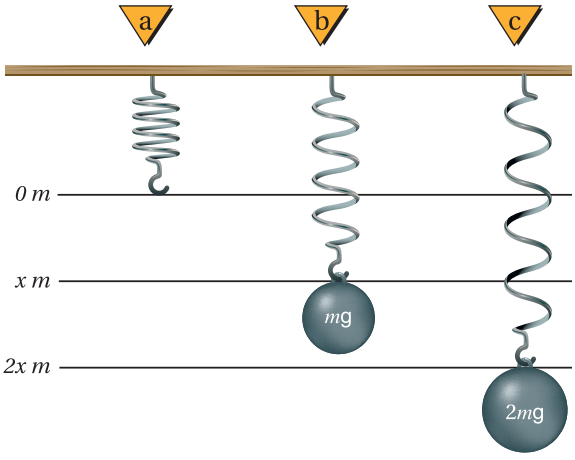
لعلك شاهدت تأرجح بندول ساعة حائط ذهابًا وإيابًا متّبعًا المسار نفسه، وتحتاج كل رحلة ذهاب وإياب إلى المقدار نفسه من الزمن. تعتبر هذه الحركة مثالاً على الحركة الاهتزازية. ومن الأمثلة الأخرى على ذلك تذبذب جسم فلزي مثبت بنابض إلى أعلى وأسفل، واهتزاز أوتار القيثارة. هذه الحركات كلها التي تكرر حركتها في دورة منتظمة أمثلة على **الحركة الاهتزازية (الدورية)**.

ويكون للجسم في تلك الأمثلة كلها موضع واحد، تكون عنده القوة المحصلة المؤثرة في الجسم تساوي صفرًا، ويكون الجسم في ذلك الموضع في حالة اتزان. وعند سحب الجسم بعيدًا عن موضع اتزانه تصبح القوة المحصلة المؤثرة في النظام لا تساوي صفرًا، وتعمل هذه القوة المحصلة على إعادة الجسم إلى موضع الاتزان. وإذا كانت القوة التي تعيد الجسم إلى موضع اتزانه تتناسب طرديًّا مع إزاحة الجسم فإن الحركة الناتجة تُسمى **حركة توافقية بسيطة**.

هناك كميتان تصفان الحركة التوافقية البسيطة، هما: **الزمن الدوري** T؛ وهو الزمن الذي يحتاج إليه الجسم ليكمل اهتزازة (دورة) كاملة من الحركة ذهابًا وإيابًا، و**سعة الاهتزازة** A هي أقصى إزاحة يتحركها الجسم مبتعدًا عن موضع الاتزان.

الكتلة المعلقة بنابض

The Mass on a Spring



الشكل 1–1 تتناسب القوة التي يؤثر بها نابض طرديًا مع المسافة التي يستطيلها.

كيف يتفاعل النابض مع القوة المؤثرة فيه؟ يبين **الشكل 1a–1** دعامة معلقٌ بها نابض دون تعليق أي شيء في نهايته؛ وبذا فإنه لا يستطيل لأنه لا يوجد قوة خارجية تؤثر فيه. أما **الشكل 1b–1** فيبين النابض نفسه معلقًا في نهايته جسم وزنه mg، وقد استطال النابض إزاحة x؛ بحيث تُوازِن القوةُ المؤثرةُ إلى أعلى قوةَ الجاذبية الأرضية المؤثرةَ إلى أسفل. ويبين **الشكل 1c–1** النابض نفسه مستطيلاً مسافة مقدارها $2x$؛ وذلك عند تعليق ضعفي الوزن السابق $(2\,mg)$ في نهايته. وهذا ما يتفق مع **قانون هوك**، الذي ينص على أن: القوة التي يؤثر بها نابض تتناسب طرديًّا مع مقدار استطالته، والنوابض التي تنطبق عليها هذه الحالة تسمى نوابض مرنة وتحقق قانون هوك، المعبّر عنه بالعلاقة التالية:

قانون هوك $F = -kx$

القوة التي يؤثر بها نابض تساوي حاصل ضرب ثابت النابض في الإزاحة التي يستطيلها أو ينضغطها النابض عن موضع اتزانه.

في هذه المعادلة تمثل k ثابت النابض الذي يعتمد على صلابة النابض، إضافة إلى خصائص أخرى له، وتمثّل x الإزاحة التي يستطيلها أو ينضغطها النابض عن موضع اتزانه.

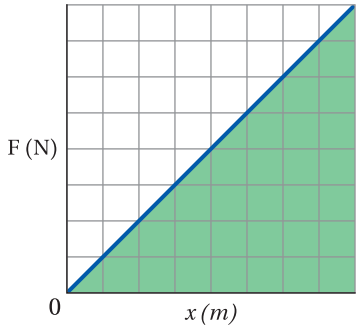
طاقة الوضع عندما تطبق قوى مختلفة ما للعمل على استطالة نابض، فسيكون هناك علاقة طردية خطية بين القوى المؤثرة وإزاحة النابض، كما يوضح **الشكل 2–1**، حيث يمثّل ميل الخط البياني ثابت النابض، مقاس بوحدة N/m، وتمثّل المساحة تحت المنحنى مقدار الشغل المبذول لإستطالة النابض، وهي تساوي طاقة الوضع المرونية المختزنة فيه بفعل هذا الشغل. وتمثّل قاعدة المثلث مسافة الاستطالة أو الانضغاط x، أما ارتفاع المثلث فيمثل مقدار القوة التي تساوي kx وفق قانون هوك، لذا يُعبر عن طاقة الوضع المرونية المختزنة في النابض بالمعادلة الآتية:

طاقة الوضع المرونية المختزنة في نابض $PE_{sp} = \frac{1}{2}kx^2$

طاقة الوضع المرونية في نابض تساوي نصف حاصل ضرب ثابت النابض في مربع إزاحته.

وستكون وحدة طاقة الوضع المرونية N.m أو جول J.

الشكل 2–1 يمكن تحديد ثابت النابض من العلاقة البيانية بين القوة المؤثرة وإزاحة النابض.



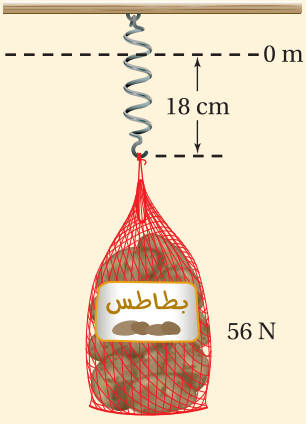
نظام التعليق في السيارات تعد النوابض أو الزنبركات من أهم أجزاء نظام التعليق في السيارات، ووظيفة هذه النوابض تثبيت الإطارات على الأرض وتكون ملفوفة حول ماص الصدمات، والتي تعمل معها أيضًا على امتصاص الصدمات الصادرة عن الطرقات وأجزاء السيارة الأخرى.

مثـال 1

ثابت النابض والطاقة المختزنة فيه استطال نابض مسافة 18 cm عندما عُلّق بنهايته كيس بطاطس وزنه 56 N، احسب:

a. مقدار ثابت النابض.

b. مقدار طاقة الوضع المرونية المختزنة في النابض والناتجة عن هذه الاستطالة؟



1 تحليل المسألة ورسمها

- مثّل الوضع
- بيّن المسافة التي استطالها النابض وموضع اتزانه، وحدّدهما.

المعلوم	المجهول
$x = 18\ \text{cm}$	$k = ?$
$F = 56\ \text{N}$	$PE_{sp} = ?$

2 إيجاد الكمية المجهولة

a. استخدم $F = -kx$، ثم أوجد قيمة k

يمكن حذف إشارة السالب؛ لأنها تعني أن القوةَ قوةُ إرجاع فقط.

$$k = \frac{F}{x}$$

بالتعويض عن $x = 0.18\ \text{m}$ ،$F = 56\ \text{N}$

$$k = \frac{56\ \text{N}}{0.18\ \text{m}} = 310\ \text{N/m}$$

b.

$$PE_{sp} = \frac{1}{2}kx^2$$

$$= \frac{1}{2}(310\ \text{N/m})(0.18\ \text{m})^2 = 5.0\ \text{J}$$

بالتعويض عن $k = 310\ \text{N/m}$ ،$x = 0.18\ \text{m}$

3 تقويم الجواب

- **هل الوحدات صحيحة؟** N/m هي الوحدة الصحيحة لثابت النابض.
  الوحدة الصحيحة للطاقة هي $(\text{N/m})(\text{m}^2) = \text{N.m} = \text{J}$.
- **هل الجواب منطقي؟** ثابت النابض متناسق مع القيم المستخدمة في ميزان البقالة مثلاً. الطاقة 5.0 J تساوي القيمة التي نحصل عليها من $W = Fx = mgh$، عندما يكون متوسط القوة المؤثرة 28 N

مسائل تدريبية

1. ما مقدار استطالة نابض عند تعليق جسم وزنه 18 N في نهايته، إذا كان ثابت النابض له يساوي 56 N/m؟

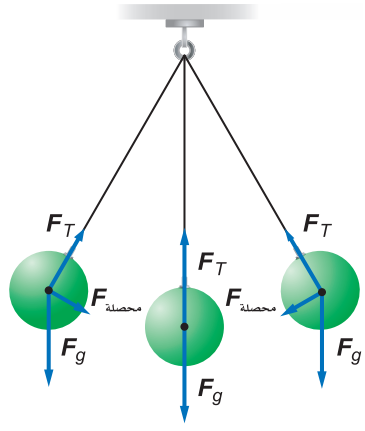
2. ما مقدار طاقة الوضع المرونية المختزنة في نابض عند ضغطه مسافة 16.5 cm، إذا كان ثابت النابض له يساوي 144 N/m؟

3. ما المسافة التي يستطيلها نابض حتى يخزّن طاقة وضع مرونية مقدارها 48 J، إذا كان ثابت النابض له يساوي 256 N/m؟

البندول البسيط Simple Pendulum

يتكون **البندول البسيط** من جسم صلب كثافته عالية يُسمى ثقل البندول، معلق بوساطة خيط طوله l. وعند سحب ثقل البندول جانبًا وتركه فإنه يتأرجح جيئة وذهابًا، كما في **الشكل 3–1**، حيث يؤثر الخيط بقوة شد F_T في ثقل البندول وتؤثر الجاذبية الأرضية أيضًا في الثقل بقوة F_g، والجمع الاتجاهي لهاتين القوتين يمثل القوة المحصلة، وقد تم تمثيلها في ثلاثة مواضع مختلفة في **الشكل 3–1**. ففي الموضعين الأيمن والأيسر تكون القوة المحصلة والتسارع أكبر ما يمكن، بينما سرعته المتجهة صفر. وفي الموضع الوسط (الاتزان) في الشكل نفسه تكون القوة المحصلة والتسارع صفرًا، بينما السرعة المتجهة أكبر ما يمكن. وفي هذه الحالة يمكنك أن تلاحظ أن القوة المحصلة هي قوة إرجاع؛ وتكون دائمًا معاكسة لاتجاه إزاحة ثقل البندول، وتعمل على إرجاع الثقل إلى موضع اتزانه. وعندما تكون زوايا الميل صغيرة (أقل من 15° مثلًا)، فإن قوة الإرجاع تتناسب طرديًّا مع الإزاحة، ويطلق على هذه الحركة حينئذٍ حركة توافقية بسيطة. ويتم حساب الزمن الدوري للبندول باستعمال المعادلة التالية:

الشكل 3–1 ($F_{محصلة}$)، المجموع المتجه لـ F_T و F_g، هي قوة الارجاع في البندول.



الزمن الدوري للبندول البسيط $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$

الزمن الدوري للبندول البسيط يساوي 2π مضروبة في الجذر التربيعي لحاصل قسمة طول خيط البندول على تسارع الجاذبية الأرضية.

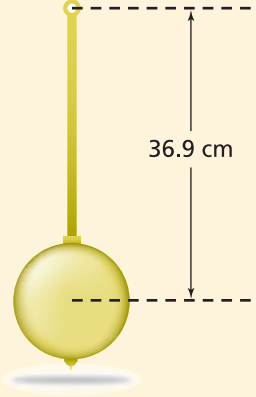
التجربة العملية:

كيف يوضح البندول البسيط خصائص الموجات؟

لاحظ أن الزمن الدوري للبندول البسيط يعتمد فقط على طول خيط البندول، وتسارع الجاذبية الأرضية، ولا يعتمد على كتلة ثقل البندول أو سعة الاهتزازة. ومن التطبيقات العملية على البندول استعماله في حساب تسارع الجاذبية الأرضية g التي تتغير قليلًا من موقع إلى آخر على سطح الأرض.

مثال 2

استعمال البندول لحساب g إذا كان الزمن الدوري لبندول ساعة طوله 36.9 cm يساوي 1.22 s، فما مقدار تسارع الجاذبية الأرضية g في منطقة وجود البندول؟



1 تحليل المسألة ورسمها

- ارسم الوضع
- وضّح طول البندول على الرسم.

المعلوم	المجهول
$l = 36.9$ cm	$g = ?$
$T = 1.22$ s	

2 إيجاد الكمية المجهولة

حل المعادلة لحساب g.

$$T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

$$g=\frac{(2\pi)^2 l}{T^2}$$

بالتعويض عن $l = 0.369\ \text{m}$، $T = 1.22\ \text{s}$

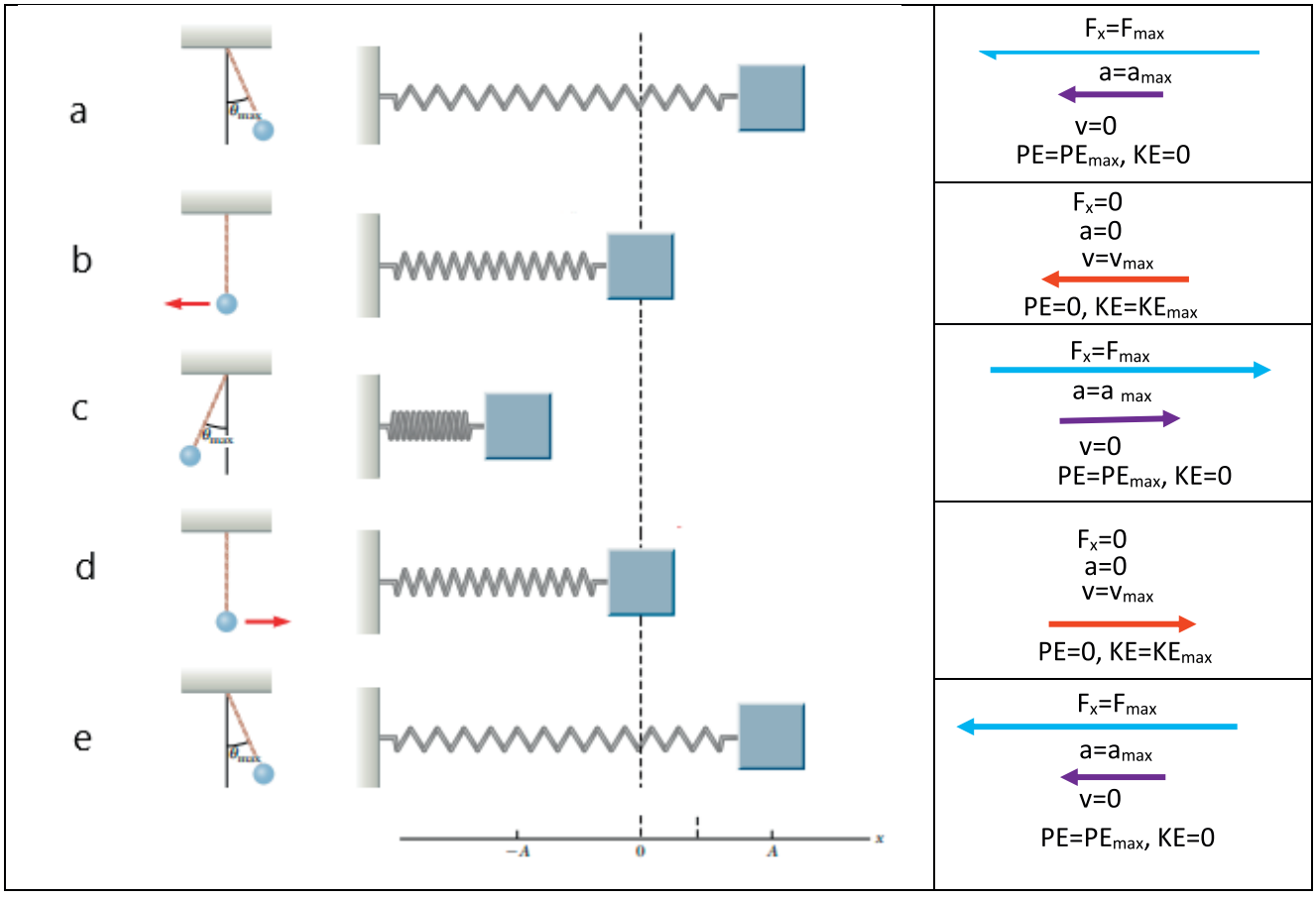
$$=\frac{4\pi^2\,(0.369\ \text{m})}{(1.22\ \text{s})^2}$$

$$=9.78\ m/\text{s}^2$$

3 تقويم الجواب

- **هل الوحدات صحيحة؟** m/s^2 هي الوحدة الصحيحة للتسارع.
- **هل الجواب منطقي؟** قيمة g المحسوبة كانت قريبة من القيمة المعيارية $9.80\ \text{m/s}^2$، ويكون البندول في منطقة أعلى من مستوى سطح البحر.

تحدث الحركة التوافقية البسيطة عندما تكون القوة المحصلة تحقق قانون هوك؛ أي أن هذه القوة تتناسب طرديًا مع الإزاحة ويكون اتجاهها دائمًا نحو موضع الاتزان، ويبين **الشكل 4–1** التماثل بين حركة البندول البسيط وبين الكتلة المرتبطة بنابض، فعند أقصى إزاحة فإن القوة المحصلة والتسارع يكونان قيمًا قصوى، بينما تكون السرعة تساوي صفرًا، وعند العودة إلى نقطة الاتزان تصبح القوة المحصلة والتسارع صفرًا بينما تكون السرعة قيمة عظمى.



الشكل 4–1 مقارنة بين الحركة التوافقية البسيطة لكتلة مرتبطة بنابض والبندول البسيط عند: أقصى إزاحة (a) الاتزان (b) أقصى إزاحة (c) الاتزان (d) أقصى إزاحة (e).

تطبيق الفيزياء

بندول فوكو
Foucult Pendulum

يستخدم بندول فوكو كأحد الأدلة على دوران الأرض حول محورها، يتكون بندول فوكو من سلك طوله 16 m معلق بنهايته كتلة كبيرة مقدارها 109 kg ووفق القانون الأول لنيوتن في الحركة يستمر البندول المتأرجح في الحركة في الاتجاه نفسه ما لم يُسحب أو يُدفع في اتجاه آخر. وبما أن الأرض تدور تحت البندول كل 24 ساعة، فإن اتجاه اهتزاز البندول يظهر متغيرًا بالنسبة للمشاهد، كما يختلف الزمن اللازم لإتمام دورة كاملة باختلاف خط العرض. ولبيان ذلك قم بما يلي: رتّب أوتادًا خشبية في دائرة على الأرض تحت البندول المتأرجح على أن يضربها ثقل البندول ويوقعها مع دوران الأرض. ويدور البندول عند القطب الشمالي ظاهريًا بمعدل $15°/h$ أي دورة كاملة خلال 24 ساعة تقريبًا ويزداد كلما اقتربنا من خط الاستواء. وقد يستخدم أيضًا لمعرفة خط العرض للموقع الذي يتواجد به البندول.

الرنين Resonance

لكي تجعل الأرجوحة تتأرجح وأنت جالس عليها، فإنك تقوم بدفعها بالانحناء إلى الخلف وسحب الحبل (أو السلسلة) من النقطة نفسها في كل شوط، أو أن يدفعك زميلك دفعات متكرّرة في اللحظات المناسبة. ويحدث **الرنين** عندما تؤثر قوى صغيرة في جسم متذبذب أو مهتز في فترات زمنية منتظمة، بحيث تؤدي إلى زيادة سعة الاهتزازة، وتكون الفترة الزمنية الفاصلة بين تطبيق القوة على الجسم المهتز مساويةً للزمن الدوري للاهتزازة، ويعد الرنين شكلًا مميّزًا للحركة التوافقية البسيطة. ومن الأمثلة الشائعة على الرنين أرجحة السيارة إلى الأمام والخلف من أجل تحرير عجلاتها من الرمل أو الثلج، والقفز المتواتر عن لوح القفز أو الغوص. وقد ينجم عن السعة الكبيرة للاهتزازة الناتجة عن الرنين إجهاد كبير. فعلى سبيل المثال، قد تؤدي حركة الجمهور المنتظمة إلى تحطيم هيكل الشرفة عند قفزهم إلى أعلى وأسفل بزمن دوري مساوٍ للزمن الدوري الطبيعي لاهتزاز هذه الشرفة.

مسائل تدريبية

4. ما طول بندول موجود على سطح القمر حيث $g = 1.6\ m/s^2$ حتى يكون الزمن الدوري له 2.0 s؟
5. إذا كان الزمن الدوري لبندول طوله 0.75 m يساوي 1.8 s على سطح أحد الكواكب، فما مقدار g على هذا الكوكب؟

1-1 مراجعة

6. **قانون هوك** علقت أجسام مختلفة الوزن بنهاية شريط مطاطي مثبت بخطاف، ثم رسمت العلاقة البيانية بين وزن الأجسام المختلفة واستطالة الشريط المطاطي. كيف تستطيع الحكم ـ اعتمادًا على الرسم البياني ـ ما إذا كان الشريط المطاطي يحقق قانون هوك أم لا؟
7. **البندول** ما مقدار التغير اللازم في طول بندول حتى يتضاعف زمنه الدوري إلى المثلين؟ وما مقدار التغير اللازم في طوله حتى يقل زمنه الدوري إلى نصف زمنه الدوري الاصلي؟
8. **طاقة النابض** ما النسبة بين الطاقة المختزنة في نابض استطال 0.40 m والطاقة المختزنة في النابض نفسه عندما يستطيل 0.20 m؟
9. **الرنين** إذا كانت عجلات سيارة غير متوازنة فسوف تهتز السيارة بقوة عند سرعة محدّدة، ولا يحدث ذلك عند سرعات أقل أو أكبر من هذه السرعة. فسّر ذلك.
10. **التفكير الناقد** ما أوجه الشبه بين الحركة الدائرية المنتظمة والحركة التوافقية البسيطة؟ وما أوجه الاختلاف بينهما؟

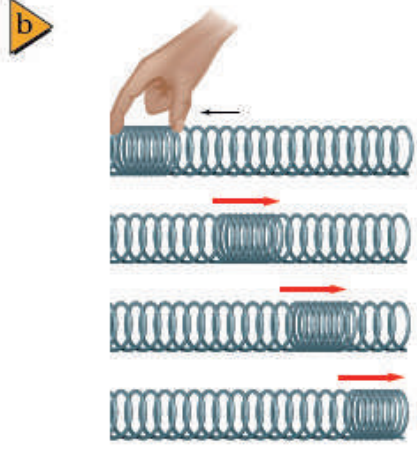
يحمل كل من الجسيمات المادية والموجات طاقة، ولكن هناك اختلافًا مهمًّا بينهما في كيفية حملهما لها، وعلى افتراض أن الكرة جسيم مادي، وقذفت بها نحو زميلك فسوف تنتقل منك إلى زميلك حاملة معها طاقة، وإن أمسكت أنت وزميلك بطرفي حبل وحركت الطرف الذي تمسك به جانبًا أو رأسيًّا، فإن الطاقة تنتقل من يدك إلى يد زميلك عبر مادة الحبل دون أن ينتقل الحبل منك إلى زميلك، وبناءً على ذلك تعرف **الموجة** بأنها اضطراب يحمل الطاقة خلال الفراغ أو المادة دون أن تنتقل مادة الوسط.

الموجات الميكانيكية Mechanical Waves

تُعد موجات الماء، وموجات الصوت، والموجات التي تنتقل خلال حبل أو نابض أشكالاً للموجات الميكانيكية، وتحتاج الموجات الميكانيكية إلى وسط مادي ناقل مثل الماء أو الهواء أو الحبال أو النوابض، مما يمكننا من ملاحظتها بطرائق مباشرة، لذا تعد الموجات الميكانيكية نموذجًا مثاليًّا يعتمد عليه في دراسة الموجات، يطلق على الاضطراب الذي يحدث من ضم عدد من لفات نابض بعد افلاتها اسم نبضات موجية؛ **فالنبضة الموجية** اضطراب (موجة) مفرد ينتقل خلال الوسط. وإذا انتشرت الموجة بالمعدل نفسه تتولّد **موجة دورية**.

الموجات المستعرضة تسمى الموجة التي تهتز فيها جزيئات المادة في اتجاه عمودي على اتجاه انتشارها **الموجة المستعرضة**، لاحظ **الشكل 5a–1** حيث يتحرك الحبل رأسيًّا، ولكن النبضة تنتقل أفقيًّا.

الموجات الطولية لاحظ **الشكل 5b–1**، إن الاضطراب الناتج عن إفلات عدد من لفات النابض بعد ضم بعضها إلى بعض يولد موجات تهتز في اتجاه – أو عكس – حركة لفات النابض نفسها، وتسمى الموجة التي تهتز فيها جزيئات المادة في اتجاه –أو عكس– انتشار الموجة نفسها **الموجة الطولية**.



الفيزياء في حياتك

تستخدم الموجات الصوتية في الكشف عن الآبار والمياه الجوفية في طبقات الأرض، حيث من خلال انعكاس الموجات بأزمان وأطوال موجية مختلفة، يستطيع العلماء دراسة طبقات الأرض، وبالتالي تحديد الأماكن المحتملة لوجود هذه الآبار والمياه الجوفية

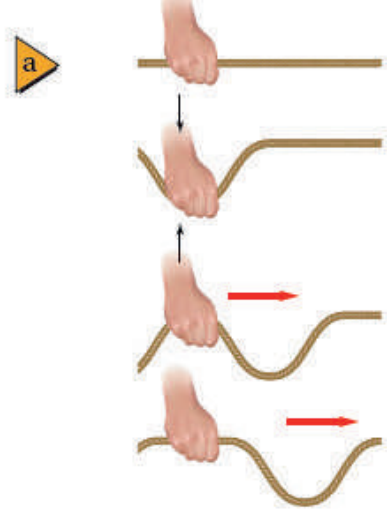
تساؤلات جوهرية:

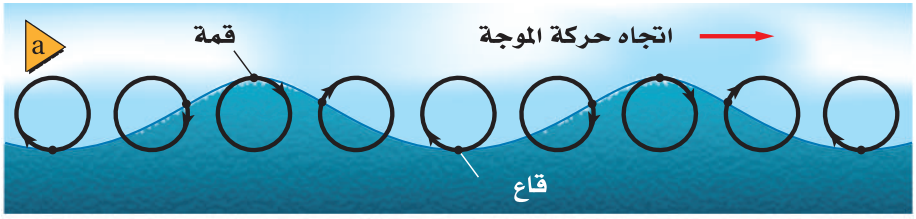
- ما الموجات؟
- كيف تختلف الموجات المستعرضة عن الموجات الطولية؟
- ما العلاقة بين سرعة الموجة وطولها الموجي وترددها؟

المفردات:

- الموجة
- نبضة الموجة
- الموجة الدورية
- الموجة المستعرضة
- الموجة الطولية
- الموجة السطحية
- سعة الموجة
- الطول الموجي
- التردّد

الشكل 5–1 (a) يولّد الاهتزاز السريع بالاتجاه العمودي على محور حبل موجات مستعرضة في الاتجاهين. (b) يولّد ضمّ لفات نابض بعضها إلى بعض ثم تركها موجات طولية في الاتجاهين.





■ **الشكل 6–1** (a) مسارات الدقائق المادية المفردة تكون دائرية. (b) للموجات السطحية خصائص الموجات المستعرضة والموجات الطولية.

الموجات السطحية (البحرية) تتحرك بعض جزيئات الماء عند السطح لحظيًا حركة اهتزازية إلى أعلى وأسفل عموديًا على اتجاه انتشارها، أي يحدث على سطح الماء موجات مستعرضة، وفي الوقت نفسه تتحرك الجزيئات نفسها لحظيًا حركة اهتزازية في اتجاه انتشار الموجه، فتعتبر حركتها موجة طولية كما في **الشكل 6–1**. إن مصدر طاقة هذه الموجات يأتي عادة من الرياح التي بدورها استمدّت طاقتها من تسخين الأرض بوساطة الطاقة الشمسية، وهذه الطاقة انتقلت بدورها من الشمس إلى الأرض بوساطة الموجات الكهرومغناطيسية المستعرضة.

قياس الموجة Measuring a Wave

تعتمد بعض خصائص الموجة على كيفية توليدها؛ في حين تعتمد خصائصها الأخرى على الوسط الذي تنتقل خلاله، وهناك طرائق عديدة لوصف الموجة أو قياسها تتفق جميعها في وصف المصطلحات التي تتعلق بالموجة وحركتها.

المختبر الافتراضي:

توضيح المفاهيم المتعلقة بسلوك الموجات.

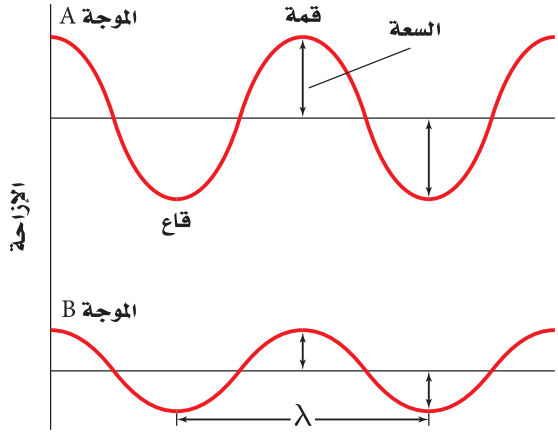
السرعة يمكن إيجاد سرعة انتقال النبضة ـ الموضحة في **الشكل 7–1** ـ أو الموجة الدورية بالطريقة نفسها التي نحدّد بها سرعة سيارة. قس أولاً إزاحة قمة الموجة Δd، ثم اقسم الناتج على الفترة الزمنية Δt لتجد السرعة $v = \Delta d / \Delta t$. وتعتمد سرعة الموجة في الموجات الميكانيكية المستعرضة والطولية – عدا الموجات السطحية – على خصائص الوسط الذي تنتقل خلاله فقط. فمثلا، يؤثر عمق الماء في سرعة موجات الماء المتكونة فيه، في حين تؤثر درجة حرارة الهواء في سرعة موجات الصوت التي تنتشر فيه، بينما تعتمد سرعة موجات النابض على مقدار قوة شدّه، وعلى كتلة وحدة أطواله.

السعة كيف تختلف النبضة المتولدة عند اهتزاز حبل برفق عن تلك النبضة الناتجة عن اهتزازه بعنف؟ يشبه الاختلاف بينهما الفرق بين موجات حوض السباحة الخفيفة وموجات المحيط القوية، وهو أن لها سعات مختلفة. و**سعة الموجة** أو الاهتزازة هي أقصى إزاحة للموجة عن موضع سكونها أو اتزانها. ويوضح **الشكل 8–1** موجتين متشابهتين، إلا أنهما تختلفان في السعة.

تعتمد سعة الموجة على كيفية توليدها، ولا تعتمد على سرعتها. ويجب أن يُبذل شغل أكبر لتوليد موجة سعتها كبيرة. فمثلا، تولّد الرياح القوية موجات ماء سعتها أكبر من سعة الموجات الناتجة عن النسائم اللطيفة. وتنقل الموجة ذات السعة الكبيرة طاقة

■ **الشكل 7–1** تم التقاط هاتين الصورتين بفارق زمني 0.20 s، وخلال هذه الفترة تحركت النبضة 0.80 m، فتكون السرعة المتجهة للموجة 4.0 m/s.

أكبر؛ فالموجة ذات السعة القليلة تحرك الرمل سنتمترات عدة على الشاطئ، أما الموجة ذات السعة الكبيرة فيمكنها اقتلاع الأشجار وتحريكها من مكان إلى آخر. يتناسب معدل نقل الموجات المتحركة للطاقة طرديًّا مع مربع السعة؛ لذا فمضاعفة سعة موجة ما مرتين، يضاعف الطاقة المنقولة بمعدل أربع مرات.

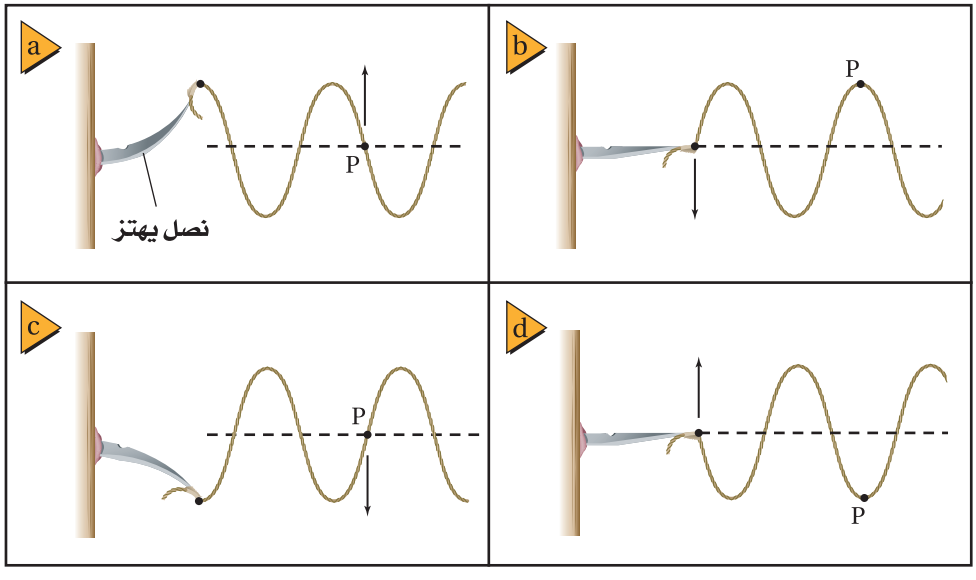


■ **الشكل 8–1** سعة الموجة A أكبر من سعة الموجة B.

الطول الموجي تخيل أنك التقطت صورة فوتوغرافية للموجة بدلاً من التركيز على نقطة واحدة عليها بحيث ترى موجة كاملة في لحظة ما. يبين **الشكل 8–1** النقاط السفلية التي تُسمى **قاع** الموجة، والنقاط العلوية التي تسمى **قمة** الموجة. ويطلق على أقصر مسافة بين أي نقطتين بحيث يتكرّر نمط الموجة نفسه اسم **الطول الموجي**؛ فالمسافة بين قمتين متتاليتين أو قاعيين متتاليين، تساوي الطول الموجي، ويرمز للطول الموجي لموجة ما بالرمز λ .

الطور إن أي نقطتين في الموجة تكونان في الطور نفسه إذا كانت المسافة بينهما تساوي طولًا موجيًّا واحدًا أو مضاعفاته. ويعد جسيمان في وسط ما في الطور نفسه أيضًا، إذا كان لهما الإزاحة نفسها عن موضع الاتزان ولهما السرعة المتجهة نفسها. أما إذا كان الجسيمان في الوسط متعاكسين في الإزاحة وفي السرعة المتجهة، فإنهما يكونان مختلفين في الطور بـ 180° أي أن هناك اختلافًا في الطور بين القمة والقاع بـ 180° أحدهما بالنسبة إلى الآخر. وأي نقطتين في الموجة يمكن أن تكونا مختلفتين في الطور بين 0° و 180° إحداهما بالنسبة إلى الأخرى.

الزمن الدوري والتردد على الرغم من استعمال سرعة الموجة وسعتها لوصف أي موجة إلا أن الزمن الدوري T والتردد f يطبّقان فقط على الموجات الدورية. ولقد تعلمت سابقًا أن الزمن الدوري للحركة التوافقية البسيطة، هو الزمن الذي يحتاج إليه الجسم المهتز حتى يكمل دورة كاملة. وعادة ما يكون مثل هذا الجسم هو مصدر الموجة الدورية أو المسبِّب لها. ويكون الزمن الدوري للموجة مساويًا الزمن الدوري للمصدر. وتوضح الأشكال من **1–9a** إلى **1–9d** تغير موضع النقطة P مع الزمن، والزمن الدوري T يساوي 0.04 s، وهو الزمن الذي يحتاج إليه المصدر حتى يكمل دورة كاملة.



■ **الشكل 9–1** يهتز أحد طرفي حبل متصل بنصل 25 اهتزازة في الثانية، وعليه قطعة من شريط لاصق عند النقطة P. لاحظ تغير موضع النقطة P مع الزمن.

تطبيق الفيزياء

الساعة الذرية
Atomic Clock

تعتمد في عملها على استخدام ترددات رنين معينة من ذرات محددة (السيزيوم أو الربيديوم) للحفاظ على الوقت بدقة، ويتم تنظيم المكونات الالكترونية للساعة الذرية من خلال تردد الاشعاع الكهرومغناطيسي المنبعث من الذرة.

أمّا **تردّد** الموجة f فهو عدد الاهتزازات الكاملة التي يُتمّها الجسم المهتز في الثانية الواحدة. ويُقاس التردد بوحدة هرتز Hz، والهرتز يمثل اهتزازة واحدة في الثانية. وبناءً عليه فإن العلاقة التي تربط بين الزمن الدوري للموجة وترددها هي:

تردد الموجة $f = \frac{1}{T}$

تردد الموجة يساوي مقلوب زمنها الدوري.

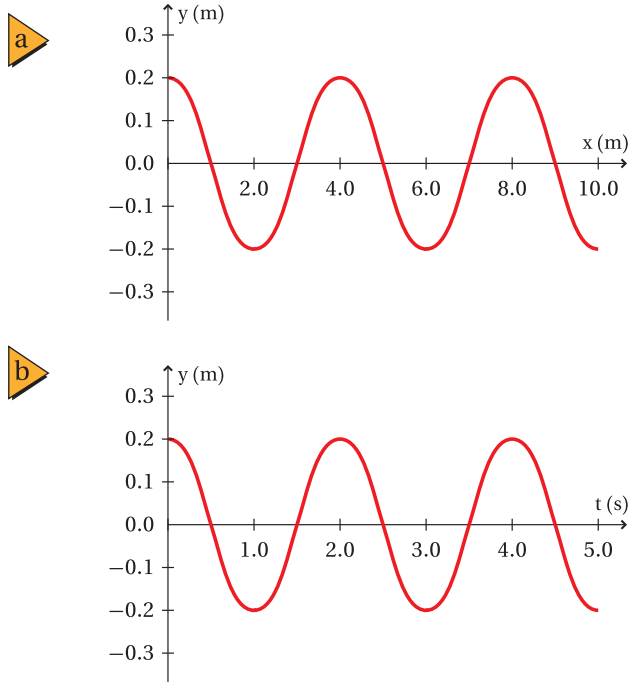
ويعتمد الزمن الدوري للموجة وترددها على مصدرها فقط، ولا يعتمدان على الوسط الذي تنتقل خلاله أو على سرعة الموجة.

وبناءً على ما سبق يمكنك قياس طول الموجة مباشرة؛ حيث إن طول الموجة يعتمد على كل من تردد المصدر وسرعة الموجة. تتحرك الموجة خلال فترة زمنية محددة تساوي زمنًا دوريًّا واحدًا مسافة تساوي طولاً موجيًّا واحدًا؛ لذا فالطول الموجي يساوي سرعة الموجة مضروبًا في الزمن الدوري، $\lambda = vT$. ولأن الحصول على التردد يكون عادة أسهل من الحصول على الزمن الدوري فإن هذه المعادلة تكتب على الشكل التالي:

طول الموجة $\lambda = \frac{v}{f}$

الطول الموجي للموجة يساوي سرعتها مقسومة على ترددها.

تمثيل الموجات إذا التقطت صورة فوتوغرافية لموجة مستعرضة في حبل أو نابض، فستجدها مشابهة لإحدى الموجات الموضحة في **الشكل 7–1**. ويمكن وضع هذه الصورة على ورق رسم بياني لتعطي معلومات أكثر عن الموجة، كما في **الشكل 10a–1**. وبالمثل إذا رصدت حركة جسيم واحد، مثل حركة النقطة P في **الشكل 9–1**، أمكنك تمثيل هذه الحركة بيانيًّا على ورق رسم بياني، بحيث ترسم الإزاحة بوصفها متغيرًا مع الزمن، كما في **الشكل 10b–1**، والذي يمكن من خلاله إيجاد الزمن الدوري.



الشكل 10–1 يمكن تمثيل الموجات بيانيًا، فالطول الموجي لهذه الموجة 4.0 m **(a)**، والزمن الدوري 2.0 s **(b)** الإزاحة أو السعة في كلا الرسمين تساوي 0.2 m فإذا مثّل هذان الرسمان البيانيان الموجة نفسها، فما سرعتها؟

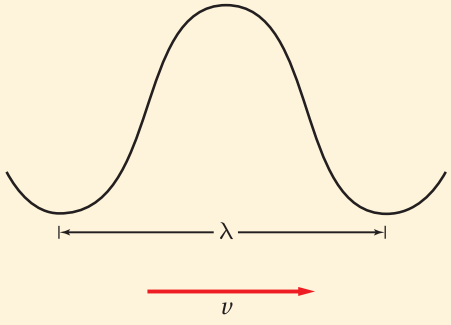
مثـال 3

خصائص الموجة قطعت موجة صوتية ترددها 192 Hz ملعب كرة قدم طوله 91.4 m خلال 0.271 s، احسب:

a. سرعة الموجة.
b. الطول الموجي للموجة.
c. الزمن الدوري للموجة.
d. الطول الموجي والزمن الدوري، إذا أصبح تردد الموجة 442 Hz.

1 تحليل المسألة ورسمها

- ارسم نموذجًا لملعب كرة قدم.
- مثّل متجه السرعة.



المعلوم	المجهول
f=192 Hz	$v = ?$
d=91.4 m	$\lambda = ?$
t= 0.271 s	$T = ?$

2 ايجاد الكمية المجهولة

a. أوجد السرعة v.

$$v = \frac{d}{t}$$

بالتعويض عن $t = 0.271\ s$، $d = 91.4\ m$

$$= \frac{91.4\ m}{0.271 s}$$

$$= 337\ m/s$$

b. أوجد طول الموجة λ.

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

بالتعويض عن $f = 192\ Hz$، $v = 337\ m/s$

$$= \frac{337\ m/s}{192\ Hz}$$

$$= 1.76\ m$$

c. أوجد الزمن الدوري T.

$$T = \frac{1}{f}$$

بالتعويض عن $f = 192\ Hz$

$$= \frac{1}{192\ Hz}$$

$$= 0.00521\ s$$

d. أوجد الطول الموجي والزمن الدوري الجديدين.

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

بالتعويض عن $f = 442\ Hz$ ، $v = 337\ m/s$

$$= \frac{337\ m/s}{442\ Hz} \quad = 0.762\ m$$

$$T = \frac{1}{f}$$

بالتعويض عن $f = 442\ Hz$

$$= \frac{1}{422\ Hz} \quad = 0.00226\ s$$

3 تقويم الجواب

- **هل الوحدات صحيحة؟** الهرتز Hz هو نفسه s^{-1}، لذا فإن $m = s$. $\frac{m/s}{Hz} = \frac{m}{s}$ وهذا صحيح.
- **هل الجواب منطقي؟** السرعة القياسية لموجات الصوت في الهواء 343 m/s تقريبًا، لذا فالجواب 337 m/s منطقي، وكذلك التردد والزمن الدوري منطقيان بالنسبة لموجات الصوت، فالتردد 442 Hz قريب من التردد 440 Hz، وهو التردد القياسي لموجات الصوت.

مسائل تدريبية

11. أطلق فادي صوتًا عاليًا في اتجاه جرف رأسي يبعد عنه 465 m، وسُمع الصدى بعد 2.75 s فما:
    a. سرعة صوت فادي في الهواء؟
    b. تردّد موجة الصوت إذا كان طولها الموجي يساوي 0.750 m؟
    c. الزمن الدوري للموجة؟
12. ولّد مصدرٌ في حبل اضطرابًا تردّده 6.00 Hz ، فإذا كانت سرعة الموجة المستعرضة في الحبل 15.0 m/s، فما طولها الموجي؟
13. تتولّد خمس نبضات في خزان ماء كل 0.100 s ، فإذا كان الطول الموجي للموجات السطحية 1.20 cm، فما سرعة انتشار الموجة؟

توصلت إلى أن الموجات تحمل طاقة مما يمكنها من إنجاز شغل، وربما شاهدت الأضرار الهائلة الناجمة عن العواصف الشديدة والأعاصير القوية أو التآكل البطيء للمنحدرات والشواطئ الناجم عن الموجات الضعيفة اليومية. ومن المهم أن تتذكّر أن سعة الموجة الميكانيكية هي ما تحدّد مقدار الطاقة التي تحملها الموجة، بينما يحدّد الوسط وحده سرعة الموجة.

1-2 مراجعة

14. **السرعة في أوساط مختلفة** إذا سحبت أحد طرفي نابض حلزوني، فهل تصل النبضة الطرف الآخر للنابض في اللحظة نفسها؟ ماذا يحدث لو حركت طرف حبل، باتجاه عمودي على محوره؟ ماذا يحدث عند ضرب طرف قضيب حديد؟ قارن بين سرعة انتقال النبضات في المواد الثلاث.
15. **خصائص الموجة** إذا ولّدت موجة مستعرضة في حبل عن طريق هزّ يدك وتحريكها من جانب إلى آخر، ثم بدأت تهزّ الحبل أسرع وأسرع ولكن دون تغير المسافة التي تتحركها يدك، فماذا يحدث لكل من: السعة، والطول الموجي، والتردد، والزمن الدوري، وسرعة الموجة؟
16. **الموجات تنقل الطاقة** افترض أنه طُلب إليك أنت وزميلك في المختبر توضيح أن الموجة المستعرضة تنقل الطاقة دون انتقال مادة الوسط، فكيف تقومان ذلك؟
17. **الموجات الطولية** صف الموجات الطولية. ما أنواع الأوساط المادية التي تنقل الموجات الطولية؟
18. **التفكير الناقد** إذا سقطت قطرة مطر في بركة فستولّد موجات ذات سعات صغيرة. أما إذا قفز سبّاح في البركة فسيولّد موجات ذات سعات كبيرة. فلماذا لا تولّد الأمطار الغزيرة في أثناء العواصف الرعدية موجات ذات سعات كبيرة؟

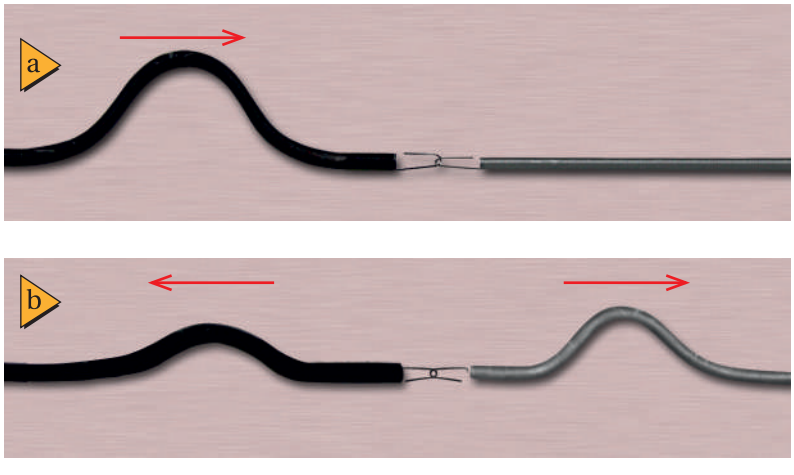
عندما تصل موجة إلى الحد الفاصل بين وسطين فإنها غالبًا ما تنعكس وترتد إلى الخلف داخل الوسط نفسه. وفي حالات أخرى تمر الموجة كلها أو جزء منها خلال الحد الفاصل إلى الوسط الآخر، ويتغير اتجاهها عند الحد الفاصل بين الوسطين. وبالإضافة إلى ذلك ينتج العديد من خصائص سلوك الموجة عن الحقيقة التي تنص على أنه: يمكن أن يكون هناك موجتان أو أكثر في الوسط نفسه خلال الزمن نفسه، بخلاف الجسيمات المادية؛ إذ لا يمكن لجسمين إشغال الحيز نفسه خلال الزمن نفسه.

الموجات عند الحواجز Waves at Boundaries

تذكر من البند السابق أن سرعة الموجة الميكانيكية تعتمد فقط على خصائص الوسط الذي تمر خلاله، ولا تعتمد على سعة الموجة أو ترددها.

بيّن ماذا يحدث عندما تمر موجة خلال حد فاصل بين وسطين كما هو الحال في نابضين أو حبلين مختلفي السمك ولهما الكثافة نفسها ومتصلي الطرفين؟

يبين **الشكل 11–1** نبضة تتحرك من النابض الأكبر سمكًا إلى النابض الأقل سمكا، وعند وصول النبضة الحد الفاصل فإن جزءًا منها سوف ينعكس (يرتد) والجزء الآخر ينتقل إلى النابض الأقل سمكًا، ويكون للنبضة المنعكسة (المرتدة) والنافذة اتجاه الموجة الساقطة. وتكون سعة النبضة المنعكسة أصغر لأن جزءًا من طاقة الموجة الساقطة ينتقل إلى النبضة النافذة، كما تكون سرعة النبضة في النابض الأقل سمكا أكبر. أما عندما تتحرك نبضة من النابض الأقل سمكًا إلى النابض الأكبر سمكًا فتكون النبضة المنعكسة مقلوبة، والنبضة النافذة لها اتجاه الموجة الساقطة.



الشكل 11–1 تمثل نقطة الاتصال بين طرفي النابضين الحد الفاصل بين الوسطين. فعندما تصل النبضة من النابض الأكبر سمكًا إلى الحد الفاصل (a) ينعكس جزء من النبضة وينفذ جزء آخر (b).

الفيزياء في حياتك

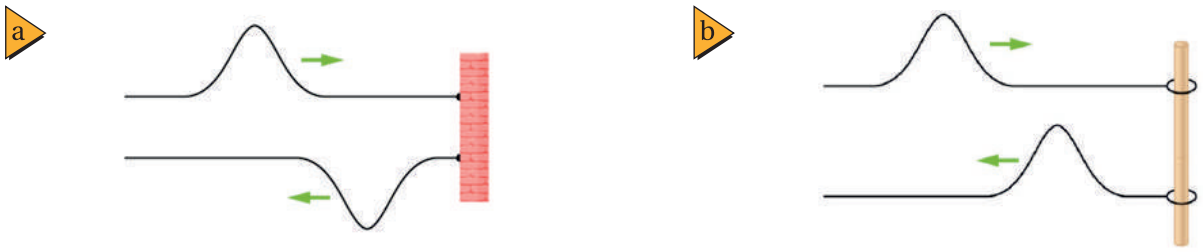
إن تداخل موجات الضوء يمكن أن يستخدم في إنتاج الصور ثلاثية الأبعاد، كما يستخدم تراكب الموجات أيضًا في ضبط الإرسال الإذاعي، حيث يعمل على زيادة كثافة البث في بعض الاتجاهات ويخفضها في اتجاهات أخرى.

تساؤلات جوهرية:

- كيف تعكس الموجات وتنكسر عند وجود حد فاصل بين وسطين؟
- كيف يطبق مبدأ تراكب الموجات في ظاهرة التداخل؟

المفردات:

- الموجة الساقطة
- الموجة المنعكسة
- مبدأ التراكب
- التداخل
- العقدة
- بطن الموجة
- الموجة الموقوفة
- صدر الموجة
- الشعاع
- العمود المقام
- قانون الانعكاس
- الانكسار



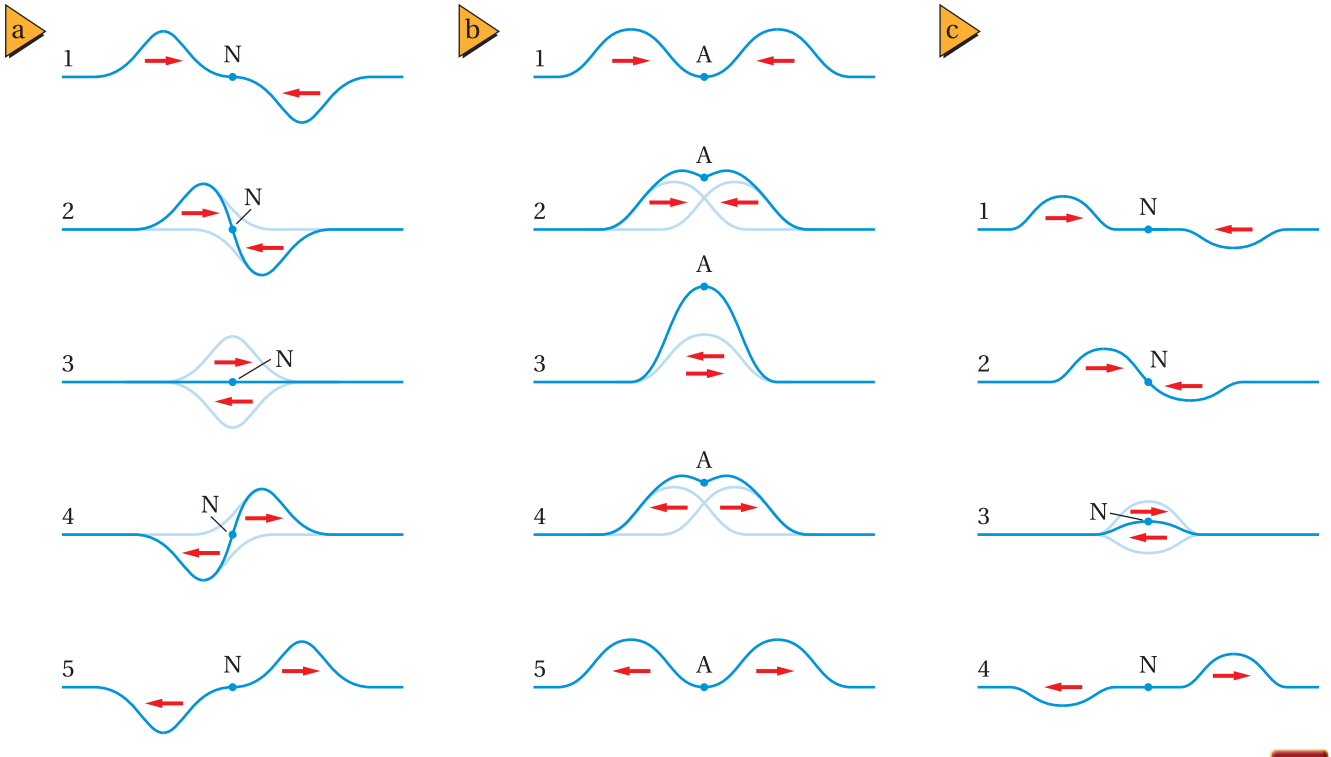
الشكل 12–1 تقترب النبضة من الحائط الصلب وترتد عنه مقلوبة (**a**)، تقترب النبضة في حبل متصل بحلقة حرة الحركة وترتد غير مقلوبة (**b**).

ماذا يحدث لو كان الحد الفاصل حائطًا وليس نابضًا آخر؟ عندما تطلق نبضة (موجة) في نابض مثبت في حائط صلب مصقول تنعكس الطاقة المنقولة عن الحائط إلى الخلف، وتكون سعة النبضة المرتدة مساويةً تقريبًا لسعة النبضة الساقطة. لذا تنعكس معظم طاقة النبضة إلى الخلف، والقليل منها ينتقل إلى الحائط. لاحظ أيضًا أن النبضة تنقلب إلى أسفل نتيجة لقوتي الفعل ورد الفعل – لاحظ **الشكل 12a–1** ، أما لو كان النابض متصلاً بحلقة حرة الحركة حول قضيب ـ كما في **الشكل 12b–1** حد فاصل حر الحركة ـ فإن النبضة تنعكس ولكنها لن تنقلب.

تراكُب الموجات Superposition of Waves

افترض أن نبضة تنتقل في نابض ولاقت نبضة منعكسة، فما الذي يحدث في هذه الحالة؟ سيكون هناك نبضتان في الوسط في المكان والزمان نفسيهما، وتؤثر كل من النبضتين في الوسط بصورة مستقلة. وينص **مبدأ التراكب** على أن الإزاحة الحادثة في وسط والناتجة عن نبضتين أو أكثر تساوي المجموع الجبري للإزاحات الناتجة عن كل نبضة على حدة، أي أنه يمكن اتحاد نبضتين أو أكثر لتكوين نبضة واحدة جديدة. إذا انتقلت النبضتان في اتجاهين متعاكسين مثلاً فإما أن تلغي كل منهما تأثير الأخرى، أو تنتج نبضة لها سعة أكبر أو أصغر من سعة كل منهما. ويسمى الأثر الناتج عن تراكب نبضتين أو أكثر **التداخل**.

الشكل 13–1 عندما تلتقي نبضتان متساويتان تتكون نقطة تُسمى العقدة (N)؛ حيث يبقى الوسط دون اضطراب (**a**). وينتج التداخل البناء في أكبر صورة له عند تكون بطن الموجة (A) (**b**). وإذا كانت سعتا النبضتين المتعاكستين غير متساويتين فسيكون الهدم غير تام (**c**).

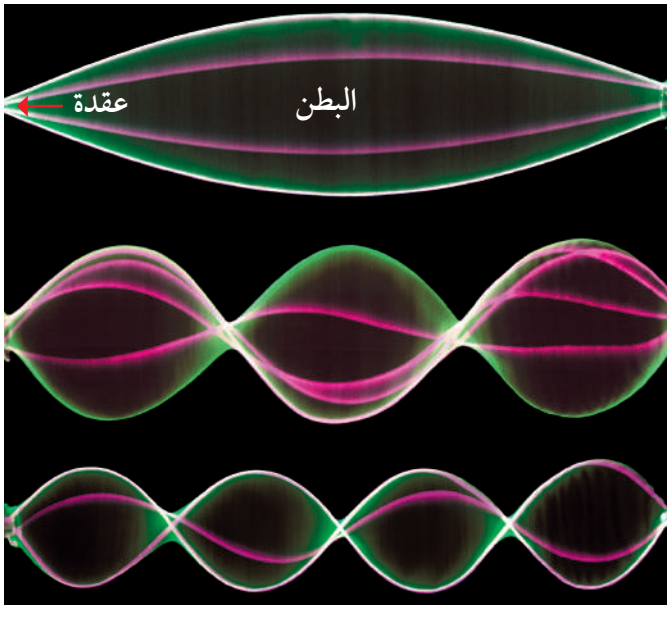


تداخل الموجات يوجد التداخل على شكلين، فإما أن يكون تداخلاً بنائيًّا أو تداخلاً هدميًّا. فعندما تلتقي نبضتان إزاحتيهما الرأسيتين في اتجاهين متعاكسين ـ أي قمة من الموجة الأولى مع قاع من الموجة الثانية ـ تقل إزاحة الوسط عند النقاط كلها في منطقة التداخل، ويكون التداخل هدميًّا. وإذا كانت سعتا الموجتين متساويتين كما في **الشكل 13a–1**، فإن مقدار الإزاحة سيساوي صفرًا. وتُسمى النقطة N التي لم تتحرك مطلقًا **العقدة**. وتستعيد النبضات شكلها الأصلي بعد التداخل وتواصل حركتها.

أما التداخل البنائي فينتج عندما تكون إزاحات الموجات في الاتجاه نفسه، وتكون النتيجة موجة لها سعة أكبر من سعة أي من الموجات كلٍ على حدة. ويبين **الشكل 13b–1** تداخلاً بنائيًّا لنبضتين متساويتين، حيث تتكون نبضةٌ ذات سعة أكبر عندما تلتقي النبضتان، ويطلق على المنطقة التي تقابل أكبر سعة **البطن**. وتمر النبضتان بعد ذلك إحداهما خلال الأخرى، دون أي تغير في شكليهما أو حجميهما. وإذا كانت سعتا النبضتين غير متساويتين، فإن النبضة الناتجة من التداخل تساوي المجموع الجبري لإزاحتي النبضتين، كما في **الشكل 13c–1**.

الموجات الموقوفة (المستقرة) يمكنك تطبيق مفهوم تراكب الموجات للتحكم في تكوين موجات مختلفة السعة. فإذا ثُبّت أحد طرفي حبل أو نابض حلزوني في نقطة ثابتة مثل مقبض باب، ثم بدأتَ بهز الطرف الآخر فإن الموجات تنطلق من يدك متحركة في اتجاه الطرف الآخر الثابت، ثم ترتد عند هذه النهاية الثابتة وتنقلب، وتعود إلى يدك ثانية.

ماذا تفعل لو أردت زيادة سعة الموجة التي ولّدتها؟ افترض أنك ضبطت حركة يدك بحيث يكون الزمن الدوري لاهتزازها مساويًا للزمن الذي تحتاج إليه النبضة حتى تكمل دورة كاملة، من يدك إلى الباب ثم العودة. عندئذٍ سوف تضاف الإزاحة التي تولّدها يدك في كل مرة إلى إزاحة الموجة المنعكسة. والنتيجة أن اهتزاز الحبل كقطعة واحدة سيكون أكبر من حركة يدك، ويمكن توقع ذلك استنادًا إلى معرفتك بالتداخل البنائي. وتعد هذه الاهتزازة ذات السعة الكبيرة مثالاً على الرنين الميكانيكي. وتكون العقدتان عند طرفي الحبل، في حين يكون البطن في وسط النبضة، كما في **الشكل 14a–1**. وتبدو الموجة موقوفة ولذا تسمى **الموجة الموقوفة** أو **المستقرة**؛ أيْ أن الموجة الموقوفة هي تداخل موجتين متساويتين في التردد والسعة تتحركان في اتجاهين متعاكسين. وإذا ضاعفت تردد الاهتزاز تتولد عقدة جديدة وبطن جديد في الحبل، ويظهر الحبل مهتزًا في قسمين. وعند زيادة التردد أكثر تتولد عقد وبطون أكثر، كما في **الشكل 14c–1، 14b–1**.



الشكل 14–1 يُنتج التداخل موجات موقوفة في الحبل، وبزيادة التردد يزداد عدد العقد والبطون، كما هو واضح من أعلى الشكل إلى أسفله.

تجربة

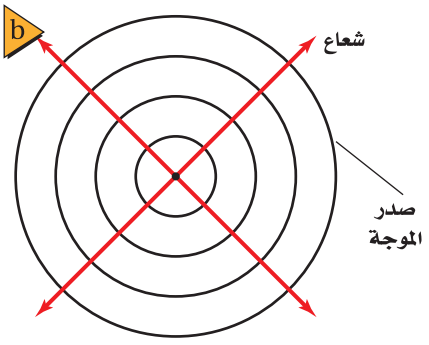
تداخل الموجات

يمكنك باستعمال نابض حلزوني توليد موجة تضاغطية متغيرة في سعتها وسرعتها واتجاهها كما في الموجة المستعرضة.

1. **صمّم تجربة** لاختبار ما يحدث عند التقاء موجتين من اتجاهين مختلفين.
2. نفّذ التجربة وسجّل ملاحظاتك.

التحليل والاستنتاج

3. هل تغيّرت سرعة أي موجة منهما؟
4. هل ترتدّ هاتان الموجتان إحداهما عن الأخرى؟ أم تمر كل منهما خلال الأخرى؟



■ **الشكل 15–1** تنتشر الموجات الدائرية إلى الخارج بعيدًا عن مصدرها (**a**). ويمكن تمثيل الموجة بدوائر ترسم عند قمم الموجات الدائرية (**b**). لاحظ أن الأشعة متعامدة مع صدر الموجة.

تطبيق الفيزياء

لوح كلادني
Cladni plate

أداة تستخدم للتعرف على تأثير الموجات الصوتية حيث يتم رش رمل ناعم على سطح معدني ثم يتم التأثير على هذا السطح فيهتز منتجًا أشكالًا وأنماطًا هندسية معقدة حيث تصطف حبيبات الرمل في المناطق التي لاتهتز وكلما كان تردد الاهتزازات أكبر كان النمو أكثر تعقيدًا.

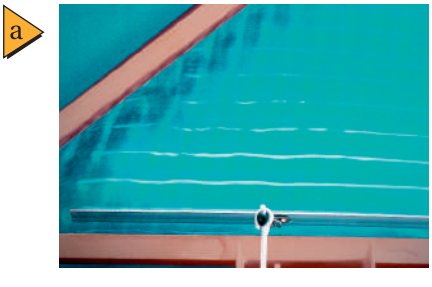
الموجات في بعدين Waves in Two Dimensions

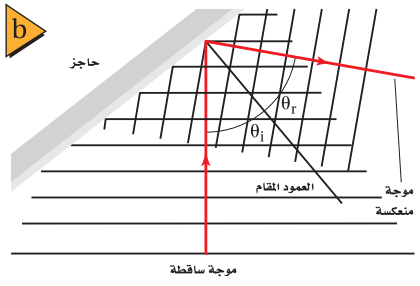
درست حتى الآن الموجات في حبل أو نابض، عندما تنعكس عن حاجز صلب، حيث تصبح السعة صفرًا نتيجة التداخل الهدمي. هذه الموجات الميكانيكية تتحرك في بُعد واحدٍ. أما الموجات على سطح الماء فتتحرك في بعدين، وستدرس لاحقًا الموجات الكهرومغناطيسية وموجات الصوت التي تتحرك في ثلاثة أبعاد، فكيف يمكن توضيح الموجات في بعدين؟

تمثيل الموجات في بعدين عندما ترمي حجرًا صغيرًا في بركة ماء ساكنة، ترى قمم وقيعان الموجات الدائرية الناتجة تنتشر إلى الخارج في جميع الاتجاهات. ويمكن تمثيل هذه الموجات برسم دوائر تُعبّر عن قمم الموجة. فعندما تضع رأس إصبعك في الماء الساكن وتحركه بتردد ثابت ستنتج دوائر متتابعة متحدة في مراكزها، ويكون إصبعك مركز تلك الدوائر التي تُسمى صدور الموجات. **فصدر الموجة** هو الخط الذي يمثل قمة الموجة في بعدين. ويمكن استعمال صدر الموجة لتوضيح الموجات بأي شكل كانت، ومن ذلك الموجات الدائرية والموجات المستقيمة. ويوضح **الشكل 15a–1** الموجات الدائرية في الماء، بينما يوضح **الشكل 15b–1** صدور الموجات التي تمثل موجات الماء هذه. وقد رسمت صدور الموجات بقيم تبين الطول الموجي لهذه الموجات، ولكن لا تبين سعتها.

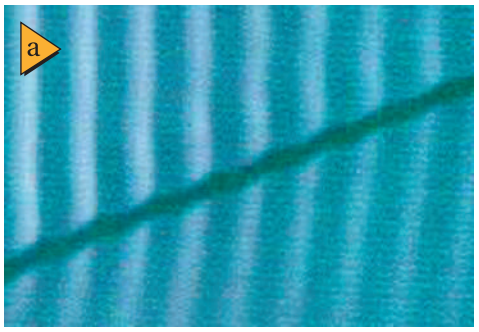
ومهما يكن شكل الموجات التي تتحرك في بعدين فإنها تتحرك في اتجاه متعامد مع صدور هذه الموجات، ويُمثَّل هذا الاتجاه **بشعاع** على شكل خط يصنع زاوية قائمة مع صدر الموجة أو مماسها. وإذا أردت بيان اتجاه انتقال الموجة فقط فإنه من الملائم أن ترسم أشعة بدلاً من صدور الموجات.

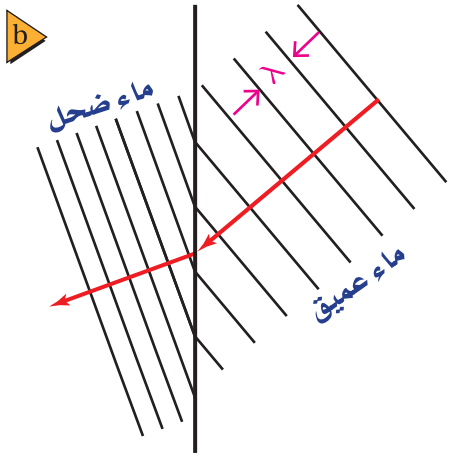
انعكاس الموجات في بعدين يستعمل حوض الموجات لبيان خصائص الموجات المنتشرة في بعدين؛ إذ يحتوي حوض الموجات على طبقة ماء ضحلة، وألواح اهتزاز تولد نبضات موجية دائرية أو مستقيمة، أو تولد ـ كما موضح في **الشكل 16a–1** ـ فإن موجات ماء تتحرك بتردد ثابت. وعند إضاءة المصباح الموجود فوق الحوض يتكون ظل تحت الحوض يبين موقع قمم الموجات وقيعانها، وعندما تنتشر موجة نحو الحاجز، تنعكس عنه في اتجاه محدد.





■ **الشكل 16–1** نبضة موجة مرتدة عن حاجز في حوض الموجات (**a**). يوضّح المخطط الشعاعي، التسلسل الزمني لاقتراب الموجة من الحاجز وانعكاسها عنه إلى اليمين (**b**).





■ **الشكل 1–17** عندما تتحرك موجات الماء فوق منطقة الماء الضحلة، حيث يوجد لوح الزجاج في حوض الموجات تتباطأ ويقل طولها الموجي (a). ويمكن تمثيل الانكسار بمخطّط صدور الموجات والأشعة (b).

ويمكن تمثيل اتجاه انتشار الموجات بالمخطّط الشعاعي المبين في **الشكل 1–16b**. فالحاجز فيمثل بخط مستقيم يفصل بين الوسطين، والخط المتعامد مع الحاجز عند نقطة السقوط يسمى **العمود المقام**، وتسمى الزاوية المحصورة بين الشعاع الساقط والعمود المقام زاوية السقوط. أما الزاوية المحصورة بين الشعاع المنعكس والعمود المقام فتسمى زاوية الانعكاس، وينص **قانون الانعكاس** على أن زاوية السقوط تساوي زاوية الانعكاس.

انكسار الموجات في بعدين يمكن استعمال حوض الموجات كذلك لتمثيل سلوك الموجات عندما تنتقل من وسط إلى آخر. يوضّح **الشكل 1–17a** لوحًا زجاجيًّا موضوعًا في حوض الموجات، ويكون سمك طبقة الماء فوقه أقل من سمك طبقة الماء في بقية الحوض؛ حيث يعمل ذلك كوسط مختلف. وبانتقال الموجة من منطقة الماء العميق إلى منطقة الماء الضحل تقل سرعتها، ويتغير اتجاهها، ولأن الموجات في منطقة الماء الضحلة تولّدت من الموجات القادمة من منطقة الماء الأعمق، فإن ترددها لن يتغير. واستنادًا إلى المعادلة $\lambda = v/f$ ، فإن تناقص سرعة الموجات يعني أن الطول الموجي يكون أقصر في منطقة الماء الضحلة. ويعرف التغير في اتجاه انتشار الموجات عند الحد الفاصل بين وسطين مختلفين **بالانكسار**. ويبين **الشكل 1–17b** صدر الموجة ونموذج المخطّط الشعاعي للانكسار، وعندما تدرس انعكاس الضوء وانكساره في الفصول القادمة ستتعرف قانون الانكسار المعروف بقانون سنل.

قد تعلم أن سبب الصدى هو انعكاس الصوت عن سطح صلب مثل حائط مخزن كبير، أو انعكاسه عن جرف صخري بعيد، وأن الانكسار مسؤول جزئيًّا عن تكون قوس المطر، فعندما يمر الضوء الأبيض خلال قطرات المطر تعمل هذه القطرات على تحليل الضوء الأبيض إلى ألوانه (ألوان الطيف المرئي السبعة) بفعل الانكسار.

1-3 مراجعة

19. **الموجات عند الحواجز** أيّ خصائص الموجة الآتية لا تتغير، عندما تمر الموجة خلال حد فاصل بين وسطين مختلفين: التردد، السعة، الطول الموجي، السرعة، الاتجاه؟

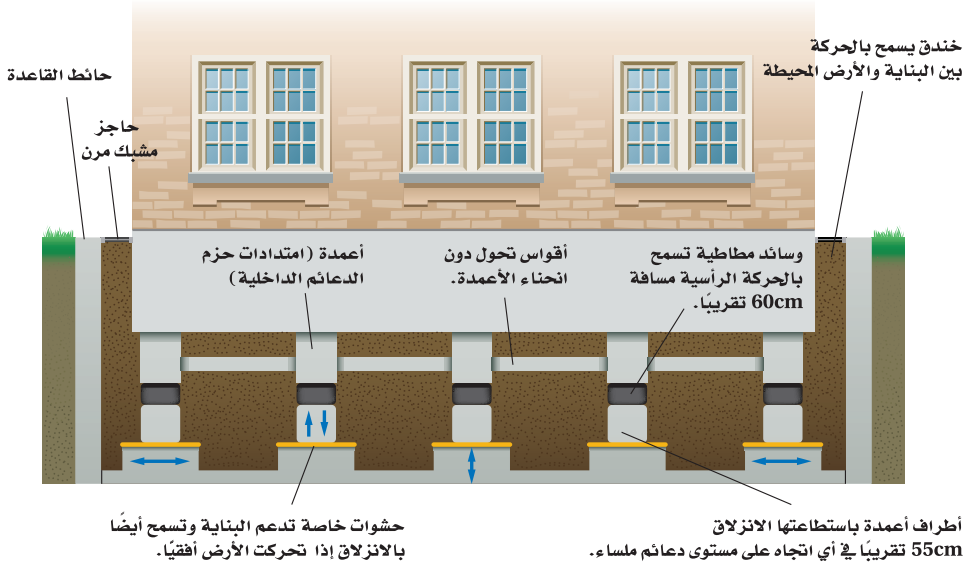
20. **انكسار الموجات** لاحظ **الشكل 1–17a**، وبين كيف يتغير اتجاه الموجة عندما تمر من وسط إلى آخر. وهل يمكن أن تعبر موجة في بعدين حدًّا فاصلًا بين وسطين دون أن يتغير اتجاهها؟ وضح ذلك.

21. **التفكير الناقد** هناك طريقة أخرى لفهم انعكاس الموجات، وهي أن تغطي الطرف الأيمن لكل رسم في **الشكل 1–13a** بقطعة ورق، على أن يكون طرف الورقة موجودًا عند النقطة N (العقدة). ثم تركز على الموجة الناتجة التي تظهر باللون الأزرق الغامق، وتلاحظ أنها تبدو مثل موجة منعكسة عن حد فاصل. فهل هذا الحد الفاصل حائط صلب أم ذو نهاية مفتوحة؟

الحماية من الزلازل Earthquake Protection

الزلزال انفجار شديد وعنيف في مكان ما تحت سطح الأرض. تكون الموجات الميكانيكية المنتشرة من الزلازل موجات مستعرضة وموجات طولية. تعمل الموجات المستعرضة على هزّ المباني أفقيًّا، في حين تهز الموجات الطولية المباني رأسيًّا. ولا يمكن توقع حدوث الزلازل أو منع حدوثها حتى الآن، وما دام الأمر كذلك فكيف يمكن اتقاء أضرارها؟

ولتقليل الاهتزاز الرأسي للبناء توضع نوابض رأسية داخل الأجزاء الرأسية لهيكل البناء، وتصنع هذه النوابض من مركب مطاطي قوي مضغوط داخل أسطوانات مصنوعة من الفولاذ الثقيل والقوي. أما الاهتزاز الجانبي فيمكن التقليل منه بوضع دعائم انزلاقية تحت أعمدة البناء والتي تحفظ هيكل البناء ثابتًا إذا تحركت الأرض تحته إلى جانب من الجوانب.



تقلّل التصاميم الحديثة للأبنية الدمار الناتج عن الهزات الأرضية

نظرًا إلى المعرفة المتزايدة حول الزلازل، بعد الاكتشافات الحديثة للكيفية التي تسبّب بها الزلازل تدمير المنشآت المختلفة، يجب تصميم المباني بحيث تصمد في وجه الزلازل، وتكون قادرة على مقاومة آثارها التدميرية بالإضافة إلى تحديث المباني القائمة حاليًا وتعديلها بعد تلك الاكتشافات الحديثة.

تقليل الدمار تبنى معظم الجسور والممرات المنحدرة باستعمال طبقات خرسانية مدعومة بالفولاذ بعضها فوق بعض، وتحافظ قوة الجاذبية الأرضية عليها في مكانها. وتكون هذه التراكيب والمباني قوية جدًّا في ظل الظروف العادية. ولكنها تهتز جزئيًّا إذا تعرضت لزلازل قوية. لذا تتطلب قواعد البناء الحديثة أن تربط أجزاء البناء بعضها ببعض بوساطة قطع فولاذية ثقيلة وقوية.

ويمكن الحد من الأضرار التي يسببها الزلزال للمباني عن طريق السماح بحدوث كمية صغيرة من الحركة المسيطر عليها بين هيكل البناء وقواعده.

أما التراكيب البنائية الطويلة ومنها الأنفاق والجسور فيجب أن تبنى بحيث تبقى رأسية أو أفقية إذا حدث قص أو صدع في الأرض أسفلها. فالجسر الذي يربط مملكة البحرين بالمملكة العربية السعودية له وصلات وروابط مرنة تجعله ثابتًا.

التوسع

1. **ابحث** ما المواد التي يتركب منها بناء مدرستك؟ وكيف بُنيت قواعد هذا البناء؟
2. **لاحظ** ابحث عن بناء فيه تصدع أو تشقق في أحد جدرانه، وما سبب حدوثه؟ ولماذا اتخذ ذلك الشكل أو المسار؟ وماذا يحدث للبناء إذا تعرّض لزلزال؟

الفصل 1
دليل الدراسة

1–1 الحركة الدورية Periodic Motion

المفردات

- الحركة الدورية
- الحركة التوافقية البسيطة
- الزمن الدوري
- السعة – الرنين
- قانون هوك
- البندول البسيط

الفكرة الرئيسة: الحركة التي تتكرر خلال أزمنة متساوية تدعى بالحركة الدورية.

- الحركة الدورية هي أيّ حركة تتكرر في دورة منتظمة، وفي ازمنة متساوية.
- تنتج الحركة التوافقية البسيطة عندما تتناسب قوة الارجاع المؤثرة في الجسم طرديًّا مع إزاحة الجسم عن وضع الاتزان. وتحقق هذه القوة قانون هوك. $F = -kx$
- تحسب طاقة الوضع المرونية المختزنة في نابض يحقق قانون هوك بالمعادلة: $PE_{sp} = \frac{1}{2}kx^2$
- يمكن حساب الزمن الدوري لبندول بسيط بالمعادلة: $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$

1–2 خصائص الموجات Wave Properties

المفردات

- الموجة
- نبضة موجية
- الموجة الدورية
- الموجة المستعرضة
- الموجة الطولية
- سعة الموجة
- الطول الموجي
- التردد

الفكرة الرئيسة: تنتقل الطاقة بواسطة الموجات دون نقلٍ للمادة.

- تنقل الموجة الطاقة دون أن تنقل مادة الوسط.
- تكون إزاحة الوسط في الموجة المستعرضة متعامدة مع اتجاه حركة الموجة. أمّا في الموجة الطولية فتكون الإزاحة موازية لاتجاه حركة الموجة.
- التردّد هو عدد الدورات في الثانية، ويرتبط التردد بالزمن الدوري من خلال المعادلة التالية:

$$f = \frac{1}{T}$$

- يمكن حساب طول موجة منتشرة بالمعادلة: $\lambda = \frac{v}{f}$

1-3 سلوك الموجات Wave Behavior

المفردات

- الموجة الساقطة
- الموجة المنعكسة
- مبدأ التراكب
- التداخل
- العقدة
- بطن الموجة
- الموجة الموقوفة
- صدر الموجة
- قانون الانعكاس
- الانكسار

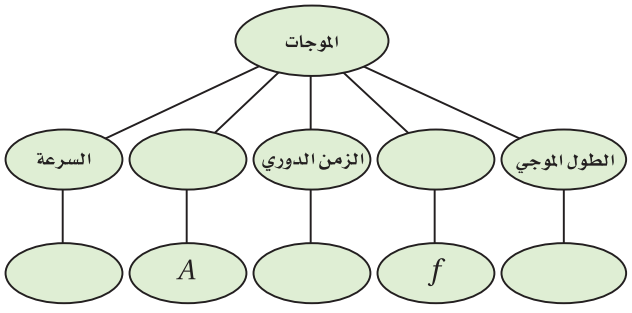
الفكرة الرئيسة: عند إلتقاء أكثر من موجة فإنها تتداخل.

- عندما تعبر موجة خلال حد فاصل بين وسطين مختلفين ينفذ جزء منها كما ينعكس الجزء الآخر.
- ينص مبدأ التراكب على أن الإزاحة الحادثة في الوسط والناتجة عن موجتين أو أكثر تساوي المجموع الجبري للإزاحات الناتجة عن كل موجة على حِدة.
- يحدث التداخل عندما تتحرك موجتان أو أكثر في الوسط نفسه وفي الوقت نفسه.
- إذا انعكست موجة في بُعدين عن حد فاصل بين وسطين فإن زاوية السقوط تساوي زاوية الانعكاس.
- الانكسار هو تغير اتجاه الموجات عند حد فاصل بين وسطين مختلفين.

الفصل 1
التقويم

خريطة المفاهيم

22. أكمل خريطة المفاهيم أدناه باستعمال المصطلحات والرموز التالية: السعة، التردد، T ، λ ، v.



إتقان المفاهيم

23. ما الحركة الدورية؟ أعط ثلاثة أمثلة عليها.

24. ما الفرق بين الزمن الدوري والتردد؟ وكيف يرتبطان؟

25. إذا حقق نابض قانون هوك؛ فكيف يكون سلوكه؟

26. كيف يمكن أن نستخلص من رسم بياني للقوة والإزاحة قيمةَ ثابت النابض لنابضٍ ما؟

27. كيف يمكن أن نستخلص من الرسم البياني للقوة والإزاحة طاقةَ الوضع في نابضٍ ما؟

28. هل يعتمد الزمن الدوري لبندول على كتلة ثقله؟ وهل يعتمد على طول خيطه؟ وعلامَ يعتمد الزمن الدوري للبندول أيضًا؟

29. ما الطرائق العامة لانتقال الطاقة؟ أعط مثالين على كل منها.

30. ما الفرق الرئيس بين الموجات الميكانيكية والموجات الكهرومغناطيسية؟

31. ما الفروق بين الموجة المستعرضة، والموجة الطولية والموجة السطحية؟

32. انتقلت موجات خلال نابض طوله ثابت، أجب عن السؤالين التاليين:

a. هل تتغير سرعة الموجات في النابض؟ وضح ذلك.

b. هل يتغير تردد الموجة في النابض؟ وضح ذلك.

33. افترض أنك ولّدت نبضة خلال حبل، فكيف تقارن موضع نقطة على الحبل قبل وصول النبضة مقارنة بموضع النقطة بعد مرور النبضة؟

34. ما الفرق بين نبضة الموجة والموجة الدورية؟

35. افترض أنك ولّدت موجة مستعرضة بهزّ أحد طرفي نابض جانبيًّا، فكيف يكون تردد يدك مقارنة بتردد الموجة؟

36. متى تكون النقاط في موجة في الطور نفسه؟ ومتى تكون في حالة اختلاف في الطور؟ أعط مثالاً على كل حالة.

37. صف العلاقة بين سعة موجة والطاقة التي تحملها.

38. عندما تمر موجة خلال حد فاصل بين حبل رفيع وآخر سميك كما في **الشكل 18–1** ستتغير سرعتها وطولها الموجي، ولن يتغير ترددها. فسر لماذا يبقى التردد ثابتًا.

الشكل 18–1

تقويم الفصل 1

39. الكمان ثُبتت شريحة فلزية رقيقة من مركزها، ونُثرَ عليها سكر. فإذا نقر على قوس الكمان فإن أحد طرفي الشريحة يبدأ في الاهتزاز، ويبدأ السكر في التجمع في مساحات محددة، ويتحرك مبتعدًا عن مساحات أخرى. صف هذه المناطق بدلالة الموجات الموقوفة.

40. إذا اهتز حبل مشكّلا أربعة أجزاء أو أقسام، فإنه يوجد عليه نقاط يمكن أن تلمسها دون أن تُحدث اضطرابًا في حركته. بيّن عدد هذه النقاط.

41. مرّت صدور موجات بزاوية من وسط إلى آخر، وتحركت فيه بسرعة مختلفة. صف تغيرين في صدور الموجات، وما الذي لم يتغير؟

تطبيق المفاهيم

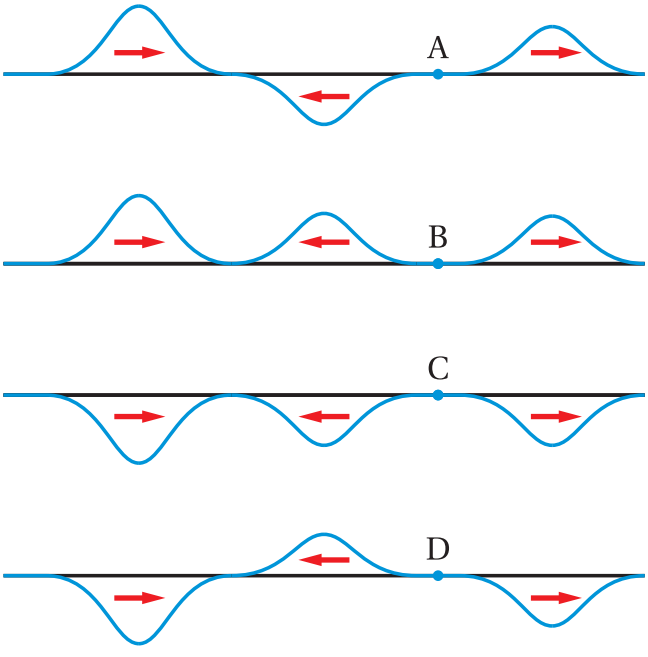
42. هل يمكن استعمال ساعة بندول في محطة فضائية دولية تتحرك في مدارها؟ وضح ذلك.

43. افترض أنك أمسكت قضيبًا فلزيًّا طوله 1 m، وضربت أحد طرفيه بمطرقة، في اتجاه موازٍ لطوله أولاً، ثم في اتجاه يصنع زاوية قائمة مع طوله ثانيًا. صف الموجات المتولّدة في الحالتين.

44. افترض أنك غمست إصبعك بشكل متكرّر في حوض مملوء بالماء لتوليد موجات دائرية، فماذا يحدث لطول الموجة إذا حركت إصبعك بسرعة بشكل متزايد؟

45. افترض أنك أحدثت نبضة واحدة في نابض مشدود، فما الطاقة التي يتطلبها إحداث نبضة لها ضعفي السعة؟

46. تكون النبضة اليسرى في كل واحدة من الموجات الموضحة في **الشكل 19–1** أدناه هي النبضة الأصلية، وتتحرك إلى اليمين، وتكون النبضة التي في الوسط هي النبضة المنعكسة، بينما تكون النبضة عن يمينك هي النبضة النافذة. صف صلابة الحد الفاصل عند النقاط A، B، C، D.



الشكل 19–1

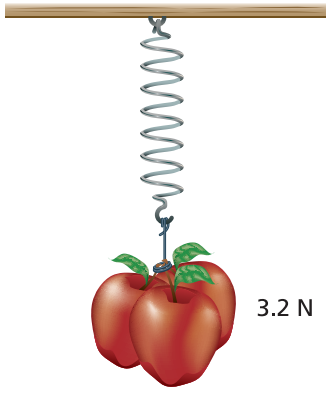
إتقان حل المسائل

1–1 الحركة الدورية

47. ماصّات الصدمات إذا كان ثابت كل نابض من نوابض سيارة وزنها 12000 N يساوي 25000 N/m. فكم ينضغط كل نابض إذا وقع عليه ربع وزن السيارة؟

تقويم الفصل 1

48. إذا استطال نابض مسافة 0.12 m عندما علق في أسفله عدد من التفاحات وزنها 3.2 N كما في **الشكل 20–1**. فما مقدار ثابت النابض؟



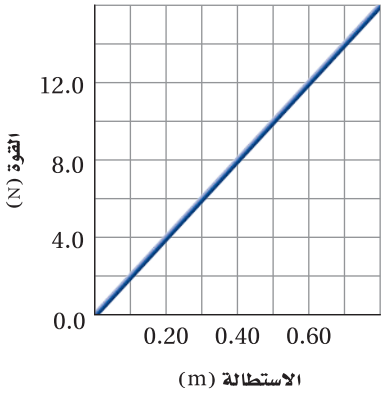
الشكل 20–1

49. **قاذفة الصواريخ** تحتوي لعبة قاذفة الصواريخ على نابض ثابته يساوي 35 N/m، ما المسافة التي يجب أن ينضغطها النابض حتى يختزن طاقة مقدارها 1.5 J؟

50. يبين **الشكل 21–1** العلاقة البيانية بين القوة المؤثرة في نابض ومقدار استطالته. احسب:

a. ثابت النابض.

b. الطاقة المخزّنة في النابض عندما يستطيل بمقدار 0.5 m



الشكل 21–1

2–1 خصائص الموجات

51. **موجات المحيط** إذا كان طول موجة محيطية 12.0 m، وتمر بموقع ثابت كل 3.0 s، فما سرعة الموجة؟

52. تنتقل موجة ماء في بركة مسافة 3.4 m في 1.8 s، فإذا كان الزمن الدوري للاهتزازة الواحدة يساوي 1.1 s، فما:

a. سرعة موجات الماء؟

b. الطول الموجي لهذه الموجات؟

53. **السونار** يرسل سونار (جهاز يكشف المواقع تحت سطح الماء عن طريق الصدى) في الماء إشارة ترددها 1.00×10^6 Hz وطولها الموجي يساوي 1.50 mm، فما:

a. سرعة الإشارة في الماء؟

b. الزمن الدوري للإشارة في الماء؟

c. الزمن الدوري للإشارة في الهواء؟

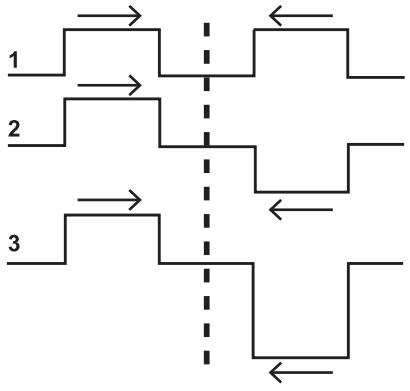
54. جلس عمر وطارق بعد السباحة على شاطئ بركة، وقدّرا المسافة الأفقية بين قاع الموجة السطحية وقمتها بمقدار 3.0 m، فإذا عدّا 12 موجة كاملة مرت بالشاطئ خلال 20.0 s، فاحسب سرعة انتشار الموجات.

55. **الزلازل** إذا كانت سرعة الموجات المستعرضة الناتجة عن زلزال 8.9 km/s وسرعة الموجات الطولية 5.1 km/s، وسجّل جهاز السيزموجراف زمن وصول الموجات المستعرضة قبل وصول الموجات الطولية بـ 68 s، فكم يبعد مركز الزلازل؟

تقويم الفصل 1

1–3 سلوك الموجات

56. ارسم الموجة المحصلة في كل من الأوضاع الثلاثة الموضحة في **الشكل 22–1** عندما يقع مركزا نبضتي الموجتين المتقاربتين على الخط المنقط، أيْ تكون النبضات في حالة تراكب.



الشكل 22–1

57. **القيثارة** إذا كانت سرعة الموجة في وتر قيثارة 265 m/s، وكان طول الوتر 63 cm ، وقد حرّكته من مركزه بسحبه إلى أعلى ثم تركه، سوف تتحرك نبضة في اتجاهين، ثم تنعكسان عند نهايتي الوتر.

a. ما الزمن الذي تحتاج إليه النبضة حتى تصل طرف الوتر ثم تعود إلى مركزه؟

b. هل يكون الوتر أعلى موضع سكونه أم أسفله عندما تعود النبضتان؟

c. إذا حرّكت الوتر من نقطة تبعد 15 cm عن أحد طرفيه فأين تلتقي النبضتان؟

مراجعة عامة

58. **تأرجح جسر** يتأرجح طارق وحسن بالحبال تحت جسر فوق أحد الأنهار،ويتأرجحان عدة دورات جيئة وذهابًا، ثم يسقطان في النهر. أجب عن الاسئلة التالية:

a. إذا استخدم طارق حبلاً طوله 10.0 m، فما الزمن الذي يحتاج إليه حتى يكمل دورة واحدة؟

b. إذا كانت كتلة حسن تزيد 20 kg على كتلة طارق، فكم تتوقع أن يختلف الزمن الدوري لحسن عما هو لطارق؟

59. **موجات الراديو** تبث إشارات راديو Am بترددات بين 550 kHz و1600 kHz وتنتقل بسرعة 3.00×10^8 m/s. أجب عن الاسئلة التالية:

a. ما مدى الطول الموجي لهذه الإشارات؟

b. إذا كان مدى ترددات FM بين 88 MHz (ميجا Hz) و 108 MHz وتنتقل بالسرعة نفسها. فما مدى الطول الموجي لموجات FM؟

60. **القفز بالحبل المطاطي** قفز لاعب منطاد على ارتفاع عالٍ بوساطة حبل نجاة قابل للاستطالة طوله 540 m، وعند اكتمال القفزة كان اللاعب معلقًا بالحبل الذي أصبح طوله 1710 m، ما مقدار ثابت النابض لحبل النجاة إذا كانت كتلة اللاعب 68 kg؟

تقويم الفصل 1

التفكير الناقد

61. إنشاء الرسوم البيانية واستخدامها عُلّقت عدة كتل في نهاية نابض، وقيست الزيادة في طول النابض. ويبين **الجدول 1–1** البيانات التي تم الحصول عليها.

الجدول 1–1

الأوزان المعلقة في النابض	
القوة F (N)	الاستطالة x (m)
2.5	0.12
5.0	0.26
7.5	0.35
10.0	0.50
12.5	0.60
15.0	0.71

a. مثّل بيانيًّا القوة المؤثرة في النابض مقابل الاستطالة في النابض، على أن ترسم القوة على المحور الرأسي (y).

b. احسب ثابت النابض من الرسم البياني.

c. استخدم الرسم البياني في إيجاد طاقة الوضع المرونية (المخزّنة) في النابض عندما يستطيل النابض مسافة 0.50 m .

الكتابة في الفيزياء

62. بحث درس العالم كرستيان هيجينز الموجات، وحدث خلاف بينه وبين نيوتن حول طبيعة الضوء. قارن بين تفسير كل منهما لظواهر الانعكاس والانكسار. أيّ النموذجين تؤيد؟ ولماذا؟

مراجعة تراكمية

63. تقطع سيارة سباق كتلتها 1400 kg مسافة 402 m خلال 9.8 s، فإذا كانت سرعتها النهائية 112 m /s، فما:

a. مقدار الطاقة الحركية النهائية للسيارة؟

b. أقل مقدار من الشغل بذله محرك السيارة؟ ولماذا لا يمكنك حساب مقدار الشغل الكلي المبذول؟

c. مقدار التسارع المتوسط للسيارة؟

64. تهتز كرة إلى أعلى وإلى أسفل عند طرف نابض مثبت رأسيًّا. صف تغيرات الطاقة التي تحدث خلال دورة كاملة، وهل تغيرت الطاقة الميكانيكية الكلية؟

اختبار مقنن

أسئلة اختيار من متعدد

اختر رمز الإجابة الصحيحة في كلٍ مما يأتي:

1. ما قيمة ثابت نابض يخزّن طاقة وضع مقدارها 8.67 J عندما يستطيل مسافة 247 mm؟

A) 70.2 N/m
B) 71.1 N/m
C) 142 N/m
D) 284 N/m

2. ما مقدار القوة المؤثرة في نابض له ثابت مقداره 275 N/m ويستطيل مسافة 14.3 cm؟

A) 2.81 N
B) 19.2 N
C) 39.3 N
D) 3.93×10^{30} N

3. إذا عُلّقت كتلة في نهاية نابض كما في الشكل أدناه، فاستطال مسافة 0.85m، فما مقدار ثابت النابض؟

A) 0.25 N/m
B) 0.35 N/m
C) 26 N/m
D) 3.5×10^{2} N/m

4. يسحب نابض بابًا لكي يغلقه. ما مقدار الشغل المبذول عندما يسحب النابض الباب بسرعة ثابتة بحيث تتغيّر استطالة النابض من 85.0 cm إلى 5.0 cm، علمًا بأن ثابت النابض 350 N/m؟

A) 112 N.m
B) 130 J
C) 224 N.m
D) 1.12×10^{3} N/m

5. ما تردّد موجة زمنها الدوري 3 s؟

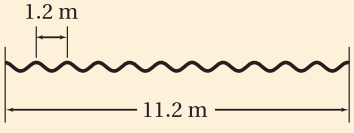
A) 0.3 Hz
B) 30 Hz
C) $\frac{\pi}{3}$ Hz
D) 3 Hz

6. أيّ الخيارات التالية يصف الموجة الموقوفة؟

	الموجات	الاتجاه	الوسط
A	متطابقة	نفسه	نفسه
B	غير متطابقة	متعاكس	مختلف
C	متطابقة	متعاكس	نفسه
D	غير متطابقة	نفسه	مختلف

7. تحركت موجة طولها 1.2 m مسافة 11.2 m في اتجاه جدار، ثم ارتدت عنه وعادت ثانية خلال 4 s ما تردّد الموجة؟

A) 0.2 Hz
B) 2 Hz
C) 5 Hz
D) 9 Hz



8. ما طول بندول بسيط زمنه الدوري 4.89 s؟

A) 5.94 m
B) 11.9 m
C) 24.0 m
D) 37.3 m

الأسئلة الممتدة

9. استخدم تحليل الوحدات للمعادلة $kx = mg$ لاشتقاق وحدة k.

✓ إرشاد

تدرّب، تدرّب، تدرّب

تدرّب لتحسين أدائك في الاختبار المقنن، ولا تقارن نفسك بالآخرين.

الفصل 2

الصوت
Sound

يتوقع بعد الإنتهاء من دراسة هذا الفصل أن أكون قادرًا على:

- توضيح المفاهيم المرتبطة بخصائص الصوت(الموجة الصوتية، تأثير دوبلر).
- بيان الخصائص المشتركة بين الموجات الصوتية والموجات الأخرى.
- الربط بين الخصائص العامة للموجات، والموجات الصوتية.
- تحديد بعض التطبيقات على تأثير دوبلر.
- توضيح المفاهيم المرتبطة بالرنين(الرنين، التردد الأساسي، الموجة الموقوفة، الضربة).
- توضيح تطبيقات الرنين على أعمدة الهواء المفتوحة والمغلقة والأوتار.
- توضيح كيف يحدث الرنين في الأوتار.
- استخدام الأدوات والأجهزة المتعلقة بالصوت لإجراء التجارب وتحليلها.
- إدراك دور الصوت وأهميته في الحياة اليومية.

الفصل الأول

الفكرة العامة:

الصوت عبارة عن موجات طولية تنتج من التغيرات التي تحدث في الضغط، ويمكن لإذن الإنسان أن تستشعر الكثير من هذه الموجات.

(2-1) خصائص الصوت

الفكرة الرئيسة إن إدراكنا للموجات الصوتية يعتمد على الخصائص الفيزيائية لها.

(2-2) الرنين

الفكرة الرئيسة يمكن للموجات أن تتداخل مع الموجات الأخرى.

فكّر

كيف تُنتج الآلات الموسيقية الأصوات التي تسمعها من الفرقة الموسيقية؟ ولماذا تختلف أصوات الآلات المتنوعة حتى لو كانت تعزف النغمة الموسيقية نفسها؟

تجربة استهلالية

كيف يمكن لكأس زجاجية ان تصدر نغمات موسيقية؟

سؤال التجربة كيف يمكنك استعمال كؤوس زجاجية لإصدار نغمات موسيقية مختلفة؟ وكيف تختلف نغمات الكؤوس ذات السيقان عن نغمات الكؤوس التي لا سيقان لها؟

الخطوات

1. اختر كأسًا زجاجية ذات ساق، ولها حافة رقيقة.
2. **احذر** تفحّص بحذر الحافة العلوية للكأس حتى لا يكون هناك حواف حادة، وأخبر معلمك إذا وجدت أي حواف حادة، وتحقق من تكرار الفحص في كل مرة تختار فيها كأسًا مختلفة.
3. ضع الكأس أمامك على الطاولة، وثبِّت قاعدة الكأس بإحدى يديك، ثم بلّل إصبعك وحكّه ببطء بالحافة العلوية للكأس من الخارج. **تحذير: تعامل مع الزجاج بحذر؛ فهو هَشٌّ.**
4. سجّل مشاهداتك، ثم زِد أو قلّل سرعة إصبعك قليلاً. ماذا يحدث؟
5. اختر كأسًا ذات ساق أطول أو أقصر من الكأس الأولى، وكرّر الخطوات 4–2.
6. اختر كأسًا بلا ساق، وكرّر الخطوات 4–2.

التحليل

لخص مشاهداتك، وبيّن أي الكأسين أصدرت نغمات رنين: ذات السيقان، أم التي لا سيقان لها، أم كلا النوعين؟ وما العوامل التي تؤثر في النغمات الصادرة؟

التفكير الناقد اقترح طريقة لإصدار نغمات مختلفة من الكأس نفسها، واختبر طريقتك التي اقترحتها. ثم اقترح اختبارًا لاستقصاء خصائص الكؤوس التي يمكن استعمالها في إصدار نغمات رنين.

الفيزياء في حياتك

يمكن استخدام موجات الصوت في الكشف والتنقيب عن النفط والمعادن.

تساؤلات جوهرية:

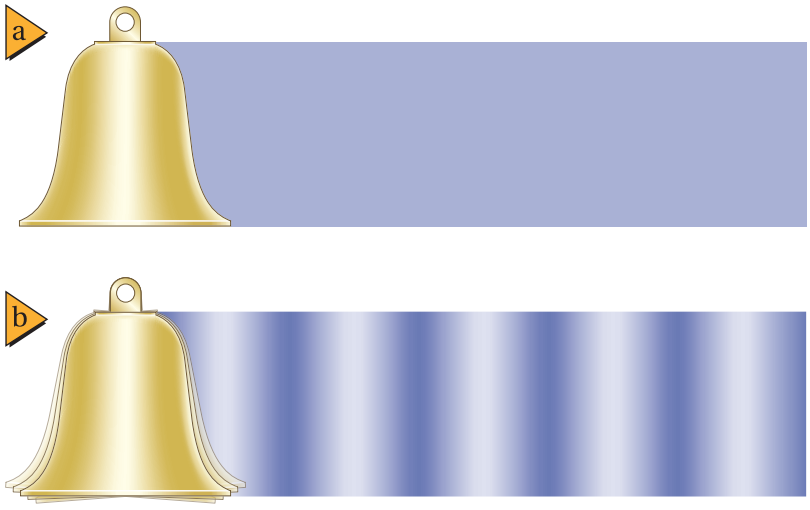
- ما الخصائص المشتركة بين الموجات الصوتية والموجات الأخرى؟
- ما المقصود بتأثير دوبلر؟
- ما أهم تطبيقات تأثير دوبلر؟

المفردات:

- الموجة الصوتية
- تأثير دوبلر

الصوت جزء مهم في حياة الكثير من المخلوقات الحية ومنها الانسان؛ إذ تستعمل الحيوانات الصوت للصيد، واجتذاب الشريك، والتحذير من اقتراب الحيوانات المفترسة. يزيد صوت صفارة الإنذار من القلق لدى الناس، في حين تساعد الأصوات الموسيقية على التهدئة وإراحة النفس. لقد أصبح مألوفًا لديك من خلال خبرتك اليومية العديد من خصائص الصوت، بما فيها العلو، والنغمة، والدرجة. ويمكنك استعمال هذه الخصائص وغيرها لتصنيف الأصوات ووصفها.

تعلمت في الفصل السابق وصف الموجات بدلالة السرعة والتردد والطول الموجي والسعة. كما استكشفت كيفية تفاعل الموجات بعضها مع بعض، ومع المادة. ولأن الصوت أحد أنواع الموجات فإنه يمكنك وصف بعض خصائصه وتفاعلاته. والسؤال الذي تحتاج إلى إجابته أولاً هو: ما نوع موجة الصوت؟

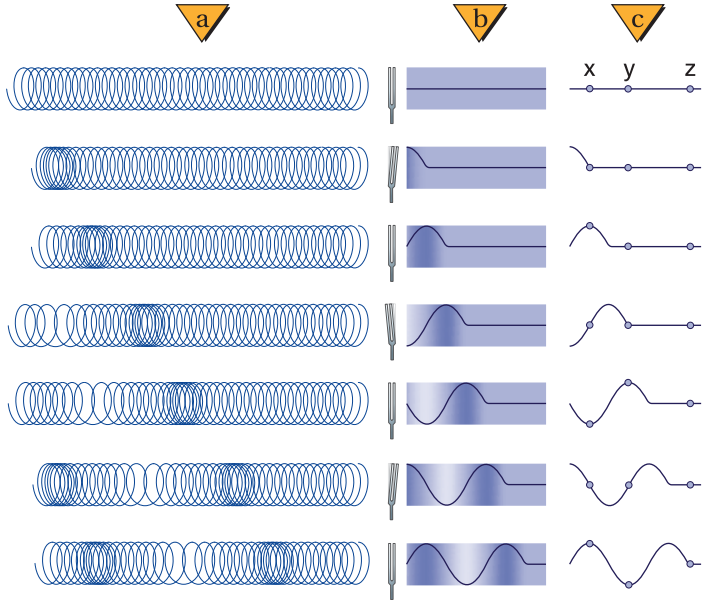


الشكل 1–2 يكون الهواء حول الجرس قبل قرعه متوسط الضغط (a). وعند قرعه تُحدث المنطقة المهتزة مناطق ذات ضغط مرتفع وأخرى ذات ضغط منخفض. حيث تمثل المساحات الداكنة مناطق الضغط المرتفع، وتمثل المساحات الفاتحة مناطق الضغط المنخفض (b). ويبين الرسم التخطيطي تحرك المناطق في اتجاه واحد للتبسيط، في حين أن الموجات تتحرك فعليًا من الجرس في الاتجاهات جميعها.

الموجات الصوتية Sound Waves

ضع أصابعك على حنجرتك وأنت تتكلم أو تُدندن. هل تشعر بالاهتزازات؟ هل حاولت مرة وضع أصابع يدك على سمّاعة مسجل؟ يوضّح **الشكل 1–2** جرسًا يهتز، والذي قد يمثل أوتارك الصوتية أو سمّاعة أو أي مصدر للصوت. فعندما يهتز الجرس إلى الخلف وإلى الأمام فإن حافة الجرس تصدم جزيئات الهواء، وتتحرك جزيئات الهواء إلى الأمام عندما تتحرك الحافة إلى الأمام؛ أي أن جزيئات الهواء ترتد عن الجرس بسرعة كبيرة. وعندما تتحرك الحافة إلى الخلف ترتد جزيئات الهواء عن الجرس بسرعة أقل.

وينتج عن تغيرات سرعة اهتزاز الجرس ما يلي: تُؤدي حركة الجرس إلى الأمام إلى تشكّل منطقة يكون فيها ضغط الهواء أكبر قليلاً من المتوسط، في حين تؤدي حركته إلى الخلف إلى تشكّل منطقة يكون فيها ضغط الهواء أقل قليلاً من المتوسط. وتؤدي التصادمات بين جزيئات الهواء إلى انتقال تغيرات الضغط بعيدًا عن الجرس في الاتجاهات جميعها. وإذا ركّزت على بقعة واحدة فستشاهد ارتفاع ضغط الهواء وانخفاضه، وبهذه الطريقة تنتقل تغيرات الضغط خلال المادة.



يبين الشكل 2–2 نمذجة تضاغطات وتخلخلات موجة صوت باستعمال نابض (a). يرتفع ضغط الهواء وينخفض مع انتشار الموجة الصوتية خلال الهواء (b). ويمكنك استخدام منحنى الجيب وحده لتعبر عن تغيرات الضغط. لاحظ أن المواضع x، y، وz تبين أن الموجة هي التي تتحرك إلى الأمام وليست المادة (c).

وصف الصوت يسمى انتقال التذبذبات الناتجة عن تغيرات الضغط خلال مادةٍ **موجة صوتية**. ينتج المصدر المهتز تغيرات أو اهتزازات منتظمة في ضغط الهواء. فتتصادم جزيئات الهواء، وتنقل تغيرات الضغط بعيدًا عن مصدر الصوت، كما في الشكل 2–2. أمّا تردد الموجة فهو عدد الاهتزازات (التغيرات) في قيمة الضغط في الثانية الواحدة. ويمثل الطول الموجي المسافة بين مركزي ضغط مرتفع أو منخفض متتاليين. ويُعد الصوت موجة طولية؛ لأن جزيئات الهواء تهتز موازية لاتجاه حركة الموجة.

تعتمد سرعة الصوت في الهواء على درجة الحرارة، حيث تزداد السرعة في الهواء بزيادة درجة الحرارة وبمقدار 0.6 m/s لكل درجة سيليزية واحدة. فمثلا؛ تتحرك موجات الصوت خلال هواء بدرجة حرارة الغرفة، 20 °C، عند مستوى سطح البحر بسرعة 343 m/s وتعطى سرعة الصوت من العلاقة $v = 331 \left(m/_s\right) + 0.6 \left(\frac{\text{m/s}}{\text{°C}}\right) T$ حيث v سرعة الصوت عند درجة الحرارة T وهي علاقة تقريبية يمكن تطبيقها عند مدى محدود من درجات الحرارة بافتراض عدم وجود رطوبة في الهواء.

ينتقل الصوت خلال المواد الصلبة والموائع أيضًا، وتكون سرعة الصوت عمومًا في المواد الصلبة أكبر منها في السائلة، وأكبر منها في الغازات. ويبين **الجدول 1–2** سرعات موجات الصوت في أوساط متعددة. ومن المعلوم أن الصوت لا ينتقل في الفراغ؛ وذلك لعدم وجود جزيئات تتصادم وتنقل الموجة.

تشترك الموجات الصوتية مع الموجات الأخرى في خصائصها العامة، ومنها انعكاسها عن الأجسام الصلبة، كجدران الغرفة مثلاً، وتُسمى موجات الصوت المنعكسة عند وصولها إلى مصدرها بالصدى. ويمكن استعمال الزمن الذي يحتاج إليه الصدى حتى يعود إلى مصدر الصوت في إيجاد المسافة بين مصدر الصوت والجسم الذي انعكس عنه. ويَستعمل هذا المبدأَ الخفافيشُ وبعض السفن التي تستعمل السونار. وقد تتداخل موجتان صوتيتان، مما يؤدي إلى نشأة بقع تدعى البقع الميتة، ويكون موقعها عند العقد، حيث يكون الصوت عندها ضعيفًا جدًّا. ويرتبط تردد الموجة وطولها الموجي بسرعتها، كما تعلمت في الفصل السابق، من خلال المعادلة: $\lambda = v/f$

الجدول 1–2

سرعة الصوت في أوساط متعدِّدة عند ضغط جوي معياري

الوسط	m/s
الهواء (0 °C)	331
الهواء (20 °C)	343
الهيليوم (0 °C)	972
الماء (25 °C)	1493
ماء البحر (25 °C)	1533
النحاس (25 °C)	3560
الحديد (25 °C)	5130

التجربة العملية:

- **ما مقدار سرعة الصوت؟**
- **كيف تستطيع استعمال أنبوب مغلق في حالة رنين لكي تحدد سرعة الصوت؟**

مسائل تدريبية

1. ما الطول الموجي لموجة صوتية ترددها 20 Hz تتحرك في هواء درجة حرارته 20 °C؟ (يُعد هذا التردد من أقل الترددات التي يمكن للأذن البشرية سماعها).
2. إذا وقفت عند طرف وادٍ وصرخت، وسمعت الصدى بعد مرور 0.80 s، فما عرض هذا الوادي؟
3. تنتقل موجة صوتية ترددها 2280 Hz وطولها الموجي 0.655 m، في وسط غير معروف. حدّد نوع الوسط.

تطبيق الفيزياء

السمع والتردّد

يستخدم تأثير دوبلر في بعض الرادارات التي تستخدمها شرطة المرور في تقدير سرعة السيارات على الطريق من خلال مقارنة الترددات الصوتية الصادرة عن محرك السيارة مع الترددات الصوتية الصادرة عن محرك السيارة المتوقفة.

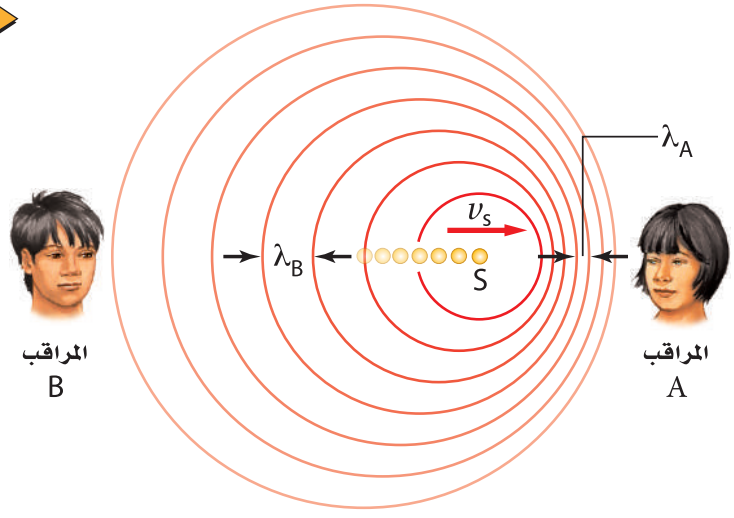
تأثير دوبلر The Doppler Effect

هل لاحظت أن درجة (حدّة) صوت سيارة الإسعاف المسرعة أو الإطفاء أو صفارة الشرطة تتغير مع مرور المركبة بجانبك؟ تكون حدّة الصوت أعلى عندما تتحرك المركبة في اتجاهك، ثم تتناقص حدّة الصوت لتصبح أقل عند حركة المركبة مبتعدةً عنك. ويُسمى انزياح أو تغير التردد الذي تحدثه حركة مصدر الصوت أو المراقب أو كليهما **تأثير دوبلر**، كما هو موضح في **الشكل 3–2**. يتحرك مصدر الصوت S إلى اليمين بسرعة v_s ، وتنتشر الموجات المنبعثة من المصدر في دوائر مركزها المصدر. ومع تحرك المصدر في اتجاه المراقب A (كاشف الصوت) في **الشكل 3a–2**، فإن العديد من الموجات تتقارب في المنطقة بين المصدر والمراقب، لذا يقل الطول الموجي ويصبح λ_A . ولأن سرعة الصوت ثابتة في الوسط الواحد فإن قممًا أكثر تصل أذن المراقب في كل ثانية، مما يعني أن تردد الصوت عند المراقب A قد ازداد. في حين يزداد الطول الموجي عند تحرك المصدر بعيدًا عن المراقب B في **الشكل 3a–2**. ويصبح λ_B ، ويقل تردد الصوت عند المراقب B. ويبين **الشكل 3b–2** تأثير دوبلر لمصدر صوتي متحرك في موجات الماء داخل حوض الموجات.

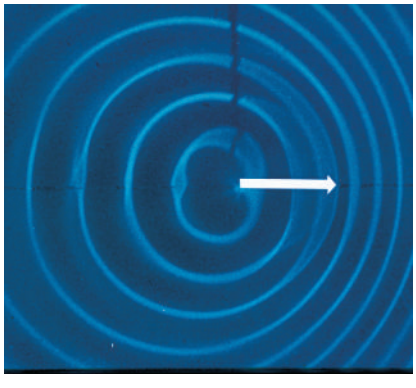
ويحدث تأثير دوبلر أيضًا إذا كان المراقب متحركًا والمصدر ثابتًا. إذ ينتج تأثير دوبلر في هذه الحالة عن السرعة المتجهة النسبية لموجات الصوت والمراقب. فمع اقتراب المراقب من المصدر الثابت، تصبح السرعة المتجهة النسبية أكبر، مما يؤدي إلى زيادة في قمم الموجات التي تصل إلى المراقب في كل ثانية، ومع ابتعاد المراقب عن المصدر تقل السرعة المتجهة النسبية، مما يؤدي إلى نقصان في قمم الموجات التي تصل إليه في كل ثانية.

يمكن حساب التردد الذي يسمعه المراقب لكلتا الحالتين: مصدر متحرك ومراقب ثابت أو مراقب متحرك ومصدر ثابت أو كليهما متحركين، باستعمال المعادلة التالية:

a



b



الشكل 3–2 يقل الطول الموجي مع تحرك مصدر الصوت في اتجاه المراقب A، ويصبح λ_A ؛ ويزداد الطول الموجي مع تحرك مصدر الصوت بعيدًا عن المراقب B ويصبح λ_B (**a**) . وتوضح حركة مصدر الموجات الصوتية تأثير دوبلر في حوض الموجات (**b**).

تأثير دوبلر $f_d = f_s\left(\frac{v - v_d}{v - v_s}\right)$

التردد الذي يدركه المراقب يساوي السرعة المتجهة النسبية للمراقب بالنسبة لسرعة الموجة مقسومًا على السرعة المتجهة النسبية للمصدر بالنسبة للموجة مضروبًا في تردد المصدر.

في معادلة تأثير دوبلر تمثل v السرعة المتجهة لموجة الصوت، و v_d السرعة المتجهة للمراقب، و v_s السرعة المتجهة لمصدر الصوت، و f_s تردد موجة المصدر، و f_d التردد الذي يستقبله المراقب. وتطبق هذه المعادلة عند حركة المصدر، أو المراقب، أو كليهما معًا.

وعند حل المسائل باستعمال المعادلة السابقة، تأكد من تحديد نظام الإحداثيات؛ بحيث يكون الاتجاه الموجب من المصدر إلى المراقب. ستصل الموجات الصوتية إلى المراقب من المصدر، لذا تكون السرعة المتجهة للصوت موجبة دائمًا. حاول رسم مخططات للتحقق من أن المقدار $(v\text{-}v_s)/(v\text{-}v_d)$ يعطي نتائج كما تتوقع، اعتمادًا على ما تعلمته حول تأثير دوبلر. لاحظ أنه بالنسبة لمصدر يتحرك في اتجاه المراقب (في الاتجاه الموجب؛ حيث ينتج مقامًا أصغر مقارنة بمصدر ثابت)، وكذلك عند حركة المراقب في اتجاه المصدر (في الاتجاه السالب؛ حيث ينتج زيادة البسط مقارنة بمراقب ثابت)، فإن التردد الذي يستقبله المراقب f_d يزداد. وعلى العكس إذا تحرك المصدر بعيدًا عن المراقب أو إذا تحرك المراقب بعيدًا عن المصدر فإن f_d تقل. اقرأ الرياضيات في الفيزياء أدناه لترى كيف تُختصر معادلة تأثير دوبلر عندما يكون المصدر أو المراقِب ثابتًا.

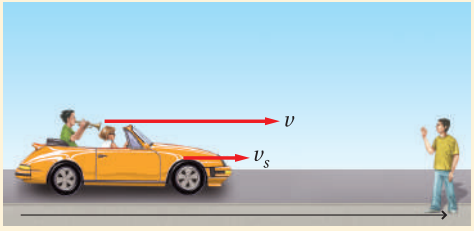
الرياضيات في الفيزياء

اختصار المعادلات عندما يساوي عنصر ما صفرًا في معادلة معقدة فإن المعادلة قد تُختصر في صورة أكثر سهولة للاستعمال.

مراقب ثابت، المصدر متحرك: $v_d = 0$	مصدر ثابت، مراقب متحرك: $v_s = 0$
$f_d = f_s\left(\frac{v - v_d}{v - v_s}\right)$	$f_d = f_s\left(\frac{v - v_d}{v - v_s}\right)$
$= f_s\left(\frac{v}{v - v_s}\right)$	$= f_s\left(\frac{v - v_d}{v}\right)$
$= f_s\left(\frac{\frac{v}{v}}{\frac{v}{v} - \frac{v_s}{v}}\right)$	$= f_s\left(\frac{\frac{v}{v} - \frac{v_d}{v}}{\frac{v}{v}}\right)$
$= f_s\left(\frac{1}{1 - \frac{v_s}{v}}\right)$	$= f_s\left(\frac{1 - \frac{v_d}{v}}{1}\right)$
	$= f_s\left(1 - \frac{v_d}{v}\right)$

مثـــــال 1

تأثير دوبلر يركب شخص سيارة تسير في اتجاهك بسرعة 24.6 m/s وينفخ في بوق منتجًا صوتًا تردده 524 Hz، ما التردد الذي ستسمعه؟ (افترض أن درجة الحرارة تساوي 20 °C)



1 تحليل المسألة ورسمها

- ارسم الحالة.
- أسّس محاور إحداثيات، بحيث يكون الاتجاه الموجب من المصدر إلى المراقب.
- بيّن السرعة المتجهة لكل من المصدر والمراقب.

المعلوم	المجهول
$v = +343\ \text{m/s}$	$f_d = ?$
$v_s = +24.6\ \text{m/s}$	
$v_d = 0\ \text{m/s}$	
$f_s = 524\ \text{Hz}$	

2 ايجاد الكمية المجهولة

استعمل المعادلة التالية، وعوّض القيمة $v_d = 0\ \text{m/s}$

$$f_d = f_s\left(\frac{v - v_d}{v - v_s}\right)$$

$$f_d = f_s\left(\frac{1}{1 - \frac{v_s}{v}}\right)$$

بالتعويض عن $v = +343\ m/s,\ v_s = +24.6\ m/s,\ f_s = 524\ Hz$,

$$= 524\ \text{Hz}\left(\frac{1}{1 - \frac{24.6\ \text{m/s}}{343\ \text{m/s}}}\right)$$

$$= 564\ \text{Hz}$$

3 تقويم الجواب

- **هل الوحدات صحيحة؟** يقاس التردد بوحدة الهرتز.
- **هل الجواب منطقي؟** يتحرك المصدر في اتجاهك؛ لذا يجب أن يزداد التردد.

مسائل تدريبية

4. افترض أنك في سيارة تتحرك بسرعة 25.0 m/s في اتجاه صفارة إنذار. إذا كان تردد صوت الصفارة 365 Hz، فما التردد الذي ستسمعه؟ علمًا بأن سرعة الصوت في الهواء 343 m/s

5. افترض أنك في سيارة تتحرك بسرعة 24.6 m/s، وتتحرك سيارة أخرى مقتربة منك بالسرعة نفسها. فإذا انطلق المنبه فيها بتردد 475 Hz، فما التردد الذي ستسمعه؟ علمًا بأن سرعة الصوت في الهواء 343 m/s

6. يرسل مصدر صوت موجات بتردد 262 Hz، ما السرعة التي يجب أن يتحرك بها المصدر ليرتفع تردد الصوت إلى 271 Hz؟ علمًا بأن سرعة الصوت في الهواء 343 m/s

الشكل 4–2 تستعمل الخفافيش تأثير دوبلر لتعيين موقع الفريسة، بعملية تسمى تحديد الموقع باستعمال الصدى.

يحدث تأثير دوبلر في كل حركة موجية؛ في الموجات الميكانيكية والموجات الكهرومغناطيسية. ويوجد له تطبيقات عدّة؛ فمثلاً تستعمل كواشف الرادار تأثير دوبلر لقياس سرعة كرات البيسبول والمركبات. ويراقب علماء الفلك الضوء المنبعث من المجرات البعيدة، ويستعملون تأثير دوبلر لقياس سرعاتها، ويستنتجون بُعدها عن الأرض. كما يستعمل في الطب لقياس سرعة حركة جدار قلب الجنين بجهاز الموجات فوق الصوتية. وتستعمل الخفافيش تأثير دوبلر في الكشف عن الحشرات الطائرة وافتراسها؛ فعندما تطير الحشرة بسرعة أكبر من سرعة الخفاش، يكون تردد الموجة المنعكسة عنها أقل، أما عندما يلحق الخفاش بالحشرة ويقترب منها، يكون تردد الموجة المنعكسة أكبر، كما موضح في **الشكل 4–2**. لا تستعمل الخفافيش الموجات الصوتية فقط لتحديد موقع الفريسة والطيران، ولكن تستعملها أيضًا في حال وجود خفافيش أخرى. هذا يعني أنها تميز الأمواج الخاصة التي ترسلها وانعكاساتها من مجموعة كبيرة من الأصوات والترددات الموجودة. يستمر العلماء في دراسة الخفافيش وقدراتها المدهشة على استعمال الموجات.

2-1 مراجعة

7. **تأثير دوبلر** هل يحدث تأثير دوبلر لبعض انواع الموجات فقط أم لجميع انواع الموجات؟

8. **الخفافيش** يرسل الخفاش نبضات صوت قصيرة بتردد عالٍ ويستقبل الصدى. وضح كيف يختلف الصدى المرتد عن:

   a. الحشرات الكبيرة والحشرات الصغيرة؟

   b. حشرة تطير مقتربة منه وحشرة تطير مبتعدة عنه؟

9. **الكشف المبكر** كان الناس في القرن التاسع عشر يضعون آذانهم على مسار سكة الحديد ليترقبوا وصول القطار. لماذا تُعد هذه الطريقة نافعة؟

10. **التفكير الناقد** هل يستطيع شرطي يقف على جانب الطريق استعمال الرادار لتحديد سرعة سيارة في اللحظة التي تمر فيها أمامه؟ وضح ذلك.

الفيزياء في حياتك

تخيل أنك ترمي كرة إلى صديقك، سوف تتحرك الكرة وهي تنقل طاقة حركية إلى صديقك، أما إذا كنت أنت وصديقك تمسكان طرفي حبل وحركت الحبل حركة سريعة، فسيظل الحبل في يدك في حين تنتقل الطاقة خلال الحبل إلى صديقك.

تساؤلات جوهرية:

- كيف يحدث الرنين؟
- ما سبب وجود اختلافات في جودة الأصوات الصادرة عن الآلات الموسيقية؟
- ما أهم تطبيقات الرنين؟

المفردات:

- الرنين
- التردد الأساسي
- الموجة الموقوفة
- الضربة

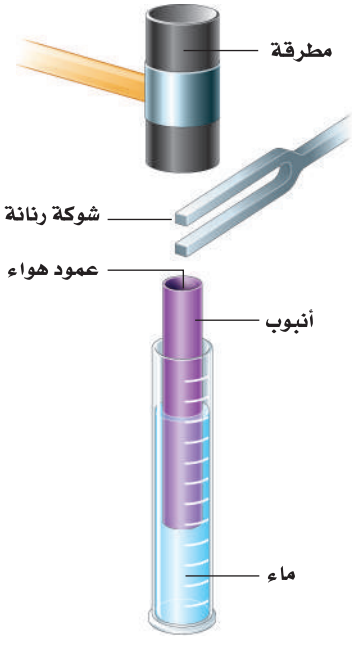
ينتج الصوت عن اهتزاز الأجسام؛ إذ تؤدي اهتزازات الجسم إلى تحريك الجزيئات التي تتسبب في إحداث تغيرات سريعة في ضغط الهواء. فمثلاً يحتوي مكبر الصوت على مخروط مصمم ليهتز بوساطة التيارات الكهربائية. ويولد سطح المخروط الموجات الصوتية التي تنتقل إلى أذنك مما يسمح لك بسماع الموسيقى. وتعمل الكثير من الآلات الموسيقية على مبدأ (ظاهرة) الرنين، ومنها الآلات الهوائية والوترية. فما المقصود بالرنين وكيف ينشأ؟

الرنين في الأعمدة الهوائية

Resonance in Air Columns

عند العزف على آلة موسيقية نحاسية أو قصبية سيهتز الهواء داخل الأنبوب بالتردد نفسه، أو برنين يتوافق مع اهتزاز معين للشفاه. يحدد طول عمود الهواء ترددات الهواء المهتز التي ستكون في حالة رنين، في حين يؤدي تغيير طول عمود الهواء في العديد من الآلات الموسيقية ـ ومنها المزمار والساكسفون والترومبون ـ إلى تغيير درجة صوت الآلة. ينتج لسان المزمار للآلة (الجزء الذي يوضع داخل الفم) مزيجًا من الترددات المختلفة، ويعمل عمود الهواء في حالة الرنين على تضخيم نغمة منفردة من مجموعة من الترددات، وتحويل الأصوات العشوائية إلى موسيقى منتظمة.

تحدث شوكة رنانة فوق أنبوب مجوف رنينًا في عمود الهواء، كما يبين **الشكل 5–2**. إذا تم وضع الأنبوب في الماء بحيث تصبح إحدى نهايتي الأنبوب أسفل سطح الماء، حيث يتكون أنبوب مغلق –بالنسبة للهواء– فإذا ضربت الشوكة الرنانة بمطرقة مطاطية، وتم تغيير طول عمود الهواء بتحريك الأنبوب إلى أعلى أو إلى أسفل في الماء فإن الصوت يصبح أعلى أو أخفض على التناوب. ويكون الصوت عاليًا عندما يكون عمود الهواء في وضع رنين مع الشوكة الرنانة. ويؤدي عمود الهواء عندما يكون في حالة رنين إلى تقوية صوت الشوكة الرنانة.

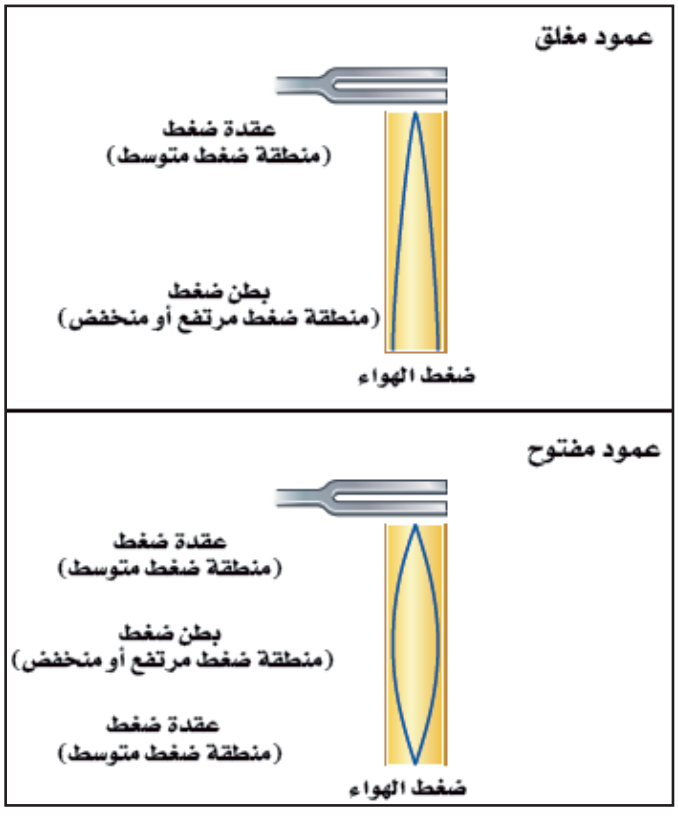


الشكل 5–2 يغير رفع الأنبوب أو إنزاله طول عمود الهواء، ويكون الصوت عالٍ عند حدوث رنين بين عمود الهواء والشوكة الرنانة.

موجات الضغط الموقوفة (المستقرة) كيف يحدث الرنين؟ تولّد الشوكة الرنانة موجات صوتية، تتكون من اهتزازات مرتفعة الضغط (تضاغط) ومنخفضة الضغط (تخلخل)، وتتحرك هذه الموجات إلى أسفل عمود الهواء المغلق. وعندما تصطدم هذه الموجات بسطح الماء تنعكس مرتدة باتجاه الشوكة الرنانة، كما في **الشكل 2–6a**. فإذا وصلت موجات الضغط المرتفع المنعكسة إلى الشوكة الرنانة في اللحظة نفسها التي تنتج فيها الشوكة الرنانة موجات ضغط مرتفع أخرى، فعندها تقوّي الموجة الصادرة عن الشوكة والموجة المنعكسة إحداهما الأخرى. وهذه التقوية أو التعزيز للموجات يولّد موجة مستقرة، ويحدث **الرنين**.

أما العمود الهوائي المفتوح فيمثّل بأنبوب مفتوح الطرفين، ويكون في حالة رنين مع مصدر الصوت عندما تنعكس موجاته من الطرف المفتوح. ويكون ضغط الموجة المنعكسة مقلوبًا. فعلى سبيل المثال، إذا وصلت موجات ضغط مرتفع (تضاغط) إلى الطرف المفتوح فسوف ترتد موجات ضغط منخفض (تخلخل)، كما يبين **الشكل 2–6b**.

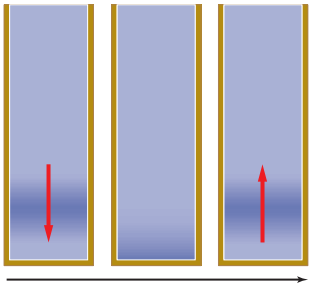
أطوال الرنين يمكن تمثيل موجة صوتية موقوفة (مستقرة) في عمود بموجة جيبية، كما يوضح **الشكل 2–7**. كما يمكن أن تمثّل الموجات الجيبية إما بتغير ضغط الهواء أو إزاحة جزيئاته. ولأن للموجات الموقوفة عقدًا وبطونًا، لذا فإنه عند التمثيل البياني لتغير الضغط تكون العقد هي مناطق الضغط الجوي المتوسط، أما مناطق البطون فيتذبذب الضغط عندها بين قيمتيه العظمى والصغرى. وتكون المسافة بين بطنين أو عقدتين متتاليتين مساوية لنصف الطول الموجي.



الشكل 2–7 تمثّل موجات الجيب ضغط الهواء للموجات المستقرة في الأعمدة.

الشكل 2–6 يمثّل الأنبوب الموضوع في ماء عمودًا مغلقًا. وتنعكس موجات الضغط المرتفع فيه موجات ضغط مرتفع (a). أما في الأعمدة المفتوحة فتكون موجات الضغط المنعكسة مقلوبة (الضغط منخفض) (b).

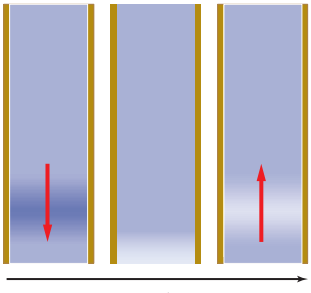
a



الزمن

أعمدة مغلقة: ينعكس الضغط المرتفع في صورة ضغط مرتفع

b



الزمن

أعمدة مفتوحة: ينعكس الضغط المرتفع في صورة ضغط منخفض

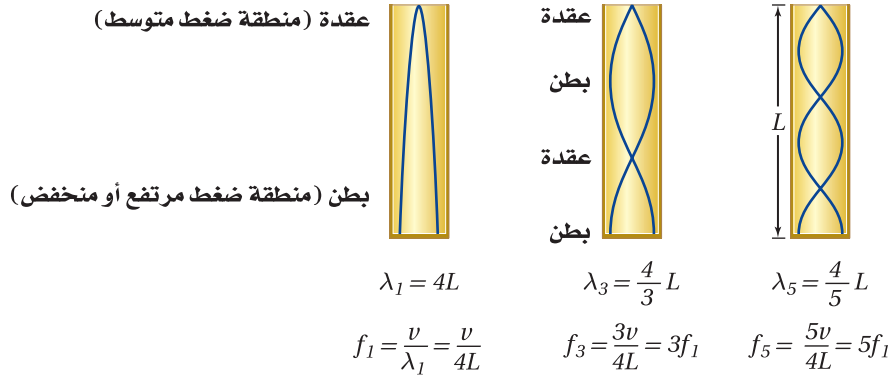
تطبيق الفيزياء

السمع والتردّد

تعمل القناة السمعية البشرية كأنها أنبوب مغلق في حالة رنين، يؤدي إلى زيادة حساسية الأذن للترددات بين 2000 و 5000 Hz، في حين يمتد المدى الكامل لترددات الصوت التي يسمعها البشر من 20 إلى 20000 Hz، ويمتد سمع الكلب لترددات مرتفعة تصل إلى 45000 Hz، أمّا القطّ فيمتد السمع لديه إلى ترددات تصل إلى 100000 Hz

الرنين في الأعمدة الهوائية المغلقة يكون طول أقصر عمود هواء له بطن عند الطرف المغلق وعقدة عند الطرف المفتوح مساويًا ربع الطول الموجي كما يبين **الشكل 8–2**. ومع زيادة التردد يكون هناك أطوال رنين إضافية عند فترات مساوية لنصف الطول الموجي. لذا تكون الأعمدة التي أطوالها $\frac{\lambda}{4}$ و $\frac{3\lambda}{4}$ و $\frac{5\lambda}{4}$ و $\frac{7\lambda}{4}$ وهكذا، في حالة رنين مع الشوكة الرنانة.

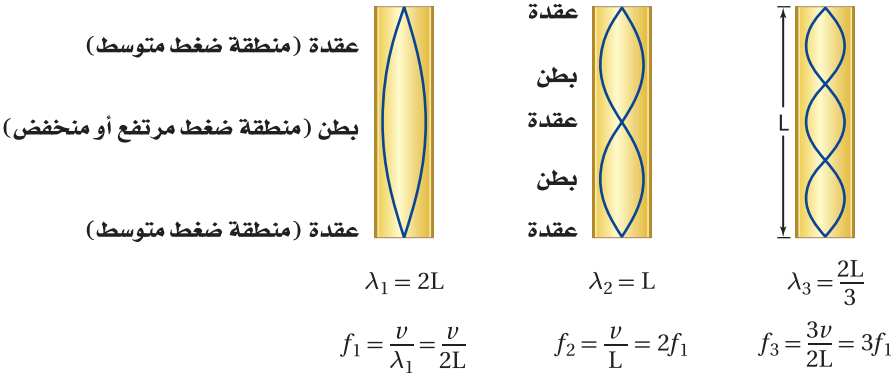
يكون طول الرنين الأول عمليًّا أطول قليلاً من ربع الطول الموجي؛ وذلك لأن تغيرات الضغط لا تنخفض إلى الصفر تمامًا عند الطرف المفتوح من الأنبوب. وتكون العقدة فعليًّا أبعد بمقدار 0.4 من قطر الأنبوب عن الطرف. وتفصل بين أطوال الرنين الإضافية مسافات بمقدار نصف الطول الموجي. ويستعمل قياس هذه المسافة بين كل رنينين في إيجاد سرعة الصوت في الهواء، كما يبين المثال 2.



الشكل 8–2 يكون الأنبوب المغلق في حالة رنين عندما يكون طوله عددًا فرديًا من مضاعفات ربع الطول الموجي.

الرنين في الأعمدة الهوائية المفتوحة يكون طول أقصر عمود هواء يحتوي على عقدة عند كل من طرفيه مساويًا نصف الطول الموجي، كما يبين **الشكل 9–2**. ومع زيادة التردد يكون هناك أطوال رنين إضافية عند فترات نصف الطول الموجي، لذا تكون الأعمدة الهوائية التي اطوالها $\frac{\lambda}{2}$ و λ و $\frac{3}{2}\lambda$ ... وهكذا في حالة رنين مع الشوكة الرنانة.

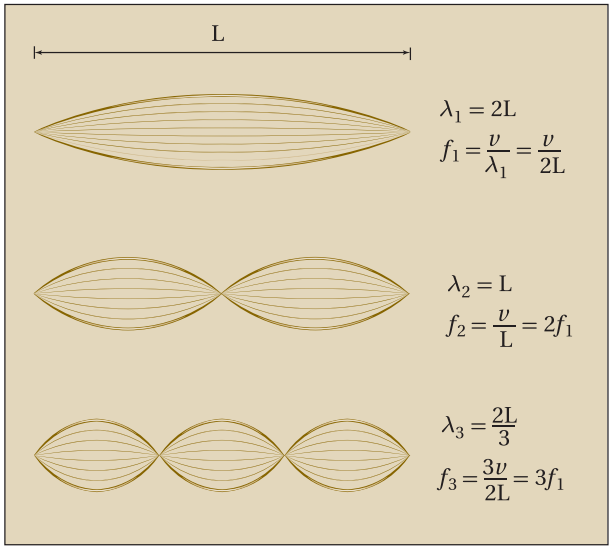
إذا استعملت عمودين أحدهما مفتوحًا والآخر مغلقًا، ولهما الطول نفسه، وكانا في حالة رنين فإن الطول الموجي لصوت الرنين في العمود المفتوح يكون نصف الطول الموجي الذي للعمود المغلق. لذا، يكون التردد في العمود المفتوح ضعفي التردد للعمود المغلق. وتكون أطوال الرنين لكلا العمودين مفصولة بفترات مقدارها نصف الطول الموجي.



الشكل 9–2 يكون العمود المفتوح في حالة رنين عندما يكون طوله عددًا زوجيًّا من مضاعفات ربع الطول الموجي.

الرنين في الأوتار Resonance on Strings

يكـون الوتر في آلة ما مشـدودًا من الطرفين، لـذا فإنه عندما يهتز يكـون له عقدة عنـد كل طرف من طرفيه. وتسـتطيع أن ترى في **الشـكل 10–2** أن النمط الأول للاهتزاز له بطن عند المنتصف، وطوله يسـاوي نصف الطول الموجي. يحدث الرنين التالي عندما يكـون طول الوتـر مطابقًا لطـول موجي واحـد. تظهر موجات مسـتقرة إضافيـة عندمـا يكـون طـول الوتـر $\frac{3\lambda}{2}$ و 2λ و $\frac{5\lambda}{2}$... وهكذا. كما هو الحال بالنسبة للعمود المفتوح فإن ترددات الرنين تسـاوي المضاعفات الصحيحة لأقـل تردد، ويعتمد تـردد الوتر المهتـز عـلى طول الجـزء المهتز وقوة الشـد في الوتـر وكتلة وحدة الأطوال من مادة الوتر.



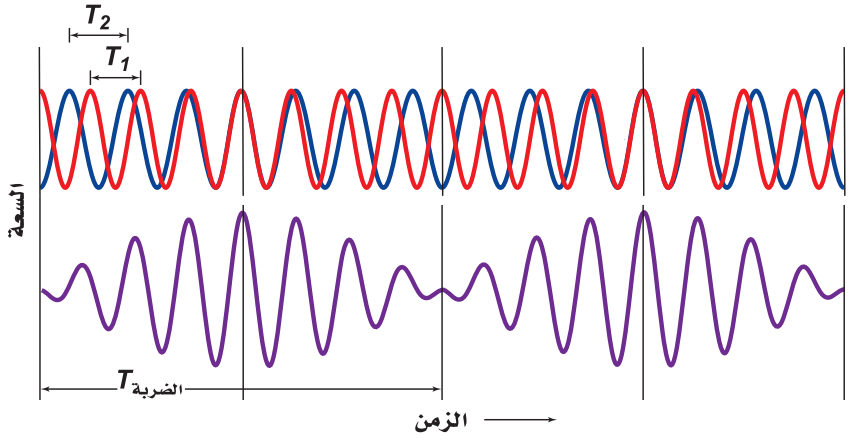
الشـكل 10–2 وتـر في حالـة رنين مع موجة موقوفة عندما يكون طوله مساويًا لمضاعفات نصف الطول الموجي.

وتعتمـد سرعـة الموجـة في الوتر على قوة الشـد فيـه، وعلى كتلة وحدة أطواله؛ لذا فإن الآلة الوترية تضبط بتغيير شـد أوتارها. فكلما كان الوتر مشدودًا أكثر، كانت سرعة حركة الموجة أكبر، لذا تزداد قيمة تردد موجاته الموقوفة.

ولأن مسـاحة المقطـع العـرضي للأوتار قليلة فإنها تحرك القليل مـن الهواء حين تهتز؛ مما يتطلـب ضرورة وصل الأوتار بصندوق الصوت (صندوق الآلة)؛ التي تنقل اهتزازاتها إلى الهواء مولّدة موجات صوتية أقوى.

الضربات Beats

عندما تكون النسـبة بين ترددين أو أكثر نسـبة عددية صحيحة وبسيطة(1:1، 1:2، 1:3، ...) يقـال إن هناك تناغمًا في الأصوات، وعندما تكون النسـبة قريبة مـن 1:1، فإن الترددات تصبـح متقاربـة جدًّا. ويتداخل تـرددان متقاربان جدًّا لينتجا مسـتويات صوت مرتفعة ومنخفضة، كما يبين **الشكل 11–2**. ويُسمى اهتزاز سعة الموجة هذه **الضربة**. وتردد الضربة يساوي مقدار الفرق بين ترددي موجتين، $f_{\text{الضربة}} = |f_A - f_B|$ وعندما يكون الفرق أقل مـن 7 Hz فإن الأذن تلتقط هذا على أنه نبضة صخب. وتضبط الآلات الموسـيقية عادة بتعديل تردداتها حتى تختفي مثل هذه الضربات.



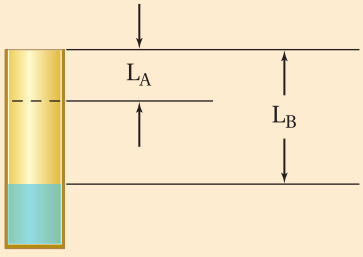
الشكل 11–2 تحدث الضربات نتيجة تراكب موجتين صوتيتين ترددّاهما مختلفان قليلاً (لاحظ الزمن الدوري لكل منهما T_1، T_2).

مثـــال 2

إيجاد سرعة الصوت باستعمال الرنين عند استعمال شوكة رنانة بتردد 392 Hz مع عمود مغلق سُمع أعلى صوت عندما كان طول عمود الهواء 21.0 cm و65.3 cm، ما سرعة الصوت في هذه الحالة؟ وهل درجة الحرارة في الأنبوب أكبر أم أقل من درجة حرارة الغرفة، (20 °C)؟ وضّح إجابتك.

1 تحليل المسألة ورسمها

- ارسم العمود الهوائي المغلق في حالة رنين.
- حدد طول عمود الهواء لحالتي الرنين.



المعلوم	المجهول
$f = 392\ \text{Hz}$	$v = ?$
$L_A = 21.0\ \text{cm}$	
$L_B = 65.3\ \text{cm}$	

2 ايجاد الكمية المجهولة

حل لإيجاد طول الموجة باستعمال علاقة: الطول– الطول الموجي للعمود المغلق. $L_B - L_A = \frac{1}{2}\lambda$

بإعادة ترتيب المعادلة بالنسبة لِـ λ

بالتعويض عن $L_A = 0.210\ \text{m}$، $L_B = 0.653\ \text{m}$

$$\lambda = 2(L_B - L_A)$$
$$= 2(0.653\ \text{m} - 0.210\ \text{m})$$
$$= 0.886\ \text{m}$$

استعمل المعادلة التالية لإيجاد السرعة $\lambda = \frac{v}{f}$

بإعادة ترتيب المعادلة بالنسبة لِـ v

بالتعويض عن $\lambda = 0.886\ \text{m}$، $f = 392\ \text{Hz}$

$$v = f\lambda$$
$$= (392\ \text{Hz})(0.886\ \text{m}) = 347\ \text{m/s}$$

السرعة أكبر قليلاً من سرعة الصوت عند درجة الحرارة 20 °C، مما يشير إلى أن درجة الحرارة أعلى قليلاً من درجة حرارة الغرفة.

3 تقويم الجواب

- **هل الوحدات صحيحة؟** وحدات الجواب صحيحة $(\text{Hz})(\text{m}) = (\frac{1}{\text{s}})(\text{m}) = \text{m/s}$.
- **هل الجواب منطقي؟** السرعة أكبر قليلاً من 343 m/s، التي هي سرعة الصوت عند درجة الحرارة 20 °C

مسائل تدريبية

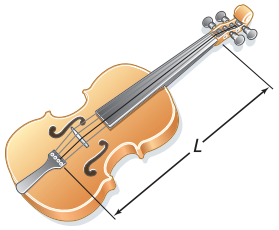
11. تهتز شوكة رنانة بتردد 440 Hz فوق عمود مغلق. حدد البعد الذي يحدث عنده الرنين الأول عندما تكون درجة حرارة الهواء 20 °C

12. استعملت شوكة رنانة تهتز بتردد 440 Hz مع عمود رنين لتحديد سرعة الصوت في غاز الهيليوم. فإذا كان البعد بين رنينين متتاليين 110 cm، فما سرعة الصوت في غاز الهيليوم؟

13. استعمل طالب عمود هواء عند درجة حرارة 27 °C، ووجد أن البعد بين رنينين متتاليين يساوي 20.2 cm، ما تردد الشوكة الرنانة؟ سرعة الصوت في الهواء 347 m/s عند درجة الحرارة 27 °C

مسألة تحدٍّ

1. حدّد قوة الشد، F_T، في وتر كمان كتلته m، وطوله L، عندما يهتز بالتردد الأساسي، الذي يساوي التردد نفسه لعمود هوائي مغلق طوله L. عبّر عن إجابتك بدلالة L ،m، وسرعة الصوت في الهواء v. استعمل معادلة سرعة الموجة في وتر $\left(u=\sqrt{\frac{F_T}{\mu}}\right)$، حيث تمثل F_T قوة الشد في الوتر، و μ كتلة وحدة الأطوال من الوتر، u سرعة الموجة في الوتر.



2. ما مقدار قوة الشد في وتر كتلته 1.0 g وطوله 40.0 cm يهتز بالتردد نفسه لعمود هوائي مغلق له الطول نفسه؟

2-2 مراجعة

14. **الرنين في أعمدة الهواء** لماذا يكون طول الأنبوب المصنوع منه البوق العادي أطول منه للأنبوب القمعي؟

15. **الرنين في الأعمدة المفتوحة** ما النسبة بين طول العمود المفتوح والطول الموجي للصوت لإنتاج الرنين الأول؟

16. **الرنين في الأعمدة المغلقة** يبلغ طول أنبوب أورغن مغلق 2.40 m، أجب عما يلي:

a. ما تردد النغمة المعزوفة بهذا الأنبوب؟

b. إذا عُزف على أنبوب ثانٍ في الوقت نفسه، فستسمع ضربة نغمة ترددها 1.40 Hz، فما مقدار الزيادة في طول الأنبوب الثاني؟

17. **التفكير الناقد** اضرب شوكة رنانة بمطرقة مطاطية واحملها بحيث يكون ذراعك ممدودة، ثم اضغط بمقبضها على طاولة، وباب، وخزانة، وأجسام أخرى. ما الذي تسمعه؟ ولماذا؟

موجات الصوت في الشمس
Sound Waves in the Sun

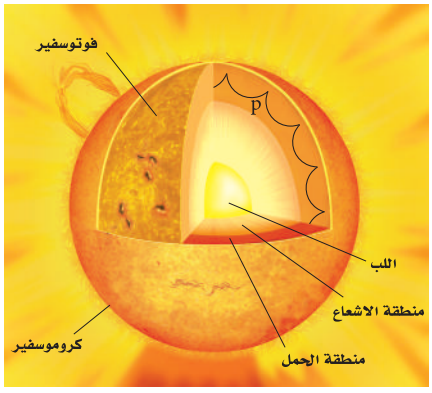
تُسمّى دراسة اهتزازات الموجات في الشمس بالسيزمولوجية الشمسية (علم زلازل الشمس)، حيث تحدث الموجات التالية طبيعيًّا في الشمس، وهي: الموجات الصوتية (موجات p)، وموجات الجاذبية، وموجات الجاذبية السطحية. وتتكون كل هذه الموجات من جزيئات مهتزة، ولكن قوى مختلفة تُسبّب هذه الاهتزازات.

وتسبب اختلافات الضغط اهتزاز الجزيئات في الموجات الصوتية. أما في الشمس فتنتقل موجات الصوت خلال منطقة الحمل الحراري التي تقع أسفل السطح مباشرة، أو أسفل الفوتوسفير. ولا تنتقل الموجات الصوتية في خط مستقيم، كما هو موضح في الصورة.

تقرع كالجرس تسبب موجات الصوت في الشمس اهتزاز السطح في الاتجاه القطري، مثل اهتزاز جرس يقرع. فعندما يقرع الجرس تضرب مطرقة الجرس في مكان واحد، وتنتج موجات موقوفة. ولسطح الشمس موجات موقوفة، لكنها لم تنتج عن حدث واحد كبير. يفترض العلماء بدلاً من ذلك أن العديد من العوائق الصغيرة في منطقة الحمل الحراري بدأت منها معظم موجات الصوت في الشمس، مثل ضجيج الماء المغلي في قدر، إلا أن حجم الفقاعة المتكونة عند سطح الشمس أكبر من مساحتي المغرب والعراق معًا، ويصدر عنها موجات صوتية.

ويكون الصوت القادم من الشمس منخفضًا جدًّا بالنسبة لنا؛ حيث أن متوسط اهتزاز الموجات في الشمس له زمن دوري 5 min، أيْ أن ($f = 0.003$ Hz).

لأننا لا نستطيع سماع موجات الصوت الصادرة من الشمس، فقد قاس العلماء حركة سطح الشمس لتعرّف موجاتها الصوتية. ويجب مراقبة الشمس فترات زمنية طويلة؛ لأن موجات الصوت تحتاج إلى ساعتين للانتقال من جانب إلى آخر في الشمس، وهذا يجعل المراقبة من الأرض صعبة لأنه لا يمكن رؤية الشمس في أثناء الليل. لذا فقد



تنتقل الموجات الصوتية (موجات p) خلال منطقة الحمل في الشمس

أطلقت وكالة ناسا عام 1995م المرصد الشمسي (SOHO). يدور هذا القمر الاصطناعي حول الأرض، ويستطيع مراقبة الشمس دائمًا.

تُقاس حركة سطح الشمس من خلال مراقبة انزياح دوبلر في ضوء الشمس. ويكون للاهتزازات المقيسة أنماط معقدة تساوي مجموع الموجات الموقوفة كلها في الشمس. ويوجد في الشمس نغمات توافقية كالنغمات التي تظهر عندما يقرع الجرس. ويمكن حساب الموجات الموقوفة الفردية وشدتها في الشمس بوساطة التحليل الدقيق.

النتائج تزوّد اهتزازات موجات الشمس العلماء بمعلومات تتعلق بتركيبها الداخلي؛ وذلك أن كلًّا من تركيبها ودرجة حرارتها وكثافتها يؤثر في انتشار الموجات الصوتية. وقد قدمت نتائج تحليل بيانات القمر الاصطناعي (SOHO) المزيد لفهم عميق حول معدل دوران الشمس على صورة دالة رياضية تعتمد على خط العرض والعمق، وعلى درجة حرارة الشمس وكثافتها أيضًا. وتقارن هذه النتائج بالحسابات النظرية لتحسين فهمنا للشمس.

التوسع

1. **كوِّن فرضية** كيف يفرّق العلماء بين حركة سطح الشمس الناجمة عن الموجات الصوتية وحركته الناجمة عن دوران الشمس؟
2. **التفكير الناقد** هل يمكن أن يكون هناك موجات صوتية لها الطول الموجي نفسه الذي لموجات الشمس الصوتية، وتصدر عن نجم آخر مشابه للشمس، لكنه مختلف في حجمه؟

الفصل 2
دليل الدراسة

2-1 خصائص الصوت Properties of Sound

المفردات

- الموجة الصوتية
- تأثير دوبلر

الفكرة الرئيسة: إن إدراكنا للموجات الصوتية يعتمد على الخصائص الفيزيائية لها.

- الصوت تغيُّر في الضغط ينتقل خلال مادة على هيئة موجة طولية.
- لموجة الصوت تردد، وطول موجي، وسرعة، وسعة. كما تنعكس موجات الصوت وتتداخل.
- سرعة الصوت في الهواء عند درجة حرارة الغرفة 20°C تساوي 343 m /s، وتزداد سرعة الصوت بزيادة درجة الحرارة 0.6 m /s تقريبًا مع كل زيادة 1 °C في درجة الحرارة.
- يُعرّف تأثير دوبلر بأنه التغير المُدرك من المراقب في تردد موجات الصوت الناتج عن حركة المصدر أو المراقب أو كليهما. ويمكن حسابه بوساطة المعادلة التالية:

$$f_d = f_s\left(\frac{v - v_d}{v - v_s}\right)$$

2-2 الرنين Resonance

المفردات

- الرنين
- التردد الأساسي
- الموجة الموقوفة
- الضربة

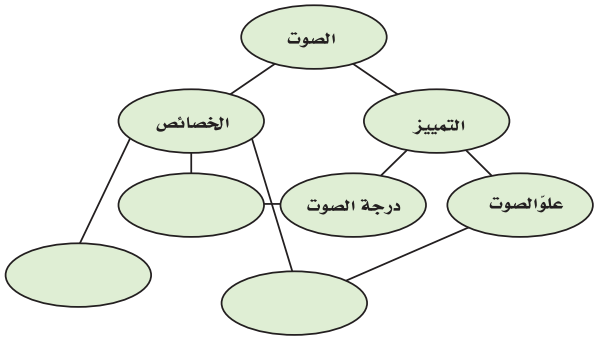
الفكرة الرئيسة: يمكن للموجات أن تتداخل مع الموجات الأخرى.

- ينتج الصوت عن اهتزاز جسم في وسط مادي.
- يمكن أن يحصل رنين لعمود هواء مع مصدر صوت، مما يزيد سعة تردد رنينه.
- يحصل رنين لعمود هوائي مغلق عندما يكون طوله $\frac{\lambda}{4}$ و$\frac{3\lambda}{4}$ و$\frac{5\lambda}{4}$ وهكذا. وتكون ترددات رنينه مضاعفات فردية للتردّد الأساسي.
- يحصل رنين لعمود هوائي مفتوح عندما يكون طوله $\frac{\lambda}{2}$ و$\frac{2\lambda}{2}$ و$\frac{3\lambda}{2}$ وهكذا. وتكون ترددات رنينه مضاعفات صحيحة للتردّد الأساسي.
- يكون للوتر المثبت عقدة عند كل طرف، ويحدث له رنين عندما يكون طوله مساويًا لـ $\frac{\lambda}{2}$ و$\frac{2\lambda}{2}$ و$\frac{3\lambda}{2}$ وهكذا، مثل العمود الهوائي المفتوح. وتكون ترددات رنينه مضاعفات صحيحة للتردّد الأساسي.
- تتداخل موجتان لهما التردد نفسه تقريبًا لتنتجا الضربات.

الفصل 2
التقويم

خريطة المفاهيم

18. أكمل الخريطة المفاهيمية أدناه باستعمال المصطلحات التالية: السعة، السرعة، التردد.



إتقان المفاهيم

19. عند قياس زمن الركض لمسافة 100 m، فإن المراقبين عند خط النهاية يبدؤون ساعات الوقف لديهم عند رؤيتهم دخانًا يتصاعد من المسدس الذي يشير إلى بدء السباق وليس عند سماعهم صوت الإطلاق. فسّر ذلك. وما الذي سيحدث لقياس زمن الركض إذا ابتدأ التوقيت عند سماع الصوت؟

20. كيف ينشأ الصوت، وينتقل في الهواء؟

21. **الغناء** كيف يمكن لنغمة معينة أن يغنيها مغني أوبرا، بحيث ينجم عنها تحطم كأس زجاجية؟

22. **المشاة** عند وصول جنود المشاة في الجيش إلى جسر فإنهم يسيرون على الجسر بخطوات غير منتظمة. فسّر ذلك.

23. **الآلات الموسيقية** لماذا لا يكون صوت معظم الآلات الموسيقية مثل صوت الشوكة الرنانة؟

تطبيق المفاهيم

24. **التقدير** لتقدير المسافة بينك وبين وميض برق بالكيلومترات، عُدّ الثواني بين رؤية الوميض وسماع صوت الرعد، واقسم على 3 وضح كيف تعمل هذه القاعدة؟

25. **الأفلام** انفجر قمر اصطناعي في فيلم خيال علمي؛ حيث سمع الطاقم في مركبة فضائية قريبة من الانفجار صوته وشاهدوه فورًا. إذا أُخترتَ مستشارًا فما الخطآن الفيزيائيان اللذان تلاحظهما ويتعين عليك تصحيحهما؟

26. **فرقة موسيقية** يقوم عازفان بضبط النغمات الصادرة عن مزماريهما، فإذا سمع قائد الفرقة تردد الضربة يزداد، فهل يتقارب تردد المزمارين أم يتباعد؟

إتقان حل المسائل

2–1 خصائص الصوت

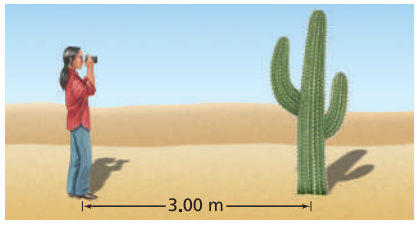
27. إذا سمعت صوت إطلاق قذيفة من مدفع بعيد بعد 5.0 s من رؤيتك للوميض فما بُعد المدفع عنك؟

28. إذا انتقلت موجة صوت تردّدها 4700 Hz في قضيب فولاذي، وكانت المسافة بين مركزي تضاغطين متتاليين هي 1.1 m، فما سرعة الموجة؟

29. **الخفافيش** يُرسل الخفاش موجات صوتية طولها الموجي 3.5 mm، ما تردد الصوت في الهواء؟

تقويم الفصل 2

30. التصوير الفوتوجرافي تحدّد بعض الكاميرات بُعد الجسم عن طريق إرسال موجة صوت وقياس الزمن الذي يحتاج إليه الصدى للعودة إلى الكاميرا، كما يبين **الشكل 12–2**، ما الزمن الذي تحتاج إليه موجة الصوت حتى تعود إلى الكاميرا إذا كان بعد الجسم عنها يساوي 3.00 m؟



الشكل 12–2

31. يهتز ملف نابضي للعبة بتردد 4.0 Hz بحيث تظهر موجات موقوفة بطول موجي 0.50 m، ما سرعة انتشار الموجة؟

32. يجلس مشجع في مباراة كرة قدم على بُعد 152 m من حارس المرمى في يوم دافئ درجة حرارته 30 °C، فما:

a. سرعة الصوت في الهواء عند درجة حرارة 30°C؟

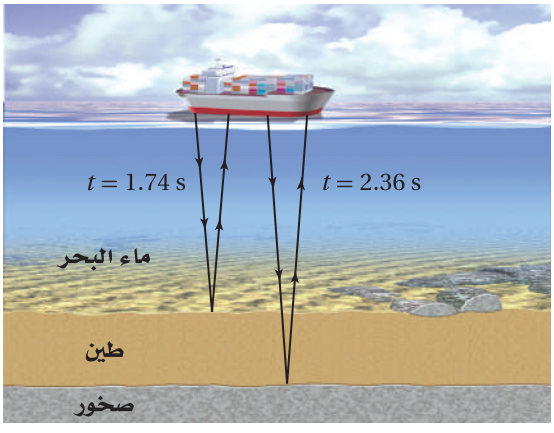
b. الزمن الذي يحتاج إليه المشجع ليسمع صوت ضرب الكرة بعد مشاهدته لضرب الحارس لها؟

33. التصوير الطبي تستعمل موجات فوق صوتية بتردد 4.25 MHz للحصول على صور للجسم البشري. فإذا كانت سرعة الصوت في الجسم مماثلة لسرعته في الماء المالح وتساوي 1.50 km/s، فما الطول الموجي لموجة ضغط ترددها 4.25 MHz في الجسم؟

34. السونار تمسح سفينة قاع المحيط بإرسال موجات سونار مباشرة من السطح إلى أسفل في ماء البحر، كما يبين **الشكل 13–2**. وتستقبل السفينة الانعكاس الأول عن الطين عند قاع البحر بعد زمن مقداره 1.74 s من إرسال الموجات. ويصل الانعكاس الثاني عن الصخور تحت الطين بَعد 2.36 s فإذا كانت درجة حرارة ماء البحر 25 °C، وسرعة الصوت في الطين 1875 m /s، فأوجد ما يلي:

a. عمق الماء.

b. سمك طبقة الطين.



الشكل 13–2

35. تتحرك شاحنة إطفاء بسرعة 35 m /s وعلى بُعد كبير وتتحرك سيارة أمام الشاحنة في الاتجاه نفسه بسرعة 15 m /s، فإذا انطلقت صفارة إنذار الشاحنة بتردد 327 Hz، فما التردد الذي يسمعه سائق السيارة؟

36. يتحرك قطار في اتجاه مراقب صوت، وعندما كانت سرعته 31 m /s انطلقت صفارته بتردد 305 Hz، ما التردد الذي يستقبله المراقب في كل حالة مما يلي:

a. المراقب ثابت.

b. المراقب يتحرك في اتجاه القطار بسرعة 21.0 m /s.

تقويم الفصل 2

2–2 الرنين

37. أنبوب في وضع رأسيّ مملوء بالماء وله صنبور عند قاعدته، وتهتز شوكة رنانة فوق طرفه العلوي. فإذا سُمع رنين عند تخفيض مستوى الماء في الأنبوب بمقدار 17 cm، وسُمع رنين مرة أخرى عند تخفيض مستوى الماء عن فوهة الأنبوب بمقدار 49 cm، فما تردد الشوكة الرنانة؟

38. شوكة رنانة تهتز بتردد 445 Hz، وعندما ضُربت شوكة ثانية نتجت ضربة نغمات بتردد 3 Hz، ما الترددان الممكنان للشوكة الثانية؟

39. **الآلات الوترية** ضبط وتر قيثارة طوله 65.0 cm ليصدر أقل تردد، ومقداره 196 Hz، فما:

a. سرعة الموجة في الوتر؟

b. ترددا الرنين التاليان لهذا الوتر؟

40. **الآلات الموسيقية** إن أخفض نغمة في الأورغن هي 16.4 Hz، أجب عن الأسئلة التالية:

a. ما طول أقصر عمود هوائي مفتوح للأورغن يحدث له رنين عند هذا التردد؟

b. كم يكون تردد أخفض نغمة إذا كان أنبوب الأورغن نفسه مغلقًا؟

مراجعة عامة

41. أنبوب أرغن مفتوح طوله 1.65 m، ما نغمة التردد الأساسي التي ينتجها في الهيليوم عند درجة حرارة 0 °C؟

42. **التاريخ العلمي** طوّر العالم الهولندي كريستوف بايز عام 1845 اختبارًا لتأثير دوبلر، فكان لديه عازف بوق يعزف نغمة A عند 440 Hz، بينما يركب سيارة مسطحة تجرّها قاطرة. ويعزف في الوقت نفسه عازف بوق ثابت النغمة نفسها، فسمع العالم 3.0 ضربات كل ثانية. ما سرعة القاطرة نحوه؟

التفكير الناقد

43. **حلّل واستنتج** صف كيف تستعمل ساعة وقف لتقدر سرعة الصوت إذا كنت على بعد 200 m من حفرة ملعب جولف، وكان مجموعة من اللاعبين يضربون كراتهم. هل يكون تقديرك لسرعة الصوت كبيرًا جدًّا أم صغيرًا جدًّا؟

44. **تصميم تجربة** صمّم تجربة تستطيع من خلالها اختبار معادلة سرعة موجة في وتر $\left(u=\sqrt{\frac{F_T}{\mu}}\right)$، حيث تمثل u سرعة الموجة في الوتر، F_T قوة الشد فيه، وμ كتلة وحدة الأطوال للوتر. ووضح القياسات التي ستجريها، وكيف تحصل عليها؟ وكيف تستعملها في فحص المعادلة؟

الكتابة في الفيزياء

45. ابحث في تركيب آلة موسيقية، مثل الكمان أو البوق. ما العوامل التي ينبغي أخذها في الحسبان إضافةً إلى طول الأوتار أو طول الأنبوب؟ وما الفرق بين آلة ذات نوعية جيدة وأخرى رديئة؟ وكيف تُفحص جودة أنغامها؟

46. ابحث في استعمال تأثير دوبلر في دراسة الفلك. ما دوره في نظرية الانفجار الكبير أو العظيم؟ وكيف يستعمل في الكشف عن الكواكب حول النجوم، ودراسة حركة المجرّات؟

مراجعة تراكمية

47. يُنقر وتر قيثارة طوله 60.0 cm في منطقة الوسط، فيعزف نغمة ترددها 440 Hz، ما سرعة الموجات في الوتر؟

اختبار مقنن

أسئلة اختيار من متعدد

اختر الإجابة الصحيحة في كلٍ مما يأتي:

1. ينتقل الصوت من مصدره إلى الأذن بسبب:

A تغير ضغط الهواء.

B الاهتزاز في الأسلاك أو الأوتار.

C الموجات الكهرومغناطيسية.

D الموجات تحت الحمراء.

2. يستمع خالد إلى موسيقى من مكبرات صوت على طرف بركة سباحة. فوصلت إلى أذنيه نغمة بتردد 327 Hz عندما كان تحت الماء. ما الطول الموجي للصوت الذي يسمعه؟ (افترض سرعة الصوت في الماء 1493 m/s).

A $2.19\ \text{nm}$ C $2.19 \times 10^{-1}\ \text{m}$

B $4.88 \times 10^{-5}\ \text{m}$ D $4.57\ \text{m}$

3. يجذب بوق سيارة انتباه مشاهد ثابت. فإذا كانت السيارة تقترب من المشاهد بسرعة 60.0 km/h، وتردد البوق 512 Hz، فما تردد الصوت الذي يسمعه المشاهد؟ (افترض سرعة الصوت في الهواء تساوي 343 m/s).

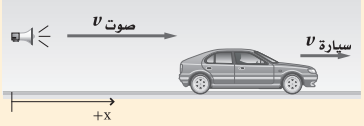
A 488 Hz C 538 Hz

B 512 Hz D 600 Hz

4. تبتعد سيارة بسرعة 72 km/h عن صفارة ثابتة، كما موضح في الشكل أدناه. فإذا انطلقت الصفارة بتردد 657 Hz، فما تردد الصوت الذي يسمعه السائق؟ (افترض سرعة الصوت في الهواء 343 m/s).

A 543 Hz C 647 Hz

B 620 Hz D 698 Hz



5. ينتقل صوت بوق في الهواء بسرعة 351 m/s، منتجًا نغمةً بتردد 298 Hz، ما الطول الموجي لموجة الصوت؟

A $9.93 \times 10^{-4}\ \text{m}$ C $1.18\ \text{m}$

B $0.849\ \text{m}$ D $1.05 \times 10^{5}\ \text{m}$

6. تسمع سماح 20 ضربة في 5.0 s عندما تعزف نغمتين على البيانو. فإذا كان تردد إحدى النغمتين 262 Hz، فما الترددان المحتملان للنغمة الثانية؟

A 242 Hz أو 282 Hz

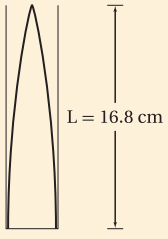
B 258 Hz أو 266 Hz

C 260 Hz أو 264 Hz

D 270 Hz أو 278 Hz

الأسئلة الممتدة

7. يبين الشكل أدناه طول عمود الهواء لأنبوب مغلق في حالة الرنين الأول، فإذا كان تردد الصوت 488 Hz، فما سرعة الصوت؟



إرشاد

دوِّن حساباتك

دوّن حساباتك وملاحظاتك حيثما كان ذلك ممكنًا. وأجر الحسابات كتابيًّا لا ذهنيًّا، ثم ضع خطًّا تحت الحقائق المهمة في العبارات والأشكال، وأعد قراءتها- ولا تحاول حفظها.

الفصل 3

أساسيات الضوء
Fundamentals of Light

يتوقع بعد الإنتهاء من دراسة هذا الفصل أن أكون قادرًا على:

- توضيح المفاهيم المرتبطة بالاستضاءة(نموذج الشعاع الضوئي، المصدر الضوئي، المصدر المستضيء(المضاء)، الوسط المعتم(غير الشفاف)، الوسط الشفاف، الوسط شبه الشفاف، التدفق الضوئي، الاستضاءة).
- تطوير نموذج الشعاع الضوئي.
- توقع تأثير البعد في الاستضاءة.
- حل مسائل تتضمن سرعة الضوء.
- توضيح المفاهيم المرتبطة بالطبيعة الموجية للضوء(الحيود، اللون الأساسي، اللون الثانوي، اللون المتمّم، الاستقطاب، قانون مالوس).
- وصف كيف تثبت ظاهرة الحيود عمليًا أن الضوء عبارة عن موجات.
- توقع تأثير ألوان الضوء المتراكبة والأصباغ الممزوجة.
- استخدام الأدوات والأجهزة المتعلقة بالضوء لإجراء التجارب وتحليل بياناتها.
- استقصاء وحل المشكلات المتعلقة ببعض المفاهيم المتعلقة بالضوء.
- الوعي بأهمية الضوء في الحياة اليومية.

الفصل الأول

الفكرة العامة:

يسلك الضوء سلوك الموجات ويمكن استكشافه بالعين المجردة.

(3-1) الاستضاءة

الفكرة الرئيسة تسير موجات الضوء في خطوط مستقيمة، ويمكن أن تغير اتجاهها فقط عندما تنتقل من وسط إلى آخر.

(3-2) الطبيعة الموجية للضوء

الفكرة الرئيسة تشبه موجات الضوء بقية الموجات فهي تحيد عن الأجسام وله طول موجي وتردد.

فكّر

إلامَ تعود هذه الفروق في اللون؟ وما العلاقة بين هذه الألوان؟

تجربة استهلالية

كيف يمكنك تحديد مسار الضوء في الهواء؟

سؤال التجربة ما المسار الذي يسلكه الضوء خلال انتقاله في الهواء؟

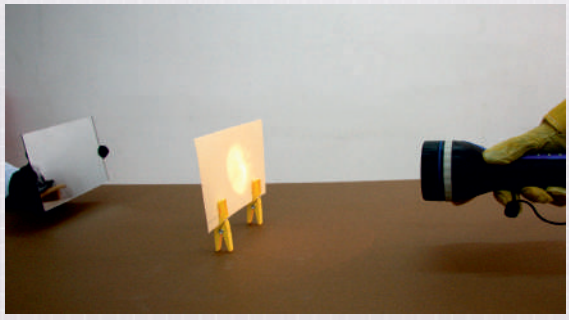
الخطوات

1. اثقب بطاقة فهرسة بالمثقب عند مركزها.
2. استخدم الصلصال في تثبيت البطاقة رأسيًّا، بحيث تكون حافتها الطويلة على سطح الطاولة.
3. أشعل المصباح ودع زميلك يحمله، مراعيًا مرور أشعة المصباح الضوئي من خلال الثقب الموجود في البطاقة. **تحذير: يسخن المصباح بمرور الوقت.**
4. احمل مرآة في الجانب المقابل للبطاقة، بحيث يصطدم الضوء المار من خلال الثقب بالمرآة، ثم عتّم الغرفة.
5. حرّك المرآة وأمِلْها بحيث تعكس الشعاع الضوئي وتسقطه على البطاقة. **تحذير: احذر من عكس الشعاع الضوئي في اتجاه عيون زملائك في المختبر.**
6. دوّن ملاحظاتك.

التحليل

صف صورة الشعاع الضوئي المنعكس التي تشاهدها على بطاقة الفهرسة. وصف المسار الذي سلكه الشعاع الضوئي.

التفكير الناقد هل يمكنك رؤية الشعاع الضوئي في الهواء؟ لماذا؟



الفيزياء في حياتك

يراعى عند تصميم المباني أن يتم التقليل من الإضاءة المصنعة، والاعتماد بشكل أكبر على الإضاءة الطبيعية.

تساؤلات جوهرية:

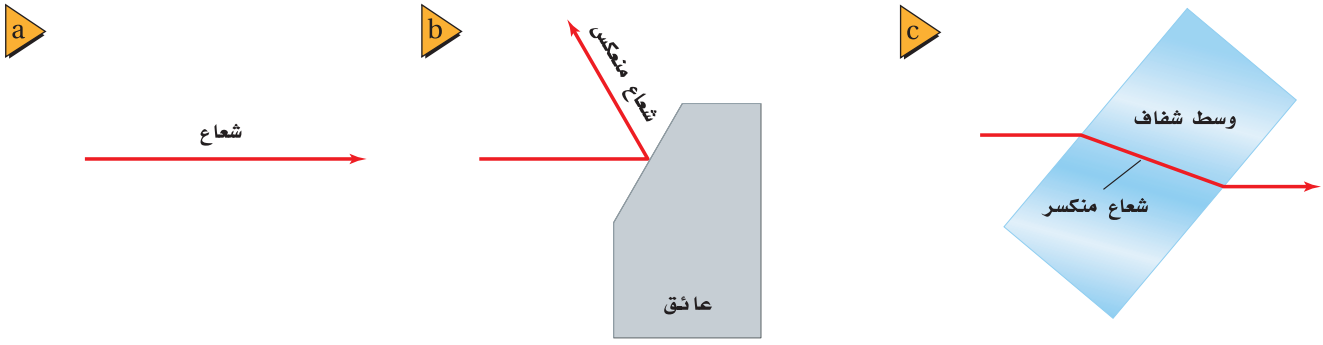
- ما المبادئ الأساسية لنموذج الشعاع الضوئي؟
- ما العلاقة بين المسافة والإضاءة؟

المفردات:

- نموذج الشعاع الضوئي
- الوسط الشفاف
- المصدر المضيء
- الوسط شبه الشفاف
- المصدر المستضيء(المضاء)
- التدفق الضوئي
- الوسط المعتم(غير الشفاف)
- الاستضاءة

يُعد الضوء والصوت وسيلتين تتمكن عن طريقهما من التواصل مع بيئاتنا والحصول على المعلومات. ويبدو الضوء الوسيلة التي توفر أكبر مجموعة متنوعة من المعلومات، حيث تستطيع العين البشرية تحسّس التغيرات البسيطة جدًّا في حجم الجسم وموقعه وسطوعه، إضافة إلى لونه، كما تتمكن أعيننا في العادة من التمييز بين الظلال والأجسام الصلبة، وتستطيع أحيانًا التمييز بين انعكاسات الأجسام والأجسام نفسها.

تعلم أن الضوء يسير في خطوط مستقيمة، فكيف تثبت ذلك؟ عندما تدخل حزمة ضوئية ضيقة ـ مثل ضوء المصباح الكهربائي أو ضوء الشمس ـ عبر النافذة فإن دقائق الغبار المنتشرة في الهواء تجعل الضوءَ مرئيًّا، وترى مسار الضوء على شكل خط مستقيم. وعندما يعترض جسمك ضوء الشمس ترى هيئة جسمك في صورة ظل. هذه الأشياء يمكن حدوثها فقط بسبب أن الضوء ينتقل في خطوط مستقيمة. وقد طوّرت نماذج تصف سلوك الضوء؛ اعتمادًا على كيفية انتقال الضوء.



الشكل 1–3 الشعاع الضوئي هو خط مستقيم يمثّل المسار الخطي لحزمة ضيقة من الضوء (a). ويمكن أن يغيّر الشعاع الضوئي اتجاهه إذا انعكس (b) أو انكسر (c).

نموذج الشعاع الضوئي Ray Model of Light

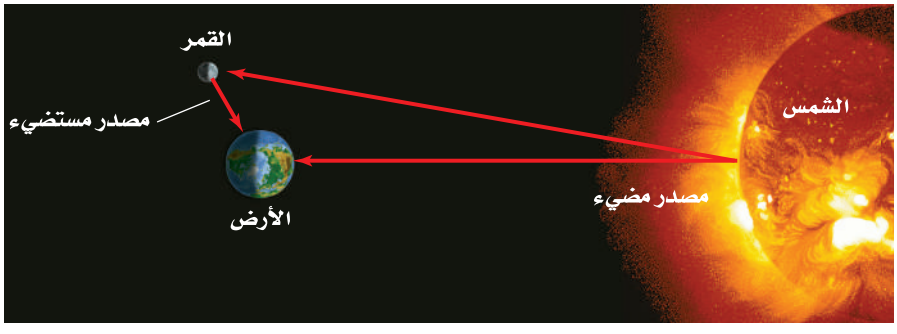
اعتقد العالم إسحق نيوتن أن الضوء سيل من جسيمات متناهية في الصغر لا يمكن تخيلها، تتحرك بسرعة كبيرة جدًّا، أطلق عليها اسم كريات ضوئية أو جُسيمات ضوئية. ولم يستطع نموذج نيوتن تفسير خصائص الضوء جميعها؛ إذ بيّنت التجارب أن الضوء يسلك أيضًا سلوك الموجات. يُمثَّل الضوء في نموذج **الشعاع الضوئي** على شكل شعاع ينتقل في خط مستقيم ويتغير اتجاهه فقط إذا اعترض حاجزٌ مساره، كما يتضح من **الشكل 1–3**. لقد قُدّم نموذج الشعاع الضوئي بوصفه طريقة لدراسة كيفية تفاعل الضوء مع المادة، بغض النظر عما إذا كان الضوء جسيمًا أو موجة. وتسمى دراسة الضوء بهذه الطريقة البصريات أو البصريات الهندسية.

مصادر الضوء تنبعث أشعة الضوء من مصادرها ، وتُعد الشمس المصدر الرئيس للضوء. وهناك بعض المصادر الطبيعية الأخرى للضوء، منها اللهب والشرر، وحتى بعض أنواع اليراع. ومصادر الضوء المصنعة، منها المصابيح المتوهّجة، والمصابيح الفلورسنتية ومصابيح الدايود الباعث للضوء LED، كما أن هناك شاشات التلفاز، وأشعة الليزر.

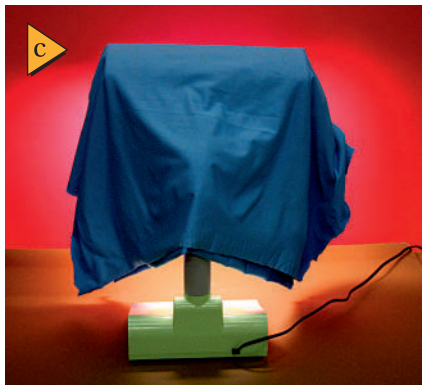
دلالة الألوان

الأشعة الضوئية باللون **الأحمر**.

ما الفرق بين ضوء الشمس وضوء القمر؟ ضوء الشمس أكثر سطوعًا من الضوء الذي يصلنا من القمر، والشمس **مصدر مضيء**؛ أيْ أنها جسم يبعث ضوءًا من ذاته، أمّا القمر فيُعدّ **مصدرًا مستضيئًا (مُضاءً)**، أيْ أنه جسم يصبح مرئيًّا نتيجة انعكاس الضوء عنه، كما يتضح من **الشكل 2–3**. فالمصابيح المتوهجة ـ ومنها المصابيح الكهربائية – مضيئة؛ لأن الطاقة الكهربائية تُسخِّن سلك التنجستن الرفيع الموجود في المصباح، مما يؤدي إلى توهّجه. وتبعث المصابيح المتوهجة الضوء نتيجة درجة حرارتها العالية. ويعمل العاكس المثبت على الدراجة الهوائية عمل مصدر مستضيء؛ حيث صُمّم ليصبح مرئيًّا بشدة عندما يُضاء بوساطة أضواء السيارة الأمامية.



الشكل 2–3 تعمل الشمس عمل مصدر مضيء للأرض والقمر، ويعمل القمر عمل مصدر مُضاء يضيء الأرض.



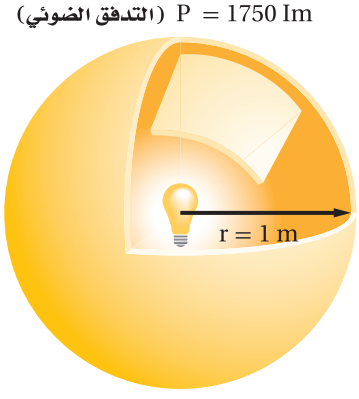
■ **الشكل 3–3** يسمح الزجاج الشفاف للأجسام أن تُرى من خلاله (a). ويسمح غطاء المصباح شبه الشفاف للضوء بالمرور من خلاله، على الرغم من أن المصباح الضوئي نفسه غير مرئي (b). والقماش البلاستيكي المعتم (غير الشفّاف) الذي يغطي التمثال يَحُول دون رؤية التمثال (c).

تكون المصادر المستضيئة مرئية بالنسبة لك؛ لأن الضوء ينعكس عن الجسم أو ينفذ من خلاله ليصل إلى عينيك. ويُسمّى الوسط الذي لا يمر الضوء من خلاله ويعكس بعض الضوء **وسطًا معتمًا** (أي غير شفّاف)، في حين يُسمّى الوسط الذي يمر الضوء من خلاله مثل الهواء والزجاج **وسطًا شفّافًا**. أما الوسط الذي يمر الضوء من خلاله، ولا يسمح للأجسام أن تُرى بوضوح فيُسمّى **وسطًا شبه شفّاف**، فمظلة المصباح مثال على الأجسام المصنوعة من أوساط شبه شفافة. ويبين **الشكل 3–3** أنواع الأوساط الثلاثة. والأوساط الشفافة أو شبه الشفافة لا تمرّر الضوء فقط، بل يمكنها أن تعكس جزءًا منه أيضًا؛ فمثلاً تستطيع رؤية انعكاس صورة جسمك على نافذة الزجاج أحيانًا.

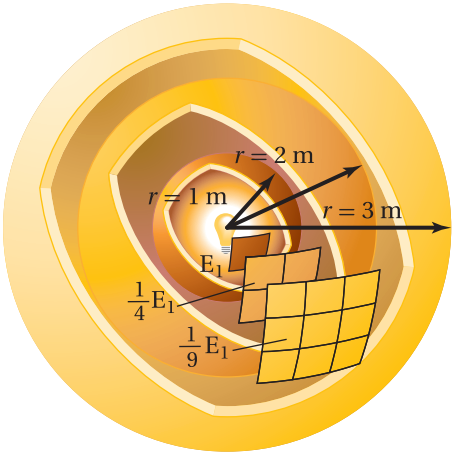
كمية الضوء معدل انبعاث طاقة الضوء من المصدر المضيء يُسمّى **التدفق الضوئي** P، ويُقاس التدفق الضوئي بوحدة لومن (lm)، فالمصباح الكهربائي المتوهج الذي قدرته 100 W يصدر 1750 lm تقريبًا. وتستطيع أن تفكر في التدفق الضوئي بوصفه مقياسًا لمعدل انبعاث الأشعة الضوئية من المصدر المضيء. تخيّل أنك وضعت هذا المصباح في مركز كرة نصف قطرها 1 m، كما في **الشكل 4–3**، سيبعث المصباح الضوء في الاتجاهات جميعها تقريبًا؛ أي أن تدفقًا ضوئيًّا بمقدار 1750 lm يصف الضوء جميعه الذي يصطدم بالسطح الداخلي للكرة خلال وحدة الزمن. وحتى لو كان نصف قطر الكرة 2 m فإن التدفق الضوئي للمصباح الكهربائي على هذه الكرة سيساوي التدفق الضوئي نفسه على الكرة التي نصف قطرها 1 m؛ وذلك لأن العدد الكلي للأشعة الضوئية الصادرة عن المصباح لا يتغير.

وبمعرفة كمية الضوء المنبعثة من المصدر المضيء يمكنك تحديد مقدار الإضاءة التي يزودها المصدر المضيء لجسم، كالكتاب مثلًا. إن إضاءة سطح، أو بمعنى آخر معدل اصطدام الضوء بوحدة المساحات للسطح يُسمّى **الاستضاءة** E. ويمكنك أن تفكر في هذا الأمر بوصفه مقياسًا لعدد الأشعة الضوئية التي تصطدم بسطح ما. وتُقاس الاستضاءة بوحدة اللوكس lx التي تساوي لومن لكل متر مربع، lm/m^2.

■ **الشكل 4–3** التدفق الضوئي يساوي معدل انبعاث الضوء من المصدر المضيء. في حين تساوي الاستضاءة معدل سقوط الضوء على السطح.



ما مقدار استضاءة السطح الداخلي للكرة، مستعينًا بالتركيب الموضح في **الشكل 4–3**؟ تُحسب المساحة السطحية للكرة من خلال المعادلة $4\pi r^2$، لذا تكون المساحة السطحية لهذه الكرة $4\pi (1.00\ \text{m})^2 = 4\pi\ \text{m}^2$ والتدفق الضوئي الذي يصطدم بكل متر مربع من الكرة يساوي $1750\ \text{lm} / (4\pi\ \text{m}^2) = 139\ \text{lx}$؛ أي يسقط على بعد 1.00 m من المصباح 139 lm على كل متر مربع، لذا تكون استضاءة السطح الداخلي للكرة 139 lx

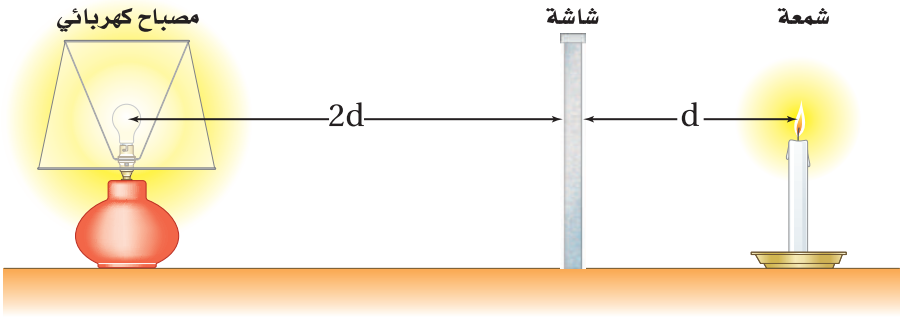


الشكل 5–3 تتغير الاستضاءة E الناتجة عن مصدر ضوء نقطي عكسيًا مع مربع البعد عنه.

قانون التربيع العكسي ماذا يحدث إذا أصبحت الكرة المحيطة بالمصباح الكهربائي أكبر؟ إذا كان نصف قطر الكرة 2.00 m فإن التدفق الضوئي الكلي سيبقى 1750 lm، في حين تصبح مساحة سطح الكرة $4\pi (2.00\ \text{m})^2 = 16.0\pi\ \text{m}^2$، أيْ أكبر أربع مرات من مساحة سطح كرة نصف قطرها 1.00 m، كما يتضح من **الشكل 5–3**. وتكون الاستضاءة داخل الكرة التي نصف قطرها 2.00 m مساويةً $1750\ \text{lm} / (16.0\pi\ \text{m}^2) = 34.8\ \text{lx}$، لذا يسقط 34.8 lm على كل متر مربع.

إن الاستضاءة على السطح الداخلي للكرة التي نصف قطرها 2.00 m تساوي ربع الاستضاءة على السطح الداخلي للكرة التي نصف قطرها 1.00 m، وبالطريقة نفسها تجد أن الاستضاءة على السطح الداخلي للكرة التي نصف قطرها 3.00 m تساوي $(1/3)^2$، أو 1/9، من الاستضاءة على السطح الداخلي للكرة التي نصف قطرها 1.00 m. ويوضح **الشكل 5–3** أن الاستضاءة الناتجة بفعل مصدر ضوء نقطي تتناسب طرديًّا مع $1/r^2$، وتُسمى علاقة التربيع العكسي؛ أي أنه عندما تنتشر أشعة الضوء من مصدر نقطي في خطوط مستقيمة وفي الاتجاهات جميعها فإن عدد أشعة الضوء المتاحة لإضاءة وحدة المساحة تتناقص مع زيادة مربع البعد عن مصدر الضوء النقطي.

شدة الإضاءة تُحدّد بعض المصادر المضيئة بوحدة الشمعة candela (cd) وهي الوحدة المستخدمة لقياس شدة الإضاءة في النظام الدولي للوحدات، والشمعة ليست مقياسًا للتدفق الضوئي؛ إنما هي مقياس لشدة الإضاءة. وشدة الإضاءة لمصدر ضوء نقطي تساوي التدفق الضوئي الذي يسقط على مساحة مقدارها $1\ \text{m}^2$ من مساحة السطح الداخلي لكرة نصف قطرها 1 m، ولذا فإن شدة الإضاءة تساوي التدفق الضوئي مقسومًا على 4π، والمصباح الكهربائي الذي تدفقه الضوئي يساوي 1750 lm تكون شدة إضاءته مساوية للمقدار التالي: $1750\ \text{lm} / 4\pi = 139\ \text{cd}$



الشكل 6–3 الاستضاءة متساوية على جانبي الشاشة مع أنّ المصباح الكهربائي أكثر سطوعًا من الشمعة.

في **الشكل 6–3**، يكون بُعد المصباح الكهربائي عن الشاشة مساويًا ضعفي بُعد الشمعة عنها. ولكي يولّد المصباح الكهربائي على الجانب المقابل له من الشاشة الاستضاءةَ نفسها التي تولّدها الشمعة على الجانب المقابل لها من الشاشة يجب أن يكون سطوع المصباح الكهربائي أكبر أربع مرات من سطوع الشمعة. لذا ينبغي أن تكون شدة إضاءة المصباح الكهربائي تعادل أربعة أضعاف شدة إضاءة الشمعة.

إضاءة السطوح Surface Illumination

كيف تتمكن من زيادة الاستضاءة على سطح مكتبك؟ يمكن أن تستخدم مصباحًا كهربائيًّا أكثر سطوعًا يؤدي إلى زيادة التدفق الضوئي، أو أن تحرك المصدر الضوئي إلى موقع أقرب لسطح مكتبك؛ أي أنّك تقلّل المسافة بين المصدر الضوئي والسطح الذي يُضيئه. ولتبسيط المسألة يمكنك اعتبار المصدر الضوئي مصدرًا ضوئيًّا نقطيًّا، ولذا فإن كلًّا من الاستضاءة والمسافة سيتبعان علاقة التربيع العكسي. ويمكنك أيضًا تبسيط المسألة أكثر إذا اعتبرت أن الضوء المنبعث من المصدر يسقط عموديًّا على سطح المكتب. وبعد هذا التبسيط يمكنك التعبير عن الاستضاءة الناتجة عن مصدر ضوء نقطي بالمعادلة التالية:

الاستضاءة بفعل مصدر نقطي $E = \frac{P}{4\pi r^2}$

الاستضاءة على الجسم بفعل مصدر نقطي تساوي التدفق الضوئي للمصدر الضوئي مقسومًا على المساحة السطحية لكرة نصف قطرها يساوي بُعد الجسم عن المصدر الضوئي.

تذكّر أن التدفق الضوئي لمصدر الضوء ينتشر بصورة كروية في الاتجاهات جميعها، لذا فإن جزءًا فقط من التدفق الضوئي يكون متاحًا لإضاءة سطح المكتب. ويكون استخدام هذه المعادلة صحيحًا، فقط إذا كان الضوء المنبعث من المصدر المضيء يسقط عموديًّا على السطح الذي يضيئه. كما أن استخدام هذه المعادلة يكون صحيحًا فقط للمصادر المضيئة التي تكون صغيرة، أو بعيدة بصورة كافية حتى يمكن اعتبارها مصادر نقطية. لذا فإن المعادلة لا تعطي قيمًا دقيقة للاستضاءة الناتجة بفعل المصابيح الكهربائية الفلورسنتية الطويلة، أو المصابيح الكهربائية المتوهجة التي تكون قريبة من السطح الذي تضيئه.

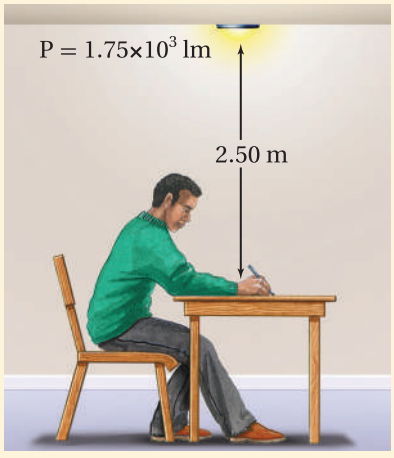
تطبيق الفيزياء

العقول المستنيرة

عند اتخاذ القرارات في كيفية تحقيق الاستضاءة الصحيحة على سطوح مقاعد الطلاب، يتعيّن على المهندسين المعماريين أن يأخذوا بعين الاعتبار التدفق الضوئي للضوء، وبُعد المصادر الضوئية عن سطوح المقاعد، كما تُعدّ كفاءة المصادر الضوئية عاملاً اقتصاديًا مهمًا.

مثـــال 1

استضاءة سطح ما الاستضاءة الواقعة على سطح مكتب إذا أُضيء بمصباح كهربائي تدفقه الضوئي 1.75×10^3 lm، علمًا بأنه موضوع على بُعد 2.50 m فوق سطح المكتب؟



1 تحليل المسألة ورسمها

- افترض أن المصباح الكهربائي مصدر نقطي.
- ارسم موقع المصباح والمكتب، وعيّن r، P.

المعلوم	المجهول
$P = 1.75 \times 10^3$ lm	$E = ?$
$r = 2.50$ m	

2 إيجاد الكمية المجهولة

بما أن السطح متعامد مع اتجاه انتقال الشعاع الضوئي، لذا يمكنك أن تطبق معادلة الاستضاءة بفعل المصدر النقطي.

بالتعويض عن $P = 1.75 \times 10^3$ lm, $r = 2.50$ m

$$E = \frac{P}{4\pi r^2}$$

$$= \frac{1.75 \times 10^3 \text{ lm}}{4\pi (2.50 \text{ m})^2}$$

$$= 22.3 \text{ lm/m}^2 \quad = 22.3 \text{ lx}$$

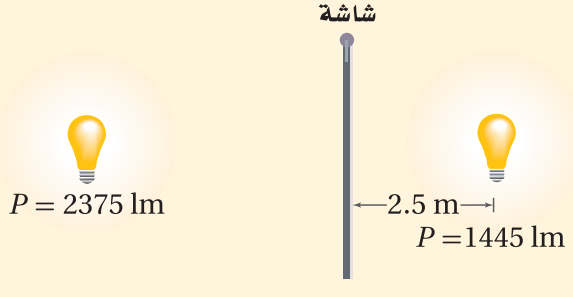
3 تقويم الجواب

- **هل الوحدات صحيحة؟** إن وحدات الاستضاءة $\text{lx} = \text{lm/m}^2$ تتفق مع الإجابة.
- **هل تعبّر الإشارات عن معنى؟** المقادير كلها موجبة، كما يجب أن تكون.
- **هل الجواب منطقي؟** إن الاستضاءة أقل من التدفق الضوئي، والتي ينبغي أن تكون عند هذه المسافة.

مسائل تدريبية

1. تحرّك مصباح فوق صفحات كتاب بدءًا من مسافة 30 cm إلى 90 cm، قارن بين استضاءة الكتاب قبل الحركة وبعدها.

2. وضعت شاشة بين مصباحين كهربائيين يُضيئانها بالتساوي، كما في **الشكل 7–3**. فإذا كان التدفق الضوئي للمصباح الأول 1445 lm عندما كان يبعد مسافة 2.5 m عن الشاشة فما بُعد المصباح الثاني عن الشاشة إذا كان تدفقه الضوئي 2375 lm؟



الشكل 7–3

يتعين على المهندسين الذين يصمّمون أنظمة الإنارة معرفة كيف يستخدم الضوء. فإذا كان المطلوب هو الحصول على إضاءة منتظمة لتجنب المساحات المظلمة فإن التصميم المناسب هو توزيع مصادر الإضاءة على المساحة المطلوب إنارتها، بحيث تكون المسافات بينها متساوية، كما هو معمول به في إنارة غرفة الصف. ولأن بعض مصادر الإضاءة لا تولّد فعليًّا ضوءًا موزعًا بالتساوي فإن المهندسين يصمّمون مصادر ضوئية خاصة؛ وذلك للتحكم في توزيع الإضاءة وانتشارها؛ فمثلاً يُنفّذون أنظمة إنارة موزعة بانتظام على مساحات كبيرة. وقد بُذلت جهود كبيرة في هذا المجال، وخصوصًا للمصابيح الأمامية في السيارات.

3-1 مراجعة

3. **الخصائص الضوئية للمواد** غالبًا ما يتم اختيار ستائر النوافذ بحيث تكون شبه شفافة أو معتمة. ما أهمية ذلك في كل حالة؟

4. **الاستضاءة** هل يولّد مصباح كهربائي واحد استضاءة أكثر من مصباحين متماثلين يقعان على ضعفي بُعد مسافة المصباح الأول؟ وضّح إجابتك.

5. **شدة الإضاءة** يضيء مصباحان شاشة بالتساوي بحيث يقع المصباح A على بعد 5.0 m، ويقع المصباح B على بعد 3.0 m، فإذا كانت شدة إضاءة المصباح A 75 cd، فما شدة إضاءة المصباح B؟

6. **بُعد المصدر الضوئي** افترض أن مصباحًا كهربائيًّا يضيء سطح مكتبك ويولّد فقط نصف الاستضاءة المطلوبة. فإذا كان المصباح يبعد حاليًّا مسافة 1.0 m فكم ينبغي أن يكون بعده ليولّد الاستضاءة المطلوبة؟

7. ماذا يحدث لاستضاءة صفحات كتاب عند تحريك المصباح بعيداً عن الكتاب ؟

8. ماذا يحدث لشدّة إضاءة المصباح عند تحريكه بعيدًا عن كتاب؟

9. **التفكير الناقد** عمود إنارة يحوي مصباحين متماثلين يرتفعان 3.3 m عن سطح الأرض. فإذا أراد مهندسو البلدية توفير الطاقة الكهربائية وذلك بإزالة أحد المصباحين، فكم يجب أن يكون ارتفاع المصباح المتبقي عن الأرض لإعطاء الاستضاءة نفسها على الأرض؟

الفيزياء عبر المواقع الإلكترونية لمزيد من الاختبارات القصيرة ارجع إلى الموقع الإلكتروني www.obeikaneducation.com

الفيزياء في حياتك

إذا ألقيت نظرة فاحصة على ظلك، فستلاحظ أن حافة الظل ليست حادة، ويحدث ذلك لأن الضوء عبارة عن موجات تنحني حول الأشياء – في هذه الحالة– جسمك.

تساؤلات جوهرية:

- كيف يبين الحيود أن الضوء عبارة عن موجات؟
- ما تأثير خلط ألوان الضوء ومزج الأصباغ؟
- كيف يحدث الاستقطاب وتأثير دوبلر؟

المفردات:

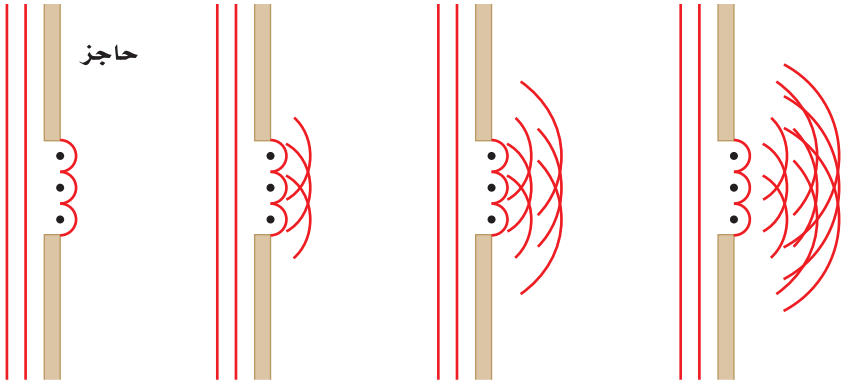
- الحيود
- اللون الأساسي
- اللون الثانوي
- اللون المتمم
- الاستقطاب
- قانون مالوس

لعلك تعرف أن الضوء مكوّن من موجات، ولكن ما الأدلة على صحة ذلك؟ افترض أنك تسير في اتجاه غرفة الموسيقى في المدرسة وباب الغرفة مفتوح، فستسمع بالتأكيد صوت الموسيقى وأنت تتحرك في اتجاه باب الغرفة قبل أن ترى أعضاء الفرقة الموسيقية من خلال الباب؛ وذلك لأن الصوت يصل إليك بانحرافه حول حافة الباب، في حين يسير الضوء الذي يجعلك ترى أعضاء الفرقة بخطوط مستقيمة فقط. فإذا كان الضوء مكوّنًا من موجات فلماذا لا يسلك الضوء الطريقة نفسها التي يسلكها الصوت؟ يسلك الضوء في الواقع سلوك الصوت نفسه، إلا أنه في حالة الضوء يكون أقل وضوحًا مقارنة بالصوت.

الحيود والنموذج الموجي للضوء
Diffraction and the Wave Model of Light

لاحظ العالم الإيطالي فرانسيسكو ماري جريمالدي في عام 1665 أن حواف الظلال ليست حادة تمامًا. فقد أدخل حزمة ضيقة من الضوء إلى داخل غرفة مظلمة، وأمسك عصًا أمام الضوء حيث أسقط الظل على سطح أبيض. فكان ظل العصا المتكون على السطح الأبيض أعرض من الظل الذي ينبغي أن يكون في حالة انتقال الضوء في خط مستقيم مرورًا بحواف العصا، ولاحظ جريمالدي أيضًا أن الظل مُحاط بحزم ملونة. وعرّف جريمالدي هذه الظاهرة **بالحيود** وهي انحناء الضوء حول حواف الحواجز.

حاول العالم الدنماركي كريستيان هيجنز في عام 1678 برهنة النموذج الموجي؛ وذلك لتفسير ظاهرة الحيود. واعتمادًا على مبدأ هيجنز يمكن اعتبار النقاط كلها على صدر الموجة الضوئية، وكأنها تمثل مصادر جديدة لموجات صغيرة. وتنتشر هذه الموجات الصغيرة في جميع الاتجاهات بعضها خلف بعض، يتكون صدر الموجة المستوية من عدد غير محدود من المصادر النقطية في خط واحد، وعندما يعبر صدر الموجة هذا حافة ما فإن الحافة تقطع صدر الموجة، حيث تنتشر كل موجة دائرية تولدت بوساطة أي نقطة من نقاط هيجنز على شكل موجة دائرية في الحيز الذي انحنى عنده صدر الموجة الأصلية، كما في **الشكل 8–3** . وهذا هو الحيود.

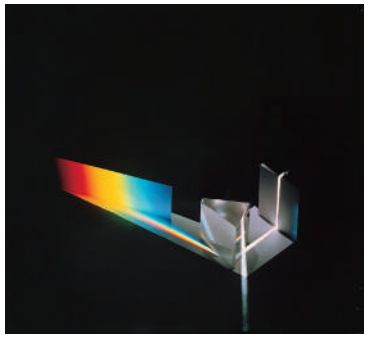


الشكل 8–3 اعتمادًا على مبدأ هيجنز يمكن اعتبار قمة كل موجة سلسلةً من المصادر النقطية. وينشئ كل مصدر نقطي مويجة دائرية، وتتراكب المويجات لتكوين مقدمة موجة مستوية، ما عدا المناطق عند الحواف؛ حيث تتحرك المويجات الدائرية لنقاط هيجنز عندها بعيدًا عن صدر الموجة.

الألوان Colors

أجرى العالم نيوتن تجارب على الألوان، وذلك عن طريق تمرير حزمة ضيقة من ضوء الشمس خلال منشور زجاجي، كما في **الشكل 9–3** . فلاحظ تكوّن ترتيب منظّم للألوان أطلق عليه نيوتن اسم الطيف. كما اعتقد نيوتن أن جسيمات الضوء تتفاعل بطريقة متفاوتة في الزجاج لتولّد الطيف؛ وذلك اعتمادًا على النموذج الجسيمي للضوء.

ولاختبار هذا الافتراض سمح نيوتن للطيف النافذ من المنشور الأول بالسقوط على منشور آخر، فإذا تولّد الطيف نتيجة التفاوت في تفاعل الزجاج مع جسيمات الضوء فإن المنشور الثاني سيزيد من انتشار الألوان، وبدلاً من ذلك فقد عكس المنشور الثاني انتشار الألوان وأعاد تراكبها لتكوّن اللون الأبيض. وبعد إجراء المزيد من التجارب، استنتج نيوتن أن اللون الأبيض مركّب من ألوان عدّة، وأن هناك خاصية أخرى للزجاج غير عدم انتظامه هي التي تؤدي إلى تحلّل الضوء إلى مجموعة من الألوان.



الشكل 9–3 عندما يمر الضوء الأبيض خلال منشور فإنه يتحلّل إلى ألوان الطيف.

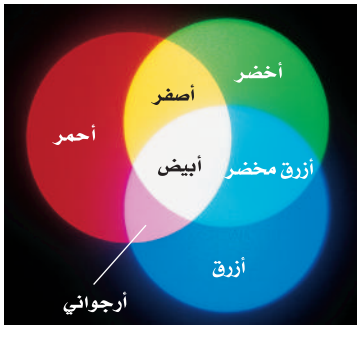
واعتمادًا على تجارب جريمالدي وهيجنز وغيرهما، فقد تم التوصل إلى أن للضوء خصائص موجية، وأن لكل لون من ألوان الضوء طولاً موجيًّا محدّدًا. وتقع منطقة الضوء المرئي ضمن نطاق من الأطوال الموجية، يتراوح بين 400 nm و700 nm تقريبًا، كما في **الشكل 10–3**. وأكبر هذه الأطوال الموجية هو طول موجة الضوء الأحمر، وكلما تناقص الطول الموجي تحوّل اللون إلى البرتقالي فالأصفر فالأخضر فالأزرق فالنيلي وأخيرًا البنفسجي.

الشكل 10–3 يمتد الطيف الضوئي من الطول الموجي الكبير (اللون الأحمر) إلى الطول الموجي القصير (اللون البنفسجي).

عندما يعبر الضوء الأبيض الحد الفاصل من الهواء إلى داخل الزجاج ويعود مرة أخرى إلى الهواء كما في **الشكل 9–3**، فإن الطبيعة الموجية تؤدي إلى انحناء كل لون من ألوان الضوء، أو انكساره، بزاوية مختلفة، وهذا الانحناء غير المتساوي للألوان المختلفة يتسبب في انتشار الضوء الأبيض على شكل طيف، وهذا يعني أن الأطوال الموجية المختلفة للضوء تتفاعل مع المادة بطرائق مختلفة يمكن التنبؤ بها.

اللون بوساطة مزج أشعة الضوء يتشكّل الضوء الأبيض من الضوء الملوّن بطرائق مختلفة. فمثلاً عندما يُسلّط كل من الضوء الأحمر والأخضر والأزرق بشدات مناسبة على شاشة بيضاء كما في **الشكل 11–3**، تظهر المنطقة التي تتداخل فيها هذه الألوان على الشاشة باللون الأبيض. أي أن هذه الألوان (الأحمر والأخضر والأزرق) تُشكّل الضوء الأبيض عندما تتراكب، وتسمى عملية جمع ألوان الضوء. وهي تستخدم في أنابيب الألوان في التلفاز، حيث تحتوي هذه الأنابيب على مصادر نقطية متناهية في

الشكل 11–3 التراكيب المختلفة للضوء الأزرق والأخضر والأحمر يمكن أن تشكّل الضوء الأصفر، أو الأزرق مخضر، أو الأرجواني أو الضوء الأبيض.



الصغر لكل من الضوء الأحمر والأخضر والأزرق. وعندما يكون لكل لون من ألوان الضوء الثلاثة شدة مناسبة تظهر الشاشة باللون الأبيض. لذا فإن كلًّا من اللون الأحمر والأخضر والأزرق يُسمى **لونًا أساسيًّا** أو أوليًّا. ويمكن مزج الألوان الأساسية على شكل أزواج لتشكيل ثلاثة ألوان إضافية كما يتضح من **الشكل 11–3**. فالضوء الأحمر والأخضر يشكّلان معًا الضوء الأصفر، في حين يشكّل الضوء الأزرق والأخضر معًا الضوء الأزرق المخضر (الفيروزي)، أما الضوء الأحمر والأزرق فيشكّلان معًا الضوء الأرجواني (الأحمر المزرق). ويُسمى كل من اللون الأصفر والأزرق المخضر (الفيروزي) والأرجواني **لونًا ثانويًّا**؛ لأن كلًّا منها مركّب من لونين أساسيين.

ويتضح من **الشكل 11–3**، أن الضوء الأصفر يتكون من الضوء الأحمر والضوء الأخضر، وإذا سُلِّط اللونان الأصفر والأزرق على شاشة بيضاء بشدة مناسبة يظهر سطح الشاشة باللون الأبيض. ويُسمى اللونان الضوئيان اللذان يتراكبان معًا لإنتاج اللون الأبيض **الألوان المتتامة**. لذا فإن اللون الأصفر لون متمِّم للون الأزرق، والعكس صحيح؛ لأن اللونين يتراكبان معًا لينتجا اللون الأبيض. وبالطريقة نفسها فإن الأزرق المخضر والأحمر لونان متتامان، وكذلك الأرجواني والأخضر. لذا يمكن تبييض الملابس المصفرّة باستخدام عامل أزرق اللون يضاف إلى مسحوق الغسل.

اللون بوساطة اختزال أشعة الضوء يمكن للأجسام أن تعكس الضوء، وتمرّره، كما يمكنها امتصاصه. ولا يعتمد لون الجسم فقط على الأطوال الموجية للضوء الذي يضيء الجسم، بل يعتمد أيضًا على الأطوال الموجية التي امتصها الجسم، وعلى الأطوال الموجية التي عكسها. إن وجود المواد الملوّنة بصورة طبيعية أو إضافتها اصطناعيًّا إلى المادة المكوّنة للجسم أو إضافة أصباغ إليه يكسبه لونًا خاصًّا.

إن المواد الملوّنة عبارة عن جزيئات لها القدرة على امتصاص أطوال موجية معينة للضوء، وتسمح لأطوال موجية أخرى بالنفاذ من خلالها أو تعكسها. وعندما يُمتص الضوء فإن طاقته تنتقل إلى الجسم الذي اصطدم به، وتتحول إلى أشكال أخرى من الطاقة. فالقميص الأحمر لونه أحمر لأن المواد الملوّنة فيه تعكس اللون الأحمر إلى أعيننا. فعندما يسقط الضوء الأبيض على الجسم الأحمر اللون الموضح في **الشكل 12–3** فإن جزيئات المواد الملوّنة في الجسم تمتص الضوء الأزرق والأخضر وتعكس الضوء الأحمر. أما عندما يسقط الضوء الأزرق فقط على جسم لونه أحمر فإن مقدارًا يسيرًا من الضوء ينعكس ويظهر الجسم غالبًا أسودًا.

تظهر مكعبات النرد الأحمر والأصفر والأخضر بلون معتم، والمكعبات الأبيض والأزرق باللون الأزرق.

تظهر المكعبات الأصفر والأزرق والأخضر باللون المعتم، والأحمر والأبيض باللون الأحمر.

الشكل 12–3 تمتص المواد الملوّنة في حجر النرد أطوالاً موجية مختلفة بشكل انتقائي وتعكسها. حجر النرد مُضاء بالضوء الأبيض (a)، والضوء الأحمر (b)، والضوء الأزرق (c).

تجربة

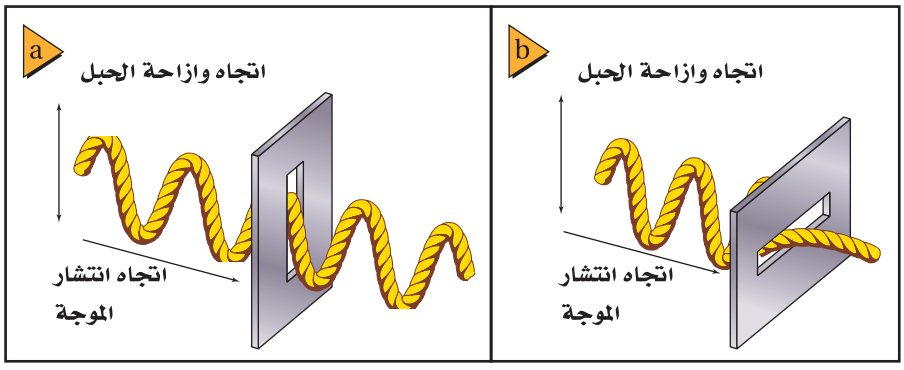
علاقة الألوان بدرجة الحرارة

يشير بعض الرسامين إلى اللونين الأحمر والبرتقالي على أنهما ألوان حارة، وإلى اللونين الأزرق والأخضر على أنهما ألوان باردة. فهل ترتبط الألوان فعليًا بدرجة الحرارة؟

1. احصل على منشور زجاجي من معلمك.
2. أحضر مصباحًا كهربائيًا مزوّدًا بمفتاح تحكم في الشدة الضوئية، وأشعله وعتّم الغرفة، واضبط مفتاح التحكم عند أقل سطوع للمصباح.
3. زد مقدار سطوع المصباح ببطء. تحذير: يمكن أن يسخن المصباح ويؤدي إلى حروق في الجلد.
4. راقب لون الضوء الناتج عن المنشور، وكيف يرتبط اللون مع سخونة المصباح الكهربائي التي تشعر بها في يدك؟

التحليل والاستنتاج

5. ما الألوان التي ظهرت أولاً عندما كان الضوء خافتًا؟
6. ما الألوان التي ظهرت عند أقصى إضاءة ممكنة؟
7. كيف ترتبط هذه الألوان مع درجة حرارة فتيلة المصباح؟



■ **الشكل 13–3** في الحبل المستخدم كنموذج لموجات الضوء يُمثّل الضوء فيه بموجة واحدة تنتقل وتهتز في المستوى الرأسي (**a**). ولا تستطيع المرور من خلال المستقطِب الأفقي (**b**).

استقطاب الضوء Polarization of Light

هل سبق أن نظرت إلى الضوء المنعكس عن طريق من خلال نظارات شمسية مستقطبة؟ ستلاحظ أنه عندما تُدير النظارات تبدو الطريق في البداية مظلمة، ثم مضيئة، ثم مظلمة مرة أخرى مع استمرار التدوير. أما عند تدوير النظارات في اتجاه ضوء منبعث من مصباح كهربائي فسيكون مقدار تغير الضوء ضئيلاً. فما سبب وجود هذا الفرق؟ إن ضوء المصباح العادي غير مستقطَب، في حين أن الضوء القادم من الطريق قد انعكس وأصبح مستقطبًا. **والاستقطاب** هو إنتاج ضوء يتذبذب في مستوى واحد.

الاستقطاب بالترشيح (الفلترة) يمكن فهم الاستقطاب من خلال الحبل المستخدم كنموذج لموجات الضوء الموضح في **الشكل 13–3**، حيث تمثّل الموجة الميكانيكية المستعرضة في الحبل الموجات الضوئية المستعرضة، أما الشق فيمثل ما يعرف بمحور الاستقطاب لوسط الاستقطاب. فعندما تكون موجات الحبل موازية للشق فإنها تعبر من خلاله، أما عندما تكون الموجات متعامدة مع الشق فلا تعبر من خلاله، بل تحجب. وتحتوي أوساط الاستقطاب جزيئات طويلة تتمكن خلالها الإلكترونات من التذبذب، جميعها في الاتجاه نفسه. فعندما ينتقل الضوء عابرًا الجزيئات تمتص الإلكترونات الموجات الضوئية التي تتذبذب في اتجاه تذبذب الإلكترونات نفسه. وتسمح هذه العملية للموجات الضوئية المهتزة في اتجاه معيّن بالعبور من خلالها، في حين تمتص الموجات المهتزة في الاتجاه الآخر. ويُسمى اتجاه وسط الاستقطاب المتعامد مع الجزيئات الطويلة بمحور الاستقطاب. والموجات التي تتمكن من العبور هي فقط تلك الموجات المهتزة بصورة موازية للمحور.

يحتوي الضوء العادي على موجات تهتز في كل اتجاه عموديّ على اتجاه انتقالها. فإذا وضع وسط الاستقطاب في طريق حزمة من الضوء العادي فإن مركّبات الموجات التي ستنفذ من خلاله هي فقط تلك المركّبات التي تكون في اتجاه محور الاستقطاب نفسه. وينفذ في المتوسط من خلال وسط الاستقطاب نصف كمية الضوء الكلي، لذا تنخفض شدة الضوء بمقدار النصف. وينتج وسط الاستقطاب ضوءًا مستقطبًا، ويُسمى مثل هذا الوسط مرشِّح (فلتر) الاستقطاب.

الاستقطاب بالانعكاس عندما تنظر من خلال مرشِّح استقطاب إلى الضوء المنعكس عن لوح زجاجيّ وتُدوّر المرشح ستلاحظ أن الضوء يسطع ثم يخفت. وهذا يعني أنه حدث استقطاب جزئيّ للضوء في اتجاه سطح الزجاج عندما انعكس؛ أي أن الأشعة

■ **الشكل 14–3** التقطت هذه الصورة لمتجر ملابس دون استخدام فلتر استقطاب؛ ويظهر فيها توهج الضوء على سطح النافذة (**a**). والتقطت الصورة للمشهد نفسه باستخدام فلتر استقطاب (**b**).

الشكل 15–3 عندما يتم ترتيب مرشّحي استقطاب بحيث يكون محورا استقطابهما متوازيين، تنفذ من خلالهما أكبر كمية من الضوء (a). ولن ينفذ الضوء من خلال مرشّحي الاستقطاب إذا تم ترتيبهما بحيث يكون محورًا استقطابهما متعامدين (b).

التجربة العملية:

- ما أنواع الإضاءة؟ وما مصادر الضوء التي تولد ضوءًا مستقطبًا؟
- كيف يمكنك التقليل من الوهج؟

الضوئية المنعكسة تحتوي على كمية كبيرة من الضوء المتذبذب بشكل موازٍ لسطح الزجاج. واستقطاب الضوء المنعكس عن الطرق هو السبب في تقليل التوهج عند استخدام النظارات الشمسية المستقطبة. ونستدل من حقيقة تغيّر شدة الضوء المنعكس عن الطرق نتيجة تدوير النظارات الشمسية المستقطبة على أن الضوء المنعكس مستقطب جزئيًّا. ويستطيع مصوّرو الفوتوجراف استخدام مرشّحات الاستقطاب وتثبيتها على عدسات الكاميرا لحجب الضوء المنعكس، كما هو موضح في **الشكل 14–3**.

تحليل الاستقطاب افترض أنك حصلت على ضوء مستقطب باستخدام مرشّح استقطاب، فماذا يحدث إذا وضعت مرشّح استقطاب آخر في مسار الضوء المُستقطب؟ إذا كان محور الاستقطاب لمرشّح الاستقطاب الثاني موازيًا لمحور الاستقطاب لمرشّح الاستقطاب الأول فسينفذ الضوء من خلاله، كما في **الشكل 15a–3**. أما إذا كان محورا الاستقطاب لمرشّحي الاستقطاب متعامدين فلن ينفذ الضوء من خلاله، كما يتضح من **الشكل 15b–3**.

ويُسمّى القانون الذي يوضح مدى انخفاض شدة الضوء عندما يعبر من خلال مرشح استقطاب ثانٍ **قانون مالوس**. فإذا كانت شدة الضوء بعد مروره بمرشح الاستقطاب الأول هي I_1 فإن مرشّح الاستقطاب الثاني، الذي يصنع محور استقطابه زاوية مقدارها θ مع محور استقطاب المرشّح الأول، سينتج ضوءًا شدته I_2، بحيث تكون أقل من I_1 أو تساويها.

قانون مالوس $I_2 = I_1 \cos^2\theta$

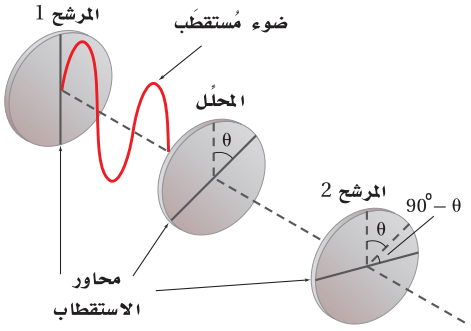
شدة الضوء الخارج من مرشّح الاستقطاب الثاني تساوي شدة الضوء الخارج من مرشّح الاستقطاب الأول مضروبًا في مربع جيب تمام الزاوية المحصورة بين محوري استقطاب المرشّحين.

تستطيع باستخدام قانون مالوس أن تُقارن بين شدة الضوء الخارج من مرشّح الاستقطاب الثاني وشدة الضوء الخارج من مرشّح الاستقطاب الأول، ومن ثَم تستطيع تحديد الزاوية المحصورة بين محوري استقطاب المرشّحين. ويُسمى مرشّح الاستقطاب الذي يستخدم قانون مالوس لتحقيق ما تقدم بالمحلّل. وتستخدم المحلّلات لتحديد استقطاب الضوء المنبعث من أي مصدر ضوئي.

مسألة تحدٍّ

إذا وضعت مرشّحًا محلّلًا بين مرشّحين متقاطعين (محورا استقطابهما متعامدان)، بحيث لا يوازي محور استقطابه أيًّا من محوري استقطاب المرشّحين المتقاطعين، كما هو موضح في الشكل المجاور.

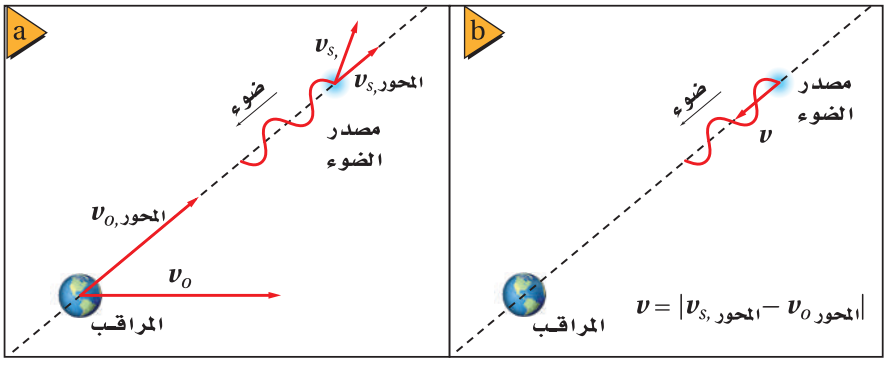
1. فإنك تلاحظ أن قسمًا من الضوء يمر من خلال المرشح 2، على الرغم من أنه لم يكن هناك ضوء يمر من خلال المرشح 2 قبل إدخال المرشّح المحلّل. فلمَ يحدث ذلك؟
2. إذا وضع المرشّح المحلّل بحيث يصنع محوره زاوية θ بالنسبة لمحور استقطاب المرشّح 1 فاشتق معادلة لحساب شدة الضوء الخارج من المرشّح 2 مقارنة بشدة الضوء الخارج من المرشّح 1.



سرعة الموجات الضوئية The Speed of a Light Waves

تعلمت سابقًا أنّ الطول الموجي λ لموجة هو دالة رياضية في سرعة الموجة v للوسط الذي تنتقل فيه، وفي ترددها الثابت f. ويمكن وصف الضوء بوساطة النماذج الرياضية نفسها التي تستخدم في وصف الموجات عمومًا؛ لأن الضوء له خصائص موجية. ويكون الطول الموجي لضوء ذي تردد معلوم ينتقل في الفراغ عبارة عن دالة رياضية في سرعة الضوء c، حيث يمكن كتابتها على النحو التالي: $\lambda_0 = c/f$. ولقد زوّدنا تطور الليزر في ستينيات القرن الماضي بطرائق جديدة لقياس سرعة الضوء. كما يمكن قياس تردد الضوء بدقة متناهية؛ وذلك باستخدام أجهزة الليزر والزمن المعياري الذي تزودنا به الساعات الذرية. في حين يتم قياس الأطوال الموجية للضوء بدقة أقل كثيرًا، وتبلغ سرعة الضوء في الفراغ c=299792458 m/s، ويمكن استخدام القيمة $c=3\times10^8$ m/s في الحسابات الرياضية.

إن لألوان الضوء المختلفة ترددات وأطوالًا موجية مختلفة، ولكنها تنتقل جميعها في الفراغ بسرعة تساوي سرعة الضوء c، فإذا كان تردد موجة الضوء في الفراغ معروفًا أمكنك عندئذٍ حساب طولها الموجي، والعكس صحيح؛ وذلك لأن جميع الأطوال الموجية للضوء تنتقل في الفراغ بالسرعة نفسها. ويمكنك باستخدام القياسات الدقيقة لتردد الضوء وسرعته حساب قيمة دقيقة للطول الموجي للضوء.



الشكل 16–3 تختلف السرعة المتجهة للمراقب عن السرعة المتجهة لمصدر الضوء (a). مقدار الطرح لمركّبتي السرعة على امتداد المحور بين مصدر الضوء ومراقب الضوء يمثل السرعة النسبية على امتداد المحور بين المصدر والمراقب v (b).

الحركة النسبية والضوء ماذا يحدث إذا تحرك مصدر الضوء في اتجاهك أو تحركت أنت في اتجاه مصدر الضوء؟ تعلّمت سابقًا أنه إذا كان مصدر الصوت أو المستمع متحركًا فسيتغير تردّد الصوت الذي يسمعه المستمع، وهذا صحيح أيضًا بالنسبة للضوء؛ ويُسمّى مقدار الفرق بين السرعتين المتجهتين لكلٍّ من المصدر والمراقب بالسرعة النسبية. وتذكّر أن العوامل المؤثرة في تأثير دوبلر هي فقط مركّبتا السرعتين المتجهتين على امتداد المحور بين المصدر والمراقب، كما في **الشكل 16–3**.

إنزياح دوبلر لدراسة تأثير دوبلر في الضوء اعتبر أن السرعات النسبية المحورية أقل كثيرًا من سرعة الضوء ($v << c$). ويستخدم هذا التبسيط لتكوين معادلة حول تردد الضوء المراقَب $f_{\text{المراقب}}$؛ التي تمثل تردد الضوء كما يراه المراقِب.

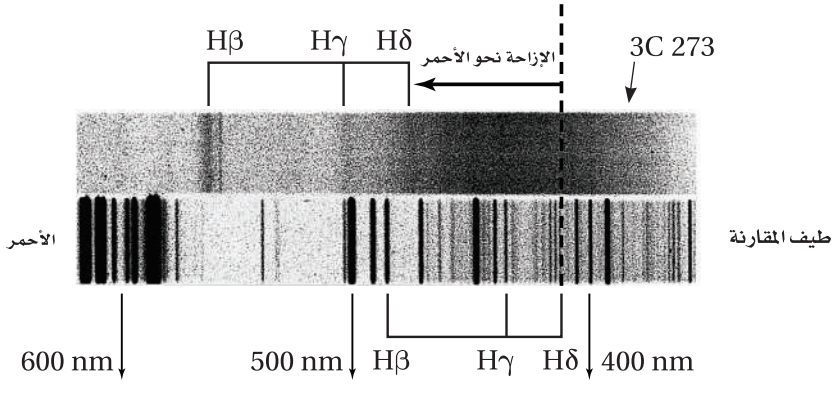
تردّد الضوء المُراقَب $f_{\text{المراقب}} = f\left(1 \pm \frac{v}{c}\right)$

تردّد الضوء المُراقَب من مصدر يساوي التردد الحقيقي لضوء المصدر، مضروبًا في حاصل جمع واحد إلى (السرعة النسبية على امتداد المحور بين المصدر والمراقب إذا تحرك كل منهما في اتجاه الآخر مقسومةً على سرعة الضوء)، أو حاصل طرح (السرعة النسبية مقسومةً على سرعة الضوء) من الواحد إذا تحركا مبتعدين.

لأن معظم المشاهدات حول تأثير دوبلر في الضوء قد تمت في سياق علم الفلك، فإن معادلة تأثير دوبلر للضوء قد صيغت بدلالة الطول الموجي بدلاً من التردد. ويمكن استعمال المعادلة التالية $\lambda = c/f$ والتبسيط $v << c$ لحساب إزاحة دوبلر $\Delta\lambda$، التي تمثل الفرق بين الطول الموجي المراقَب للضوء والطول الموجي الحقيقي له.

انزياح دوبلر $(\lambda_{\text{المراقب}} - \lambda) = \Delta\lambda = \pm \frac{v}{c}\lambda$

الفرق بين الطول الموجي المراقَب للضوء والطول الموجي الحقيقي للضوء الذي يولّده المصدر يساوي الطول الموجي الحقيقي للضوء الذي يولّده المصدر مضروبًا في السرعة النسبية للمصدر والمراقب مقسومًا على سرعة الضوء. وهذه الكمية تكون موجبة إذا تحرّكا مبتعدين أحدهما عن الآخر، وسالبة إذا تحرّكا في اتجاه أحدهما إلى الآخر.



الشكل 17–3 تبدو بوضوح ثلاثة خطوط انبعاث لعنصر الهيدروجين مزاحة نحو الأحمر في طيف الكوازار 3C 273 (النجم الزائف)، حيث أزيحت أطوالها الموجية 16% تقريبًا مقارنة بالظروف المختبرية.

مسائل تدريبية

10. ما تردّد خط طيف الأكسجين إذا كان طوله الموجي 513 nm؟

11. تتحرك ذرة هيدروجين في مجرة بسرعة 6.55×10^{6} m/s مبتعدة عن الأرض، وتبعث ضوءًا بتردّد 6.16×10^{14} Hz، ما التردّد الذي سيلاحظه فلكي على الأرض للضوء المنبعث من ذرة الهيدروجين؟

12. ينظر فلكي إلى طيف مجرة، فيجد أن هناك خطًّا لِطَيْف الأكسجين بالطول الموجي 525 nm، في حين أن القيمة المقيسة في المختبر تساوي 513 nm، احسب سرعة تحرك المجرة بالنسبة للأرض، ووضح ما إذا كانت المجرة تتحرك مقتربة من الأرض أو مبتعدة عنها. وكيف تعرف ذلك؟

إن التغير الموجب في الطول الموجي يعني أن الضوء مُزاح نحو الأحمر، وهذا يحدث عندما تكون السرعة المتجهة النسبية للمصدر في اتجاه مبتعدًا عن المراقِب. والتغير السالب في الطول الموجي يعني أن الضوء مُزاح نحو الأزرق، وهذا يحدث عندما تكون السرعة المتجهة النسبية للمصدر في اتجاه مقترب من المراقب. وعندما يزاح الطول الموجي نحو الأحمر فإن التردّد المراقَب يكون أقل، نتيجة للعلاقة العكسية بين هذين المتغيرين؛ لأن سرعة الضوء تبقى ثابتة. وعندما يُزاح الطول الموجي نحو الأزرق فإن التردد المراقَب يكون أكبر.

يستطيع الباحثون تحديد كيفية تحرك الأجسام الفلكية، مثل المجرات، بالنسبة للأرض، وذلك بمراقبة انزياح دوبلر للضوء. ويتم ذلك عن طريق مراقبة طيف الضوء المنبعث من النجوم في المجرة باستخدام جهاز يُسمّى المطياف، كما هو موضح في **الشكل 17–3**. حيث تبعث العناصر الموجودة في نجوم المجرات أطوالاً موجية محدّدة يمكن قياسها في المختبر. وللمطياف القدرة على قياس انزياح دوبلر لهذه الأطوال الموجية.

الربط مع الفلك

اقترح إدوين هابل في عام 1929 أن الكون يتمدد، وقد توصل هابل إلى هذه النتيجة بتحليل طيف الانبعاث القادم من عدة مجرات. ولاحظ هابل أن خطوط الطيف للعناصر المألوفة كانت ذات أطوال موجية أطول من المتوقع، حيث كانت خطوط الطيف مزاحة نحو نهاية الطيف ذي اللون الأحمر. وبغض النظر عن مساحة السماء التي راقبها، فقد كانت المجرات ترسل إلى الأرض ضوءًا مزاحًا نحو الأحمر. ترى، ما سبب انزياح خطوط الطيف نحو الأحمر؟ استنتج هابل من ذلك أن المجرات جميعها تتحرك مبتعدة عن الأرض.

3-2 مراجعة

13. **مزج ألوان الضوء** ما لون الضوء الذي يتّحد مع الضوء الأزرق للحصول على الضوء الأبيض؟

14. **الخصائص الموجية للضوء** سرعة الضوء الأحمر في الهواء والماء أقل من سرعته في الفراغ. فإذا علمت أن التردد لا يتغير عندما يدخل الضوء الأحمر في الماء، فهل يتغير الطول الموجي؟ إذا كان هناك تغير فكيف يكون؟

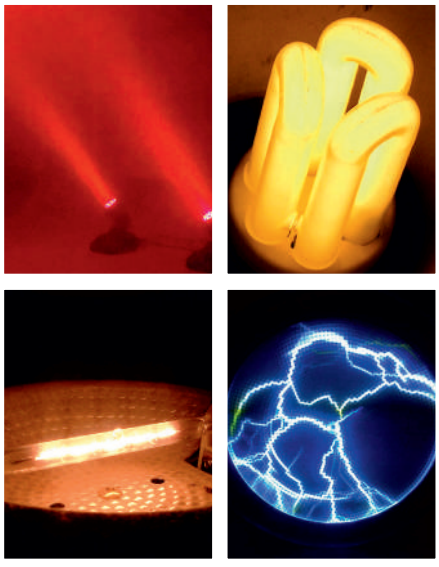
15. **الاستقطاب** صف تجربة بسيطة يمكنك إجراؤها لتحديد ما إذا كانت النظارات الشمسية المتوافرة في المتجر مستقطبة أم لا؟

16. **التفكير الناقد** توصّل الفلكيون إلى أن مجرّة الأندروميدا، وهي المجرّة القريبة من مجرتنا (مجرة درب التبانة)، تتحرك في اتجاه مجرتنا. وضح كيف تمكّن العلماء من تحديد ذلك. وهل يمكنك التفكير في دليل محتمل لاقتراب مجرة الأندروميدا من مجرتنا؟

تطورات الإضاءة Advances In Lighting

لقد سجّل التاريخ استخدام الزيت والشموع والغاز لتوفير الإضاءة في ساعات الليل المظلمة، فكان هناك دائمًا خطر كامن في استخدام اللهب المكشوف للحصول على الضوء. وجاء اختراع الإضاءة الكهربائية في القرن التاسع عشر، فزودنا بضوء أكثر سطوعًا، كما تحسنت وسائل الأمان والسلامة العامة للناس.

والمصابيح المتوهجة هي الشكل التقليدي للإضاءة الكهربائية التي لا تزال شائعة الاستعمال إلى الآن، حيث تُسخّن فتيلة التنجستن بالكهرباء حتى تتوهج باللون الأبيض. والتنجستن لا يحترق ولكنه يتبخر، مما يؤدي في نهاية الأمر إلى تلف فتيلة التنجستن، لذا فلن يكون الحصول على الضوء منه فعالًا جدًّا؛ بسبب تبخره. وقد نتج عن السعي المتواصل في تطوير الإضاءة الكهربائية إنتاج مصادر إضاءة أطول عمرًا وأقل إنتاجًا للحرارة.



تظهر الصور من أعلى اليسار وفي عكس اتجاه عقارب الساعة، الثنائيات الباعثة للضوء، وضوء الفلورسنت، وضوء الهالوجين، ومصابيح غاز—التفريغ الكهربائي في صورة مصابيح النيون.

مصابيح الكوارتز-الهالوجين

لحماية الفتيلة من التلف يُصنع المصباح بحيث يكون صغيرًا جدًّا ومملوءًا بغاز البرومين أو اليود. حيث تتّحد أيونات التنجستن الموجودة في الفتيلة بجزيئات الغاز في الحيز البارد من المصباح لتكوين مركّب يدور خلال المصباح ويتحد ثانية بالفتيلة. ويكون الضوء الناتج ناصع البياض وساطعًا، إلا أنه ساخن جدًّا أيضًا، ممّا يؤدي إلى صهر المصباح الزجاجي العادي، لذا يستخدم الكوارتز المنصهر الذي له درجة انصهار عالية.

مصابيح الغازات المخلخلة يصنع هذا النوع من المصابيح من أنبوب زجاجي مع سلك كهربائي (قطب كهربائي) مثبت عند كل طرف من أطراف الأنبوب، ويستخرج الهواء جميعه من داخل الأنبوب ويوضع مكانه كمية قليلة جدًّا من غاز يُختار بصورة خاصة. وعند تطبيق فرق جهد بين طرفي الأنبوب، تؤين الكهرباء أو تنتزع بعض الإلكترونات من ذرات الغاز. ويُعدّ الغاز المؤيّن موصلاً جيدًا للكهرباء، لذا يسري التيار الكهربائي خلاله، ويتسبب في توهج الغاز.

يعتمد استخدام مصابيح الغازات المخلخلة على نوع الغاز: إذ يستخدم غاز النيون في الإعلان، ويستخدم غاز الزنون في الكشّافات وفي وامضات آلات التصوير، كما يستخدم غاز الصوديوم في مصابيح إنارة الشوارع. ويعطي كل غاز لونًا مختلفًا إلا أن تراكيب المصابيح تكون متشابهة إلى حدٍّ كبير.

المصابيح الفلورسنتية يكون التوهج الناتج عن بخار الزئبق غير مرئي؛ لأن معظم طيفه يكون في نطاق الضوء فوق البنفسجي، وهو غير مرئي. لذا يُصنع المصباح الفلورسنتي بطلاء السطح الداخلي لمصباح تخلخل الزئبق بالفوسفور، وهو عنصر كيميائي يتوهج بسطوع عندما يصطدم به الضوء فوق البنفسجي. ويمكن صناعة المصابيح الفلورسنتية بأي لون؛ وذلك بتغيير المزيج المتكوّن من الفوسفور الأحمر والأخضر والأزرق. ومن ميزات هذه المصابيح أنها اقتصادية، وتعمر طويلا؛ لأنها تنتج حرارة قليلة، إضافةً إلى إنتاجها كمية كبيرة من الضوء.

الصمامات الثنائية الباعثة للضوء أصبحت الصمامات الثنائية الباعثة للضوء من مصادر الضوء الشائعة. حيث ينتج الصمام الثنائي ضوءًا أبيض، وذلك بإضاءة شاشة فوسفورية صغيرة جدًّا داخله باستخدام ضوء أزرق. وتعطي هذه الصمامات إضاءة كافية، كما أنها تكاد لا تنتج الحرارة عندما تعمل. وتتميز بكفاءتها العالية حيث يمكن لبطارية سيارة تزويد هذه المصابيح بالطاقة الكهربائية لتعمل في المنزل أيامًا عدة دون الحاجة إلى إعادة شحن البطارية.

التوسع

1. **لاحظ** بمساعدة معلمك بعض الأجهزة التي تستخدم الأضواء، وافحص بعض هذه الأجهزة لترى أنواع التقنيات المستخدمة في المصابيح.
2. **ابحث** تعرّف التركيب الداخلي لبعض أنواع مصابيح تفريغ الغاز بالإضافة إلى خصائص لون الضوء لكل منها ومجالات استخدامها اليومية العادية.

الفصل 3
دليل الدراسة

3-1 الاستضاءة Illumination

المفردات

- نموذج الشعاع الضوئي
- المصدر المضيء
- المصدر المستضيء (المُضَاء)
- الوسط المعتم
- الوسط الشفاف
- الوسط شبه الشفاف
- التدفق الضوئي
- الاستضاءة

الفكرة الرئيسة: تسير موجات الضوء في خطوط مستقيمة، ويمكن أن تغير إتجاهها فقط عندما تنتقل من وسط إلى آخر.

- ينتقل الضوء في خط مستقيم خلال أي وسط متجانس.
- يمكن تصنيف المواد على أنها شفافة، أو شبه شفافة أو غير شفافة (معتمة)، اعتمادًا على كمية الضوء التي تعكسها، أو تنفذها أو تمتصها.
- التدفق الضوئي لمصدر ضوئي هو المعدل الذي ينبعث به الضوء، ويقاس بوحدة لومن lm.
- الاستضاءة هي التدفق الضوئي لكل وحدة مساحة، وتقاس بوحدة لوكس lx، أو لومن لكل متر مربع lm/m^2.
- الاستضاءة بفعل مصدر ضوء نقطي تتناسب عكسيًّا مع مربع المسافة وطرديًّا مع التدفق الضوئي.

$$E = \frac{P}{4\pi r^2}$$

- سرعة الضوء في الفراغ ثابتة وتساوي $c = 3.00 \times 10^8\ m/s$.

3-2 الطبيعة الموجية للضوء The Wave Nature of Light

المفردات

- الحيود
- اللون الأساسي
- اللون الثانوي
- الألوان المتمِّمة
- الاستقطاب
- قانون مالوس

الفكرة الرئيسة: تشبه موجات الضوء بقية الموجات، فهي تحيد عن الأجسام ولها طول موجي وتردد.

- للضوء المرئي أطوال موجية يتراوح طولها بين 400 nm و 700 nm.
- يتكوّن الضوء الأبيض من تراكب ألوان الطيف، ولكل لون طول موجي خاص به.
- تراكب الألوان الأساسية (الأحمر والأخضر والأزرق) يكوّن الضوء الأبيض. ويشكّل تراكب لونين أساسيين أحد الألوان الثانوية التالية: الأصفر، الأزرق المخضر، الأرجواني.
- يتكوّن الضوء المستقطَب من موجات تتذبذب في المستوى نفسه.
- عند استخدام مرشِّحي استقطاب لاستقطاب الضوء فإن شدة الضوء الخارج من المرشِّح الأخير تعتمد على الزاوية بين محوري الاستقطاب لمرشِّحي الاستقطاب.

$$I_2 = I_1 \cos^2 \theta$$

- يمكن تمييز موجات الضوء المنتقلة خلال الفراغ بدلالة كل من تردّدها وطولها الموجي وسرعتها.

$$\lambda_0 = \frac{c}{f}$$

- تتعرّض موجات الضوء لإنزياح دوبلر، الذي يعتمد على السرعة النسبية على امتداد المحور بين المراقب ومصدر الضوء.

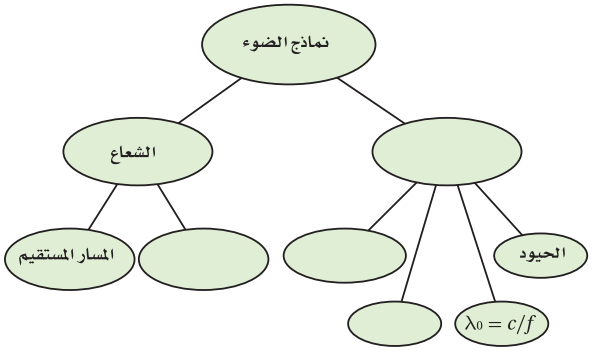
$$f_{\text{المراقَب}} = f\left(1 \pm \frac{v}{c}\right)$$

$$\Delta\lambda = (\lambda_{\text{المراقَب}} - \lambda) = \pm \frac{v}{c}\lambda$$

الفصل 3
التقويم

خريطة المفاهيم

17. أكمل خريطة المفاهيم التالية باستخدام المصطلحات التالية: الموجة، c، تأثير دوبلر، الاستقطاب.



إتقان المفاهيم

18. لا ينتقل الصوت خلال الفراغ، فكيف تعرف أن الضوء ينتقل في الفراغ؟

19. فرّق بين المصدر المضيء والمصدر المستضيء (المُضاء).

20. فرّق بين الأجسام الشفافة وشبه الشفافة والمعتمة.

21. ما الذي يتناسب طرديًّا مع استضاءة سطح بمصدر ضوئي؟ وما الذي يتناسب معه عكسيًّا؟

22. لماذا يعد حيود الموجات الصوتية أكثر شيوعًا في الحياة اليومية من حيود الموجات الضوئية؟

23. ما لون الضوء الذي له أقصر طول موجي؟

24. ما مدى الأطوال الموجية للضوء، بدءًا من الأقصر إلى الأطول؟

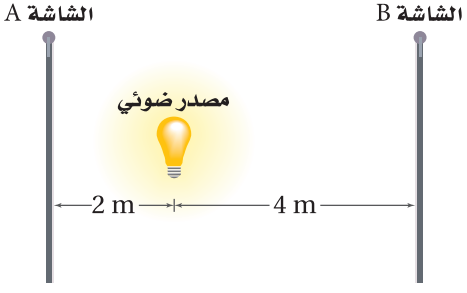
25. ما الألوان الضوئية التي يتكوّن منها الضوء الأبيض؟

26. لماذا يظهر جسم ما أسود اللون؟

27. تبعث مجرة بعيدة خطًّا طيفيًّا في منطقة اللون الأخضر من الطيف الضوئي، فهل ينزاح الطول الموجي المُراقَب على الأرض إلى الضوء الأحمر أو إلى الضوء الأزرق؟ وضح إجابتك.

تطبيق المفاهيم

28. يقع مصدر ضوء نقطي على بعد 2.0 m من الشاشة A، وعلى بعد 4.0 m من الشاشة B، كما يتضح من **الشكل 18–3**. قارن بين الاستضاءة على الشاشة B والاستضاءة على الشاشة A؟



الشكل 18–3

29. **مصباح الدراسة** يبعد مصباح صغير مسافة 35 cm من صفحات الكتاب، فإذا ضاعفت المسافة مرتين:

a. فهل تبقى الاستضاءة على الكتاب هي نفسها دون تغيير؟

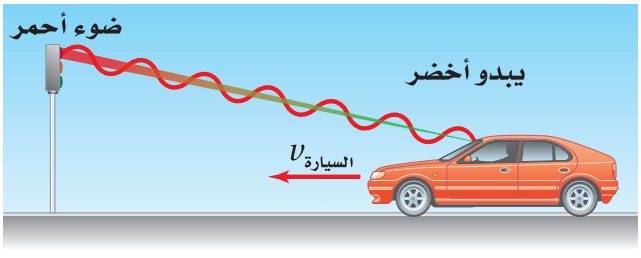
b. إذا لم تكن كذلك فكم تكون أكبر أو أصغر؟

30. **حساسية العين** إن العين حساسة جدًّا للضوء الأصفر والأخضر، في حين أن حساسيتها للضوء الأحمر والأزرق أقل عشرة في المئة من حساسيتها القصوى. بناءً على هذه المعلومة، ما الألوان التي توصي بها لطلاء سيارات الإطفاء والإسعاف؟ ولماذا؟

تقويم الفصل 3

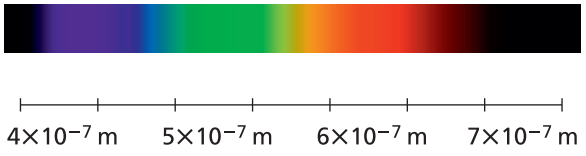
31. **لون إضاءة الشوارع** تحتوي بعض مصابيح الشوارع على بخار الصوديوم تحت ضغط عالٍ. وتنتج هذه المصابيح ضوءًا معظمه أصفر وجزء قليل منه أحمر. هل يصلح أن تستخدم المجتمعات التي فيها مثل هذه المصابيح سيارات شرطة ذات لون أزرق داكن؟ ولماذا؟

32. **مخالفة السير** هبْ أنك شرطي مرور، وأوقفت سائقًا تجاوز الإشارة الحمراء، وافترض أيضًا أن السائق وضّح لك من خلال رسم **الشكل 19–3** أن الضوء كان يبدو أخضر بسبب تأثير دوبلر عندما قطع الإشارة. وضّح له مستخدمًا معادلة إزاحة دوبلر، كم يجب أن تكون سرعته حتى يبدو الضوء الأحمر ($\lambda = 645\ nm$) على شكل ضوء أخضر ($\lambda = 545\ nm$). **مساعدة: افترض لحل هذه المسألة أن معادلة إزاحة دوبلر يمكن تطبيقها عند هذه السرعة.**



الشكل 19–3

33. **الانزياح نحو الأحمر** لاحظ الفلكيون أن الضوء القادم من المجرات البعيدة يبدو أكثر احمرارًا من الضوء القادم من المجرات القريبة. فسّر لماذا استنتج الفلكيون أن المجرات البعيدة تتحرك مبتعدة عن الأرض، اعتمادًا على **الشكل 20–3** للطيف المرئي.



الشكل 20–3

34. **الصور المستقطبة** يضع مصورو الفوتوجراف مرشِّحات استقطاب فوق عدسات الكاميرا لكي تبدو الغيوم أكثر وضوحًا، فتبقى الغيوم بيضاء في حين تبدو السماء داكنة بصورة أكبر. وضح ذلك معتمدًا على معرفتك بالضوء المستقطب.

إتقان حل المسائل

3–1 الاستضاءة

35. أوجد الاستضاءة على مسافة 4.0 m أسفل مصباح تدفقه الضوئي 405 lm.

36. يستهلك مصباح كهربائي ثلاثي الضبط قدرة كهربائية 150 W، 100 W، 50 W لإنتاج تدفق ضوئي 2285 lm، 1620 lm، 665 lm في أزرار ضبطه الثلاثة. وضع المصباح على بعد 80 cm فوق ورقة. إذا كانت أقل استضاءة لازمة لإضاءة الورقة هي 175 lx، فما أقل زر ضبط ينبغي أن يُستخدم؟

37. يريد أحد الطلبة مقارنة التدفق الضوئي لمصباح ضوئي يدوي بمصباح آخر تدفقه الضوئي 1750 lm، وكان كل منهما يضيء ورقة بالتساوي. فإذا كان المصباح 1750 lm يقع على بُعد 1.25 m من الورقة، في حين كان المصباح الضوئي اليدوي يقع على بعد 1.08 m، فاحسب التدفق الضوئي للمصباح اليدوي.

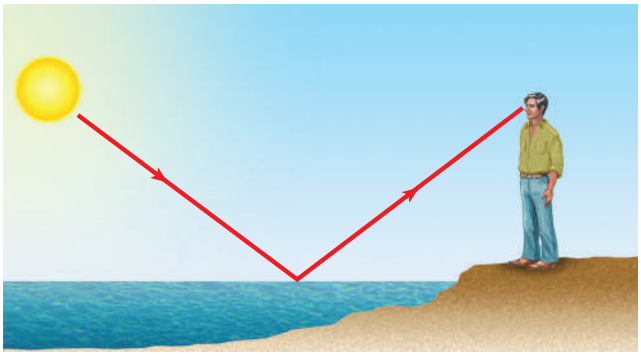
2–3 الطبيعة الموجية للضوء

38. حركة المجرة ما السرعة التي تتحرك بها مجرة بالنسبة للأرض، إذا كان خط طيف الهيدروجين 486 nm قد أزيح نحو الأحمر 491 nm؟

39. النظارات الشمسية المستقطبة في أي اتجاه يجب توجيه محور النفاذ للنظارات الشمسية المستقطبة للتخلّص من الوهج الصادر عن سطح الطريق: في الاتجاه الرأسيّ أم الأفقي؟ فسّر إجابتك.

40. حركة المجرة إذا كان خط طيف عنصر الهيدروجين المعروف بطول موجي 434 nm مزاحًا نحو الأحمر بنسبة 6.5% في الضوء القادم من مجرة بعيدة فما سرعة ابتعاد المجرة عن الأرض؟

41. افترض أنك كنت تتجه إلى الشرق عند شروق الشمس. وينعكس ضوء الشمس عن سطح بحيرة، كما في **الشكل 21–3**، فهل الضوء المنعكس مستقطَب؟ إذا كان كذلك ففي أي اتجاه؟



الشكل 21–3

مراجعة عامة

42. مصدر ضوء نقطي شدة إضاءته 10.0 cd ويبعد 6.0 m عن جدار. كم يبعد مصباح آخر شدة إضاءته 60.0 cd عن الحائط إذا كانت إستضاءة المصباحين متساوية عند الجدار؟

43. الرعد والبرق وضح لماذا تحتاج إلى 5 s لسماع الرعد عندما يبعد البرق مسافة 1.6 km.

44. الدوران الشمسي لأن الشمس تدور حول محورها فإن أحد جوانب الشمس يتحرك في اتجاه الأرض، أما الجانب الآخر فيتحرك مبتعدًا عنها. وتكمل الشمس دورة كاملة كل 25 يومًا تقريبًا، ويبلغ قطر الشمس 1.4×10^{9} m، فإذا بعث عنصر الهيدروجين في الشمس ضوءًا بتردّد 6.16×10^{14} Hz من كلا الجانبين فما التغير في الطول الموجي المراقَب؟

التفكير الناقد

45. حلّل واستنتج إذا كنت تقود سيارتك عند الغروب في مدينة مزدحمة ببنايات جدرانها مغطّاة بالزجاج، حيث يؤدي ضوء الشمس المنعكس عن الجدران إلى انعدام الرؤيا لديك مؤقتًا. فهل تحل النظارات المستقطبة هذه المشكلة؟

الكتابة في الفيزياء

46. اكتب مقالاً تصف فيه تاريخ المعرفة البشرية المتعلقة بسرعة الضوء، وضمّنه إنجازات العلماء المهمة في هذا المجال.

47. ابحث في معلومات النظام العالمي للوحدات SI المتعلقة بوحدة الشمعة cd، وعبّر بلغتك الخاصة عن المعيار الذي يستخدم في تحديد قيمة 1 cd.

مراجعة تراكمية

48. يتأرجح جسم كتلته 2.0 kg معلّق بخيط طوله 1.5 m في مسار على شكل دائرة رأسية وبسرعة ثابتة 12 m/s، احسب قوة الشد في الخيط عندما يكون الجسم عند:

a. أسفل المسار الدائري.

b. قمة المسار الدائري.

اختبار مقنن

أسئلة اختيار من متعدد

اختر رمز الإجابة الصحيحة في كلٍ مما يأتي:

1. شوهد نجم مستعر في عام 1987 في مجرة قريبة، واعتقد العلماء أن المجرة تبعد 1.66×10^{21} m، ما عدد السنوات التي مضت على حدوث انفجار النجم فعليًّا قبل رؤيته؟

A 5.53×10^{3} yr
B 1.75×10^{5} yr
C 5.53×10^{12} yr
D 1.74×10^{20} yr

2. تتحرك مجرة مبتعدة بسرعة 5.8×10^{6} m/s، ويبدو تردد الضوء الصادر عنها 5.6×10^{14} Hz بالنسبة لمراقب. ما تردد الضوء المنبعث منها؟

A 1.1×10^{13} Hz
B 5.5×10^{14} Hz
C 5.7×10^{14} Hz
D 6.2×10^{14} Hz

3. إذا احتاج الضوء الصادر عن الشمس إلى 8.0 min للوصول إلى الأرض فكم تبعد الشمس؟

A 2.4×10^{9} m
B 1.4×10^{10} m
C 1.4×10^{8} km
D 2.4×10^{9} km

4. ما مقدار تردد ضوء طوله الموجي 404 nm في الفراغ؟

A 2.48×10^{-3} Hz
B 7.43×10^{5} Hz
C 2.48×10^{6} Hz
D 7.43×10^{14} Hz

5. إذا كانت الاستضاءة الناتجة بفعل مصباح ضوئي قدرته 60.0 W على بعد 3.0 m تساوي 9.35 lx، فما التدفق الضوئي الكلي للمصباح؟

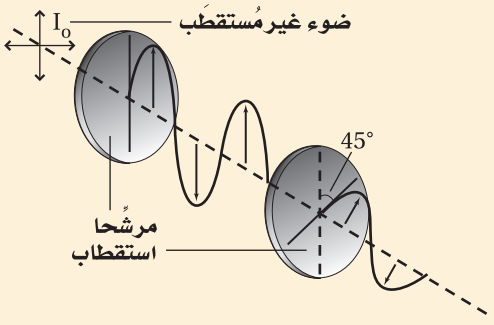
A 8.3×10^{-2} lm
B 7.4×10^{-1} lm
C 1.2×10^{2} lm
D 1.1×10^{3} lm

6. ماذا نعني بالعبارة "إنتاج اللون باختزال أشعة الضوء"؟

A مزج الضوء الأخضر والأحمر والأزرق ينتج عنه الضوء الأبيض.
B ينتج لون عن إثارة الفوسفور بالإلكترونات في جهاز التلفاز.
C يتغير لون الطلاء باختزال ألوان معينة، ومنها إنتاج الطلاء الأزرق من الأخضر بالتخلص من اللون الأصفر.
D يتكوّن اللون الذي يظهر به الجسم نتيجة امتصاص أطوال موجية محدّدة للضوء وانعكاس بعضها الآخر.

الأسئلة الممتدة

7. يسقط ضوء غير مستقطب شدته I_o على مرشِّح استقطاب، ويصطدم الضوء النافذ بمرشِّح استقطاب ثانٍ، كما يتضح من الشكل أدناه. ما شدة الضوء النافذ من مرشح الاستقطاب الثاني؟



✓ إرشاد

طرح الأسئلة

عندما يكون لديك استفسار حول الاختبار، مثل طريقة توزيع الدرجات، أو الزمن المخصص لكل جزء، أو أي شيء آخر فاسأل المعلم أو الشخص المشرف على الاختبار حول ذلك.

الفصل 4

الانعكاس و المرايا

Reflection and Mirrors

يتوقع بعد الإنتهاء من دراسة هذا الفصل أن أكون قادرًا على:

- توضيح المفاهيم المرتبطة بالانعكاس عن المرايا المستوية(الانعكاس المنتظم، الانعكاس غير المنتظم، المرآة المستوية، الجسم، الصورة التقديرية).
- توضيح قانون الانعكاس.
- المقارنة بين الانعكاس المنتظم والانعكاس غير المنتظم.
- تحديد موقع الصور التي تكونها المرايا المستوية.
- توضيح المفاهيم المرتبطة بالمرايا الكروية(المرآة المقعرة، المحور الرئيس، البؤرة، البعد البؤري، الصورة الحقيقية، الزيغ(التشوه) الكروي، التكبير، المرآة المحدبة).
- توضيح كيف تكوّن كل من المرايا المقعرة والمرايا المحدبة الصور.
- وصف خصائص المرايا الكروية.
- ذكر استخدامات المرايا الكروية.
- تحديد مواقع وأطوال الصور التي تكوّنها المرايا الكروية.
- استخدام الأدوات والأجهزة المتعلقة بالنعكاس لإجراء التجارب وتحليلها.
- ادراك دور الانعكاس وأهميته في الحياة اليومية.

الفصل الأول

الفكرة العامة:

جميع الأسطح تعكس الضوء، ولكن الأسطح الملساء هي التي تكّون الصور.

(4-1) الانعكاس عن المرايا المستوية

الفكرة الرئيسة تكون زاوية سقوط الأشعة الضوئية مساوية لزاوية انعكاسها.

(4-2) المرايا الكروية

الفكرة الرئيسة تكّون المرايا الكروية صورًا حقيقية أو تقديرية للأجسام، كما يمكن أن تكون هذه الصور مكبرة أو مصغرة.

فكّر

لماذا تبدو لك صورتك في البحيرة معتدلة، في حين تبدو صورة الجبل مقلوبة رأسيًّا؟

4-1 الانعكاس عن المرايا المستوية
Reflection from Palne Mirrors

الفيزياء في حياتك

عندما تفكّر في الانعكاس، تبرز المرايا كتطبيق لها، وهي عبارة قطع من الزجاج مغطاة بطبقة رقيقة من الألومنيوم، ومن الممكن أن ترى صورتك في زجاج النوافذ والمياه الساكنة والمعادن اللامعة.

تساؤلات جوهرية:

- ما قانوني الانعكاس؟
- ما الفرق بين الانعكاس المنتظم والانعكاس غير المنتظم؟
- كيف تحدد موقع الصور التي تكونها المرايا المستوية؟

المفردات:

- الانعكاس المنتظم
- الانعكاس غير المنتظم
- المرآة المستوية
- الجسم
- الصورة التقديرية

لم يكن بالإمكان رؤية صور الأجسام الناتجة عن السطوح المصقولة بوضوح حتى عام 1857 عندما اكتشف العالم الفرنسي جان فوكولت طريقة لطلاء الزجاج بالفضة. فالمرايا الحديثة صُنعت بدقة متناهية لكي تكون ذات مقدرة كبيرة جدًّا على عكس الضوء، وذلك من خلال عملية تبخير الألومنيوم أو الفضة على زجاج مصقول بدرجة كبيرة من الانتظام. وتُعد نوعية السطوح العاكسة مهمة جدًّا في بعض التطبيقات العملية والأجهزة البصرية، ومنها الليزر، والمقراب (التلسكوب).

تجربة استهلالية

كيف تظهر الصورة على شاشة؟

سؤال التجربة ما نوع المرايا التي يمكنها تكوين صورة على شاشة؟

الخطوات

1. احصل من معلمك على بطاقة فهرسة (بطاقة كرتونية)، ومرآة مستوية، ومرآة مقعرة، ومرآة محدبة، ومصباح ضوئي يدوي.
2. أطفئ أضواء الغرفة، وقف بجانب النافذة.
3. أمسك البطاقة بيد والمرآة المستوية باليد الأخرى.
4. اعكس الضوء القادم من النافذة على البطاقة. **تحذير: "لا تنظر إلى الشمس مباشرة أو إلى ضوء الشمس المنعكس عن المرآة".** قرّب البطاقة نحو المرآة ببطء أو أبعدها عنها ببطء، وحاول تكوين صور واضحة للأجسام الموجودة في الخارج.
5. إذا استطعت تكوين صورة واضحة على البطاقة فإن هذه الصورة تكون حقيقية، أما إذا كان الضوء مشتتًا على البطاقة فلا تتكون صورة حقيقية. سجّل ملاحظاتك.
6. أعد الخطوات من 3 إلى 5 باستخدام مرآة مقعرة ثم مرآة محدبة.
7. كرر الخطوة 4 لكل مرآة بحيث تستخدم المصباح الضوئي، ولاحظ الانعكاس على البطاقة.

التحليل

أيّ مرآة كوّنت صورًا حقيقية (تكونت على حاجز)؟ ما ملاحظاتك حول الصورة أو الصور التي شاهدتها؟

التفكير الناقد وضح كيف تتكون الصور الحقيقية استنادًا إلى ملاحظاتك حول الصور الناتجة باستخدام المصباح الضوئي

قانون الانعكاس The Law of Reflection

مـاذا يحدث للضوء السـاقط على هذا الكتـاب؟ عندما تضع الكتـاب بينك وبين مصدر الضـوء فلـن ترى أي ضوء ينفذ من خلاله. إن مثل هذا الجسـم يُسـمّى جسـمًا معتمًا؛ إذ يحـدث امتصـاص لجزء من الضوء السـاقط على الكتـاب، ويتحول هذا الجـزء إلى طاقة حرارية، كما ينعكس جزء آخر من الضوء السـاقط على الكتاب. ويعتمد سـلوك الضوء المنعكس على طبيعة السطح العاكس، وزاوية سقوط الضوء على السطح.

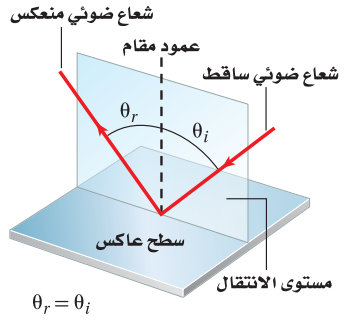
عندمـا تنتشر موجـة في بعديـن، وتصطـدم بحاجز، فـإن زاوية سـقوطها عـلى الحاجز تسـاوي زاوية انعكاسها. وينعكس الضوء بالطريقة نفسـها التي ترتد بها كرة السلة بعد اصطدامها بالأرض. ويبين **الشكل 1–4** سقوط شعاع ضوئي على سطح مستوٍ عاكس. وتلاحـظ أن هنـاك خطًّا وهميًّا عموديًّا على السـطح العاكس عند نقطة سـقوط الشـعاع الضوئي على السـطح. ويُسـمّى هذا الخط بالعمود المقام. ويقع كل من الشـعاع الساقط والشعاع المنعكس والعمود المقام على السطح العاكس من نقطة سقوط الشعاع الضوئي في مسـتوى واحـد عمودي على السـطح العاكـس. وعلى الرغم مـن أن الضوء ينتشر في ثلاثة أبعاد إلّا أن انعكاسه يكون في مستوى واحد. وتُعرف العلاقة بين زاويتي السقوط والانعكاس باسم قانون الانعكاس.

قانون الانعكاس $\theta_r = \theta_i$

حيث تمثل θ_i زاوية السقوط، و θ_r زاوية الانعكاس.

الزاوية التي يصنعها الشعاع الساقط مع العمود المقام على السطح العاكس عند نقطة السقوط تساوي الزاوية التي يصنعها الشعاع المنعكس مع العمود نفسه.

يمكن تفسـير هـذا القانون باسـتخدام النموذج الموجـي للضوء؛ إذ يبين **الشـكل 2–4** صـدر موجة الضـوء يقترب من السـطح العاكـس، وعندما تصل كل نقطـة على امتداد صدر الموجة إلى السطح العاكس فإنها تنعكس بالزاوية نفسها كالنقطة السابقة لها. ولأن النقـاط جميعها تنتشر بالسرعة نفسـها فإنها سـتقطع المسـافة الكلية نفسـها خلال الزمن نفسـه، لـذا ينعكس صدر الموجـة كاملًا عن السـطح بزاوية مسـاوية لزاوية سـقوطها. لاحظ أن الطول الموجي للضوء لا يؤثر في هذه العملية؛ فألوان الضوء الأحمر والأخضر والأزرق جميعها تتبع هذا القانون.

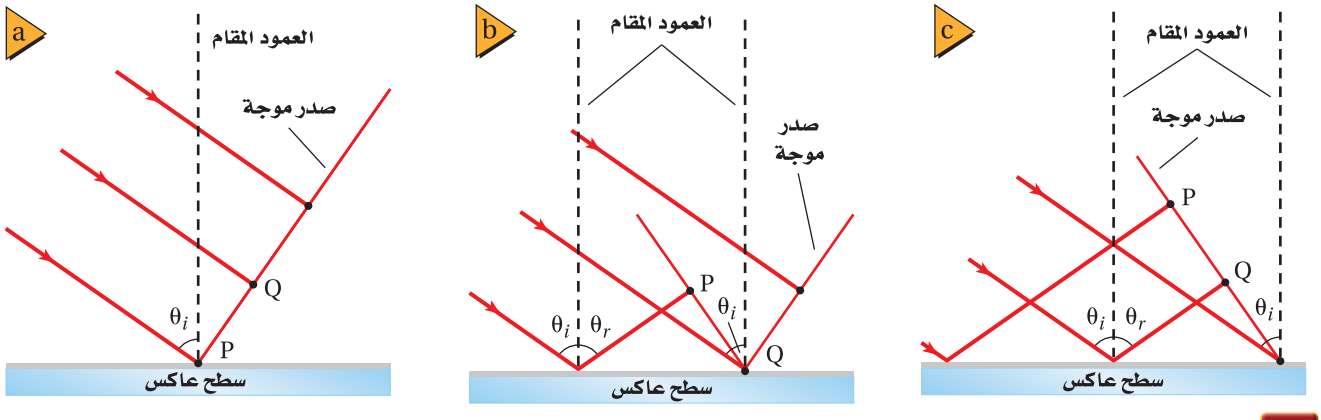


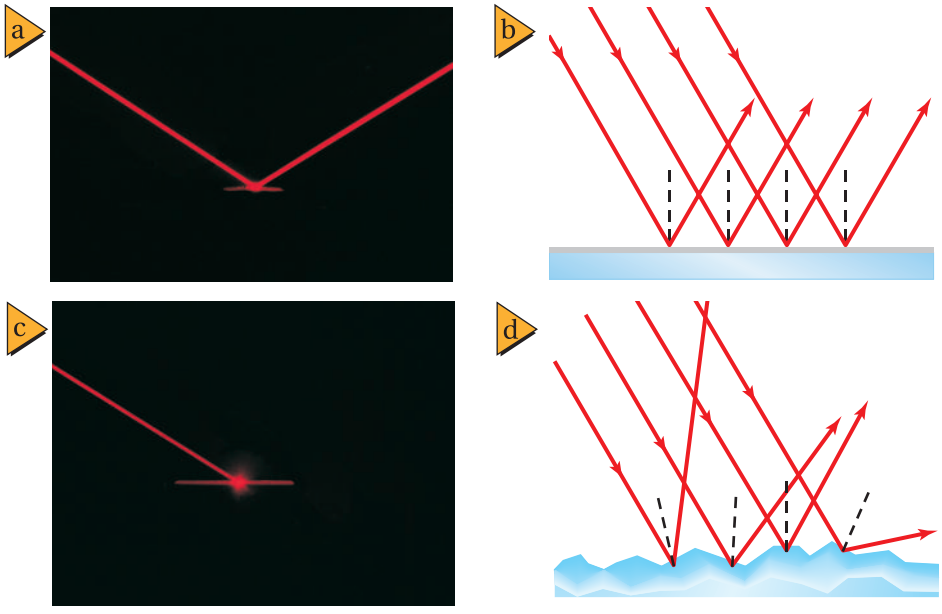
الشكل 1–4 يقع كل من الشعاع الساقط والشعاع المنعكس ضمن مستوى الانتقال نفسه.

دلالة الألوان

- الأشعة الضوئية ومقدمات الموجة مرسومة وموضحة باللون الأحمر.
- المرايا مرسومة وموضحة باللون الأزرق الفاتح.

الشكل 2–4 يقترب صدر الموجة الضوئية من السطح العاكس. تصطدم النقطة P الموجودة على صدر الموجة بالسطح أولاً (a). وتصل النقطة Q إلى السطح بعد أن تكون النقطة P قد انعكست بزاوية مساوية لزاوية السقوط (b). وتستمر العملية وتُتابع النقاط جميعها الانعكاس بزوايا مساوية لزوايا سقوطها، مما يؤدي إلى تشكل صدر الموجة المنعكسة (c).





الشكل 3–4 عندما تسقط حزمة ضوئية على سطح مرآة (a) تنعكس الأشعة المتوازية في الحزمة الساقطة متوازيةً ومحافظةً على شكل الحزمة (b). وعندما تسقط حزمة الضوء على سطح خشن (c) تنعكس الأشعة المتوازية في الحزمة الساقطة عن سطوح مختلفة صغيرة جدًا، ممّا يؤدي إلى تشتيت الأشعة (d).

السطوح الملساء والسطوح الخشنة تأمل حزمة الضوء الساقطة في **الشكل 3a–4** ولاحظ أن جميع الأشعة في الحزمة الضوئية قد انعكست عن السطح متوازية، كما في **الشكل 3b–4**. وهذا يحدث فقط إذا كان السطح العاكس أملس مقارنة بالطول الموجي للضوء. فالسطح الأملس أو المصقول، مثل المرآة، يسبب **انعكاسًا منتظمًا**؛ أي أن الأشعة الضوئية التي تسقط عليه متوازية تنعكس عنه متوازية أيضًا.

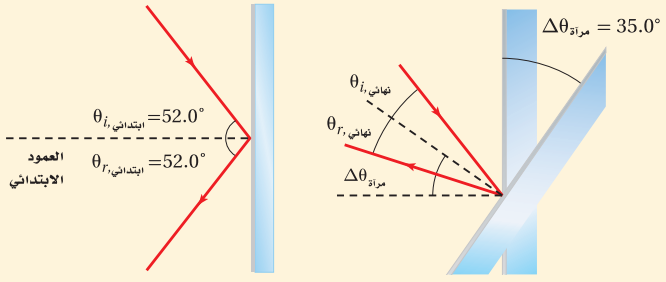
ماذا يحدث عندما يسقط الضوء على سطح يبدو أملس ولكنه في الواقع خشن، مثل صفحة هذا الكتاب أو جدار أبيض؟ يبين **الشكل 3c–4** حزمة ضوئية تنعكس عن صفيحة ورقية خشنة السطح، حيث سقطت أشعة الحزمة الضوئية جميعها متوازية، ولكنها انعكست غير متوازية، كما في **الشكل 3d–4**. ويُسمّى تشتّت الضوء عن سطح خشن **انعكاسًا غير منتظم**.

وعلى الرغم من أن قانون الانعكاس ينطبق على كل من السطوح المصقولة والخشنة؛ إذ تكون زاوية السقوط وزاوية الانعكاس لكل شعاع على حدة متساوية، إلا أن الأشعة المنعكسة عن السطوح الخشنة لا تكون متوازية، لأن الأعمدة المقامة على السطح الخشن عند مواقع السقوط لا تكون متوازية.

مثـــال 1

تغيير زاوية السقوط سقط شعاع ضوئي على مرآة مستوية بزاوية 52.0° بالنسبة للعمود المقام، فإذا دُوّرت المرآة بزاوية 35.0° حول نقطة سقوط الشعاع على سطحها بحيث نقصت زاوية سقوط الشعاع، وكان محور الدوران متعامدًا مع مستوى الشعاع الساقط والشعاع المنعكس، فما زاوية دوران الشعاع المنعكس؟

1 تحليل المسألة ورسمها



- مثّل الحالة قبل دوران المرآة.
- ارسم شكلاً آخر بتطبيق زاوية الدوران على المرآة.

المعلوم	المجهول
$\theta_{i,\text{ابتدائي}} = 52^\circ$	$\theta_r = ?$
$\Delta\theta_{\text{مرآة}} = 35^\circ$	

2 ايجاد الكمية المجهولة

لتقليل زاوية السقوط دوّر المرآة في اتجاه حركة عقارب الساعة.

$$\theta_{i,\text{نهائي}} = \theta_{i,\text{ابتدائي}} - \Delta\theta_{\text{مرآة}}$$

عوّض مستخدمًا $\theta_{i,\text{ابتدائي}} = 52.0^\circ$, $\Delta\theta_{\text{مرآة}} = 35.0^\circ$

$$= 52.0^\circ - 35.0^\circ$$

$$= 17.0^\circ$$ في اتجاه حركة عقارب الساعة بالنسبة للعمود المقام الجديد

طبّق قانون الانعكاس

$$\theta_{r,\text{نهائي}} = \theta_{i,\text{نهائي}}$$

عوّض مستخدمًا $\theta_{i,\text{نهائي}} = 17.0^\circ$

$$= 17.0^\circ$$ في عكس اتجاه حركة عقارب الساعة بالنسبة للعمود المقام الجديد

أوجد الزاوية التي دار بها الشعاع المنعكس باستخدام الشكلين

$$\Delta\theta_r = 52.0^\circ + 35.0^\circ - 17.0^\circ$$

$$= 70.0^\circ$$ في اتجاه حركة عقارب الساعة من الزاوية الأصلية

3 تقويم الجواب

- **هل الجواب واقعي؟** بمقارنة الرسم النهائي مع الرسم الابتدائي يتبين أن الزاوية التي يصنعها الشعاع الضوئي مع العمود المقام تقل عندما تدور المرآة في اتجاه حركة عقارب الساعة في اتجاه الشعاع الضوئي. ومن المنطقي أن يدور الشعاع المنعكس في اتجاه حركة عقارب الساعة أيضًا.

مسائل تدريبية

1. عند سكب كمية ماء فوق سطح زجاجي خشن يتحوّل انعكاس الضوء من انعكاس غير منتظم إلى انعكاس منتظم. وضح ذلك.
2. إذا كانت زاوية سقوط شعاع ضوئي 42.0° فما مقدار كل مما يأتي:
   a. زاوية الانعكاس؟
   b. الزاوية المحصورة بين الشعاع الساقط والمرآة؟
   c. الزاوية المحصورة بين الشعاع الساقط والشعاع المنعكس؟
3. سقطت حزمة ضوء ليزر على سطح مرآة مستوية بزاوية 38.0° بالنسبة للعمود المقام. فإذا حُرّك الليزر بحيث زادت زاوية السقوط بمقدار 13.0° فما مقدار زاوية الانعكاس الجديدة؟

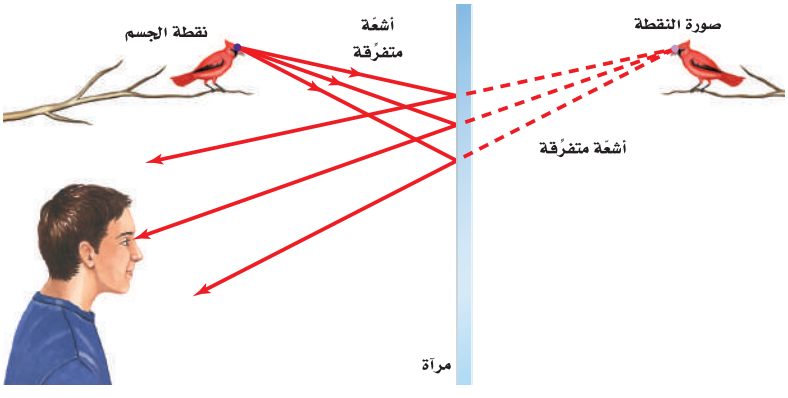
الأجسام والصور في المرايا المستوية
Objects and Plane–Mirror Images

عندما تنظر إلى نفسك بوساطة مرآة مستوية فإن ما تشاهده هو صورتك فيها، **فالمرآة المستوية** عبارة عن سطح مستوٍ أملس (مصقول) ينعكس عنه الضوء انعكاسًا منتظمًا. ولفهم انعكاس الضوء عن المرايا يجب أن نحدّد الجسم ونوع الصورة المتكوّنة. وقد استخدمت كلمة جسم في الفصل السابق لتشير إلى مصدر الضوء، أما في موضوع المرايا فتستخدم كلمة جسم بالطريقة نفسها، لكن بتطبيق أكثر تحديدًا؛ **فالجسم** هو مصدر الأشعة الضوئية التي ستُعكَس عن سطح مرآة، ويمكن أن يكون الجسم مصدرًا مضيئًا مثل المصباح، أو مصدرًا مستضاءًا مثل الشاب، كما في **الشكل 4–4**.

الشكل 4–4 المصباح الضوئي مصدر مضيء، ويشع الضوء في الاتجاهات جميعها. أما الشاب فيُعدّ مصدرًا مستضيئًا يشتّت ضوء المصباح الساقط على جسمه عن طريق الانعكاس غير المنتظم للضوء.

خذ نقطة مفردة على الطائر في **الشكل 5–4**، تلاحظ أن الضوء ينعكس انعكاسًا غير منتظم من نقطة الجسم (عُرف الطائر) فماذا يحدث للضوء المنعكس؟ يسقط الضوء من الطائر على المرآة وينعكس. سيصل الضوء المنعكس إلى عيني الصبي. ولأن دماغه يُعالج هذه الأشعة وكأنها سلكت مسارًا مستقيمًا، لذا سيبدو له أن الضوء يتّبع الخطوط المتقطعة على الشكل، أيْ كأنه قادم من نقطة خلف المرآة، والتي تمثل صورة النقطة.

وسيرى الصبي في **الشكل 5–4** الأشعة الضوئية القادمة من نقاط متعدّدة على جسم الطائر بالطريقة نفسها، وتتشكل بذلك صورة الطائر من اتحاد صورة النقاط الناتجة بفعل الأشعة الضوئية المنعكسة. وتعد هذه الصورة **صورة تقديرية**؛ وذلك لأنها تكوّنت من التقاء امتدادات الأشعة الضوئية المنعكسة عن المرآة. وتقع الصور التقديرية دائمًا على الجانب الآخر من المرآة (خلف المرآة)، وهذا يعني أن صور الأجسام المتكوّنة في المرايا المستوية تكون دائمًا صورًا تقديرية؛ أي لا يمكن جمعها على حاجز.



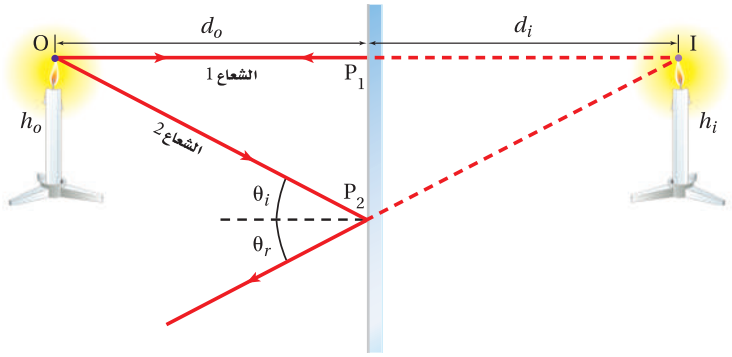
الشكل 5–4 تبدو الأشعة المنعكسة التي تصل إلى العين وكأنها قادمة من نقطة خلف المرآة.

التجربة العملية:

أين تتكون صورتك في المرآة؟

صفات الصور في المرايا المستوية
Properties of Plane–Mirror Images

درست سابقًا أن الصور المتكونة في المرايا المستوية تكون تقديرية، كما يمكن أن تلاحظ أنه عندما تنظر إلى نفسك في مرآة مستوية فإن بعدك عن المرآة يساوي بعد صورتك عنها، وأن صورتك تقع خلف المرآة، وأنها معتدلة ومعكوسة جانبيًا، وإذا تحركت في اتجاه المرآة بسرعة ما فإن صورتك ستتحرك في الاتجاه المعاكس وبالسرعة نفسها.



الشكل 6–4 تنبعث الأشعة الضوئية من نقطة على الجسم في الاتجاهات جميعها، حيث يسقط بعضها على سطح المرآة، فينعكس إلى العين. يبين الرسم شعاعين ضوئيين فقط. وتمتد خطوط الرؤية (الامتداد الخلفي) –الموضحة على هيئة خطوط متقطعة– إلى الخلف من مواقع انعكاس الأشعة على سطح المرآة إلى موقع التقائها، ويكون موقع الصورة في المكان الذي تلتقي فيه هذه الامتدادات: $d_i = -d_o$

موقع الصورة وطولها يوضح النموذج الهندسي في **الشكل 6–4** تساوي بُعد الجسم وبُعد الصورة عن المرآة وكذلك تساوي طول الجسم وطول الصورة. ويتبين ذلك برسم شعاعين صادرين من النقطة O على رأس الشمعة (أحدهما عمودي) يسقطان على المرآة في النقطتين P_1، P_2 على الترتيب. وينعكس الشعاعان وفق قانون الانعكاس، ويتقاطع امتدادا انعكاسيهما خلف المرآة على أنهما خطوط الرؤية (خط متقطع) في النقطة I التي تمثل صورة النقطة O. فالشعاع 1 يسقط على المرآة بزاوية سقوط $0°$، فينعكس مرتدًّا على نفسه؛ أي عموديًّا على المرآة. أما الشعاع 2 فينعكس بالزاوية نفسها التي سقط بها، لذا يصنع خط الرؤية (الامتداد الخلفي) مع المرآة زاوية مساوية للزاوية التي يصنعها الشعاع الساقط نفسه مع المرآة.

ويبين النموذج الهندسي أن القطعتين المستقيمتين $\overline{OP_1}$، $\overline{IP_1}$ تمثّلان ضلعين متقابلين في مثلثين متطابقين OP_1P_2، IP_1P_2. وتمثل d_o بُعد الجسم عن المرآة وتساوي طول القطعة $\overline{OP_1}$، أما d_i فتمثّل بُعد الصورة عن المرآة وتساوي طول القطعة $\overline{IP_1}$. وباستخدام دلالة نظام الإشارات ـ حيث تشير الإشارة السالبة لموقع الصورة إلى أن الصورة تقديرية ـ تكون المعادلة التالية صحيحة:

موقع الصورة التي تُكوِّنها مرآة مستوية $d_i = -d_o$

بُعد الصورة عن المرآة المستوية يساوي سالب بُعد الجسم عنها، وإشارة السالب تدل على أن الصورة تقديرية.

ولإيجاد طول الصورة يمكنك رسم شعاعين من الجسم. فمثلًا يلتقي امتداد الشعاعين الصادرين من قمة الشمعة، كما في **الشكل 6–4**، في نقطة خلف المرآة تكوّن قمة الصورة. وسيكون طول الصورة h_i المتكوّنة – باستخدام قانون الانعكاس وهندسة تطابق المثلثات – مساويًا لطول الجسم h_o.

طول الصورة التي تكوّنها المرآة المستوية $h_i = h_o$

في المرآة المستوية يكون طول الصورة مساويًا لطول الجسم.

تجربة

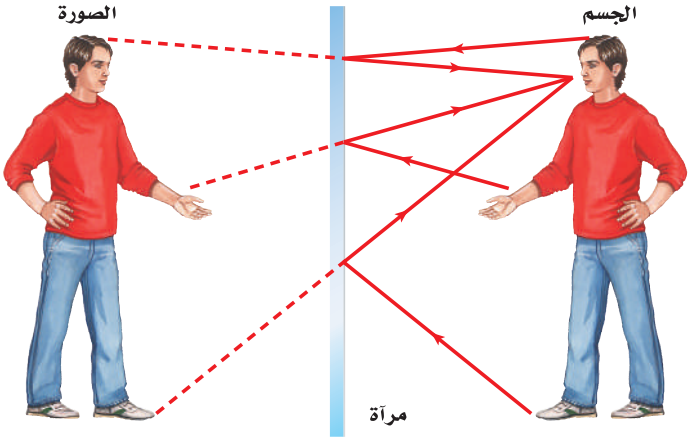
موقع الصورة التقديرية

افترض أنك تنظر إلى صورتك في مرآة مستوية، هل تستطيع قياس بعد الصورة؟

1. اطلب من معلمك آلة تصوير (كاميرا) على أن يكون لها قرص تركيز كُتبت عليه المسافات.
2. قف على بعد 1.0 m من المرآة، وركز الكاميرا على حافة المرآة، وتحقّق من قراءة قرص التركيز. يجب أن تكون 1.0 m
3. قس بُعد صورتك من خلال تركيز الكاميرا عليها، وتحقق من قراءة قرص التركيز.

التحلّيل والاستنتاج

4. ما بُعد الصورة خلف المرآة؟
5. لماذا تكون الكاميرا قادرة على التقاط صورة للصورة التقديرية التي خلف المرآة، رغم عدم وجود جسم حقيقي في ذلك الموقع؟



■ **الشكل 7–4** الصورة المتكوّنة في المرآة المستوية لها حجم الجسم نفسه، وبُعد الجسم نفسه عن المرآة، وتقع خلف المرآة، وتكون معكوسة جانبيًا؛ فإذا حرك الشخص يده اليمنى تتحرك اليد اليسرى في الصورة.

وضع الصورة تُكوّن المرآة المستوية صورًا في اتجاه الجسم نفسه؛ أيْ تُكوّن صورًا معتدلة. فإذا كنت تقف على قدميك فإن الصورة المتكوّنة في المرآة المستوية تظهر كذلك، وإذا كنت تقف على يديك تكون الصورة أيضًا بوضعية الوقوف على اليدين. غير أن هناك اختلافًا بينك وبين صورتك التي تكوّنها المرآة المستوية. تتبَّع خطوط الأشعة الموضحة في **الشكل 7–4**. فالأشعة المنتشرة من اليد اليمنى للشخص تبدو كأنها تتجمع في اليد اليسرى لصورته؛ أيْ تظهر اليد اليسرى، واليد اليمنى معكوستين في المرآة المستوية. فلماذا لا تنعكس قمة الجسم وقاعدته؟ هذا لا يحدث لأن المرآة المستوية في الحقيقة لا تعكس الجهة اليسرى واليمنى، بل تعمل المرآة في **الشكل 7–4** على عكس صورة الشخص فقط بحيث تقابله في الاتجاه المعاكس له؛ أي أن المرآة تكوّن صورًا معكوسة جانبيًّا.

4-1 مراجعة

4. **الانعكاس** سقط شعاع ضوئي على سطح مصقول عاكس بزاوية سقوط 80°، ما الزاوية التي يصنعها الشعاع المنعكس مع سطح المرآة؟
5. **قانون الانعكاس** وضح كيف يُطبّق قانون الانعكاس في حالة الانعكاس غير المنتظم.
6. **السطوح العاكسة** صنّف السطوح التالية إلى سطوح ملساء، وسطوح خشنة: ورقة، معدن مصقول، زجاج نافذة، معدن خشن، إبريق حليب بلاستيكي، سطح ماء ساكن، زجاج خشن (مصنفر).
7. **صفات الصورة** يقف طفل طوله 50 cm على بُعد 3 m من مرآة مستوية وينظر إلى صورته. ما بُعد الصورة وطولها؟ وما نوع الصورة المتكوّنة؟
8. **مخطّط الصور** إذا كانت سيارة تتبع سيارة أخرى على طريق أفقية، وكان الزجاج الخلفي للسيارة الأمامية يميل بزاوية 45°، فارسم مخطّطًا للأشعة يبين موقع الشمس الذي يجعل أشعتها تنعكس عن الزجاج الخلفي للسيارة الأمامية، في اتجاه عيني سائق السيارة الخلفية.
9. **التفكير الناقد** وضح كيف يُمكّنك الانعكاس غير المنتظم للضوء عن جسم معين، من رؤية الجسم عند النظر إليه من أية زاوية.

الفيزياء في حياتك

عندما تنظر إلى صورتك المتكونة في ملعقة معدنية لامعة، فإنك تراها مقلوبة عند النظر إليها من خلال الجزء المقعر، بينما تكون معتدلة عند النظر إليها من الجزء المحدب، فكيف يحدث ذلك؟

تساؤلات جوهرية:

- كيف تكوّن المرايا الكروية الصور؟
- ما خصائص صور الأجسام في المرايا الكروية؟
- كيف تحدد مواقع وأطوال الصور التي تكوّنها المرايا الكروية؟

المفردات:

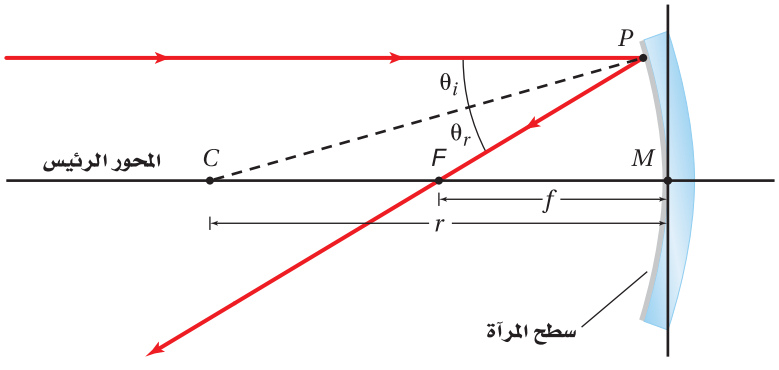
- المرآة المقعرة
- المحور الرئيس
- البؤرة
- البعد البؤري
- الصورة الحقيقية
- الزيغ (التشوه) الكروي
- التكبير
- المرآة المحدبة

عندما تنظر إلى سطح ملعقة لامعة تلاحظ أن انعكاس صورتك يختلف عن انعكاسها في مرآة مستوية. إذ تعمل الملعقة عمل مرآة كروية؛ حيث يكون أحد سطحيها منحنيًا إلى الداخل، والسطح الآخر منحنيًا إلى الخارج. وتعتمد خصائص المرايا الكروية والصور التي تكوّنها على شكل المرآة وموقع الجسم.

المرايا المقعّرة Concave Mirrors

يعمل السطح الداخلي للملعقة (السطح الذي يحمل الطعام) عمل مرآة مقعرة. و**المرآة المقعرة** سطح عاكس منحنٍ، حوافّه منحنية نحو المشاهد. وتعتمد خصائص المرآة المقعرة على مدى تقعرها، ويبين **الشكل 8–4** كيف تعمل المرآة الكروية المقعرة. ويبدو شكل المرآة الكروية المقعرة كأنه جزء مأخوذ من كرة جوفاء سطحها الداخلي عاكس للضوء. وللمرآة الكروية المقعرة المركز الهندسي نفسه C، ونصف قطر التكوّر نفسه r، الخاصّين بالكرة المأخوذة منها. ويسمّى الخط الذي يحتوي على القطعة المستقيمة CM **المحور الرئيس**؛ وهو خط مستقيم متعامد مع سطح المرآة الذي يقسمها إلى نصفين. وتمثل النقطة M قطب المرآة؛ وهي نقطة تقاطع المحور الرئيس مع سطح المرآة.

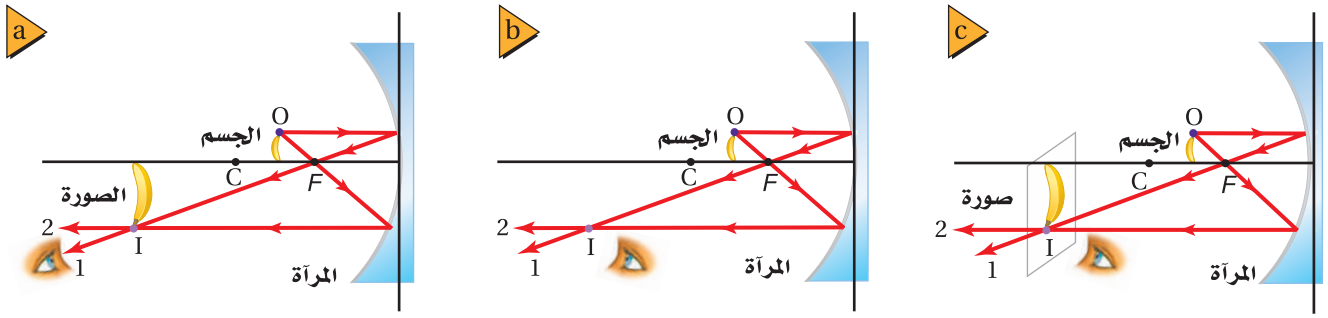
عندما توجه المحور الرئيس للمرآة المقعرة نحو الشمس تنعكس الأشعة جميعها مارة بنقطة واحدة. ويمكنك تحديد هذه النقطة بتقريب وإبعاد قطعة ورق أمام المرآة حتى تحصل على أصغر وأوضح نقطة لأشعة الشمس المنعكسة على الورقة. وتُسمى هذه النقطة **بؤرة** المرآة الأصلية؛ وهي النقطة التي تتجمع فيها انعكاسات الأشعة الساقطة متوازية وموازية للمحور الرئيس.



الشكل 8–4 تقع بؤرة المرآة الكروية المقعرة في منتصف المسافة بين مركز التكوّر وسطح المرآة. وتنعكس الأشعة الساقطة موازية للمحور الرئيس مارة بالبؤرة F.

وعندما يسقط الشعاع على مرآة فإنه ينعكس وفق قانون الانعكاس. ويبين **الشكل 8–4** أن الأشعة الساقطة موازيةً للمحور الرئيس تنعكس عن المرآة وتقطع المحور في البؤرة F. وتقع البؤرة F في منتصف المسافة بين مركز التكور C والقطب M، أما **البعد البؤري** f، فيمثل المسافة بين قطب المرآة وبؤرتها الأصلية ويعبر عنه على النحو التالي: $f = \frac{r}{2}$، ويكون البعد البؤري للمرآة المقعرة موجبًا.

ونظرًا للبعد الكبير بين الشمس والأرض فإن جميع الأشعة التي تصل الأرض تُعد متوازية.



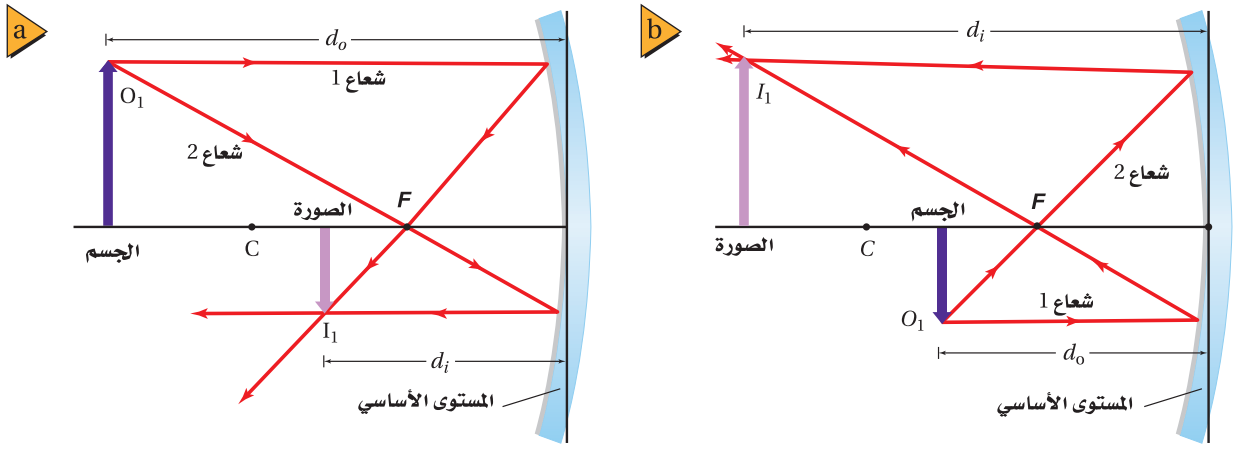
■ **الشكل 9–4** الصورة الحقيقية التي تُرى بالعين المجردة (**a**). لا ترى العين الصورة الحقيقية إذا كانت في موقع لا يلتقط الأشعة المنعكسة (**b**). الصورة الحقيقية كما ترى على شاشة معتمة بيضاء (**c**).

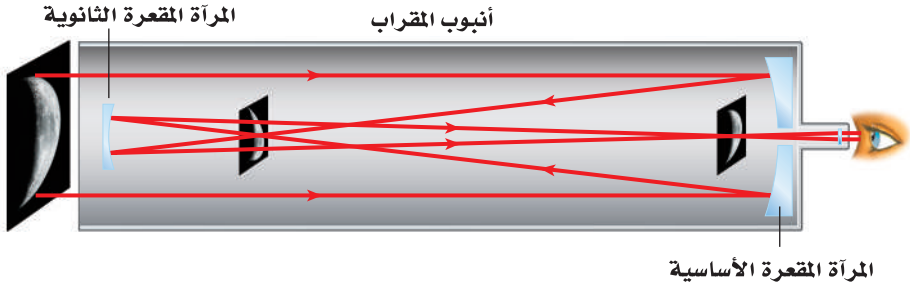
الطريقة الهندسية لتحديد موقع الصورة
Graphical Method of Finding the Image

تعد طريقة رسم مسارات الأشعة المنعكسة عن المرايا المقعرة مفيدة في تحديد موقع الصورة، ليس لأن موقع الصورة هو الذي يتغير فقط، بل لأن حجمها ووضعها أيضًا يتغيران. ويمكنك استخدام مخطّط الأشعة للكشف عن خصائص الصور التي تكوّنها المرايا المقعرة. ويبين **الشكل 9–4** عملية تكوين **صورة حقيقية**؛ وهي الصورة التي تتكون من التقاء الأشعة المنعكسة. ويمكن جمعها على الحاجز، وتلاحظ أن الصورة مقلوبة وأكبر حجمًا من الجسم، وأنّ الأشعة تلتقي فعليًّا في النقطة التي تتكون فيها الصورة. وتُحدِّد نقطة التقاطع، I، لشعاعين منعكسين موقع الصورة. ويمكنك رؤية الصورة في الفضاء عندما تسقط الأشعة المنعكسة التي كوَّنت الصورة على عينك، كما في **الشكل 9a–4**. يوضّح **الشكل 9b–4** أنه يجب أن يكون موقع عينك في الجهة التي تسقط عليها الأشعة المنعكسة المكوّنة للصورة، ولا يمكنك رؤية الصورة من الخلف. وإذا وضعت حاجزًا (شاشة) في موقع تكوّن الصورة فإن هذه الصورة ستظهر على الحاجز كما في **الشكل 2c–4**، وهذا غير ممكن في حالة الصور التقديرية التي تتكون من التقاء امتدادات الأشعة المنعكسة ولا يمكن جمعها على حاجز.

ولتسهيل فهم كيفية سلوك الأشعة في المرايا المقعرة يمكنك استخدام أجسام أحادية البعد؛ سهم مثلا، كما في **الشكل 10a–4**. تكوِّن المرآة الكروية المقعرة صورة حقيقية ومقلوبة للجسم؛ إذا كان بعد الجسم d_o أكبر من البعد البؤري f. أما إذا كان الجسم واقعًا بين البؤرة F ومركز التكور C كما في **الشكل 10b–4** فإن الصورة تكون مكبّرة. إذا كان الجسم واقعًا خلف مركز التكور C فإن الصورة ستكون مصغرة.

■ **الشكل 10–4** إذا كان بُعد الجسم عن المرآة أكبر من بُعد مركز التكوّر فستكون الصورة حقيقية ومقلوبة ومصغرة مقارنة بالجسم (**a**). أما إذا كان الجسم بين البؤرة ومركز التكور فستكون الصورة حقيقية ومقلوبة ومكبرة وموقعها خلف C (**b**).





■ **الشكل 11–4** يكوّن مقراب جريجوريان Gregorian صورًا حقيقية ومعتدلة.

الربط مع الفلك

كيف يمكن تحويل الصورة الحقيقية والمقلوبة التي تكوّنها مرآة مقعرة إلى صورة معتدلة وحقيقية؟ لقد طوّر عالم الفلك الأسكتلندي جيمس جريجوري في عام 1663 المقراب المعروف باسمه، مقراب جريجوريان، المبين في **الشكل 11–4** لحل هذه المشكلة. ويتكوَّن مقرابه من مرآتين مقعرتين إحداهما كبيرة والأخرى صغيرة. وتقع المرآة الصغيرة خلف بؤرة المرآة الكبيرة. وعندما تسقط الأشعة المتوازية القادمة من جسم بعيد على المرآة المقعرة الكبيرة فإنها تنعكس في اتجاه المرآة الصغيرة، التي تعكس بدورها هذه الأشعة مكوِّنة صورة حقيقية ومعتدلة تمامًا كالجسم.

استراتيجيات حل المسألة

استخدام طريقة رسم الأشعة لتحديد موقع الصور التي تكوّنها المرايا الكروية

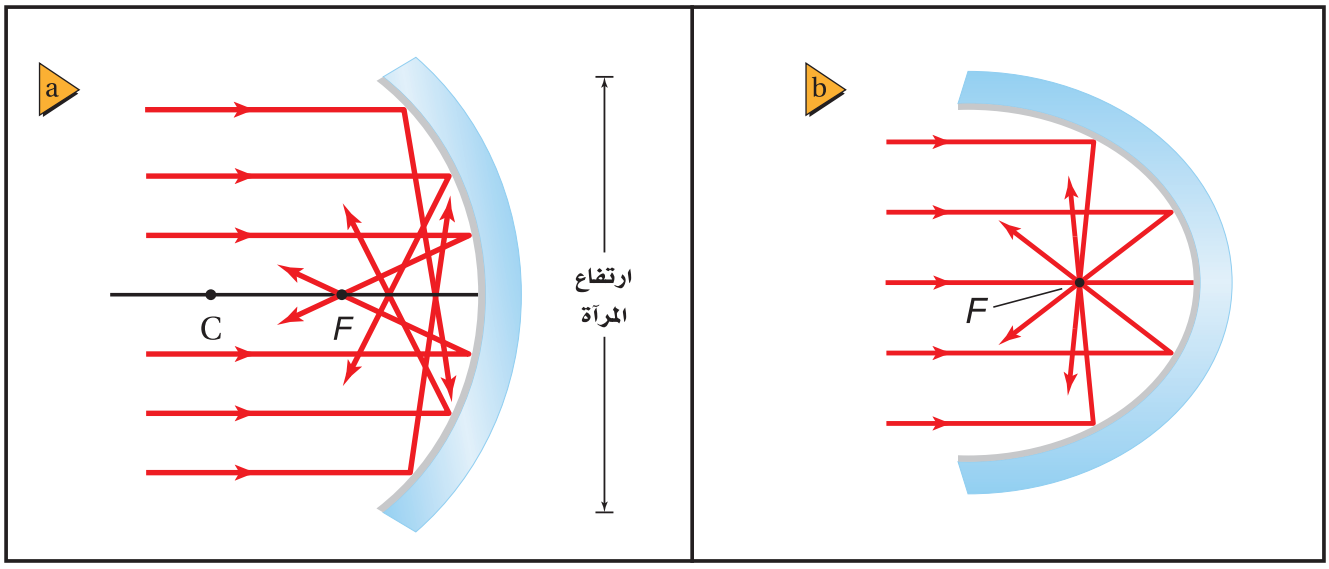
استخدم الاستراتيجيات التالية لحل مسائل المرايا الكروية. ارجع إلى **الشكل 10–4**:

1. استخدم ورقة مُسطّرة أو ورقة رسم بياني، وارسم المحور الرئيس للمرآة على صورة خط أفقي من يسار الصفحة إلى يمينها، تاركًا مسافة 6 أسطر فارغة أعلاه، و6 أسطر فارغة أسفله.
2. ضع نقاطًا أو علامات على المحور تمثّل كلًّا من الجسم و C و F على النحو الآتي:

   a. إذا كانت المرآة مقعرة وكان الجسم خلف مركز التكور C، بعيدًا عن المرآة فضع المرآة عن يمين الصفحة، والجسم عن يسارها، وضع C و F وفق مقياس الرسم.

   b. إذا كانت المرآة مقعرة والجسم بين C و F فضع المرآة عن يمين الصفحة وC في وسطها وF في منتصف المسافة بين المرآة ومركز التكور C ، وضع الجسم وفق مقياس الرسم.

   c. لأي وضع آخر، ضع المرآة في وسط الصفحة، وضع الجسم أو البؤرة F [أيهما أبعد عن المرآة] على يسار الصفحة، وضع الآخر الأقرب وفق مقياس الرسم.
3. ارسم خطًّا رأسيًّا لتمثيل المرآة، يمر بقطبها وفي الفراغ المكوّن من الاثني عشر سطرًا. يمثل هذا الخط المستوى الأساسي للمرآة.
4. ارسم الجسم على هيئة سهم، واكتب على رأسه O_1. للمرايا المقعرة، يجب ألا يزيد طول الأجسام الواقعة أمام C على 3 أسطر، وأمّا لسائر الأوضاع فاجعل طول الأجسام 6 أسطر. سيكون مقياس رسم طول الجسم مختلفًا عن مقياس الرسم المستخدم على المحور الرئيس.
5. ارسم الشعاع 1 بصورة موازية للمحور الرئيس، حيث ينعكس عن المستوى الأساسي مارًّا بالبؤرة.
6. ارسم الشعاع 2 مارًّا بالبؤرة. سينعكس هذا الشعاع عن المستوى الأساسي موازيًا للمحور الرئيس.
7. تتكون الصورة عند موقع التقاء الشعاعين المنعكسين 1 و 2 أو امتداديهما، وتكون الصورة ممثلة بسهم عمودي من المحور الرئيس إلى I_1 (نقطة التقاء الشعاعين المنعكسين أو امتداديهما).



عيوب الصور الحقيقية في المرايا المقعرة عند رسم الأشعة في المرايا الكروية يمكنك أن تعكس الأشعة عن المستوى الأساسي؛ وهو الخط الرأسي الذي يمثل المرآة، إلا أن الأشعة في حقيقة الأمر تنعكس عن المرآة نفسها، كما في **الشكل 12a–4**. لاحظ أن الأشعة المتوازية القريبة من المحور الرئيس (الأشعة المحورية) فقط هي التي تنعكس مارة بالبؤرة. أما الأشعة الأخرى فتلتقي في نقاط أقرب إلى المرآة. لذا فإنّ نتيجة انعكاس الأشعة التي تسقط متوازية على مرآة كروية ذات قطر كبير بانحناءٍ صغير، ستكون في صورة قرص، وليست نقطة. ويُسمى هذا العيب **الزيغ (التشوه) الكروي**، وهو ما يجعل الصورة تبدو غير واضحة.

والمرآة المقعرة التي تكون على شكل قطع مكافئ ـ كما في **الشكل 12b–4** ـ لا تعاني من الزيغ الكروي. ونظرًا لارتفاع تكلفة تصنيع المرايا الكبيرة التي تأخذ شكل القطع المكافئ تمامًا، فإن أغلب أجهزة المقراب الجديدة تستعمل مرايا كروية ومرايا ثانوية صغيرة مصمّمة على هيئة خاصة، أو عدسات صغيرة، لتصحيح الزيغ الكروي. ويمكن تقليل الزيغ الكروي كذلك بتقليل نسبة ارتفاع المرآة، الموضحة في **الشكل 12a–4**، إلى نصف قطر تكورها. وتُستخدم المرايا ذات التكلفة الأقل في التطبيقات التي لا تحتاج إلى دقة عالية.

■ **الشكل 12–4** تعكس المرآة الكروية المقعرة جزءًا من الأشعة، بحيث تتجمع في نقاط غير البؤرة (**a**). تُجمّع مرآة القطع المكافئ الأشعةَ المنعكسة جميعها وتركّزها في نقطة واحدة (**b**).

تطبيق الفيزياء

مشكلة هابل
Hubble Trouble

أطلقت وكالة الفضاء الأمريكية (ناسا) في عام 1990 تلسكوب هابل الفضائي في مدار حول الأرض، وكان من المتوقع أن يُزوّد الوكالة بصور واضحة دون التشوه الحادث بوساطة الغلاف الجوي، إلّا أنّه وجد بعد إطلاقه مباشرة زيغ كروي في الصور. وفي عام 1993 أُجريت تصحيحات بصرية، سميت كوستار COSTAR، على تلسكوب هابل ليتمكن من إعطاء صور واضحة.

الطريقة الرياضية لتحديد موقع الصورة
Mathmatical Method of Locating the Image

يمكن استعمال نموذج المرآة الكروية لإيجاد معادلة بسيطة خاصة بالمرايا الكروية. ويتعين عليك لتكوين الصورة مراعاة الاعتماد على الأشعة المحورية؛ وهي الأشعة القريبة من المحور الرئيس والمتوازية معه. واستعمال هذا التقريب إلى جانب استخدام قانون الانعكاس يقود إلى معادلة المرآة الكروية عن طريق ربط الكميات التالية بعضها مع بعض: البعد البؤري للمرآة الكروية f، وبعد الجسم d_o، وبعد الصورة d_i.

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

مقلوب البعد البؤري للمرآة الكروية يساوي حاصل جمع مقلوب بُعد الجسم ومقلوب بُعد الصورة عن المرآة.

من المهم أن تتذكر عند استخدام هذه المعادلة في حل المسائل أنها صحيحة تقريبًا؛ حيث لا تتنبأ بالزيغ الكروي؛ لأنها تعتمد على الأشعة المحورية في تكوين الصور. وفي الحقيقة تكون الأشعة الصادرة عن الجسم مشتتة، لذا لا تكون جميع الأشعة موازية للمحور الرئيس أو قريبة منه. وتعطي هذه المعادلة صفات الصورة بدقة كبيرة، إذا كان ارتفاع المرآة صغيرًا مقارنة بنصف قطر تكوّرها، بحيث يحدّ من الزيغ الكروي.

التكبير للمرايا الكروية خاصية **التكبير** m؛ ويُقصد به كم مرّة تكون الصورة أكبر من الجسم أو أصغر منه. والتكبير عمليًّا هو النسبة بين طول الصورة وطول الجسم. ويمكن استخدام هندسة تطابق المثلثات لكتابة هذه النسبة بدلالة كلٍّ من بُعد الجسم وبعد الصورة.

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

يُعرّف تكبير مرآة كروية لجسم ما على أنه: طول الصورة مقسومًا على طول الجسم. ويساوي حاصل قسمة سالب بُعد الصورة عن المرآة على بعد الجسم عن المرآة.

إذا كان بُعد الصورة الحقيقية موجبًا، فإن التكبير يكون سالبًا، وهذا يعني أن الصورة مقلوبة مقارنة بالجسم. وإذا كان الجسم واقعًا خلف مركز التكور C كانت القيمة المطلقة لتكبير الصورة الحقيقية أقل من 1؛ وهذا يعني أن الصورة تكون أصغر من الجسم (مصغّرة). أما إذا وضع الجسم بين البؤرة F ومركز التكور C كانت القيمة المطلقة لتكبير الصورة الحقيقية أكبر من 1؛ أيْ أن الصورة أكبر من الجسم (مكبّرة).

التجربة العملية:

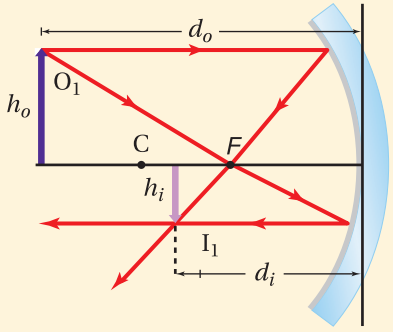
ما الشروط الواجب توافرها لتكوين صور حقيقية وأخرى تقديرية باستخدام مرآة مقعرة؟

المختبر الافتراضي:

توضيح خصائص الصور في المرايا المقعرة.

مثـــــال 2

الصورة الحقيقية التي تكوّنها مرآة مقعرة وضع جسم طوله 2.0 cm أمام مرآة مقعرة نصف قطرها 20.0 cm، وعلى بُعد 30 cm منها. فما بُعد الصورة؟ وما طولها؟



1 تحليل المسألة ورسمها

- ارسم مخططًا للجسم والمرآة.
- ارسم شعاعين أساسيّين لتحديد موقع الصورة على المخطّط.

المعلوم	المجهول
$h_o = 2.0\ \text{cm}$	$d_i = ?$
$d_o = 30.0\ \text{cm}$	$h_i = ?$
$r = 20.0\ \text{cm}$	

2 ايجاد الكمية المجهولة

نحسب البعد البؤري

بالتعويض عن $r = 20.0\ \text{cm}$

$$f = \frac{r}{2}$$

$$f = \frac{20.0\ \text{cm}}{2}$$

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

استخدم معادلة المرآة، وحل لإيجاد بُعد الصورة:

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

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

بالتعويض عن $f = 10.0\ \text{cm}$، و $d_o = 30.0\ \text{cm}$

$$= \frac{(10.0\ \text{cm})(30.0\ \text{cm})}{30.0\ \text{cm} - 10.0\ \text{cm}}$$

$$= 15.0\ \text{cm}$$ (صورة حقيقية أمام المرآة)

استخدم علاقة التكبير لحساب طول الصورة:

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

بالتعويض عن $d_i = 15.0\ \text{cm}$، $h_o = 2.00\ \text{cm}$، $d_o = 30.0\ \text{cm}$

$$h_i = \frac{-d_i h_i}{d_o} = \frac{-(15.0\ \text{cm})(2.0\ \text{cm})}{30.0\ \text{cm}}$$

$$= -1.0\ \text{cm}$$ (صورة مقلوبة مصغرة)

3 تقويم الجواب

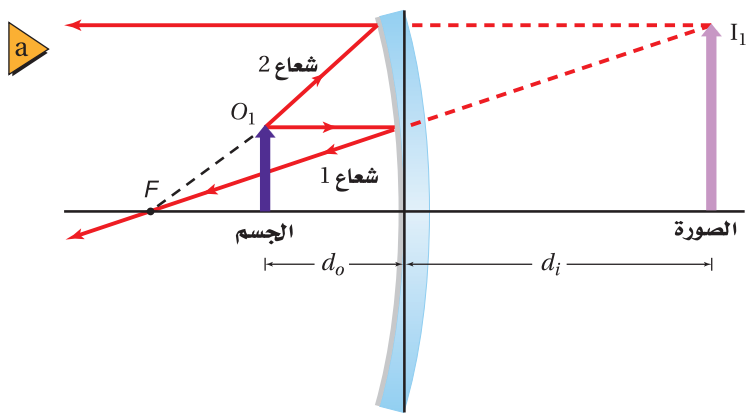
- **هل الوحدات صحيحة؟** جميع الوحدات بالسنتمتر cm.
- **هل هناك معنى للإشارة؟** الموقع الموجب والطول السالب متفقان مع الرسم.

مسائل تدريبية

10. وضع جسم على بُعد 36.0 cm أمام مرآة مقعرة بعدها البؤري 16.0 cm، أوجد بُعد الصورة.

11. وضع جسم طوله 2.4 cm على بُعد 16.0 cm من مرآة مقعرة بعدها البؤري 7.0 cm، أوجد طول الصورة.

12. وضع جسم بالقرب من مرآة مقعرة بعدها البؤري 10.0 cm، فتكوّن له صورة مقلوبة طولها 3.0 cm على بُعد 16.0 cm من المرآة. أوجد كلًّا من بعد الجسم عن المرآة وطول الجسم.



الشكل 13–4 عند وضع جسم بين البؤرة والمرآة الكروية المقعرة تتكون له صورة مكبّرة ومعتدلة وتقديرية خلف المرآة (a)، كما هو موضّح في الشكل (b). ما الصفات الأخرى التي تراها للصورة أيضًا في هذا الشكل؟

الصور التقديرية في المرايا المقعرة
Virtual Images with Concave Mirrors

لاحظت أنه كلّما اقترب الجسم من بؤرة المرآة المقعرة f ابتعدت الصورة عن المرآة. وإذا وضع الجسم في البؤرة تمامًا كانت الأشعة المنعكسة جميعها متوازية، ومن ثم لا تتقاطع، لذا نقول إن الصورة تكوّنت في ما لا نهاية، ولا تُرى صورة للجسم في هذه الحالة. ماذا يحدث إذا اقترب الجسم من المرآة أكثر؟

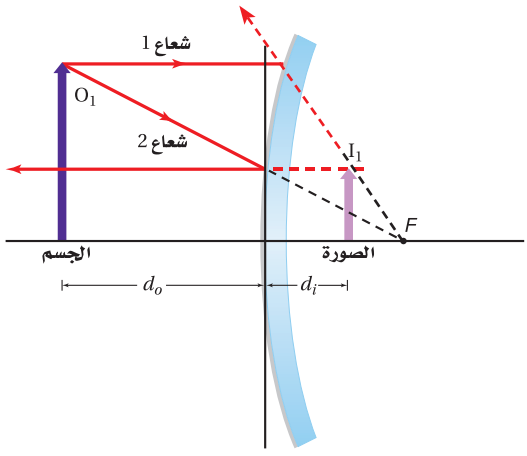
ماذا تلاحظ عندما تقرّب وجهك من مرآة مقعرة أكثر فأكثر؟ تكون صورة وجهك معتدلة وخلف المرآة. فالمرآة المقعرة تكوّن صورةً تقديرية إذا وضع الجسم بين المرآة والبؤرة، كما في **الشكل 13a–4**. ولتحديد صورة نقطة من نقاط الجسم يُرسم مرة أخرى شعاعان، وكما ذُكر سابقًا يُرسم الشعاع 1 ساقطًا بموازاة المحور الرئيس وينعكس مارًّا بالبؤرة. أمّا الشعاع 2 فيُرسم من نقطة على الجسم ليصل إلى المرآة، بحيث يمر امتداد هذا الشعاع في البؤرة، وينعكس هذا الشعاع موازيًا المحور الرئيس. تلاحظ أن الشعاعين 1 و2 يتشتّتان عندما ينعكسان عن المرآة، لذا لا يمكن أن يكوّنا صورة حقيقية، في حين يلتقي امتدادا الشعاعين المنعكسين خلف المرآة مكوّنين صورة تقديرية.

وعندما تستخدم معادلة المرآة المقعرة لتحديد بُعد صورة جسم يقع بين البؤرة والمرآة تجد أن بُعد الصورة يكون سالبًا. وستعطي معادلة التكبير تكبيرًا موجبًا أكبر من 1، وهذا يعني أن الصورة معتدلة ومكبّرة، مقارنة بالجسم، كما في الصورة الموضحة في **الشكل 13b–4**.

مسألة تحدٍّ

وضع جسم طوله h_o على بعد d_o من مرآة مقعرة بعدها البؤري f.

1. ارسم شكلاً لمخطّط أشعة يوضح البعد البؤري وموقع الجسم إذا كان بُعد الصورة الناتجة يساوي ضعفي بُعد الجسم عن المرآة، وأثبت صحة إجابتك رياضيًّا. واحسب البعد البؤري كدالّة رياضية في بُعد الجسم في هذه الحالة.
2. ارسم شكلاً لمخطّط أشعة يوضح بُعد الجسم إذا كان بُعد الصورة عن المرآة يساوي ضعفي البعد البؤري، وأثبت صحة إجابتك رياضيًّا، واحسب طول الصورة كدالّة رياضية في طول الجسم في هذه الحالة.
3. أين يجب وضع الجسم بحيث لا تتكوّن له صورة؟



■ **الشكل 14–4** تكوّن المرآة المحدبة دائمًا صورًا تقديرية ومعتدلة ومصغرة مقارنة بالجسم.

المرايا المحدبة Convex Mirrors

تعلمت في بداية هذا الفصل أن السطح الداخلي لملعقة مصقولة يعمل عمل مرآة مقعرة. وإذا قلبت الملعقة فإن السطح الخارجي سيعمل عمل مرآة محدبة. والمرآة المحدبة سطح عاكس حوافه منحنية بعيدًا عن المشاهد. ماذا ترى عندما تنظر إلى ظهر ملعقة؟ سترى صورتك معتدلة ومصغرة.

المختبر الافتراضي:

توضيح خصائص الصور في المرايا المحدبة.

وخصائص المرآة الكروية المحدبة موضحة في **الشكل 14–4**. فالأشعة المنعكسة عن المرآة المحدبة مشتّتة دائمًا. لذا تكوِّن المرايا المحدبة صورًا تقديرية. وتكون النقطتان C و F واقعتين خلف المرآة. وعند تطبيق معادلة المرآة ستكون قيمتا f، d_i سالبتين دائمًا؛ لأنهما خلف المرآة.

ويبيّن مخطّط الأشعة في **الشكل 14–4** كيفية تكوّن الصورة بوساطة المرآة الكروية المحدبة، فعند أخذ شعاعين من العدد اللانهائي من الأشعة الصادرة عن الجسم فإن الشعاع 1 يسقط على المرآة موازيًا المحور الرئيس، وينعكس عنها، بحيث يمرّ امتداد الشعاع المنعكس في البؤرة F خلف المرآة. ويسقط الشعاع 2 على المرآة بحيث يمرّ امتداده في البؤرة F خلف المرآة، لماذا؟ وسيكون كلّ من الجزء المنعكس من الشعاع 2 وامتداد الشعاع 2 المنعكس خلف المرآة موازيين للمحور الرئيس، وسيتشتّت الشعاعان المنعكسان، في حين يلتقي امتداداهما خلف المرآة ليكوّنا صورة تقديرية ومعتدلة ومصغرة مقارنة بالجسم.

تكون معادلة التكبير مفيدة لتحديد الأبعاد الظاهرية للجسم كما سيرى في المرآة الكروية المحدبة. فإذا علمت قطر جسم فاضربه في مقدار التكبير لمعرفة مدى تغير القطر عندئذٍ. وستجد أن القطر صغير، مثله مثل باقي الأبعاد، وهذا يفسّر لماذا يبدو بُعد الصور المتكونة لأجسام في مرآة محدبة أقل من بعدها الحقيقي.

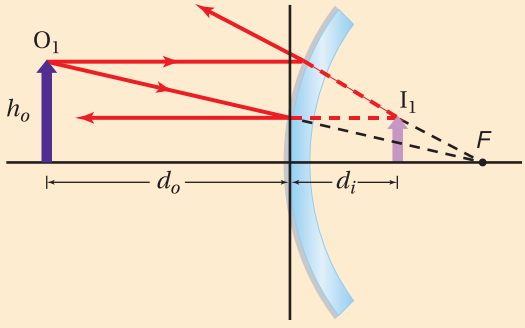
مجال الرؤية قد يبدو أن استعمالات المرايا المحدبة محدودة بسبب الصور المصغّرة التي تكوّنها للأجسام، إلا أنّ هذه الخاصية جعلت للمرايا المحدبة استخدامات عملية؛ فمن خلال تكوينها صورًا مصغّرة للأجسام تؤدي المرايا المحدبة إلى توسيع المساحة، أو مجال الرؤية، التي يراها المراقب، كما في **الشكل 15–4**. كما أن مركز مجال الرؤية مشاهد من أي زاوية للناظر بالنسبة للمحور الرئيس للمرآة، ومن ثم يكون مجال الرؤية واضحًا بمشهدٍ أوسع. ولذا تُستخدم المرايا المحدبة على نحوٍ واسع على جوانب السيارات للرؤية الخلفية.

■ **الشكل 15–4** تكوّن المرايا المحدبة صورًا أصغر من الأجسام، وهذا يزيد من مجال الرؤية للمراقب.

مثـــــال 3

الصورة في مرآة المراقبة تُستخدم مرآة محدبة بعدها البؤري 0.50 m من أجل الأمن في المستودعات، فإذا كان هناك رافعة شوكية طولها 2.0 m على بُعد 5.0 m من المرآة فما بُعد الصورة المتكوّنة وما طولها؟

1 تحليل المسألة ورسمها



- ارسم مخطّطًا للمرآة والجسم.
- ارسم شعاعين أساسيّين لتحديد موقع الصورة على المخطّط.

المعلوم	المجهول
$h_o = 2.0\ \text{m}$	$d_i = ?$
$d_o = 5.0\ \text{m}$	$h_i = ?$
$f = -0.5\ \text{m}$	

2 ايجاد الكمية المجهولة

استخدم قانون المرآة، وأوجد بُعد الصورة.

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

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

بالتعويض عن $d_o = 5.0\ m,\ f = -0.50\ m$

$$= \frac{(-0.50\ \text{m})(5.0\ \text{m})}{5.0\ \text{m} + 0.5\ \text{m}}$$

$$= -0.45\ \text{m}$$ (صورة تقديرية وخلف المرآة)

استخدم معادلة المرآة، وحل لإيجاد طول الصورة:

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

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

بالتعويض عن $d_o = 5.0\ \text{m}, h_o = 2.0\ \text{m}, d_i = -0.45\ \text{m}$

$$= \frac{-(-0.45\ m)(2.0\ m)}{(5.0\ m)}$$

$$= 0.18\ \text{m}$$ (الصورة معتدلة ومصغرة)

3 تقويم الجواب

- **هل الوحدات صحيحة؟** جميع الوحدات بالمتر m.
- **هل هناك معنى للإشارة؟** تدل الإشارة السالبة في بُعد الصورة على أنها تقديرية، وتدل الإشارة الموجبة في طول الصورة على أنها معتدلة. وهذا يتفق مع المخطّط.

مسائل تدريبية

13. إذا وضع جسم على بعد 20.0 cm أمام مرآة محدبة بعدها البؤري 15.0 cm ، فأوجد بُعد الصورة المتكوّنة عن المرآة باستخدام الرسم التخطيطي وفق مقياس رسم، وباستخدام معادلة المرآة.

14. تقف فتاة طولها 1.8 m على بُعد 2.4 m من مرآة أمان خاصة بمستودع، فتكونت لها صورة طولها 0.36 m، ما البعد البؤري للمرآة؟

الجدول 1-4					
خصائص الصور في مرآة مفردة					
نوع المرآة	f	d_o	d_i	m	الصورة
مستوية		$d_o > 0$	$\lvert d_i \rvert = d_o$ (سالب)	الحجم نفسه	تقديرية
مقعرة	+	$d_o > r$	$r > d_i > f$	مصغرة ومقلوبة	حقيقية
		$r > d_o > f$	$d_i > r$	مكبرة ومقلوبة	حقيقية
		$f > d_o > 0$	$\lvert d_i \rvert > d_o$ (سالب)	مكبرة	تقديرية
محدبة	-	$d_o > 0$	$\lvert f \rvert > \lvert d_i \rvert > 0$ (سالب)	مصغرة	تقديرية

مقارنة المرايا Mirror comparison

كيف تقارن بين الأنواع المختلفة من المرايا؟ يوضح **الجدول 1—4** مقارنة بين خصائص أنظمة مرآة مفردة (أحادية) لأجسام موضوعة على المحور الرئيس للمرآة. وتلاحظ من الجدول أنّ بُعد الصورة التقديرية دائمًا سالب؛ لأنها تقع دائمًا خلف المرآة. وعندما تكون القيمة المطلقة للتكبير بين صفر و 1 تكون الصورة أصغر من الجسم. والتكبير السالب يعني أن الصورة مقلوبة بالنسبة للجسم. لاحظ أيضًا أن المرآة المستوية والمرآة المحدبة تكوّنان دائمًا صورًا تقديرية، في حين تكوّن المرآة المقعرة صورًا تقديرية وصورًا حقيقية. وتعطي المرايا المستوية انعكاسًا واقعيًّا للأشياء، أمّا المرايا المحدبة فتعمل على توسيع مجال الرؤية. وتعمل المرآة المقعرة على تكبير الصورة إذا كان الجسم واقعًا بين المرآة وبعدها البؤري.

4-2 مراجعة

15. **صفات الصورة** إذا كنت تعرف البعد البؤري لمرآة مقعرة فأين يجب أن تضع جسمًا بحيث تكون صورته مكبّرة ومعتدلة بالنسبة للجسم؟ وهل تكون هذه الصورة حقيقية أم تقديرية؟
16. **التكبير** وضع جسم على بُعد 20.0 cm أمام مرآة مقعرة بعدها البؤري 9.0 cm، ما تكبير الصورة؟
17. **بعد الجسم** عند وضع جسم أمام مرآة مقعرة بُعدها البؤري 12.0 cm، تكوّنت له صورة على بُعد 22.3 cm من المرآة، فما بُعد الجسم عن المرآة؟
18. **بعد الصورة وطولها** وضع جسم طوله 3.0 cm على بُعد 22.0 cm من مرآة مقعرة بُعدها البؤري 12.0 cm، ارسم مخطّطًا بمقياس رسم مناسب يبين بُعد الصورة وطولها، وتحقق من إجابتك باستخدام معادلتي المرآة والتكبير.
19. **مخطّط الأشعة** وضع جسم طوله 4.0 cm على بُعد 14.0 cm من مرآة محدبة بعدها البؤري 12.0 cm، ارسم مخطّطًا بمقياس رسم مناسب يبين بُعد الصورة وطولها، وتحقق من إجابتك باستخدام معادلتي المرآة والتكبير.
20. **نصف قطر التكوّر** وضع جسم طوله 6.0 cm على بعد 16.4 cm من مرآة محدبة. فإذا كان طول الصورة المتكوّنة 2.8 cm فما نصف قطر التكور للمرآة؟
21. **البعد البؤري** استخدمت مرآة محدبة لتكوين صورة حجمها يساوي $\frac{2}{3}$ حجم الجسم على بُعد 12.0 cm خلف المرآة. ما البعد البؤري للمرآة؟
22. **التفكير الناقد** هل يكون الزيغ الكروي للمرآة أقل إذا كان ارتفاعها أكبر من نصف قطر تكورها أم إذا كان ارتفاعها أقل من نصف قطر تكورها؟ وضّح ذلك.

الأنظمة البصرية المتكيفة Adaptive Optical Systems

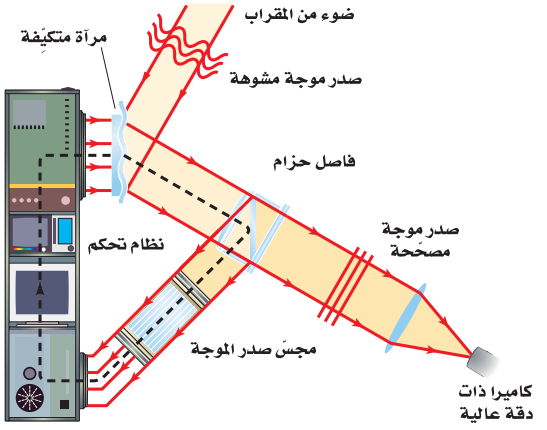
يصعب ملاحظة الأجسام الموجودة في الفضاء من الأرض لأنها برّاقة ومتلألئة؛ حيث تؤدي حركة الغلاف الجوي والتسخين غير المتساوي له، إلى انكسار الضوء القادم من تلك الأجسام بصورة فوضوية، ويمكن تشبيه ذلك بمحاولة النظر إلى جسم صغير من خلال الجزء السفلي لبطرمان فارغ مصنوع من الزجاج الشفاف في أثناء تدويره.

المرآة المتكيّفة المرنة يعوّض النظام البصري المتكيّف AOS باستمرار التشوهات الناجمة عن الغلاف الجوي من خلال إزالة اللمعان من صور النجوم؛ حتى يتمكن الفلكيون من مشاهدة صور ثابتة لأبعد الأجسام في الكون المرئي وتصويرها.

ينقل النظام البصري المتكيّف AOS صورة النجم المكبّرة من المقراب إلى مرآة متكيّفة مرنة مصنوعة من زجاج رقيق، وتشد هذه المرآة بوساطة 20 –30 مكبسًا متحركًا؛ إذ تؤدي تلك المكابس إلى دفع سطح المرآة أو سحبه إلى أي شكل مهما كان معقدًا أو صعبًا. ويعمل كل مكبس بوساطة محرك سريع، يتم التحكم فيه آليًّا عن طريق حاسوب. وعندما يصبح سطح المرآة مطابقًا تمامًا للنمط المحدد في الوقت المحدد فإنها تُعوِّض عن حركة الحمل الحراري في الغلاف الجوي بين المقراب والنجم، وستعكس صورة واضحة نحو المراقب أو الكاميرا.

مجس صدر الموجة يُوجَّه مجس صدر الموجة نحو نجم واحد خلال المقراب للكشف عن التشوه الناجم بفعل الغلاف الجوي في كل لحظة؛ إذ تحتوي هذه الأداة على مجموعة مرتبة من العدسات الرقيقة في صفوف متعدّدة، وتكوّن كل مجموعة عدسات صورة للنجم على شاشة حساسة خلفها، ويمكن أن يُقرأ موقع كل صورة بوساطة الحاسوب.

إذا كانت الصورة لا تقع خلف مجموعة العدسات الخاصة بها تمامًا فإن برمجيّات الحاسوب تميّز أن موجات النجم الضوئية تكون مشتتة بفعل الغلاف الجوي. لاحظ أن النجم يمثّل مصدرًا ضوئيًّا نقطيًّا بعيدًا، لذا فإنه يُنتج موجات مستوية.



يلغي النظام البصري المتكيّف التشويه في صورة تيتان-أكبر أقمار زحل.

تلسكوب كيك الذي يستخدم النظام البصري المتكيّف | تلسكوب هابل الفضائي | تلسكوب تقليدي

والصورة المشوهة للنجم ناتجة عن موجات ضوء غير مستوية، وهذه الموجات غير المستوية تؤدي إلى إزاحة صور النجم خلف بعض مجموعات العدسات فتختفي الصورة.

وتعالج برمجيّة الحاسوب هذا الخطأ، من خلال تقانة محددة، تعمل على تكيف المرآة لإعادة الصور المختفية جميعها إلى مكانها؛ إذ تنعكس صورة النجم نحو المشاهد (المراقب) ثم تُصحّح، ولذا سترى صورة جميع الأجسام (مثل المجرات والكواكب) القريبة بوضوح. ونستطيع تغيير شكل المرآة المتكيّفة 1000 مرة تقريبًا في الثانية.

التوسع

1. **ابحث** ما الإجراء المتّبع إذا لم يكن هناك نجم مناسب لتحليله أو دراسته باستخدام مجس صدر الموجة وذلك في منطقة من الفضاء تحت المراقبة؟
2. **طبّق** ابحث في كيفية استخدام المتكيّف البصري في المستقبل لتصحيح الرؤية.

الفصل 4

دليل الدراسة

4–1 الانعكاس عن المرايا المستوية Reflection from Plane Mirrors

المفردات

- انعكاس منتظم
- انعكاس غير منتظم
- مرآة مستوية
- جسم
- صورة تقديرية

الفكرة الرئيسة: تكون زاوية سقوط الأشعة الضوئية مساوية لزاوية انعكاسها.

- وفق قانون الانعكاس، فإن الزاوية التي يصنعها الشعاع الساقط مع العمود المقام على السطح العاكس عند نقطة السقوط تساوي الزاوية التي يصنعها الشعاع المنعكس مع العمود المقام على السطح عند النقطة نفسها.

$$\theta_r = \theta_i$$

- يُطبّق قانون الانعكاس على السطوح الخشنة والسطوح المصقولة، حيث يكون العمود المقام على السطح الخشن في اتجاهات كثيرة مختلفة، وهذا يعني أن الأشعة المتوازية الساقطة تنعكس مشتّتة. (انعكاس غير منتظم)، بينما تنعكس الأشعة الساقطة على السطح المصقول متوازية (انعاس منتظم).
- يُنتج السطح المصقول انعكاسًا منتظمًا، في حين يُنتج السطح الخشن انعكاسًا غير منتظم.
- يُسبّب الانعكاس المنتظم تكوّن الصور التي تظهر كأنها خلف المرايا المستوية.
- الصورة التي تكوّنها المرآة المستوية تقديرية دائمًا، وحجمها يساوي حجم الجسم نفسه، ولها اتجاه الجسم نفسه، وبعدها عن المرآة يساوي بُعد الجسم عن المرآة.

$$d_i = -d_o \qquad h_i = h_o$$

4–2 المرايا الكروية Curved Mirrors

المفردات

- المرآة المقعّرة
- المحور الرئيس
- البؤرة
- البعد البؤري
- الصورة الحقيقية
- الزيغ الكروي
- التكبير
- المرآة المحدّبة

الفكرة الرئيسة: موقع تكوّن المرايا الكروية صورة حقيقية أو تقديرية للأجسام كما يمكن أن تكون هذه الصور مكبرة أو مصغرة.

- يمكنك تحديد موقع الصورة التي تكوّنها مرآة كرويّة من خلال رسم شعاعين من نقطة على الجسم إلى المرآة، وتكون نقطة تقاطع الشعاعين المنعكسين أو امتدادها صورة نقطة الجسم.
- تُعبّر معادلة المرآة عن العلاقة بين بعد الصورة، وبعد الجسم، والبعد البؤري للمرآة الكروية:

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

- تُعبّر النسبة بين بُعد الصورة وبُعد الجسم، أو النسبة بين طول الصورة، وطول الجسم عن تكبير الصورة في المرآة.

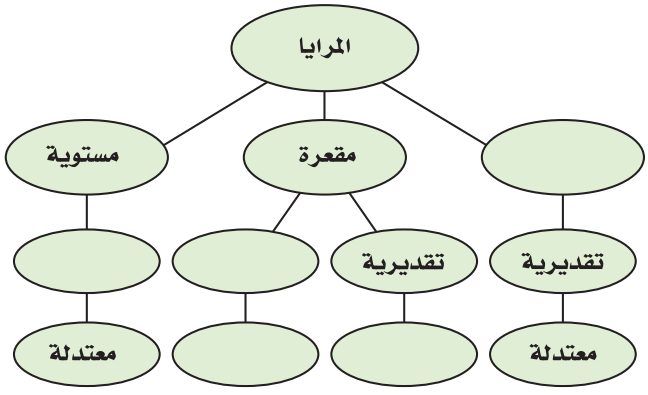
$$m = \frac{h_i}{h_o} = \frac{-d_i}{d_o}$$

- تكوّن المرآة المقعرة صورة حقيقية ومقلوبة عندما يكون بعد الجسم أكبر من البعد البؤري.
- تكوّن المرآة المقعرة صورة تقديرية ومعتدلة عندما يكون بعد الجسم أقل من البعد البؤري.
- تكوّن المرآة المحدبة دائمًا صورة تقديرية ومعتدلة ومصغرة.
- تبدو الصور التي تكوّنها المرايا المحدبة أبعد، كما تنتج مجال رؤية واسعًا؛ لأنها تكوّن صورًا مصغرة.
- يمكن استخدام المرايا في مجموعات أو ضمن تراكيب لإنتاج صور بحجوم وأوضاع ومواقع مختلفة، حسب الحاجة أو الرغبة. ويُعدّ المقراب (التلسكوب) الاستخدام الأكثر شيوعًا لمثل هذه التراكيب.

الفصل 4
التقويم

خريطة المفاهيم

23. أكمل خريطة المفاهيم باستخدام المصطلحات التالية: محدبة، معتدلة، مقلوبة، حقيقية، تقديرية.



إتقان المفاهيم

24. ما العيب الموجود في جميع المرايا الكروية المقعرة؟ وما سببه؟

25. ما المعادلة التي تربط بين كلٍّ من بعد الجسم وبعد الصورة والبعد البؤري؟

26. ما العلاقة بين مركز تكور المرآة المقعرة وبعدها البؤري؟

27. إذا عرفت بعد الصورة وبعد الجسم عن مرآة كروية، فكيف يمكنك تحديد تكبير هذه المرآة؟

28. لماذا تستخدم المرايا المحدّبة على أنها مرايا مخصّصة للنظر إلى الخلف في السيارات؟

29. لماذا لا يمكن تكوين صور حقيقية بوساطة المرآة المحدبة؟

تطبيق المفاهيم

30. اذكر الصفات الفيزيائية للصورة التي تكوّنها مرآة مقعرة إذا كان الجسم موضوعًا عند مركز تكوّرها، وحدّد موقعها.

31. إذا وضع جسم خلف مركز تكور مرآة مقعرة فحدّد موقع الصورة، واذكر صفاتها الفيزيائية.

32. **المقراب (التلسكوب)** إذا احتجت إلى مرآة مقعرة كبيرة لصنع مقراب يكوّن صورًا ذات جودة عالية فهل تستخدم مرآة كروية أم مرآة قطع مكافئ؟ وضّح ذلك.

33. صف خصائص الصورة التي كوّنتها المرآة المحدبة الموضّحة في **الشكل 16–4** .

الشكل 16–4

34. ما الشروط اللازم توافرها لتكوين صورة حقيقية بوساطة مرآة كروية مقعرة؟

35. ما الشروط اللازم توافرها لتكوين صورة مصغرة بوساطة مرآة كروية محدبة أو مقعرة؟

36. **المرايا المستخدمة للرؤية الخلفية** يُكتب على مرايا السيارة الجانبية المستخدمة في النظر إلى الخلف التحذير التالي: "الأجسام في المرآة أقرب مما تبدو عليه". ما نوع هذه المرايا؟ وبمَ تمتاز من غيرها؟

تقويم الفصل 4

إتقان حل المسائل

4–1 الانعكاس عن المرايا المستوية

37. سقط شعاع ضوئي بزاوية 38° مع العمود المقام عند نقطة السقوط، ما الزاوية التي يصنعها الشعاع المنعكس مع العمود المقام؟

38. إذا سقط شعاع ضوئي بزاوية 53° مع سطح المرآة؛ فأوجد ما يلي:

a. مقدار زاوية الانعكاس.

b. مقدار الزاوية بين الشعاع الساقط والشعاع المنعكس.

39. سقط شعاع على مرآة مستوية وصنع زاوية 36° مع المرآة. ما مقدار الزاوية بين الشعاع الساقط والشعاع المنعكس؟

40. ارسم مخطّط أشعة لمرآة مستوية تبين فيه أنه إذا أردت رؤية نفسك من قدميك حتى قمة رأسك فإنه يجب أن يكون طول المرآة المستخدمة على الأقل يساوي نصف طولك.

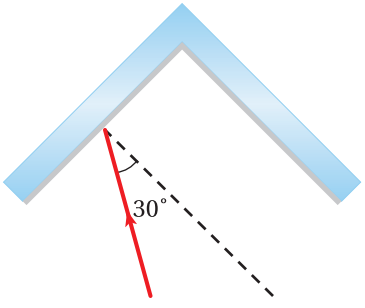
41. **الصورة في المرآة** أراد طالب أن يلتقط صورة بكاميرا لصورته في مرآة مستوية كما في **الشكل 17–4**. فإذا كانت الكاميرا على بعد 1.2 m أمام المرآة. فعلى أي بعد يجب أن تضبط عدسة الكاميرا لالتقاط صورة واضحة له؟

الشكل 17–4

42. يبين **الشكل 18–4** مرآتين مستويتين متجاورتين بينهما زاوية 90°، فإذا سقط شعاع ضوئي على إحداهما بزاوية سقوط 30°، فأجب عما يلي:

a. ما زاوية انعكاس الشعاع عن المرآة الأخرى؟

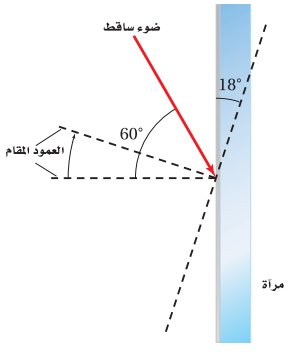
b. البريسكوب العاكس هو أداة تعكس الأشعة الضوئية في الاتجاه المعاكس لاتجاه الأشعة الضوئية الساقطة. ارسم مخطّطًا يبين زاوية السقوط على إحدى المرآتين بحيث يعمل نظام المرآتين عمل عاكس.



الشكل 18–4

43. وضِعت مرآتان مستويتان بحيث كانت الزاوية بينهما 45°، فإذا سقط شعاع ضوئي على إحداهما بزاوية سقوط 30° وانعكس عن المرآة الثانية، فاحسب زاوية انعكاسه عن المرآة الثانية.

44. سقط شعاع ضوئي على مرآة مستوية بزاوية سقوط 60°، فإذا أديرت المرآة بزاوية 18° في اتجاه حركة عقارب الساعة كما في **الشكل 19–4**، فما الزاوية التي يصنعها الشعاع المنعكس مع المرآة؟



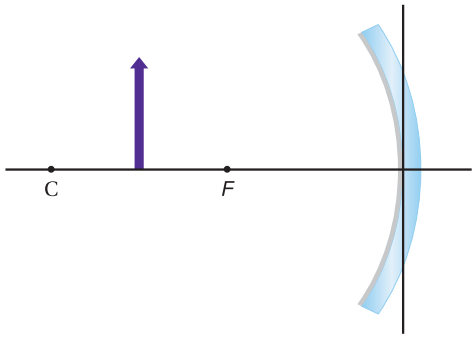
الشكل 19–4

تقويم الفصل 4

4–2 المرايا الكروية

45. **بيت الألعاب** يقف طالب بالقرب من مرآة محدبة في بيت الألعاب، فلاحظ أن صورته تظهر بطول 0.60 m، فإذا كان تكبير المرآة $\frac{1}{3}$ فما طول الطالب؟

46. صف الصورة المتكوّنة للجسم في **الشكل 20–4**. مبينًا هل هي حقيقية أم تقديرية، مقلوبة أم معتدلة، وهل هي أصغر من الجسم أم أطول منه؟

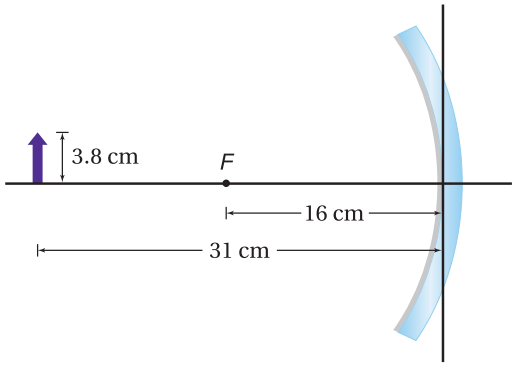


الشكل 20–4

47. **صورة نجم** جُمع الضوء القادم من نجم بوساطة مرآة مقعرة. ما بُعد صورة النجم عن المرآة إذا كان نصف قطر تكوّر المرآة 150 cm؟

48. **المرآة المستخدمة للرؤية الخلفية** على أيّ بُعد تظهر صورة سيارة خلف مرآة محدبة بعدها البؤري 6.0 cm، عندما تكون السيارة على بعد 10.0 m من المرآة؟

49. احسب بعد الصورة وارتفاعها للجسم الموضح في **الشكل 21–4**.



الشكل 21–4

50. **المرآة المستخدمة لرؤية الأسنان** يستخدم طبيب أسنان مرآة مقعرة صغيرة نصف قطرها 40 mm لتحديد نخر في أحد أسنان مريض، فإذا كانت المرآة على بُعد 16 mm من السن، فما تكبير الصورة الناتجة؟

51. وضع جسم طوله 3 cm على بُعد 22.4 cm من مرآة مقعرة، فإذا كان نصف قطر تكوّر المرآة 34.0 cm، فما بُعد الصورة عن المرآة؟ وما طولها؟

52. **مرآة تاجر مجوهرات** يفحص تاجر مجوهرات ساعة قطرها 3.0 cm بوضعها على بُعد 8.0 cm من مرآة مقعرة بعدها البؤري 12 cm فما:

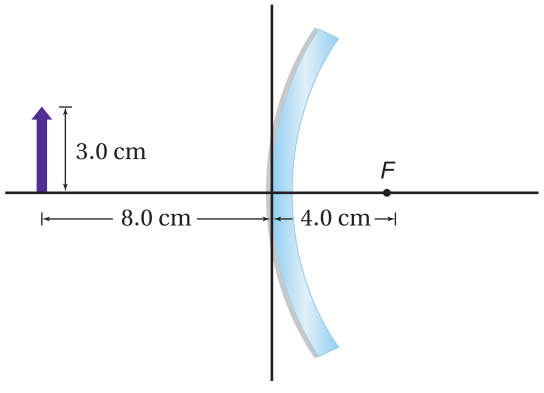
a. البعد الذي ستظهر عليه صورة الساعة؟

b. قطر الصورة؟

53. تُعدّ الكرات المعدنية اللامعة الموضوعة على قواعد في حديقة مرايا محدبة. فإذا كان قطر إحداها 40.0 cm، وقد وقف طائر طوله 12 cm على شجرة تبعد 1.5 m عن الكرة، فأوجد بُعد صورة الطائر عن المرآة، وما طولها؟

مراجعة عامة

54. انقل **الشكل 22–4** إلى دفترك، ثم ارسم أشعة على الشكل لتحديد طول الصورة المتكوّنة وموقعها.



الشكل 22–4

تقويم الفصل 4

55. وضع جسم طوله 2.4 cm على بعد 30.0 cm أمام مرآة مقعرة نصف قطر تكوّرها 26.0 cm، فما:

a. بعد الصورة المتكوّنة؟

b. طول الصورة المتكوّنة؟

56. تُستخدم مرآة محدبة لتكوين صورة حجمها نصف حجم الجسم على بعد 36 cm خلف المرآة. ما البعد البؤري للمرآة؟

57. ما نصف قطر تكوّر مرآة مقعرة تكبر صورة الجسم 3.2+ مرة عندما يوضع على بُعد 20.0 cm من المرآة؟

58. **مرآة المراقبة** تستخدم المحال الكبيرة مرايا المراقبة في الممرات، وكل مرآة لها نصف قطر تكوّر مقداره 3.8 m فما:

a. بُعد الصورة لزبون يقف أمام المرآة على بعد 6.5 m منها؟

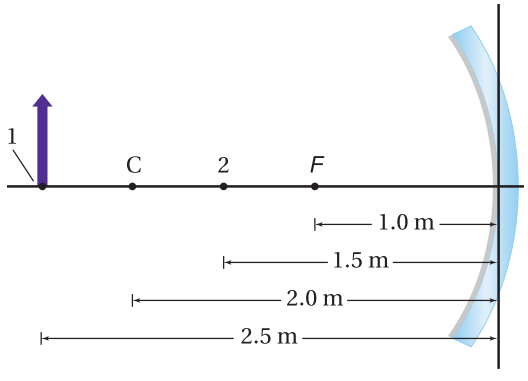
b. طول صورة زبون طوله 1.7 m؟

59. **مرآة الفحص والمعاينة** يريد مراقب خط إنتاج في مصنع تركيب مرآة تكوّن صورًا معتدلة تكبيرها 7.5 مرات عندما توضع على بُعد 14.0 mm من طرف الآلة، فما:

a. نوع المرآة التي يحتاج إليها المراقب لعمله؟

b. نصف قطر تكوّر المرآة؟

60. تحرّك الجسم في **الشكل 23–4** من الموقع 1 إلى الموقع 2. انقل الشكل إلى دفترك، ثم ارسم أشعة تبين كيف تتغير الصورة.



الشكل 23–4

61. وضعت كرة على بُعد 22 cm أمام مرآة كروية وتكوّنت لها صورة تقديرية، فإذا استبدل بالمرآة الكروية مرآة مستوية فظهرت الصورة أقرب إلى المرآة بمقدار 12 cm، فما نوع المرآة الكروية التي استخدمت؟ وما بُعدها البؤري؟

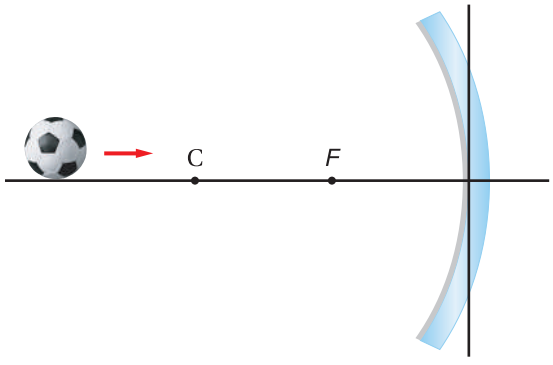
62. تقف فتاة طولها 1.6 m على بعد 3.2 m من مرآة محدّبة، فإذا كان طول صورة الفتاة 0.28 m، فما البعد البؤري للمرآة؟

63. **خدعة سحرية** يستخدم بهلوان مرآة مقعرة بعدها البؤري 8.0 m ليخفي جسمًا طوله 3.0 m موضوعًا على بُعد 18.0 m من المرآة، فيبدو كصورة حقيقية يراها الجمهور. أنشئ مخطّط الأشعة بمقياس رسم لحساب بعد الصورة وطولها.

64. وضع جسم طوله 4.0 cm على بُعد 12.0 cm من مرآة محدبة. فإذا كان طول صورة الجسم 2.0 cm وبعدها 6.0 cm، فما البعد البؤري للمرآة؟ ارسم مخطّط الأشعة للإجابة عن السؤال، واستخدم معادلتي المرآة والتكبير للتحقق من إجابتك.

التفكير الناقد

65. **تطبيق المفاهيم** تتدحرج الكرة في **الشكل 24–4** ببطء إلى اليمين نحو المرآة المقعرة. صف كيف يتغيّر حجم صورة الكرة في أثناء تدحرجها نحو المرآة.

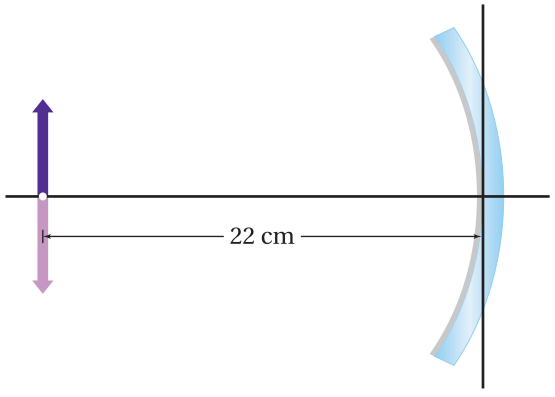


الشكل 24–4

تقويم الفصل 4

66. **استخدام المعادلات** أثبت أنه مع ازدياد نصف قطر تكوّر مرآة مقعرة إلى مالانهاية تُصبح معادلة المرآة مماثلة للعلاقة بين بُعد الصورة وبُعد الجسم في المرآة المستوية.

67. **التحليل والاستنتاج** وضع جسم على بُعد 22 cm من مرآة مقعرة، كما في **الشكل 25–4**. ما البعد البؤري للمرآة؟



الشكل 25–4

68. **التحليل والاستنتاج** وضع جسم على بُعد 6.0 cm من مرآة مستوية، فإذا وضعنا مرآة مقعرة مكان المرآة المستوية، فإنّ بُعد الصورة الناتجة خلف المرآة سيزداد 8.0 cm عما كان عليه. احسب البعد البؤري للمرآة المقعرة على افتراض أن الجسم موضوع بين البؤرة والمرآة.

الكتابة في الفيزياء

69. تعكس المرايا الأشعة لأنها مطلية بالفلزات. ابحث في واحد مما يأتي، واكتب ملخصًا حوله.

a. الأنواع المختلفة للطلاء المستخدم، ومزايا كل نوع وسلبياته.

b. صقل الألومنيوم بدرجة دقيقة من النعومة، بحيث لا تحتاج إلى زجاج لعمل المرآة.

70. ابحث في طريقة صقل وتلميع وفحص المرايا المستخدمة في المقراب العاكس. ويمكنك الكتابة في الطرائق التي يستخدمها الفلكي المبتدئ الذي يصنع مقرابه الخاص بيده، أو الطريقة التي تُستخدم في المختبر الوطني، وأعدّ تقريرًا في ورقة واحدة تصف فيه الطريقة، ثم اعرضه على طلاب الصف.

مراجعة تراكمية

71. ما الزمن الدوري لبندول طوله 2.0 m على سطح القمر؟ علمًا بأن كتلة القمر 7.34×10^{22} kg ونصف قطره 1.74×10^{6} m؟ وما الزمن الدوري لهذا البندول على سطح الأرض؟

72. وضِع مرشِّحان ضوئيان على مصباحين يدويين بحيث يُنفِذ إحدهما ضوءًا أحمر، وينفذ الآخر ضوءًا أخضر. فإذا تقاطعت الحزمتان الضوئيتان فلماذا يبدو لون الضوء في منطقة التقاطع أصفر، وتعود كل حزمة إلى لونها الأصلي بعد التقاطع؟ فسّر ذلك بدلالة الموجات.

اختبار مقنن

أسئلة اختيار من متعدد

اختر رمز الإجابة الصحيحة في كل مما يأتي:

1. أين يجب وضع الجسم بحيث تكوّن له مرآة مقعرة صورة مصغّرة؟

(A) في بؤرة المرآة

(B) بين البؤرة والمرآة

(C) بين البؤرة ومركز التكوّر

(D) خلف مركز التكوّر

2. ما البعد البؤري لمرآة مقعرة، إذا كبّرت جسمًا موضوعًا على بعد 30 cm منها بمقدار 3.2+ مرة؟

(A) 23 cm (C) 44 cm

(B) 32 cm (D) 46 cm

3. وضع جسم على بُعد 21cm أمام مرآة مقعرة بعدها البؤري 14 cm. ما بُعد الصورة؟

(A) −42 cm (C) 8.4 cm

(B) −8.4 cm (D) 42 cm

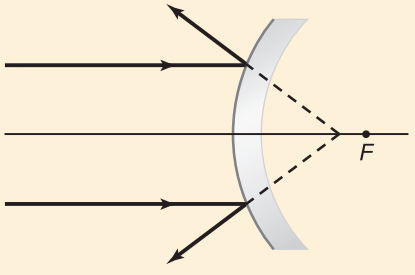
4. لا تتجمع امتدادات الأشعة الضوئية بدقة في البؤرة في الشكل أدناه. وهذه المشكلة تحدث في:

(A) جميع المرايا الكروية

(B) جميع مرايا القطع المكافئ

(C) المرايا الكروية المعيبة فقط

(D) مرايا القطع المكافئ المعيبة فقط



5. تكوّنت صورة مقلوبة طولها 8.5 cm أمام مرآة مقعرة على بعد 34.5 cm منها، فإذا كان البعد البؤري للمرآة 24.0 cm، فما طول الجسم الذي مثّلته هذه الصورة؟

(A) 2.3 cm (C) 14 cm

(B) 3.5 cm (D) 19 cm

6. كوّنت مرآة مقعرة بعدها البؤري 16 cm صورة على بعد 38.6 cm منها. ما بعد الجسم عن المرآة؟

(A) 2.4 cm (C) 22.6 cm

(B) 11.3 cm (D) 27.3 cm

7. كوّنت مرآة محدبة صورة لجسم حجمها $\frac{3}{4}$ حجم الجسم وعلى بعد 8.4 cm خلف المرآة. ما البعد البؤري للمرآة؟

(A) −34 cm (C) −6.3 cm

(B) −11 cm (D) −4.8 cm

8. وُضعت كأس على بعد 17 cm من مرآة مقعرة، فتكوّنت لها صورة على بعد 34 cm أمام المرآة. ما تكبير الصورة؟ وما اتجاهها؟

(A) 0.5، (مقلوبة) (C) 2.0، (مقلوبة)

(B) 0.5، (معتدلة) (D) 2.0، (معتدلة)

الأسئلة الممتدة

9. وضع جسم طوله 5.0 cm على بعد 20.0 cm من مرآة محدّبة بعدها البؤري 14.0 cm. ارسم مخطّط الأشعة بمقياس رسم مناسب لتبيّن طول الصورة.

✓ إرشاد

إجاباتك أفضل من إجابات الاختبار

عندما تعرف طريقة حل المسألة فحلّها قبل أن تنظر إلى خيارات الإجابة، ويكون هناك على الأغلب أكثر من خيار يبدو جيدًا، لذا أجرِ الحسابات أولاً، وزوّد نفسك بالإجابة قبل النظر إلى الخيارات.

الفصل 5

الانكسار والعدسات
Refraction and Lenses

الفصل الأول

الفكرة العامة:

يحدث انكسار للضوء عند مروره في العدسات وتتكوّن الصور.

(5-1) انكسار الضوء

الفكرة الرئيسة يعتمد انكسار الضوء بين وسطين على معاملي انكسار الوسطين وزاوية سقوط الأشعة الضوئية.

(5-2) العدسات المحدّبة والمقعرّة

الفكرة الرئيسة يمكن للعدسات تكبير أو تصغير الصور.

(5-3) تطبيقات العدسات

الفكرة الرئيسة تستخدم العدسات لرؤية الأجسام التي لايمكن رؤيتها بالعين المجردة.

يتوقع بعد الإنتهاء من دراسة هذا الفصل أن أكون قادرًا على:

- توضيح المفاهيم المرتبطة بانكسار الضوء(معامل الانكسار، قانون سنل في الانكسار، الزاوية الحرجة، الانعكاس الكلي الداخلي، التفريق"التحليل").
- حل مسائل تتضمن الانكسار.
- توضيح بعض التطبيقات البصرية المبنية على الانكسار.
- توضيح المفاهيم المرتبطة بالعدسات المحدبة والمقعرة(العدسة، العدسة المحدبة، العدسة المقعرة، المعادلة العامة للعدسة الرقيقة، الزيغ اللوني، العدسة اللاونية).
- وصف كيف تتكون الصور الحقيقية والتقديرية بوساطة عدسات محدبة ومقعرة مفردة على الترتيب.
- تعيين موقع الصور المتكونة بوساطة العدسات بكل من الطريقتين الهندسية والرياضية.
- توضيح كيف يمكن تقليل الزيغ اللوني.
- توضيح المفاهيم المرتبطة بتطبيقات العدسات(قصر النظر، طول النظر).
- وصف كيف تركّز العين الضوء لتكوّن الصور.
- توضيح كيف تصحح عدسات النظارات عيوب الابصار.
- وصف الأنظمة البصرية في بعض الأدوات البصرية الشائعة.
- استخدام الأدوات والأجهزة المتعلقة بالانكسار لإجراء التجارب واستخلاص نتائجها.
- استقصاء وحل المشكلات المتعلقة ببعض المفاهيم المتعلقة بالانكسار.
- إدراك دور بالانكسار في الحياة اليومية.
- إدراك دور الانعكاس وأهميته في الحياة اليومية.

فكّر

ما الذي يجعل صور الأشجار متموّجة؟

تجربة استهلالية

كيف يبدو قلم رصاص في سائل عند النظر إليه جانبيًّا؟

سؤال التجربة هل يبدو القلم مختلفًا عندما يشاهد خلال الماء، أو زيت الطهي، أو شراب الذرة؟

الخطوات

1. املأ دورقًا سعته 400 mL بالماء.
2. املأ دورقًا آخر سعته 400 mL إلى منتصفه بشراب الذرة، والنصف الآخر بالماء (اسكب ببطء لتجنب امتزاج السائلين).
3. املأ دورقًا ثالثًا سعته 400 mL إلى منتصفه بالماء، والنصف الآخر بزيت طهي (اسكب ببطء لتجنب امتزاج السائلين).
4. ضع قلمًا في كل دورق بصورة مائلة.
5. لاحظ كل قلم من جانب الدورق مع تدويره ببطء.
6. أنشئ جدول بيانات لتتمكن من تسجيل وصفٍ حول شكل القلم في كل محلول.

التحليل

أي الدوارق يبدو فيها القلم كأنه مكسور؟ وهل مقادير الكسر متساوية في الدوارق جميعها؟ ومتى لا يظهر القلم مكسورًا؟ وضح ذلك.

التفكير الناقد ضع فرضية حول متى تبدو الأجسام الصلبة كأنها مكسورة، ومتى لا تبدو كذلك، وتأكد من أن تتضمن تفسيرًا لمدى الانكسار.

الفيزياء في حياتك

هل لاحظت قوس المطر الذي يتشكل إذا كانت الشمس ساطعة في أثناء سقوط المطر، يعد قوس المطر مثالاً واضحاً على التفاعل الذي يحدث بين الضوء والوسط.

تساؤلات جوهرية:

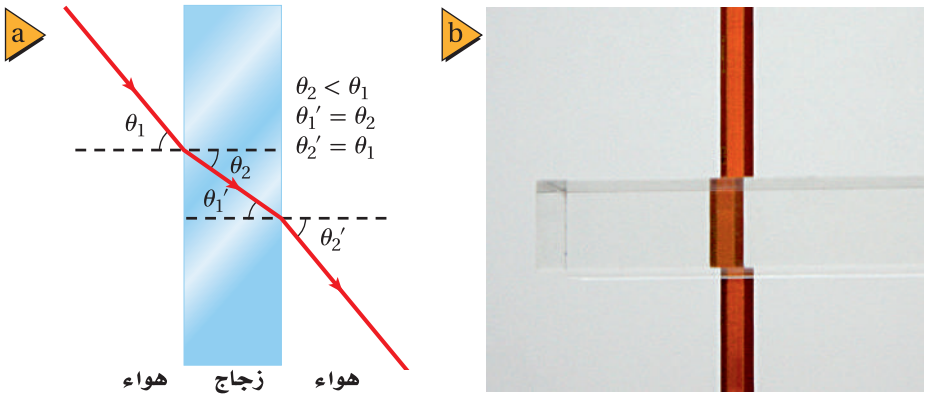
- وضح قانون سنل في الانكسار؟
- ما معنى معامل انكسار الوسط؟
- كيف يحدث الانعكاس الداخلي الكلي؟
- كيف يمكن الاستفادة من انكسار الضوء في صنع تطبيقات بصرية؟

المفردات:

- معامل الانكسار
- الانعكاس الكلي الداخلي
- قانون سنل في الانكسار
- التفريق (التحليل)
- الزاوية الحرجة

يمكنك رؤية انعكاس ضوء الشمس عن الماء عند النظر إلى سطح الماء في بركة سباحة في يوم صيفي. كما يمكنك رؤية الأجسام الموجودة داخل البركة؛ لأن جزءًا من ضوء الشمس يمر إلى داخل الماء، وينعكس عن الأجسام. وعندما تمعن النظر في الأجسام الموجودة داخل الماء تلاحظ أنها تبدو مشوّهة. فعلى سبيل المثال، تبدو الأشياء التي تحت سطح الماء أقرب من بعدها الحقيقي، كما تبدو قَدَمَا الشخص الواقف في البركة أنهما تتحركان إلى الخلف وإلى الأمام، وتبدو الخطوط التي في قاع البركة تتمايل مع حركة الماء. وتحدث هذه التأثيرات لأن الضوء يغيّر اتجاهه عند مروره من الماء إلى الهواء، أو العكس.

كما تعلمت سابقًا، ينحني مسار الضوء، عند عبوره الحد الفاصل بين وسطين بسبب الانكسار. ويعتمد مقدار الانكسار على خصائص الوسطين الشفافين، وعلى الزاوية التي يسقط بها الضوء على الحد الفاصل. ويتحرك الحد الفاصل بين الهواء والماء إلى أعلى وإلى أسفل، ويميل إلى الخلف والأمام أيضًا، عند انتقال الموجات على سطح الماء. وينحرف مسار الضوء الخارج من الماء مع حركة الحد الفاصل؛ مما يؤدي إلى ظهور الأجسام متموجة تحت سطح الماء.



الشكل 1–5 ينحرف الضوء مقتربًا من العمود المقام على نقطة السقوط عند انتقاله من الهواء إلى الزجاج، وينحرف مبتعدًا عن العمود المقام عند انتقاله من الزجاج إلى الهواء (a). انحراف الضوء يجعل الأجسام وكأنها مزاحة عن مواقعها الحقيقية (b).

قانون سنل في الانكسار Snell's Law of Refraction

ما الذي يحدث عندما تُسقط ضوءًا على سطح قطعة زجاج بصورة غير متعامدة؟ سينحرف الضوء عن مساره عند مروره بالحد الفاصل بين الهواء والزجاج كما في **الشكل 1–5**. ويُسمى انحراف الضوء الانكسار، كما تسمى الزاوية المحصورة بين العمود المقام واتجاه الشعاع الساقط بزاوية السقوط θ_1، والزاوية المحصورة بين العمود المقام واتجاه الشعاع الضوئي المنكسر بزاوية الانكسار θ_2. وقد وجد سنل في عام 1621 أنه عند مرور الضوء من الفراغ إلى وسط شفاف فإن جيب كل زاوية يرتبط مع المعادلة $\sin\theta_1 / \sin\theta_2 = n$؛ حيث تمثل n مقدارًا ثابتًا يعتمد على المادة، ولا يعتمد على الزوايا، يُسمّى **معامل الانكسار**. ويبين **الجدول 1–5** معاملات انكسار بعض المواد. ويمكن تعميم معادلة سنل عندما يمر الضوء خلال الحد الفاصل بين أي مادتين شفافتين مختلفتين. وتُعرف هذه المعادلة العامة **بقانون سنل في الانكسار**.

قانون سنل في الانكسار $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$

"حاصل ضرب معامل انكسار الوسط الأول في جيب زاوية السقوط يساوي حاصل ضرب معامل انكسار الوسط الثاني في جيب زاوية الانكسار".

يبين **الشكل 1–5** كيفية تطبيق قانون سنل عندما ينتقل الضوء خلال قطعة زجاج سطوحها متوازية، مثل زجاج النافذة. وينكسر الضوء مرتين، مرة عند دخوله إلى الزجاج، ومرة أخرى عند خروجه منه. وعندما ينتقل الضوء من الهواء إلى الزجاج فإنه ينتقل من مادة ذات معامل انكسار قليل إلى مادة معامل انكسارها أكبر؛ أيْ أن $n_1 < n_2$، ولكي تكون المعادلة متساوية الطرفين فإنه يجب أن يكون $\sin\theta_1 > \sin\theta_2$، أيْ أن حزمة الضوء تنحرف مقتربة من العمود المقام على السطح.

وعندما ينتقل الضوء من الزجاج إلى الهواء فإنه يمر من مادة ذات معامل انكسار كبير إلى مادة معامل انكسارها أقل؛ أيْ أن $n_1 > n_2$، وفي هذه الحالة يجب أن يكون $\sin\theta_1' < \sin\theta_2'$ حتى تكون المعادلة متساوية الطرفين. أيْ أن الضوء ينحرف مبتعدًا عن العمود المقام. لاحظ أيضًا أن اتجاه الشعاع عند خروجه من الزجاج هو نفسه كما كان قبل أن يسقط على الزجاج، ولكنه انزاح عن موضعه الأصلي.

المختبر الافتراضي:

توضيح انحراف الضوء عند انتقاله بين وسطين.

دلالة الألوان

- يكون وسط الانكسار والعدسات باللون الأزرق الفاتح.

الجدول 1-5

معاملات الانكسار للضوء الأصفر (في الفراغ $\lambda = 589$ nm)

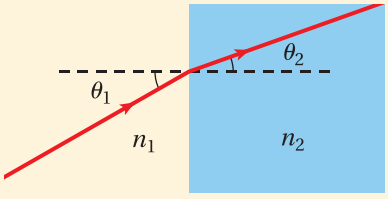
الوسط	n
الفراغ	1.00
الهواء	1.0003
الماء	1.33
الإيثانول	1.36
الزجاج التاجي	1.52
الكوارتز	1.54
الزجاج الصوّاني	1.62
الألماس	2.42

مثال 1

زاوية الانكسار تسقط حزمة ضوء من الهواء على قطعة من الزجاج التاجي بزاوية $30.0°$، ما مقدار زاوية الانكسار؟

1 تحليل المسألة ورسمها

- ارسم الحد الفاصل بين الهواء والزجاج التاجي.
- ارسم مخطّط الأشعة.



المعلوم	المجهول
$\theta_1 = 30.0°$	$\theta_2 = ?$
$n_1 = 1.00$	
$n_2 = 1.52$	

2 ايجاد الكمية المجهولة

استخدم قانون سنل لإيجاد زاوية الانكسار:

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

$$\sin\theta_2 = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)\sin\theta_1$$

$$\theta_2 = \sin^{-1}\left(\left(\frac{n_1}{n_2}\right)\sin\theta_1\right)$$

بالتعويض عن $n_1 = 1.00,\ n_2 = 1.52,\ \theta_1 = 30.0°$

$$= \sin^{-1}\left(\left(\frac{1.00}{1.52}\right)\sin 30.0°\right)$$

$$= 19.2°$$

3 تقويم الجواب

- **هل الوحدات صحيحة؟** يعبر عن الزوايا بالدرجات.
- **هل الجواب منطقي؟** إن معامل الانكسار n_2 أكبر من معامل الانكسار n_1، لذا، تكون زاوية الانكسار θ_2 أقل من زاوية السقوط θ_1.

مسائل تدريبية

1. أُسقطت حزمة ليزر من الهواء على إيثانول بزاوية سقوط $37.0°$، ما مقدار زاوية الانكسار؟
2. ينتقل ضوء في الهواء إلى داخل الماء بزاوية $30.0°$ بالنسبة للعمود المقام. أوجد مقدار زاوية الانكسار.
3. غمر قالب من مادة غير معروفة في الماء، وأسقط ضوء من الماء على القالب بزاوية سقوط $31°$، فكانت زاوية انكسار الضوء في القالب $27°$، ما معامل الانكسار للمادة المصنوع منها القالب؟

الربط مع الفلك

يرجع اللون الأحمر للقمر خلال مرحلة خسوفه إلى الانكسار؛ إذ يحدث خسوف القمر عندما تحجب الأرض ضوء الشمس عن القمر. ونتيجة لهذا، فقد تتوقع أن يصبح القمر معتمًا تمامًا، ولكن ما يحدث هو أن الضوء ينكسر خلال الغلاف الجوي للأرض، وينحرف حول الأرض في اتجاه القمر؛ ولأن الغلاف الجوي للأرض يشتت معظم الضوء الأزرق والأخضر لذا ينير اللون الأحمر أغلب القمر. ولأن القمر يعكس معظم ألوان الضوء بالدرجة نفسها فإنه يعكس الضوء الأحمر إلى الأرض، فيظهر القمر باللون الأحمر.

النموذج الموجي في الانكسار Wave Model of Refraction

طُوّر النموذج الموجي للضوء بعد 200 عام تقريبًا من نشر سنل لبحثه. وتم التوصل بعد 300 عام من عمل سنل إلى فهم أن الضوء يتفاعل مع الذرات عند انتقاله خلال الوسط، كأن يتحرك بسرعة أقل مما هو في الفراغ. ويمكن كتابة العلاقة التي تخص انتقال موجة الضوء في الفراغ على النحو التالي: $\lambda = c/f$، ولأي وسط فإنه يمكن كتابة هذه العلاقة على النحو $\lambda = v/f$، حيث تمثل v سرعة الضوء في أي وسط، و λ تمثل الطول الموجي. ولا يتغير تردد الضوء f عندما يعبر الحد الفاصل؛ أيْ أن عدد الاهتزازات لكل ثانية التي تصل الحد الفاصل هي نفسها التي تخرج من الحد الفاصل وتنتقل خلال وسط الانكسار. لذا يجب أن يقل الطول الموجي للضوء λ عندما تقل سرعة الضوء؛ فيكون الطول الموجي للضوء في أي وسط أقصر من الطول الموجي له في الفراغ. ويجدر التنويه هنا أن سرعة الضوء ثابتة دائمًا ويرجع نقصانها الظاهري إلى أن الضوء يتعرض إلى عدد من الامتصاصات والانبعاثات المتتالية من قبل ذرات المادة وهذا يؤخر عملية الانتشار ويبدو كما لو أن الضوء سار بسرعة أبطأ.

ما الذي يحدث عندما ينتقل الضوء من وسط يتحرك فيه بسرعة أكبر إلى وسط يتحرك فيه بسرعة أقل كما في **الشكل 2a–5**؟ للإجابة عن ذلك انظر إلى **الشكل 2b–5** الذي يبيّن حزمة ضوئية مكوّنة من سلسلة متوازية من صدور الموجات المستقيمة، حيث يكون صدر كل موجة متعامدًا مع اتجاه الحزمة الضوئية التي تسقط على السطح بالزاوية θ_1. في المثلث PQR تكون ∠PQR قائمة، لأن صدور الموجات تعامد اتجاه الحزمة؛ و ∠QRP تساوي θ_1. لذا فإن $\sin\theta_1$ تساوي المسافة $\overline{PQ}$ مقسومة على المسافة $\overline{PR}$.

$$\sin\theta_1 = \frac{\overline{PQ}}{\overline{PR}}$$

وترتبط زاوية الانكسار θ_2 بالطريقة نفسها مع المثلث PSR، وفي هذه الحالة:

$$\sin\theta_2 = \frac{\overline{RS}}{\overline{PR}}$$

ومن خلال حساب نسبة الجيب للمثلثين فإن $\overline{PR}$ تُلغى وتبقى المعادلة التالية:

$$\frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1} = \frac{\overline{RS}}{\overline{PQ}}$$

رُسم **الشكل 2b–5** بحيث كانت المسافة بين P و Q مساوية لطول ثلاثة أطوال موجية للضوء في الوسط 1؛ أي أن $\overline{PQ} = 3\lambda_1$. وبالطريقة نفسها فإن $\overline{RS} = 3\lambda_2$. وبتعويض هاتين القيمتين في المعادلة السابقة وإلغاء العامل المشترك، الرقم 3، تنتج معادلة تربط زاويتي السقوط والانكسار بالطول الموجي للضوء في كل وسط.

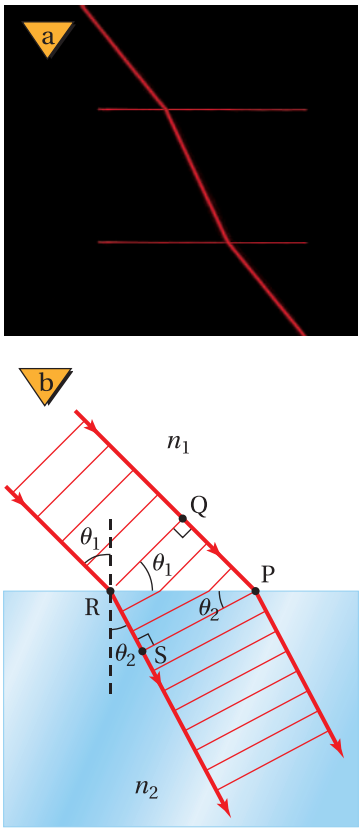
$$\frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1} = \frac{3\lambda_2}{3\lambda_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$$

وبالتعويض عن الطول الموجي $\lambda = v/f$ في المعادلة أعلاه وإلغاء العامل المشترك f، فإنه يُمكننا إعادة كتابة المعادلة على الشكل التالي:

$$\frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1} = \frac{v_2}{v_1}$$

كما يمكن أيضًا كتابة قانون سنل في صورة نسبة لمعاملي انكسار الوسطين.

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



الشكل 2–5 ينتقل الضوء من الهواء إلى الزجاج ثم إلى الهواء مرة أخرى (**a**). يتباطأ الضوء وينحرف مقتربًا من العمود المقام عندما يدخل منطقة معامل انكسارها أكبر (**b**).

التجربة العملية:

كيف ينحرف الضوء؟

معامل الانكسار باستخدام خاصية التعدي للمساواة، فإن المعادلتين السابقتين تؤديان إلى المعادلة التالية:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

وبالنسبة للفراغ فإن، $v = c$، $n = 1$. فإذا كان أحد الوسطين فراغًا فإن المعادلة تبسّط إلى معادلة تربط معامل انكسار الوسط بسرعة الضوء فيه.

معامل الانكسار $n = \frac{c}{v}$

"معامل انكسار الوسط يساوي سرعة الضوء في الفراغ مقسومة على سرعة الضوء في الوسط".

ويمكن استخدام تعريف معامل الانكسار لإيجاد الطول الموجي للضوء في وسط ما مقارنة بالطول الموجي للضوء في الفراغ، حيث يعبَّر عن سرعة الضوء في وسط معامل انكساره n بالعلاقة $v = c/n$، وعن الطول الموجي للضوء في الفراغ بـ $\lambda_0 = c/f$. وبحل المعادلة $\lambda = v/f$ بالنسبة للتردد، وتعويض كل من المعادلتين $f = c/\lambda_0$ و $v = c/n$ فيها، ستجد أن $\lambda = (c/n)/(c/\lambda_0) = \lambda_0/n$، لذا يكون الطول الموجي للضوء في الوسط أقل من الطول الموجي له في الفراغ.

الانعكاس الكلي الداخلي Total Internal Reflection

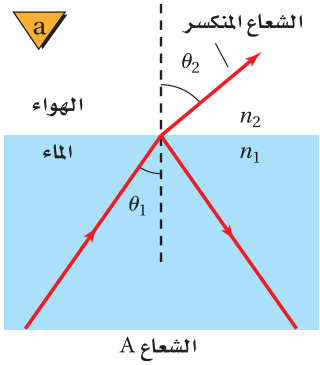
عندما ينتقل الضوء إلى وسط معامل انكساره أقل تكون زاوية الانكسار أكبر من زاوية السقوط، كما يبين **الشكل 3a–5**. وهذا يؤدي إلى ظاهرة طبيعية؛ إذ إنه مع زيادة زاوية السقوط تزداد زاوية الانكسار، إلا أنه عند زاوية سقوط معينة تُسمى **الزاوية الحرجة** θ_c، ينكسر الشعاع على امتداد الحد الفاصل بين الوسطين، وتكون زاوية الانكسار $90.0°$ كما يبين **الشكل 3b–5**.

يحدث **الانعكاس الكلي الداخلي** عندما يسقط الضوء على الحد الفاصل بزاوية أكبر من الزاوية الحرجة، إن أهم ما يميز الانعكاس الكلي الداخلي عن انعكاس الضوء أن الضوء ينعكس بصورة كاملة إلى الوسط الذي معامل انكساره أكبر، كما يبين **الشكل 3c–5**. وتستطيع استخدام قانون سنل لإيجاد معادلة للزاوية الحرجة لأي حد فاصل، وذلك بتعويض $\theta_1 = \theta_c$ و $\theta_2 = 90.0°$.

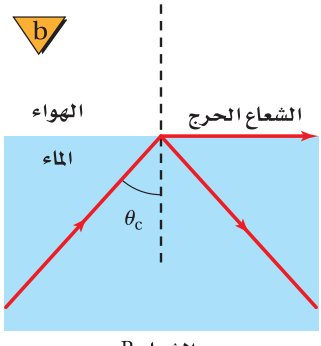
الزاوية الحرجة $\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1}$

"جيب الزاوية الحرجة يساوي معامل انكسار وسط الانكسار مقسومًا على معامل انكسار وسط السقوط".

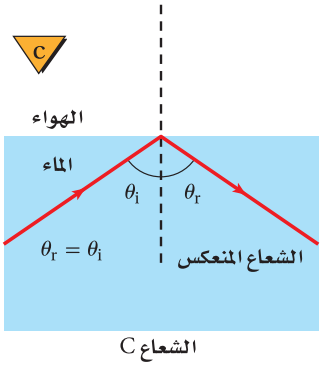
يؤدي الانعكاس الكلي الداخلي إلى بعض التأثيرات الغريبة. افترض أنك تغوص في بركة ماء ساكن، وتنظر إلى أعلى سطح الماء، فإنك قد ترى انعكاسًا مقلوبًا لجسم آخر قريب موجود أسفل الماء أيضًا، أو قد ترى انعكاسًا لقاع البركة نفسها؛ إذ يعمل سطح الماء عمل المرآة.



الشعاع A



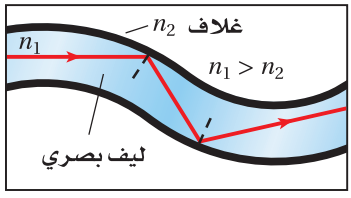
الشعاع B



الشعاع C

■ **الشكل 3–5** انكسر الشعاع A جزئيًا، وكذلك انعكس جزئيًا (**a**). انكسر الشعاع B على امتداد الحدّ الفاصل بين الوسطين عندما سقط بزاوية تساوي الزاوية الحرجة (**b**). زاوية السقوط أكبر من الزاوية الحرجة، مما يؤدي إلى حدوث انعكاس كلي داخلي للشعاع C، والذي يتبع قانون الانعكاس (**c**).

وكذلك عندما تقف بجانب بركة فإنه يمكن ألا ترى الأشياء الموجودة أسفل سطح الماء. فعندما يسبح شخص تحت الماء بالقرب من السطح وفي الجهة المقابلة لك من البركة، فإنك قد لا تراه؛ وذلك لأن الضوء القادم من جسمه ينعكس إلى الأسفل ليرتد إلى داخل البركة. تعد الألياف البصرية تطبيقًا تقنيًّا مهمًّا للانعكاس الكلي الداخلي. فكما يبين **الشكل 4–5**، يصطدم الضوء الذي ينتقل خلال الليف الشفاف بالسطح الداخلي لليف البصري دائمًا بزاوية أكبر من الزاوية الحرجة، لذا ينعكس الضوء انعكاسًا داخليًّا فلا ينفذ أي جزء منه خلال الحد الفاصل. ولذلك فإن الضوء يحافظ على شدته على طول المسافة التي يمتدّها الليف البصري مهما بلغت، وبهذا يمكن نقل الضوء من منطقة إلى أخرى.



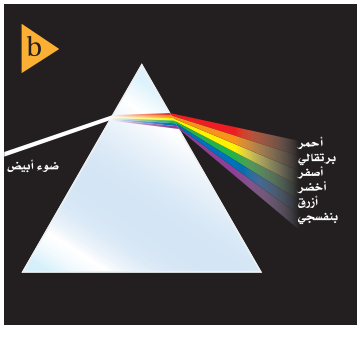
الشكل 4–5 تدخل نبضات الضوء من مصدر ضوء إلى أحد طرفي الليف البصري. وفي كل مرة يصطدم فيها الضوء بالسطح، تكون زاوية السقوط أكبر من الزاوية الحرجة، ولذا يبقى الضوء داخل الليف البصري.

تفريق (تحليل) الضوء Dispersion of Light

تتحدّد سرعة الضوء في وسط ما من خلال التفاعلات بين الضوء، وذرات الوسط. فإذا علمت أن درجة الحرارة والضغط يرتبطان بطاقة الجسيمات على المستوى الذري، لذا فإن سرعة الضوء تتغير، ويتغير تبعًا لذلك معامل الانكسار للوسط الغازي قليلاً مع تغيّر درجة الحرارة. وبالإضافة إلى ذلك فإن سرعة الضوء ومعامل الانكسار تتغير للأطوال الموجية المختلفة للضوء في الوسط السائل أو الصلب نفسه.

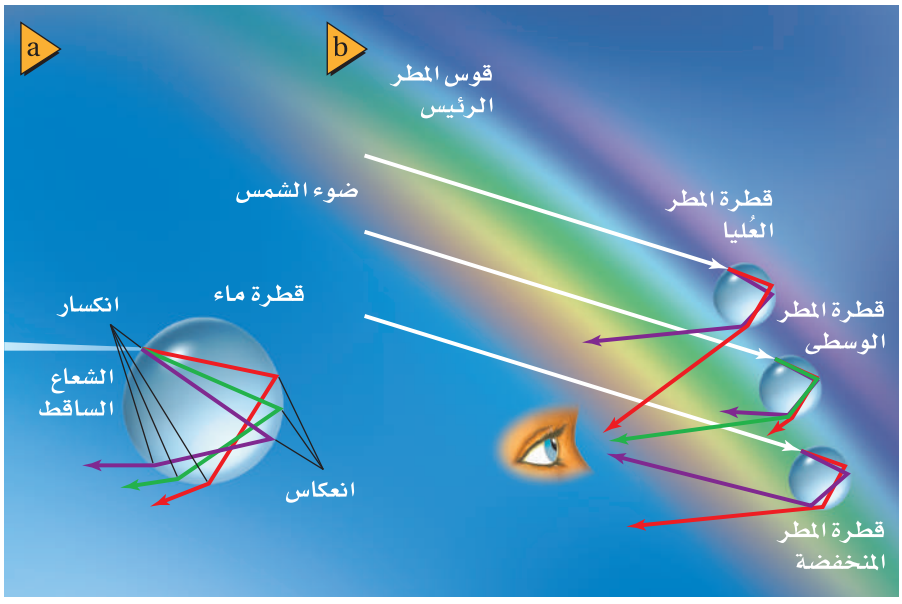
يتحلل الضوء الأبيض إلى طيف من الألوان عند مروره خلال منشور زجاجي، كما يبين **الشكل 5a–5**، حيث تُسمى هذه الظاهرة **بالتفريق (التحليل)**. وإذا نظرت بدقة إلى الضوء الذي يمر خلال المنشور فستلاحظ أن لون الضوء البنفسجي ينكسر أكثر من لون الضوء الأحمر، كما يبين **الشكل 5b–5**. وهذا يحدث لأن سرعة الضوء البنفسجي خلال الزجاج أقل منها للضوء الأحمر. وللضوء البنفسجي تردد أكبر من تردد الضوء الأحمر، مما يجعله يتفاعل بصورة مختلفة مع ذرات الزجاج. وهذا يؤدي إلى جعل معامل انكسار الزجاج للضوء البنفسجي أكبر منه للضوء الأحمر.

الشكل 5–5 يسقط ضوء أبيض على منشور فيتفرق (يتحلل) إلى حزم من ألوان مختلفة (a). وتنحرف الألوان المختلفة من الضوء بدرجات مختلفة عند عبورها وسط ما (b).



قوس المطر المنشور ليس الوسيلة الوحيدة لتفريق الضوء الابيض ثم تحليله إلى ألوانه؛ فقوس المطر طيف يتشكّل عندما يتفرق (يتحلّل) ضوء الشمس بفعل قطرات الماء في الغلاف الجوي. وينكسر ضوء الشمس الساقط على قطرات الماء؛ حيث ينكسر كل لون بزاوية انكسار مختلفة قليلاً؛ بسبب التفريق كما هو موضّح في **الشكل 6a–5**. ويحدث انعكاس داخلي لجزء من الضوء على السطح الخلفي للقطرة. وعند خروج الضوء من القطرة يحدث له انكسار مرة أخرى ويزداد التفريق.

وعلى الرغم من أن كل قطرة تنتج طيفًا كاملاً إلا أن المراقب الموجود بين الشمس والمطر سيرى من كل قطرة طولاً موجيًّا معينًا للضوء فقط؛ حيث يعتمد الطول الموجي على المواقع النسبية للشمس، والقطرة، والمراقب، كما يبين **الشكل 6b–5**. وسيظهر طيف كامل؛ لأنه يوجد الكثير من القطرات في السماء. وستصنع القطرات التي تعكس الضوء الأحمر زاوية 42° بالنسبة لأشعة الشمس؛ في حين تصنع القطرات التي تعكس الضوء الأزرق زاوية 40°.



الشكل 6–5 يتشكّل قوس المطر بسبب تفرق (تحلّل) الضوء الأبيض عند دخوله الحد الفاصل وانعكاسه عن الحد الفاصل الداخلي، وخروجه من قطرات المطر (a). يصل لون واحد فقط إلى المراقب من كل قطرة مطر بسبب التفريق (b).

قد ترى أحيانًا قوس مطرٍ ثانٍ باهت، كما في **الشكل 7–5**. ويقع قوس المطر الثاني خارج الأول، كما يكون باهتًا، وله ترتيب ألوان معكوس. وينتج هذا التأثير بسبب انعكاس أشعة الضوء مرتين في داخل قطرة الماء. وقد يظهر قوس مطر ثالث خارج الاثنين ولكن بصورة نادرة جدًّا. ما توقعك حول عدد مرات انعكاس الضوء في قطرة الماء وترتيب ظهور الألوان لقوس المطر الثالث؟

الشكل 7–5 يسمح وجود الضباب خلال رؤيتك للضوء المشتمل على الطيف الكامل للألوان بأن يصل إلى عينيك على صورة قوس مطر. وقد يمكّنك الانعكاس عن قطرات المطر أحيانًا من رؤية قوس مطر آخر بألوان معكوسة الترتيب.

4. **معامل الانكسار** عند نفاذ الضوء من الماء إلى سائل معين فإنه ينحرف مقتربًا من العمود المقام، ولكن عند نفاذ الضوء من الزجاج التاجي إلى السائل نفسه فإنه ينحرف مبتعدًا عن العمود المقام. ما الذي تستنتجه عن معامل انكسار السائل؟

5. **معامل الانكسار** سقط شعاع ضوئي في الهواء بزاوية 30.0° على قالب من مادة غير معروفة، فانكسر فيها بزاوية 20.0°، ما معامل انكسار المادة؟

6. **سرعة الضوء** هل يمكن أن يكون معامل الانكسار أقل من 1؟ وما الذي يعنيه هذا بالنسبة لسرعة الضوء في ذلك الوسط؟

7. **سرعة الضوء** ما سرعة الضوء في الكلوروفورم $(n=1.51)$؟

8. **الانعكاس الكلي الداخلي** إذا توافر لديك الكوارتز والزجاج التاجي لتصنع ليفًا بصريًّا، فأيّهما تستخدم لطبقة الغلاف؟ ولماذا؟

9. **زاوية الانكسار** تعبر حزمة ضوئية الماء إلى داخل البولي إيثيلين (معامل انكساره $n=1.50$). فإذا كانت $\theta_i=57.5^\circ$ فما زاوية الانكسار في البولي إيثيلين؟

10. **الزاوية الحرجة** هل هناك زاوية حرجة للضوء المنتقل من الزجاج إلى الماء، وللضوء المنتقل من الماء إلى الزجاج؟

11. **التفريق** لماذا تستطيع رؤية صورة الشمس فوق الأفق تمامًا عندما تكون الشمس نفسها قد غابت فعلاً؟

12. **التفكير الناقد** في أي اتجاه تستطيع رؤية قوس المطر في مساء يوم ماطر؟ وضّح إجابتك.

في الوقت الذي نشعر فيه بجمال قوس المطر والخسوف الأحمر للقمر، الناتجين عن انكسار الضوء، فإن للانكسار فوائد جمة في حياتنا؛ فقد كتب الفيزيائي الفرنسي برنارد أوف جوردون عام 1303 حول استخدام العدسات لتصحيح النظر. واستخدم جاليليو عام 1610 عدستين لصنع المقراب الذي اكتشف بوساطته أقمار المشتري. واستخدمت العدسات منذ زمن جاليليو في أجهزة عديدة، منها المجاهر (الميكروسكوبات) وآلات التصوير. وقد تكون العدسات أكثر الأدوات البصرية فائدة.

أنواع العدسات Types of Lenses

العدسة قطعة من مادة شفافة، مثل الزجاج أو البلاستيك، تُستخدم في تجميع الضوء أو تفريقه وتكوين الصور. ويمكن أن يكون أي سطح من سطحي العدسة منحنيًا أو مستويًا. وتُسمّى العدسة في **الشكل 8a–5 عدسة محدبة**؛ لأنها أكثر سمكًا عند الوسط مما عند الطرفين. وتُسمّى العدسة المحدبة العدسة المجمِّعة؛ وذلك لأنها عندما تُحاط بمادةٍ معامل انكسارها أقل فإنها تعمل على كسر الأشعة الضوئية المتوازية والموازية للمحور الرئيس بحيث تتجمع الأشعة المنكسرة في نقطة واحدة. وتُسمّى العدسة التي في **الشكل 8b–5 عدسة مقعرة**؛ لأنها أدقّ وأرقّ عند الوسط مما عند الطرفين. وتُسمّى العدسة المقعرة العدسة المفرِّقة؛ وذلك لأنها عندما تُحاط بمادة معامل انكسارها أقل من معامل انكسار مادة العدسة فإنها تعمل على كسر أشعة الضوء المتوازية بحيث تتفرق.

عندما يمر الضوء خلال عدسة يحدث الانكسار عند سطحيها، وباستخدام قانون سنل وقوانين الهندسة فإنه يمكنك التنبؤ بمسار الأشعة المارة خلال العدسات. ولتسهيل مثل هذه المسائل افترض أن الانكسار يحدث كاملاً في مستوى يُسمّى المستوى الأساسي، يمر في مركز العدسة وطرفيها. ويُسمّى هذا التقريب نموذج العدسة الرقيقة، والذي سيطبق على العدسات جميعها التي تدرسها في هذا البند.

معادلتا العدسة ستتضمن المسائل التي تحلها عدسات كروية رقيقة، أي أن لكل عدسة وجهين متناظرين من الكرة نفسها بنصف قطر تكور صغير. واعتمادًا على نموذج العدسة الرقيقة، والتبسيطات نفسها التي استعملتها في حل مسائل المرايا الكروية، والتي طورت منها معادلات للعدسات مشابهة تمامًا لمعادلات المرايا الكروية؛ إذ تربط **المعادلة العامة للعدسة الرقيقة** بين البعد البؤري للعدسة الكروية الرقيقة وبعد الجسم وبعد الصورة.

المعادلة العامة للعدسة الرقيقة

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

مقلوب البعد البؤري للعدسة الكروية يساوي حاصل جمع مقلوب بعد الصورة ومقلوب بعد الجسم عن العدسة.

ويمكن استخدام معادلة التكبير في العدسات الكروية الرقيقة كتلك التي استخدمت للمرايا الكروية.

التكبير

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

يعرف تكبير عدسة كروية لجسم ما بأنه النسبة بين طول الصورة إلى طول الجسم. ويساوي سالب بعد الصورة عن العدسة مقسومًا على بعد الجسم عن العدسة.

الفيزياء في حياتك

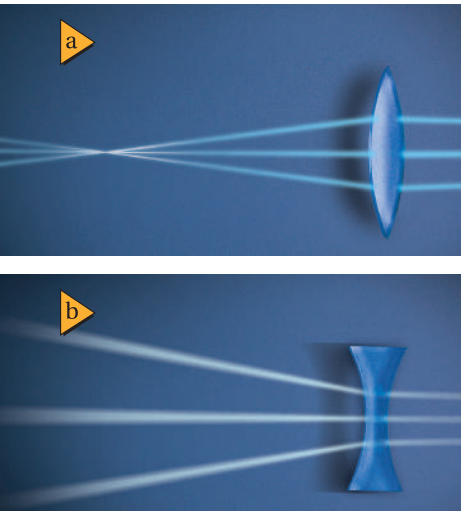
لعلك سمعت بأن النار يمكن إشعالها باستخدام عدسات مكبرة، إذ تقوم هذه العدسات بتركيز أشعة الضوء في حيز صغير.

تساؤلات جوهرية:

- كيف تتكوّن الصور الحقيقية والتقديرية في العدسات المحدبة والعدسات المقعرة؟
- كيف تحدد مواقع صور الأجسام في العدسات هندسياً ورياضياً؟
- كيف تقلل من الزيغ اللوني؟

المفردات:

- العدسة
- العدسة المحدّبة
- العدسة المقعّرة
- المعادلة العامة للعدسة الرقيقة
- الزيغ اللّوني
- العدسة اللّاونية



الشكل 8–5 تعمل العدسة المحدبة على تجميع أشعة الضوء (a). أمّا العدسة المقعرة فتفرّق أشعة الضوء (b).

الجدول 2-5

خصائص العدسات الكروية

نوع العدسة	f	d_o	d_i	m	الصورة
محدبة	+	$d_o > 2f$	$2f > d_i > f$	مصغرة مقلوبة	حقيقية
		$2f > d_o > f$	$d_i > 2f$	مكبرة مقلوبة	حقيقية
		$f > d_o > 0$	$\lvert d_i \rvert > d_o$ سالب	مكبرة	تقديرية
مقعرة	−	$d_o > 0$	$\lvert f \rvert > \lvert d_i \rvert > 0$ سالب	مصغرة	تقديرية

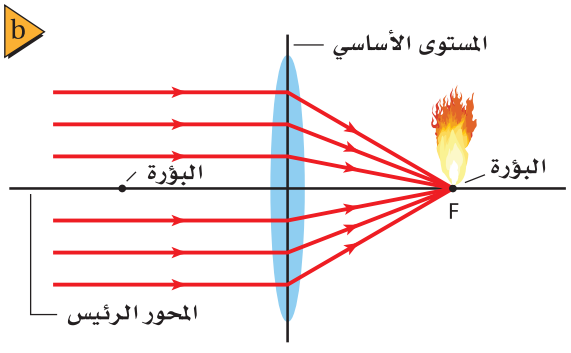
استخدام معادلتي العدسات من المهم استخدام نظام إشارات مناسب عند استخدام هاتين المعادلتين. ويبين **الجدول 2–5** مقارنة بين بُعد الصورة، والتكبير، ونوع الصورة المتكوّنة بوساطة عدسات محدبة ومقعرة مفردة عند وضع الجسم في مواقع متعددة d_o بالنسبة للعدسة. ولاحظ التشابه بين هذا الجدول **والجدول 1–4** الخاص بالمرايا. وكما في المرايا، فإن المسافة بين المستوى الأساسي للعدسة والبؤرة هي البعد البوري f. ويعتمد البعد البؤري على شكل العدسة ومعامل انكسار مادتها. ويمكن أن تكون الأبعاد البؤرية وأبعاد الصورة سالبة.

تكون الصورة التقديرية للعدسات دائمًا في الجانب نفسه الموجود فيه الجسم، مما يعني أن بُعد الصورة سالب. وتكون الصورة أصغر من الجسم عندما تكون القيمة المطلقة للتكبير $0 < |m| < 1$. في حين تمثّل القيمة المطلقة للتكبير التي تكون أكبر من واحد، الصور الأكبر من الأجسام. أما التكبير السالب فيعني أن الصورة مقلوبة بالنسبة للجسم. لاحظ أيضًا أن العدسة المقعرة تنتج صورًا تقديرية فقط، في حين تنتج العدسة المحدبة صورًا حقيقية أو تقديرية.

العدسات المحدّبة والصور الحقيقية

Convex Lenses and Real Images

يمكن إشعال أعشاب جافة ـ كما في **الشكل 9a–5** ـ بتكوين صورة للشمس على الأعشاب. تذكر من خلال دراستك السابقة أن أشعة الشمس تصل إلى الأرض بصورة متوازية تقريبًا. وتتجمّع الأشعة بعد انكسارها بوساطة العدسة عند البؤرة للعدسة. و**الشكل 9b–5** يبين نقطتين بؤريتين، واحدة في كل جانب من جوانب العدسة، وإذا دوّرت العدسة حول نفسها، فإنها ستعمل بالطريقة نفسها.



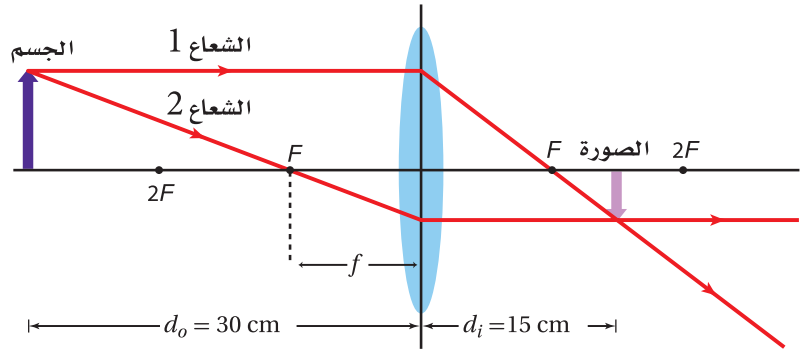
■ **الشكل 9–5** يمكن استخدام عدسة محدبة (مجمّعة) لحرق أعشاب جافة (a). يسقط الضوء الداخل بصورة موازية للمحور الرئيس ويتجمع عند بؤرة العدسة، ولذا تتركز الطاقة الشمسية (b).

المختبر الافتراضي:

- توضيح خصائص الصور في العدسات.
- توضيح أثر تغطية جزء من العدسة.

التجربة العملية:

كيف يرتبط بعد الصورة عن العدسة الرقيقة المحدبة مع كلٍ من بعد الجسم والبعد البؤري؟



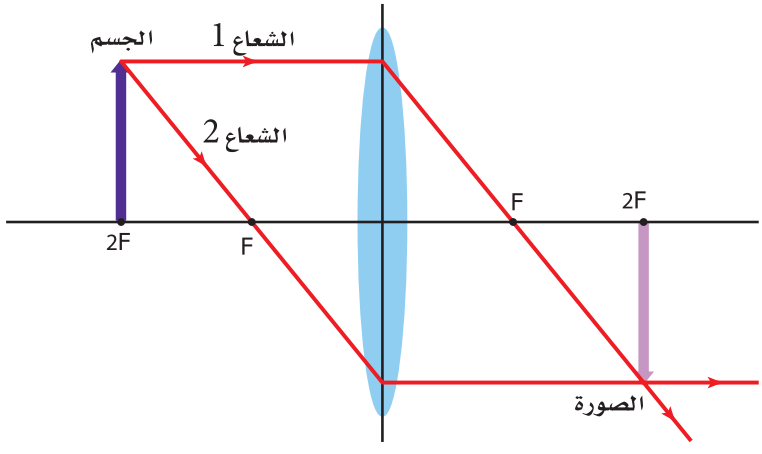
الشكل 10–5 إذا وضع جسم على بُعد أكبر من ضعفي البعد البؤري للعدسة تكونت صورة حقيقية مقلوبة ومصغرة بالنسبة للجسم. وإذا وضع الجسم في مكان الصورة أمكنك تعيين موقع الصورة الجديدة من خلال رسم الأشعة نفسها في الاتجاه المعاكس.

مخطط الأشعة وفقًا لمخطط الأشعة ستحتاج إلى استخدام شعاعين فقط لتحديد موقع صورة نقطة على جسم؛ إذ يكون الشعاع 1 موازيًا للمحور الرئيس، وينكسر مارًّا بالبؤرة F في الجانب الآخر للعدسة. ويمر الشعاع 2 بالبؤرة F في طريقه إلى العدسة، ويكون مساره بعد الانكسار موازيًا للمحور الرئيس، حيث يتقاطع الشعاعان عند نقطةٍ ما بعد F ، فيحدّدان موقع الصورة. وتتقاطع الأشعة المختارة من نقاط أخرى على الجسم عند نقاط مماثلة لتكوين الصورة على نحوٍ كامل. لاحظ أن الصورة حقيقية ومقلوبة ومصغرة بالنسبة للجسم.

تستطيع استخدام **الشكل 10–5** لتعيين موقع الصورة لجسم قريب من العدسة أكثر من الجسم الذي في الشكل. فإذا عُكِس اتجاه شعاع منكسر فإنه سيتبع مساره الأصلي في الاتجاه المعاكس، وهذا يعني أنه يمكن تبادل المواقع بين الجسم والصورة بوساطة تغيير اتجاه الأشعة .

أما إذا وضع الجسم على بعد يساوي ضعفي البعد البؤري من العدسة عند نقطة 2 F ، كما في **الشكل 11–5**، فإن الصورة تتكون عند 2 F، ويكون للصورة والجسم البعدين نفسيهما بسبب التماثل. لذا تستطيع استنتاج أنه إذا كان بُعد الجسم عن العدسة أكبر من ضعفي البعد البؤري للعدسة فسوف تكون الصورة مصغرة. وإذا كان الجسم بين F و2 F ، فإن الصورة ستكون مكبرة.

الشكل 11–5 عندما يوضع جسم على بُعد مساوٍ لضعفي البعد البؤري عن العدسة فإن الصورة تكون مساوية لأبعاد الجسم.



تجربة

تأثير تغطية العدسات

ما الذي يحدث عندما تغطي جزءًا من العدسة؟ هل يؤدي ذلك إلى تكون جزء من الصورة الحقيقية فقط بوساطة العدسة؟

1. ألصق طرف العدسة المحدبة بكرة من الصلصال، وضع العدسة فوق الطاولة. ***تحذير: للعدسات أطراف حادة، لذا تعامل معها بحذر.***
2. ضع مصباحًا صغيرًا عند أحد طرفي الطاولة، وشاشة عند الطرف الآخر للحصول على صورة واضحة للمصباح الضوئي. ***تحذير: قد يسخن المصباح فيحرق يدك.***
3. **توقع** ماذا يحدث للصورة إذا وضعت يدك على النصف العلوي للعدسة؟ وهذا ما يُسمّى التغطية.
4. **لاحظ** تأثيرات التغطية لأكبر وأقل مساحة من العدسة.

التحليل والاستنتاج

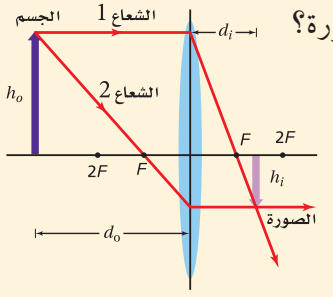
5. ما المقدار الكافي من العدسة الذي يتطلبه الحصول على صورة كاملة؟
6. ما تأثير تغطية العدسة؟

مثـــــال 2

الصورة التي تكونها عدسة محدبة وضع جسم على بعد 32.0 cm من عدسة محدبة بعدها البؤري 8.0 cm، أجب عن الأسئلة التالية:

a. أين تتكوّن الصورة؟ **b.** إذا كان طول الجسم 3.0 cm فما طول الصورة؟

c. هل الصورة معتدلة أم مقلوبة؟



1 تحليل المسألة ورسمها

- ارسم الحالة، وعيّن موقع كلٍّ من الجسم والعدسة.
- ارسم الشعاعين الأساسيّين.

المعلوم	المجهول
$d_o = 32.0\ cm$	$d_i = ?$
$h_o = 3.0\ cm$	$h_i = ?$
$f = 8.0\ cm$	

2 ايجاد الكمية المجهولة

a. استخدم معادلة العدسة الرقيقة لتحديد d_i

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

بالتعويض عن $f = 8.0\ cm$ ، $d_o = 32.0\ cm$

$$d_i = \frac{fd_o}{d_o - f} = \frac{(8.0\ \text{cm})\ (32.0\ \text{cm})}{32.0\ \text{cm} - 8.0\ \text{cm}}$$
$$= 11\ \text{cm}$$

(11 cm بعيدًا عن العدسة في الجانب المعاكس للجسم)

b. استخدم معادلة التكبير وأوجد طول الصورة.

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

بالتعويض عن $d_i = 11\ cm, h_o = 3.0\ cm, d_o = 32.0\ cm$

$$h_i = \frac{-d_i h_o}{d_o} = \frac{-(11\ \text{cm})(3.0\ \text{cm})}{32.0\ \text{cm}}$$
$$= -1.0\ \text{cm}$$

c. إن الإشارة السالبة في الفرع **b** تعني أن الصورة مقلوبة.

3 تقويم الجواب

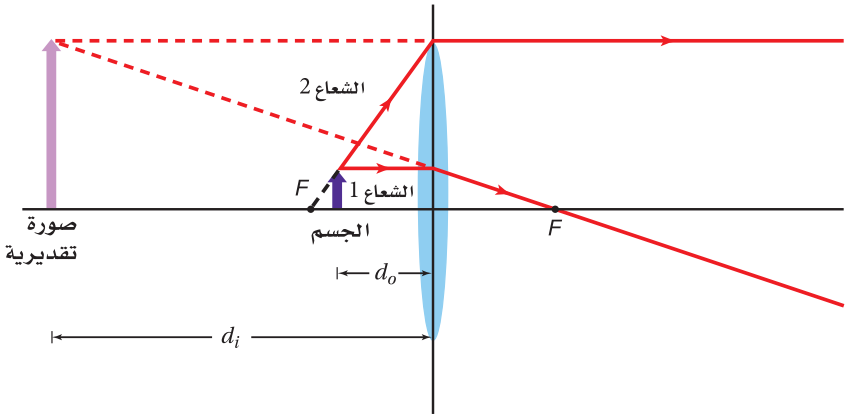
- **هل الوحدات صحيحة؟** الأبعاد كلها بالسنتمتر cm .
- **هل تعني الوحدات أي شيء؟** موضع الصورة موجب (صورة حقيقية)، وأمّا طولها فسالب؛ أيْ مقلوبة بالنسبة للجسم، مما يدل على أن العدسة محدبة.

مسائل تدريبية

13. تكوَّن لجسم موجود بالقرب من عدسة محدبة صورة حقيقية مقلوبة طولها 1.8 cm على بُعد 10.4 cm منها. فإذا كان البعد البؤري للعدسة 6.8 cm فما بعد الجسم؟ وما طوله؟

14. وضع جسم عن يسار عدسة محدبة بعدها البؤري 25 mm، فتكوّنت له صورة حجمها يساوي حجم الجسم. ما بُعد كل من الجسم والصورة؟

15. حدّد بُعد الصورة وطولها لجسم طوله 2.0 cm موضوع على بُعد 25 cm من عدسة محدبة بعدها البؤري 5.0 cm، هل الصورة معتدلة أم مقلوبة؟



الشكل 12–5 يبيّن مخطط الأشعة، أن العدسة المحدّبة تكوّن صورة تقديرية معتدلة ومكبّرة مقارنة بالجسم عندما يكون الجسم بين العدسة والبؤرة.

العدسات المحدّبة والصور التقديرية

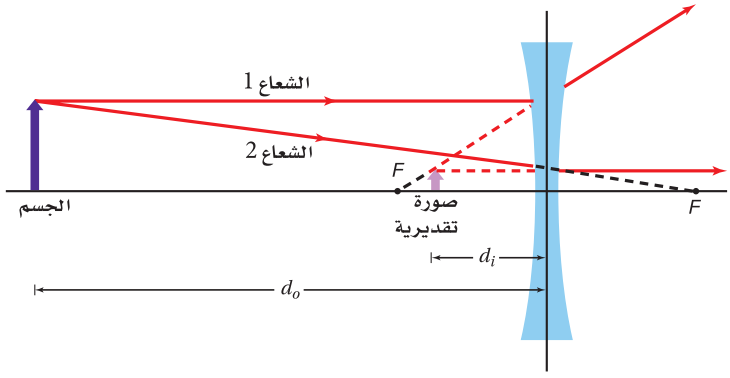
Convex Lenses and Virtual Images

عندما يوضع جسم في بؤرة عدسة محدبة فإن الأشعة ستنكسر في حزمة متوازية ولا تتكوّن صورة للجسم. وعندما يقترب الجسم من المستوى الأساسي للعدسة تنحرف الأشعة في اتجاه الجانب المعاكس للعدسة، وتظهر هذه الأشعة للمشاهد كأنها قادمة من بقعة في جانب العدسة نفسه الذي فيه الجسم، وتكون الصورة تقديرية،ومعتدلة ومكبّرة.

يبين **الشكل 12–5** كيف تكوِّن العدسة المحدّبة صورة تقديرية. فعندما يكون الجسم بين F والعدسة يصل الشعاع 1 إلى العدسة موازيًا المحور الرئيس، وينكسر مارًّا في البؤرة، F. أمّا الشعاع 2 فينتقل من قمة الجسم، وفي اتجاه مماثل إلى الاتجاه الذي يسلكه، إذا بدأ من F في جانب العدسة، الذي يوجد فيه الجسم. يبيّن الخط المتقطع من F إلى الجسم كيف ترسم الشعاع 2، حيث يخرج الشعاع 2 من العدسة موازيًا المحور الرئيس. ويتباعد الشعاعان 1 و 2 عندما يخرجان من العدسة. لذا لا يمكن تكوين صورة حقيقية. إن رسم الامتداد الخلفي للشعاعين المنكسرين لتعيين مكان تقاطعهما الظاهري يحدّد موضع الصورة التقديرية، ويكون موضعها في جانب العدسة نفسه الذي يوجد فيه الجسم، وتكون الصورة معتدلة ومكبّرة. لاحظ أن الصورة الحقيقية تتكوّن بفعل الضوء الذي يمرّ خلال العدسة، ولكن بإمكانك تحديد الصورة التقديرية بوساطة رسم امتدادات الأشعة التي لا تمرّ فعلًا من خلال العدسة.

مسائل تدريبية

16. إذا وضعت صحيفة على بُعد 6.0 cm من عدسة محدبة بعدها البؤري 20.0 cm فأوجد بُعد الصورة المتكوِّنة لها.
17. إذا وضعت عملة معدنية قطرها 2.0 cm على بُعد 3.4 cm من عدسة مكبّرة بعدها البؤري 12.0 cm فحدّد موقع صورة العملة المعدنية، وقطر الصورة.
18. يريد أحد هواة جمع الطوابع تكبير طابع بمقدار 4.0 مرات عندما يكون الطابع على بُعد 3.5 cm من العدسة. ما البعد البؤري للعدسة اللّازمة؟



الشكل 13–5 تنتج العدسات المقعرة صورًا تقديرية ومعتدلة ومصغرة فقط مقارنة بالأجسام.

العدسات المقعرة Concave Lenses

تفرّق العدسة المقعرة الأشعة كلّها. و**الشكل 13–5** يبيّن كيف تكوّن مثل هذه العدسة صورة تقديرية، حيث يصل الشعاع 1 إلى العدسة موازيًا المحور الرئيس. ويخرج من العدسة على شكل شعاع يمر امتداده في البؤرة. أما الشعاع 2 فَيصِل إلى العدسة كما لو كان سيمر خلال البؤرة في الجانب المعاكس، ويبتعد عن العدسة موازيًا المحور الرئيس. وتتقاطع الامتدادات الخلفية للشعاعين 1 و 2 في الجانب نفسه من العدسة الذي يوجد فيه الجسم. ولأن الأشعة تخرج من العدسة متباعدة، فإنها تكوّن صورة تقديرية. ويكون موضع الصورة عند النقطة التي يظهر عندها أن الأشعة تتفرّق منها. وتكون الصورة أيضًا معتدلة وأصغر من الجسم (مصغرة). وهذا صحيح بغض النظر عن بعد الجسم عن العدسة، كما يكون البعد البؤري للعدسة المقعرة سالبًا.

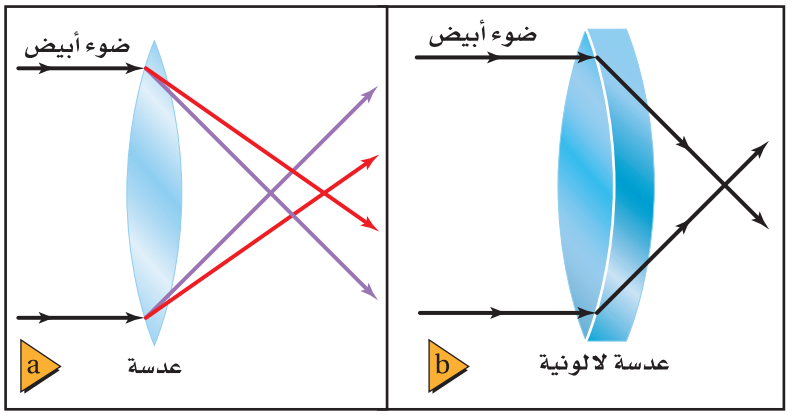
عند استخدام معادلة العدسة الرقيقة لحل مسائل على العدسات المقعرة فإن نظام الإشارات للبعد البؤري مختلف عنه للعدسة المحدّبة. إذ يكون البُعد البؤري للعدسة المقعرة سالبًا.

عيوب العدسات الكروية Defects of Spherical Lenses

درست خلال هذا الفصل العدسات التي تكوِّن صورة خالية من العيوب عند مواضع محدّدة. وفي الواقع، فإن للعدسات الكروية عيوبًا جوهرية ـ مثل المرايا الكروية ـ ينجم عنها مشاكل في وضوح الصورة وألوانها. حيث تواجه العدسات الكروية زيغًا متعلقًا بتصميمها الكروي، مثل المرايا تمامًا. وإضافة إلى ذلك، فإن تشتّت الضوء خلال العدسة الكروية يسبّب زيغًا لا تسبّبه المرايا.

الزيغ الكروي يقترح النموذج الذي استخدمته لرسم الأشعة خلال العدسات الكروية أن الأشعة التي تسقط متوازية تتجمّع في الموضع نفسه، وهذا مجرد تقريب. وفي الحقيقة، تتجمّع الأشعة المتوازية التي تمر خلال أطراف العدسة الكروية في مواضع مختلفة عن المواضع التي تتجمّع فيها الأشعة المتوازية والقريبة من المحور الرئيس. ويُسمى عدم قدرة العدسة الكروية على تجميع الأشعة المتوازية جميعها في نقطة واحدة **الزيغ الكروي**، وسببه اتساع سطح العدسة بالنسبة لبعدها البؤري. ويعالج الزيغ الكروي بمراعاة أن تكون الأشعة الضوئية التي تسقط على العدسة قريبة من المحور الرئيس. وتستخدم العديد من العدسات في الأدوات العالية الدقة، حيث تستخدم غالبًا خمس عدسات أو أكثر لتكوين صور واضحة ودقيقة.

الزيغ اللوني هناك عيب آخر في العدسات لا يوجد في المرايا. فالعدسة تعمل عمل عدد لانهائي من المناشير الرقيقة. لذا تنكسر فيها الأطوال الموجية المختلفة للضوء بزوايا مختلفة، كما يبين **الشكل 14a–5**. ولذلك يتجمع الضوء أو يتفرق عند مروره خلال العدسة المحدبة أو المقعرة على الترتيب في بؤر متعددة، وتظهر صورة الجسم محاطة بالألوان. ويُسمّى هذا التأثير **الزيغ اللّوني**.

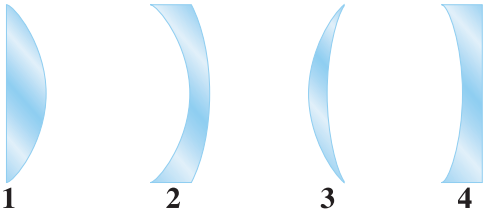


■ **الشكل 14–5** للعدسات البسيطة جميعها زيغ لوني، حيث يتركز الضوء ذو الأطوال الموجية المختلفة في نقاط مختلفة (**a**). العدسة اللّالونية نظام من العدسات يؤدي إلى تقليل الزيغ اللوني (**b**).

ويحدث الزيغ اللوني دائمًا عندما تستخدم عدسة مفردة. ويمكن تخفيض أثر هذا العيب كثيرًا بوساطة **العدسات اللّالونية**، وهي نظام مكون من عدستين أو أكثر، كعدسة محدبة مع عدسة مقعرة، لهما معاملا انكسار مختلفين. ويبيّن **الشكل 14b–5** مثل هذا التركيب للعدسات. فكلتا العدستين في الشكل تحرف الضوء، ولكن الانحراف الذي تسببه العدسة المحدبة يُلغى أثره تقريبًا بوساطة الانحراف الذي تسبِّبه العدسة المقعرة. ويُختار معامل انكسار العدسة المحدبة على أن يؤدي النظام المكوّن من العدسات إلى تجميع الضوء.

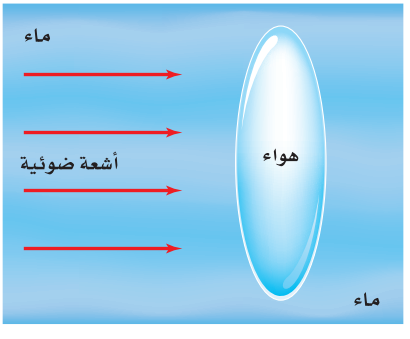
5-2 مراجعة

19. **التكبير** تُستخدم العدسات المكبّرة عادة لتكوين صور أكبر من الأجسام، ولكنها أيضًا يمكن أن تكوّن صورًا أصغر من الأجسام. وضّح ذلك.
20. **أنواع العدسات** يبيّن **الشكل 15–5** المقطع العرضي لأربع عدسات رقيقة. أي هذه العدسات مجمعة للصور أو مفرقة له؟



الشكل 15–5

21. **الزيغ اللوني** للعدسات البسيطة كلها زيغ لوني. فسر ذلك. لماذا لا ترى هذا الأثر عندما تنظر خلال المجهر؟
22. **الزيغ اللوني** إذا سمحت لضوء أبيض بالمرور من خلال عدسة محدبة إلى شاشة، وضبطت المسافة بين الشاشة والعدسة لتجمّع اللون الأحمر، ففي أي اتجاه يجب أن تحرّك الشاشة لتركز الضوء الأزرق؟
23. **التفكير الناقد** تتكون عدسة هوائية، موضوعة في خزان ماء من زجاجتي ساعة. انقل **الشكل 16–5** إلى دفترك، وارسم تأثير هذه العدسة في أشعة الضوء المتوازية الساقطة على العدسة.



الشكل 16–5

الفيزياء في حياتك

يستخدم البحارة المناظير –تلسكوبات صغيرة محمولة باليد– لرؤية الأجسام البعيدة، وتعتمد هذه المناظير والعديد من التلسكوبات الأخرى على العدسات لتكبير صور الأشياء البعيدة.

تساؤلات جوهرية:

- كيف تركّز العين الضوء لتكوّن الصور؟
- ما قصر النظر، وطول النظر، وكيف تصحح عدسات النظارات هذه العيوب؟
- ما خصائص الأنظمة البصرية في بعض الأدوات البصرية الشائعة؟

المفردات:

- قصر النظر
- طول النظر

الربط مع الأحياء

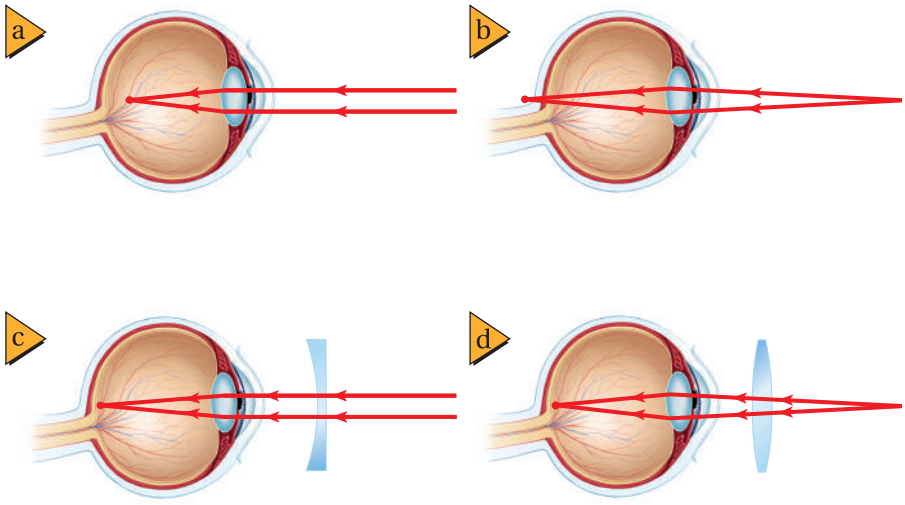
إن الخصائص التي تعلّمتها عن انكسار الضوء خلال العدسات تستخدم في أغلب الآلات البصرية. وتستخدم في حالات عديدة مجموعة من العدسات والمرايا لتكوين صورة واضحة لأجسام صغيرة أو بعيدة. إذ يحتوي كل من المقراب (التلسكوب)، والمنظار، وآلة التصوير، والمجهر (الميكروسكوب)، وحتى العين ـ على عدسات.

العدسات في العينين Lenses in Eyes

العين البشرية أداة بصرية جديرة بالملاحظة، مملوءة بسائل. وهي على هيئة وعاء كروي كما يبين **الشكل 17–5**. ينتقل الضوء المنبعث أو المنعكس عن الجسم إلى داخل العين خلال القرنية، ثم يمر الضوء بعدها خلال العدسة ويتركز على الشبكية الموجودة في مؤخرة العين. وتمتص خلايا متخصّصة في الشبكية الضوء وترسل المعلومات المتعلّقة بالصورة بوساطة العصب البصري إلى الدماغ.

تكوين الصور قد تعتقد ـ بسبب التسمية ـ أن عدسة العين هي المسؤولة عن تجميع الضوء على الشبكية. ولكن في الحقيقة، يتجمع الضوء الداخل إلى العين أساسًا بوساطة القرنية؛ لأن الفرق بين معامل انكسار الضوء ومادة القرنية كبير نسبيًا. أما العدسة فهي المسؤولة عن التجميع الدقيق الذي يسمح لك برؤية الأجسام البعيدة والقريبة بوضوح تام. وتستطيع العضلات المحيطة بالعين من خلال عملية تسمى التكيّف أن تجعل العدسة تنقبض أو تنبسط، مما يغيّر من شكلها، فيؤدي بدوره إلى تغيير البعد البؤري لعدسة العين. فعندما ترتخي العضلات تتركز صورة الجسم البعيد على الشبكية. وعندما تنقبض العضلات يقل البعد البؤري للعدسة، مما يسمح لصور الأجسام القريبة بأن تتركز على الشبكية.

قصر النظر وطول النظر لا تكوّن عيون الكثير من الناس صورًا واضحة على الشبكية. إذ تتكون الصور إما أمام الشبكية أو خلفها. فتصبح هناك حاجة إلى العدسات الخارجية على هيئة نظارات أو عدسات لاصقة؛ لضبط الصور لتقع على الشبكية. ويبين **الشكل 17a–5** حالة **قصر النظر**؛ حيث يكون البعد البؤري للعين أقل من البعد البؤري للعين السلمية، فتتكون الصور أمام الشبكية. وتُستخدم عدسات مقعرة لتصحيح ذلك بتفريق الضوء كما يبين **الشكل 17c–5**، لذا يؤدي ذلك إلى زيادة بعد الصور عن العدسة، وتكوين الصور على الشبكية.



الشكل 17–5 لا يستطيع شخص مصاب بقصر النظر رؤية الأجسام البعيدة بوضوح؛ لأن الصور تتركز أمام الشبكية (a). وتُصحّح العدسة المقعرة هذا العيب (c). ولا يستطيع شخص مصاب بطول النظر رؤية الأجسام القريبة بوضوح؛ لأن الصور تتركز خلف الشبكية (b). وتصحّح العدسة المحدبة هذا العيب (d).

ويبين **الشكل 17b–5** حالة **طول النظر**، حيث يكون البعد البؤري للعين أكبر منه للعين السليمة، فتتشكّل الصور خلف الشبكية، وتحدث حالة مماثلة أيضًا للأشخاص فوق عمر 45 عامًا، حيث لا يعود لعدسات العينين وعضلاتها المقدرة على تقليل البعد البؤري إلى الحدّ الذي يكفي لتكوين الصور للأجسام القريبة على الشبكية. وتُستخدم عدسات محدبة لتصحيح هذا العيب؛ إذ تكوِّن صورًا تقديرية أبعد عن العين من أجسامها، كما يبين **الشكل 17d–5**، فتصبح الصور عندئذ هي الأجسام بالنسبة لعدسة العين، فتتكون على الشبكية.

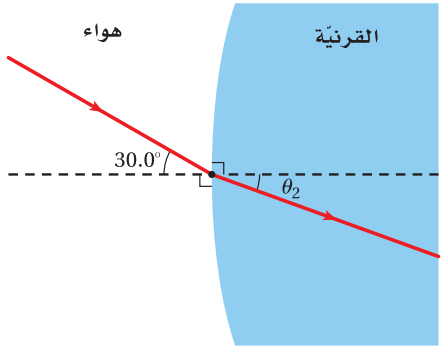
تطبيق الفيزياء

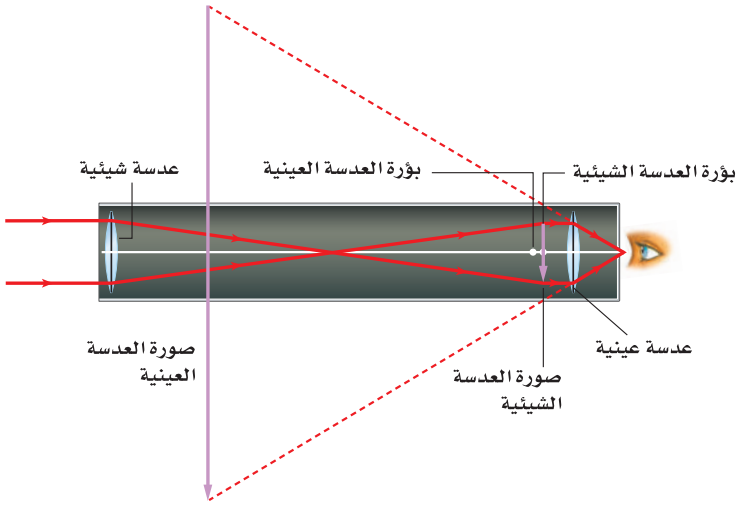
العدسات اللاصقة تعمل العدسات اللاصقة عمل النظارات الزجاجية؛ حيث توضع هذه العدسات الصغيرة الرقيقة مباشرة على القرنية. وتعمل طبقة رقيقة من الدمع بين القرنية والعدسة على ثبات العدسة في مكانها، ويحدث أغلب الانكسار عند سطح الهواء والعدسة، حيث يكون الفرق بين معاملي الانكسار كبيرًا.

مسألة تحدٍّ

عندما يدخل الضوء إلى العين فإنه يواجه الحد الفاصل بين الهواء والقرنية. فإذا دخل شعاع ضوء الحد الفاصل بين الهواء والقرنية لعين شخص بزاوية 30° بالنسبة للعمود المقام، وكان معامل انكسار القرنية 1.4 تقريبًا أجب عن الأسئلة التالية:

1. استخدم قانون سنل لحساب زاوية الانكسار.
2. ما مقدار زاوية الانكسار إذا كان الشخص يسبح أسفل الماء؟
3. أيهما أكبر: الانكسار في الهواء أم في الماء؟ وهل يعني هذا أن الأجسام التي تحت الماء تبدو أقرب أم أبعد مما لو كانت في الهواء؟
4. لو أردت أن تكون زاوية الانكسار لشعاع الضوء في الماء مساوية لها كما في الهواء فكم يجب أن تكون زاوية السقوط الجديدة؟





الشكل 18–5 يكوّن المقراب الفلكي الكاسر صورة تقديرية ومقلوبة مقارنة بالجسم.

المقراب (التلسكوب) الكاسر Refracting Telescopes

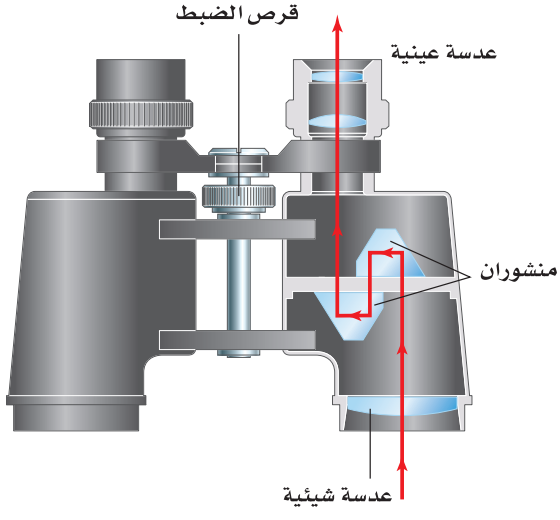
تستخدم العدسات في المقراب الفلكي الكاسر لتقريب الأجسام البعيدة وتكبير صورها. ويبين **الشكل 18–5** النظام البصري للمقراب الكبلري؛ حيث يكون الضوء القادم من النجوم والأجسام الفلكية الأخرى عادة بعيدًا جدًّا؛ لذا يمكن اعتبار الأشعة متوازية. وتدخل أشعة الضوء المتوازية العدسة الشيئية المحدبة، وتتركّز بوصفها صورة حقيقية عند بؤرة العدسة الشيئية، وتكون الصورة مقلوبة بالنسبة للجسم. ثم تصبح هذه الصورة بمنزلة الجسم بالنسبة للعدسة العينية المحدبة. لاحظ أن العدسة العينية موضوعة بحيث تقع بؤرة العدسة الشيئية بين العدسة العينية وبؤرتها. وذلك يعني أنه تتكوّن صورة تقديرية معتدلة وأكبر من الصورة الأولى عن طريق العدسة العينية. ولأن الصورة الأولى كانت مقلوبة فإن الصورة النهائية تبقى مقلوبة. ويعد انقلاب الصورة مقبولاً لمشاهدة الأجسام الفلكية.

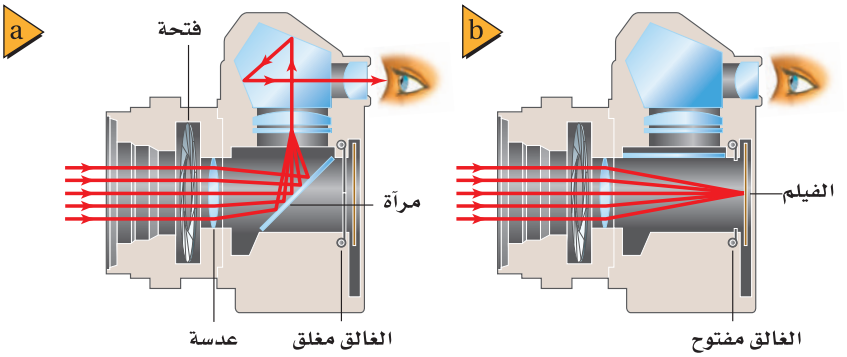
وتستخدم عدسات عينية محدبة لالونية في المقراب دائمًا. وتعمل مجموعة العدسات هذه على إزالة الألوان المحيطة، أو التخلّص من الزيغ اللّوني، المتشكّل مع الصورة.

الشكل 19–5 المنظار عبارة عن مقرابين متجاورين.

المنظار Binoculars

يكوِّن المنظار ـ مثل المقراب ـ صورًا مكبّرة للأجسام البعيدة. ويبين **الشكل 19–5** تصميمًا لمنظار نموذجي. ويشبه كل جانب من المنظار مقرابًا صغيرًا؛ حيث يدخل الضوء العدسة الشيئية المحدّبة وتكوّن صورة مقلوبة، ثم ينتقل الضوء خلال منشورين يَستخدمان ظاهرة الانعكاس الكلي الداخلي ليقلبا الصورة مرة أخرى، حيث يرى المشاهد صورة معتدلة للجسم الأصلي المراقب. ويؤدي المنشوران كذلك إلى إطالة مسار انتقال الضوء وتوجيهه إلى العدسة العينية للمنظار. وكما تزوّدك المسافة الفاصلة بين عينيك بإحساس الأبعاد الثلاثية والعمق فإن المنشورين يؤديان إلى زيادة المسافة الفاصلة بين العدستين الشيئيتين، ممّا يحسّن من الرؤية الثلاثية الأبعاد للجسم البعيد عن المنظار.



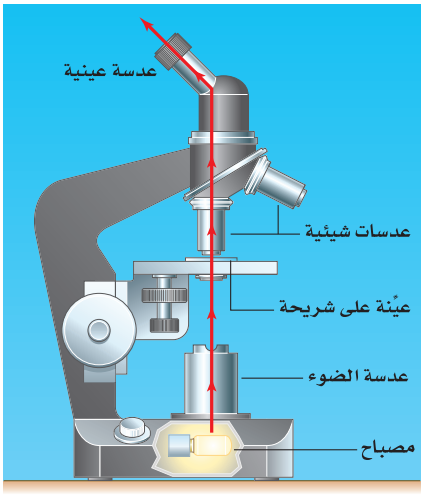


■ **الشكل 20–5** يبين الشكل آلة التصوير ذات العدسة المفردة العاكسة، والتي تعكس الصورة المتكوّنة بالعدسة من خلال المنشور لمشاهدتها (a)، أو توجيهها في اتجاه الفيلم (b).

آلات التصوير Cameras

يبين **الشكل 20a–5** النظام البصري المستخدم في آلة التصوير العاكسة ذات العدسة المفردة. فعندما يدخل الضوء إلى آلة التصوير، فإنه يمر خلال عدسة لالونية. ويعمل نظام العدسة هذا على انكسار الضوء، بطريقة تُشبه إلى حد كبير عمل عدسة محدبة مفردة، ويكوّن صورة مقلوبة على المرآة العاكسة. تنعكس الصورة إلى أعلى في اتجاه المنشور والذي يؤدي بدوره إلى عكس الضوء وتوجيهه إلى عين المشاهد. وعندما يحمل الشخص آلة التصوير لالتقاط صورة فإنه يضغط زر الغالق، الذي يرفع المرآة لفترة وجيزة، كما في **الشكل 20b–5**. وبدل أن يتجه الضوء إلى المنشور فإنه ينتقل في خط مستقيم ليكوّن صورة على الفيلم.

■ **الشكل 21–5** تنتج العدسة الشيئية والعدسة العينية في هذا المجهر صورة مقلوبة ومكبرة مقارنة بالجسم.



المجهر (الميكروسكوب) Microscopes

للمجهر عدستان محدبتان مثل المقراب، إحداهما شيئية والأخرى عينية. ويستخدم المجهر في مشاهدة الأجسام الصغيرة. ويبين **الشكل 21–5** النظام البصري المستخدم في المجهر المركّب، حيث يوضع الجسم في المنطقة ما بين بؤرة العدسة الشيئية وضعفي البُعد البؤري. فتتكوّن صورة حقيقية مقلوبة وأكبر من الجسم. ثم تصبح هذه الصورة بمثابة جسم للعدسة العينية؛ إذ يكون هذا الجسم بين العدسة العينية وبؤرتها، فتتكوّن صورة تقديرية معتدلة ومكبّرة مقارنة بالصورة التي كوّنتها العدسة الشيئية. لذا يرى المشاهد صورة مقلوبة مكبَّرة جدًا.

5-3 مراجعة

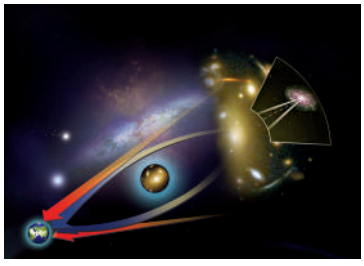
24. **الانكسار** فسّر لماذا تعدّ القرنية عنصر التجميع الرئيس للاشعة في العين؟
25. **أنواع العدسات** أيّ العدسات ينبغي أن يستخدمها الشخص المصاب بقصر النظر: العدسة المحدبة أم المقعرة؟ وأيها ينبغي أن يستخدمها الشخص المصاب بطول النظر؟
26. **الصورة** لماذا تكون الصورة المُشاهَدةُ في المقراب مقلوبة؟
27. **المنشور** ما المزايا الثلاث لاستخدام المنشورين في المنظار؟
28. **البعد البؤري** افترض أنك تريد رؤية جسم بعيد عنك بوضوح، فهل يزداد البعد البؤري لعدسة العين أم يقل؟ وضح ذلك.
29. **التفكير الناقد** عندما تستخدم التكبير الأقصى في المجهر فإن الصورة تكون معتمة أكثر منها في حالة التكبير الأقل. ما الأسباب المحتملة لتكوّن الصورة المعتمة؟ وما الذي يمكن أن تفعله للحصول على صورة أوضح؟

عدسات الجاذبية Gravitational Lenses

اكتشف الفلكيون عام 1979 في مرصد جودرل Jodrell Bank في بريطانيا نجمين من النجوم البعيدة (quasars) تفصل بينهما مسافة 7 ثوانٍ قوسية.

وبيّنت القياسات أنّ النجمين يبعد أحدهما عن الآخر 500,000 سنة ضوئية. وبدا أن النجمين يتغيران في السطوع وفي الإيقاع معًا، ولكنّ المدهش أنّه كان للنجمين أطياف متماثلة. فقد ظهرا وكأنهما جسمان مختلفان، ولكن في الحقيقة كان الجسمان عبارة عن جسم واحد.

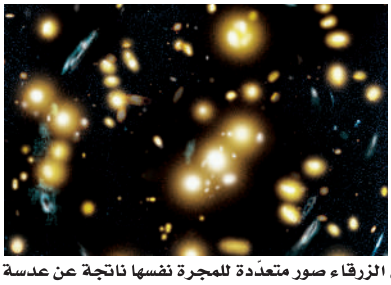
يبين الرسم أدناه كيف أنّ الضوء القادم من مجرة بعيدة ينحني حول تجمع مجرات قبل أن يصل إلى الأرض.



وأكدّت دراسات أخرى لفلكيّين من مختلف أنحاء العالم أنّه لا يوجد إلاّ نجم واحد فقط، انحنى ضوؤه بفعل تجمّع من المجرّات تسيطر عليها مجرة إهليلجية ضخمة تقع على الخط البصري بين النجم والأرض. فأدرك الفلكيون أنّهم شاهدوا صورتين لنجم واحد. وأثّرت المجرة كأنها عدسة محدبة ناقصة، تركّز الضوء المنحرف بطريقة ما، بحيث تتكوّن صورتان لجسم واحد. ولكن ما الذي دفعهم إلى الاعتقاد بأنّ الضوء قد انحنى؟

الجاذبية والضوء تذكّر الفلكيون أبحاث ألبرت أينشتاين ونظريته النسبية. فقد اقترح أينشتاين أن الضوء ينحني بفعل مجال الجاذبية للأجسام الضخمة. ففي نظرية الفضاء الكلاسيكية المعروفة بالفضاء الإقليدي، ينتقل الضوء في خطوط مستقيمة. واستنادًا إلى أينشتاين فإنّ الضوء ينحني عندما يمر بجانب الأجسام الضخمة.

وفي عام 1919 أثبتت مقارنة لضوء نجم قبل كسوف الشمس وفي أثنائه صحة نظرية أينشتاين. فاقترح أينشتاين في عام 1936 ظاهرة عدسة الجاذبية. ولأنّ الضوء يمكنه أن ينحني بفعل مجالات الجاذبية للأجسام الضخمة، لذا على المراقبين أن يروا صور حلقات تقديرية عندما يكون هناك جسم ضخم بين الأرض والجسم المراقَب. ولم يشاهد أينشتاين أبدًا مثل هذه الظاهرة، ولكن نظريته في النسبية دعمت إمكانية وجود عدسات الجاذبية هذه.



الأشكال الزرقاء صور متعدّدة للمجرة نفسها ناتجة عن عدسة الجاذبية القادمة من مجرة عنقودية 1654 + 0024 في مركز الصورة.

الدليل عندما يكتشف شخصٌ شيئًا ما للمرة الأولى فإنّ العديد من الاكتشافات الداعمة تعقُب ذلك. فمنذ قدّم أينشتاين اقتراحاته إلى أن اكتشفت الصورة المزدوجة للنجم البعيد (الكوازار) عام 1979، اكتشفت العديد من عدسات الجاذبية، كما شوهدت كل من حلقات أينشتاين والصور المتعدّدة. ونتجت حلقات أينشتاين عندما أصبحت عدسة الجاذبية والضوء القادم من الجسم على استقامة واحدة تقريبًا. وتتشكّل الصور المتعدّدة عندما لا تكون عدسة الجاذبية والضوء على استقامة واحدة. وحتى الآن اكتشف أكثر من 50 عدسة جاذبية.

التوسع في البحث

1. **استنتج** لماذا كان اكتشاف عدسات الجاذبية مهمًّا؟
2. **قارن وميّز** فيمَ تتشابه عدسات الجاذبية والعدسات المحدبة؟ وفيمَ تختلفان؟

الفصل 5
دليل الدراسة

5–1 انكسار الضوء Refraction of Light

المفردات

- معامل الانكسار
- قانون سنل في الانكسار
- الزاوية الحرجة
- الانعكاس الكلي الداخلي
- التفريق

الفكرة الرئيسة: يعتمد انكسار الضوء بين وسطين على معاملي انكسار الوسطين وزاوية سقوط الأشعة الضوئية.

- ينحرف مسار الضوء عندما ينتقل من وسط ذي معامل انكسار n_1 إلى وسط آخر معامل انكساره مختلف n_2.

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

- النسبة بين سرعة الضوء في الفراغ c إلى سرعته في أيّ وسط آخر تساوي معامل انكسار الوسط n.

$$n = \frac{c}{v}$$

- عندما ينتقل الضوء من وسط لوسط آخر معامل انكساره أقل وبزاوية سقوط أكبر من الزاوية الحرجة θ_c. فإن الضوء ينعكس انعكاسًا كليًّا داخليًّا في الوسط نفسه الذي هو فيه، ولا ينفذ إلى الوسط الآخر.

$$\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

5-2 العدسات المحدبة والمقعرة Convex and Concave Lenses

المفردات

- العدسة
- العدسة المحدبة
- العدسة المقعرة
- المعادلة العامة للعدسة الرقيقة
- الزيغ اللونيّ
- العدسة اللالونيّة

الفكرة الرئيسة: يمكن للعدسات تكبير أو تصغير الصور.

- يرتبط كلٌّ من البعد البؤري f، وبعد الجسم d_o، وبعد الصورة d_i للعدسة الرقيقة بالمعادلة التالية:

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

- يُعرَّف التكبير m للصورة الناتجة عن عدسة بالطريقة نفسها التي عُرّف بها التكبير للصورة الناتجة عن مرآة.

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

- تكوّن العدسة المحدبة المفردة صورة حقيقية مقلوبة عندما يكون بعد الجسم أكبر من البعد البؤري، وتكون الصورة مصغّرة أو مكبّرة وفقًا لبعد الجسم.
- تكوّن العدسة المحدبة المفردة صورة تقديرية معتدلة ومكبّرة عندما يوضع الجسم بين العدسة والبؤرة.
- تكوّن العدسة المقعرة صورًا تقديرية دائمًا، وتكون معتدلة ومصغّرة.
- جميع العدسات لها زيغ لونيّ، وجميع العدسات التي لها سطوح كروية لها زيغ كروي.

5-3 تطبيقات العدسات Applications of Lenses

المفردات

- قصر النظر
- طول النظر

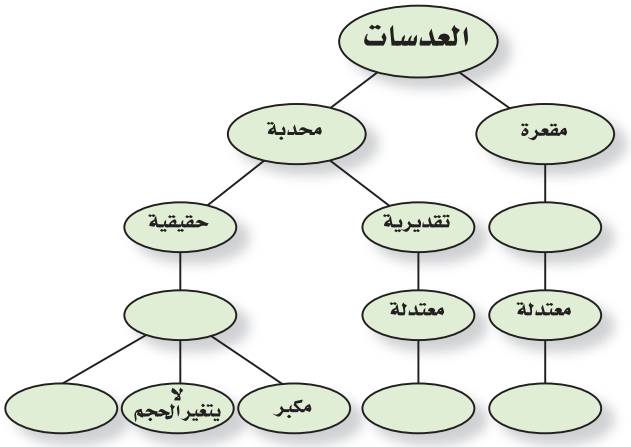
الفكرة الرئيسة: تستخدم العدسات لرؤية الأجسام التي لا يمكن رؤيتها بالعين المجردة

- يُعدّ الفرق بين معاملي انكسار الهواء والقرنية المسؤول الرئيس عن تجميع الضوء في العين.
- تستخدم الأدوات البصرية مجموعة من العدسات للحصول على صور واضحة للأجسام الصغيرة أو البعيدة.

الفصل 5 التقويم

خريطة المفاهيم

30. أكمل خريطة المفاهيم أدناه باستخدام المصطلحات التالية: مقلوبة، مكبرة، مصغّرة، تقديرية.



إتقان المفاهيم

31. قارن زاوية السقوط بزاوية الانكسار عندما ينتقل شعاع الضوء من الزجاج إلى الهواء بزاوية لا تساوي صفرًا؟

32. على الرغم من أنّ الضوء القادم من الشمس ينكسر في أثناء مروره في الغلاف الجويّ للأرض، إلّا أنّ الضوء لا يتحلّل إلى طيفه. فإلامَ يشير هذا بالنسبة لسرعات الألوان المختلفة للضوء المنتقلة في الهواء؟

33. فسّر لماذا يبدو القمر أحمر اللون في أثناء الخسوف؟

34. ما العوامل التي تحدّد موقع البؤرة للعدسة؟

35. عند عرض صورة بوساطة آلة عرض الأفلام على شاشة فإنّ الفيلم يوضع بين F و 2F لعدسة مجمِّعة. ويُنتج هذا الترتيب صورة مقلوبة، فلماذا يظهر مشهد الفيلم معتدلاً عندما يعرض الفيلم؟

36. وضّح لماذا تستخدم الأدوات البصرية الدقيقة العدسات اللّالونية؟

37. ما الحالة التي يكون عندها البعد البؤري للعين قصيرًا جدًّا بحيث لا يمكنه تركيز الضوء على الشبكية؟

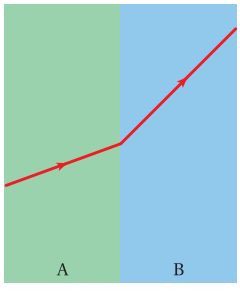
38. ما طبيعة الصورة المتكوّنة بوساطة العدسة الشيئية في المقراب؟

39. لماذا تعد زيادة المسافة بين العدستين الشيئيتين في المنظار أمرًا نافعًا؟

40. ما الغرض من المرآة العاكسة في آلة التصوير؟

تطبيق المفاهيم

41. أي المادتين A أم B، في **الشكل 22–5** لها معامل انكسار أكبر؟ وضّح ذلك.



الشكل 22–5

42. كيف يتغير مقدار الزاوية الحرجة مع زيادة معامل الانكسار؟

43. **قوس المطر** لماذا لا تستطيع رؤية قوس المطر في السماء جنوبًا إذا كنت في نصف الكرة الشمالي؟ وإذا كنت في نصف الكرة الأرضية الجنوبي فإلى أي اتجاه يجب أن تنظر لترى قوس المطر؟

44. يستخدم غطاس عدسة مكبِّرة تحت الماء لمشاهدة جسم صغير في قاع بركة السباحة، واكتشف أن العدسة لا تُكبِّر الجسم بشكل جيد، فسّر لماذا لا تعمل العدسة المكبّرة في الماء كما كانت تعمل في الهواء.

45. لماذا يكون هنالك زيغ لوني للضوء المار خلال عدسة، في حين لا يكون للضوء الذي ينعكس عن مرآة زيغ لوني؟

46. يكون بؤبؤ العينين صغيرًا عندما تتعرض لضوء الشمس الساطع مقارنة بالتعرض لضوء أخفت،

تقويم الفصل 5

وضّح لماذا تستطيع عيناك تجميع الضوء بشكل أفضل في الضوء الساطع؟

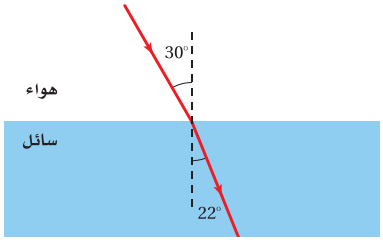
إتقان حل المسائل

5–1 انكسار الضوء

47. ينتقل شعاع ضوء من الهواء إلى سائل ما، كما في **الشكل 23–5**، حيث يسقط الشعاع على السائل بزاوية 30°، وينكسر بزاوية 22°

a. احسب معامل انكسار السائل باستخدام قانون سنل.

b. قارن معامل الانكسار الذي حسبته بالقيم الموجودة في **الجدول 1–5**، وماذا يمكن أن يكون هذا السائل؟



الشكل 23–5

48. يسقط شعاع ضوئي على زجاج مسطح لأحد جوانب حوض سمك، بزاوية مقدارها 40° بالنسبة للعمود المقام. فإذا علمت أن معامل انكسار الزجاج $n=1.5$، احسب:

a. زاوية انكسار الضوء في الزجاج؟

b. زاوية انكسار الضوء في الماء؟

49. ارجع إلى الجدول 1–5، واستخدم معامل انكسار الألماس لحساب سرعة الضوء فيه.

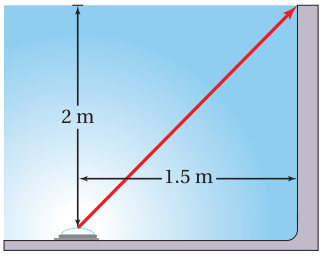
50. ارجع إلى الجدول 1–5، وأوجد الزاوية الحرجة للألماس في الهواء.

51. **حوض سمك** استخدمت صفيحة سميكة من البلاستيك $n=1.50$، في صنع حوض سمك، فإذا انعكس ضوء عن سمكة موجودة في الماء وسقط على صفيحة البلاستيك بزاوية 35°، فما الزاوية التي سيخرج فيها الضوء إلى الهواء؟

52. وضع مصدر ضوء في قاع حوض سباحة على عمق 2.0 m من سطح الماء ويبعد عن طرف الحوض 1.5 m كما في **الشكل 24–5**. وكان الحوض مملوءًا بالماء إلى قمته.

a. ما الزاوية التي يصل فيها الضوء طرف المسبح خارجًا من الماء؟

b. هل تؤدي رؤية الضوء بهذه الزاوية إلى ظهوره بشكل أعمق أم أقل عمقًا مما هو عليه في الواقع؟



الشكل 24–5

53. إذا كانت سرعة الضوء في بلاستيك شفاف $1.90 \times 10^8\ m/s$، وسقط شعاع ضوء على البلاستيك بزاوية 22°، فما الزاوية التي ينكسر بها الشعاع؟

5–2 العدسات المحدبة والمقعرة

54. إذا وضع جسم على بُعد 10 cm من عدسة مجمّعة بعدها البؤري 5.0 cm، فعلى أيّ بعد من العدسة تتكوّن الصورة؟

55. إذا أردنا استخدام عدسة محدبة لتكوِّن صورة حجمها يساوي 0.75 من حجم الجسم، وأن تكون الصورة على بعد 24 cm من الجانب الآخر للعدسة، فما البعد البؤري للعدسة الذي يحقق ذلك؟

56. وضع جسم طوله 3.0 cm على بُعد 15 cm أمام عدسة مجمّعة، فتكوّنت له صورة حقيقية على بُعد 10 cm من العدسة.

a. ما البعد البؤري للعدسة؟

b. إذا استُبدِلت العدسة الأصلية، ووضع مكانها

تقويم الفصل 5

عدسة أخرى لها ضعفا البعد البؤري، فحدّد موقع الصورة وطولها واتجاهها.

57. وضع جسم بالقرب من عدسة مفرّقة بعدها البؤري 15 cm، فتكوّنت له صورة طولها 2.0 cm على بُعد 5.0 cm من العدسة.

a. ما بُعد الجسم عن العدسة؟ وما طوله؟

b. إذا استبدلت العدسة المفرّقة، ووضع مكانها عدسة مجمّعة لها البعد البؤري نفسه فما موقع الصورة وطولها واتجاهها؟ وهل هي تقديرية أم حقيقية؟

3–5 تطبيقات العدسات

58. **النظارات** يجب أن يكون الكتاب على بُعد 25 cm من العين لقراءته بوضوح. فإذا كان هناك فتاة تعاني من طول النظر، وتحتاج أن يكون الكتاب على بُعد 45 cm من عينيها لقراءته بوضوح، فما البعد البؤري اللازم لعدستي نظارتها؟

59. **المجهر (الميكروسكوب)** وضعت شريحة من خلايا البصل على بُعد 12 mm من عدسة المجهر الشيئية، فإذا كان البعد البؤري لهذه العدسة 10 mm:

a. فما بُعد الصورة المتكوّنة عن العدسة؟

b. ما تكبير هذه الصورة؟

c. تتكوّن الصورة الحقيقية على بُعد 10 mm تحت العدسة العينية. فإذا كان بعدها البؤري 20.0 mm فما موقع الصورة النهائية؟

d. ما التكبير النهائي لهذا النظام؟

مراجعة عامة

60. وضع جسم طوله 3 cm على بُعد 20 cm أمام عدسة مجمّعة. فتكوّنت له صورة حقيقية على بُعد 10 cm من العدسة. ما البعد البؤري للعدسة؟

61. **الفلك** كم دقيقة إضافية يستغرق وصول الضوء من الشمس إلى الأرض إذا امتلأ الفضاء بينهما بالماء بدلاً من الفراغ؟ علمًا بأن بُعد الشمس عن الأرض 1.5×10^8 km

التفكير الناقد

62. **قارن** أوجد الزاوية الحرجة للجليد الذي معامل انكساره $n = 1.31$. في المناطق الباردة جدًّا، هل تكون أسلاك الألياف الضوئية المصنوعة من الجليد أفضل من تلك المصنوعة من الزجاج لحفظ الضوء داخل السلك؟ وضح ذلك.

63. **التفكير الناقد** تستخدم عدسة لعرض صورة جسم على شاشة. افترض أنك غطيت النصف الأيمن من العدسة فما الذي يحدث للصورة؟

الكتابة في الفيزياء

64. إنّ عملية تكيّف العين وهي عملية انقباض العضلات المحيطة بعدسة العين أو انبساطها لرؤية الأجسام القريبة أو البعيدة تختلف من كائن لآخر. ابحث هذه الظاهرة في حيوانات مختلفة، وأعدّ تقريرًا للصف تبين من خلاله كيفية التكيف في عيونها لرؤية الأشياء.

65. ابحث في نظام العدسات المستخدم في الأدوات البصرية، ومنها جهاز عرض الشفافيات أو آلات التصوير الخاصة أو المقراب، وحضر عرضًا تصويريًّا للصف تبين من خلاله كيف تكوّن هذه الأدوات الصور.

مراجعة تراكمية

66. تطلق سيارة صوت منبِّهَهَا عندما تقترب من شخص يمشي على ممر المشاة. ما الذي يسمعه الشخص عند توقف السيارة لتسمح للشخص بعبور الشارع؟

67. **مرآة التجميل** وضعت شمعة طولها 3.0 cm على بُعد 6.0 cm أمام مرآة مقعرة بعدها البؤري 14.0 cm، أوجد موقع صورة الشمعة وطولها بوساطة ما يلي:

a. رسم مخطّط الأشعة بمقياس رسم.

b. معادلتي المرآة والتكبير.

اختبار مقنن

أسئلة اختيار من متعدد

اختر رمز الإجابة الصحيحة في كل مما يأتي:

1. وُجِّه شعاع من مصباح يدوي على بركة سباحة في الظلام بزاوية 46° بالنسبة للعمود المقام على سطح الماء. ما مقدار زاوية انكسار الشعاع في الماء؟ (معامل انكسار الماء 1.33)

A) 18° C) 33°

B) 30° D) 44°

2. إذا كانت سرعة الضوء في الألماس 1.24×10^8 m/s، فما معامل انكسار الألماس؟

A) 0.0422 C) 1.24

B) 0.413 D) 2.42

3. أيّ مما يأتي لا يؤثر في تشكيل قوس المطر؟

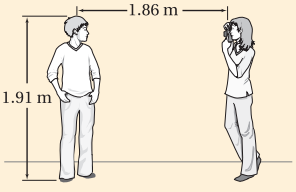
A) الحيود C) الانعكاس

B) التشتّت D) الانكسار

4. التقطت سارة صورة لأسامة كما في الشكل مستخدمة كاميرا بعدسة محدبة بعدها البؤري 0.0470 m، حدّد موضع صورة أسامة.

A) 1.86 cm C) 4.82 cm

B) 4.70 cm D) 20.7 cm



5. ماذا يحدث للصورة المتكوّنة من عدسة محدبة عندما يُغطَّى نصفها؟

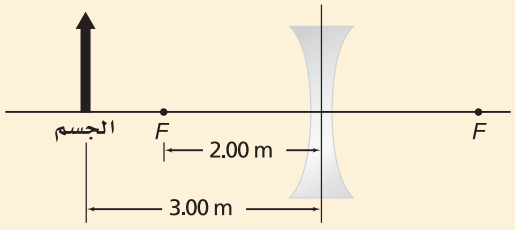
A) تختفي نصف الصورة C) تصبح الصورة ضبابية

B) لا تتكون صورة D) تنعكس الصورة

6. ما بعد الصورة للحالة الموضحة في الشكل؟

A) −6.00 m C) 0.167 m

B) −1.20 m D) 0.833 m



7. ما الزاوية الحرجة للانعكاس الكلي الداخلي، عندما ينتقل الضوء من زجاج معامل انكساره $n = 1.52$ إلى الماء الذي معامل انكساره $n = 1.33$؟

A) 29.0° C) 48.8°

B) 41.2° D) 61.0°

الأسئلة الممتدة

8. إذا كانت الزاوية الحرجة للانعكاس الكلي الداخلي عند الحدّ الفاصل بين الألماس والهواء 24.4°، فما زاوية الانكسار في الهواء إذا كانت زاوية سقوط الشعاع على الحد الفاصل 20°؟

9. يتكوّن لجسم يبعد 6.98 cm عن عدسةٍ صورةٌ تبعد 2.95 cm عن العدسة في الجانب نفسه. حدّد نوع العدسة، ووضّح كيف عرفت ذلك؟

إرشاد

استخدم الوقت الذي يلزمك

لن تحصل على نقاط إضافية إذا أنهيت الاختبار مبكرًا. لذا اعمل ببطء وبحذر؛ تجنّبًا للوقوع في أخطاء لعدم الانتباه الذي يمكن أن يحدث عندما تريد إنهاء الاختبار بسرعة.

الفصل 6

التداخل والحيود
Interference and Diffraction

يتوقع بعد الانتهاء من دراسة هذا الفصل أن أكون قادرًا على:

- توضيح المفاهيم المرتبطة بالتداخل (الضوء غير المترابط، الضوء المترابط، أهداب التداخل، الضوء الأحادي اللون، التداخل في الأغشية الرقيقة).
- تفسير تكون نمط تداخل باسقاط الضوء على شقين.
- حساب الأطوال الموجية للضوء من أنماط التداخل.
- تطبيق النمذجة على تداخل الأغشية الرقيقة.
- توضيح المفاهيم المرتبطة بالتداخل (نمط الحيود، محزوز الحيود).
- توضيح كيف تتشكل أنماط الحيود بوساطة محزوزات الحيود.
- وصف كيفية استخدام محزوزات الحيود في المطياف.
- استخدام الأدوات والأجهزة المتعلقة بالتداخل والحيود لإجراء التجارب وتمثيل بياناتها وتحليلها.
- استقصاء وحل المشكلات المتعلقة ببعض المفاهيم المتعلقة بالتداخل والحيود.
- الوعي بأهمية التداخل والحيود في الحياة اليومية.

الفصل الأول

الفكرة العامة:

يمكن لموجات الضوء أن تحيد وتتداخل مع بعضها بعضًا.

(6-1) التداخل

الفكرة الرئيسة يحدث تداخل الموجات الضوئية عند تراكب الموجات الناتجة عن مصادر الضوء المترابط.

(6-2) الحيود

الفكرة الرئيسة عند عبور الضوء المترابط من خلال شق ضيق فإن موجاته تتداخل تداخلات بنائية أو هدمية يمكن جمعها على شاشة.

فكّر

كيف يُظهر محلول فقاقيع الصابون ألوان قوس المطر؟

تجربة استهلالية

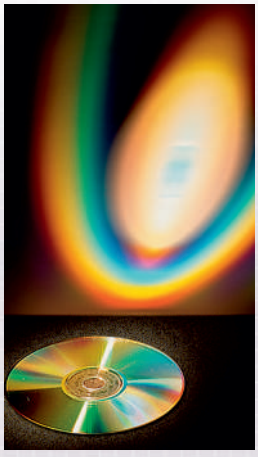
لماذا يعكس القرص المدمج الضوء بألوان قوس المطر؟

سؤال التجربة كيف يتأثر الضوء عندما ينعكس عن القرص المدمج؟

الخطوات

1. احصل على قرص مدمج CD أو DVD، ومصدر ضوئي، ومرشّحات ضوئية.
2. ضع القرص المدمج على سطح الطاولة على أن يكون سطحه العاكس إلى أعلى.
3. ضع مرشح اللون على المصدر الضوئي.
4. شغل المصدر الضوئي، وأسقط الضوء الصادر على سطح القرص المدمج، على أن يسقط الضوء المنعكس عنه على سطح أبيض. ***تحذير: لا تنظر مباشرة إلى الضوء الصادر عن جهاز عرض الضوء.***
5. دوّن ملاحظاتك حول الضوء الذي تشاهده على الشاشة.
6. أطفئ المصدر الضوئي وغيّر مرشح اللون مستعملًا مرشح لون آخر.
7. كرّر الخطوات من 4 إلى 5 باستعمال مرشح لون جديد.
8. كرّر الخطوات من 4 إلى 5 باستعمال ضوء أبيض.

التحليل



هل يؤثر لون الضوء في النمط المتكوّن؟ كيف يختلف انعكاس الضوء الأبيض عن الضوء الأحادي اللون؟

التفكير الناقد تأمّل في ملاحظاتك حول الضوء الأبيض المنعكس عن القرص، واقترح مصادر أخرى ممكنة تُظهر حزمًا من الألوان.

الفيزياء في حياتك

هل سبق لك أن رأيت ألوان قوس المطر في فقاعات الصابون أو في السائل المتكون من الماء والصابون؟ إن هذا هو نتيجة لظاهرة تسمى تدخل الأغشية الرقيقة، فكيف يتفاعل الضوء والمادة لإنتاج هذه الأنماط.

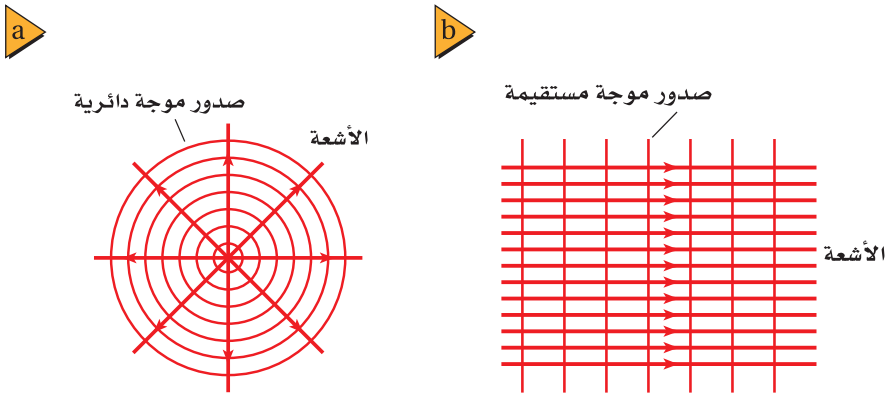
تساؤلات جوهرية:

- كيف يمكن للضوء الساقط على شقين أن ينتج تداخلاً؟
- كيف تستخدم أنماط التداخل لإيجاد الطول الموجي للضوء؟
- كيف نطبق النمذجة على تداخل الأغشية الرقيقة؟

المفردات:

- الضوء غير المترابط
- الضوء المترابط
- أهداب التداخل
- الضوء الأحادي اللون
- التداخل في الأغشية الرقيقة

لقد تعلمت أن الضوء يسلك سلوك الموجات أحيانًا، كما يحدث لموجات الماء والموجات الصوتية تمامًا، وقد أمكن بذلك تفسير كل من ظاهرتي الانعكاس والانكسار للضوء وفقًا للنموذج الموجي، واللتين فسرهما أيضًا نموذج الشعاع الضوئي. فما الذي قاد العلماء للاعتقاد بأن للضوء خصائص موجية؟ لقد اكتشف العلماء أن للضوء سلوكات ترتبط بالطبيعة الموجية نفسها؛ فالضوء يحيد عندما يمر بالحواف، وترى ضوءًا غير مترابط ذا صدور موجية غير متزامنة عندما تستضيء الأجسام بمصدر ضوئي أبيض، وهو ما تلاحظه من عدم انتظام الصدور الموجية للماء عندما تسقط الأمطار بغزارة على سطح بركة.



الشكل 1–6 تتولد صدور موجات الضوء المنتظمة بوساطة المصادر النقطية (a)، وأشعة الليزر (b).

التجربة العملية:

كيف يمكن استعمال نمط تداخل الشق المزدوج في قياس الطول الموجي للضوء الأحادي؟

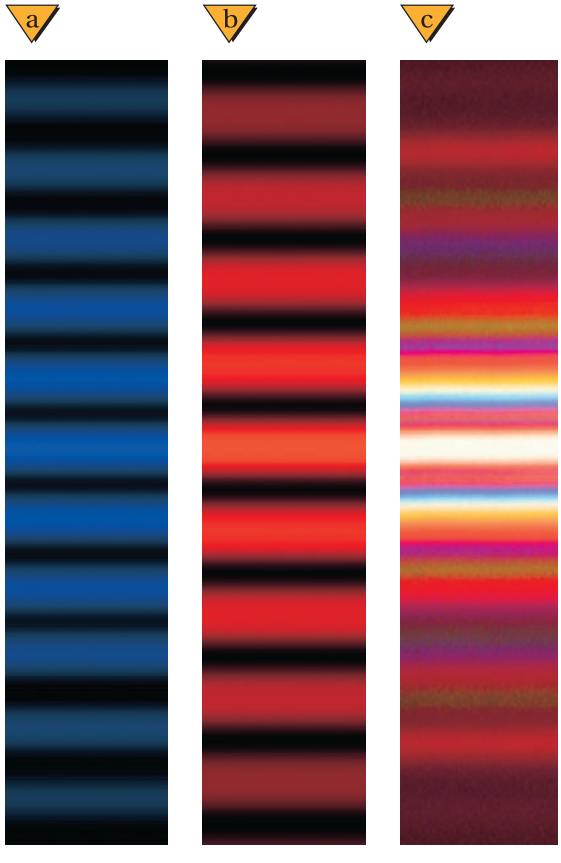
تداخل الضوء المترابط (المتزامن)
Interference of Coherent Light

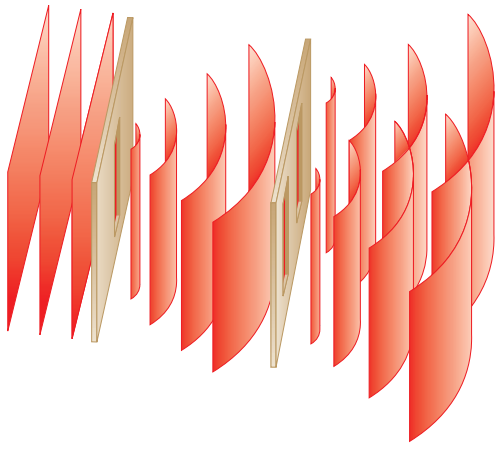
الضوء المترابط هو الضوء الناتج من مصدرين أو أكثر من الموجات التي لها التردد نفسه وفرق الطور نفسه؛ حيث يشكل الضوءان تراكبًا لتشكيل صدور موجات منتظمة. ويمكن توليد صدر الموجة المنتظمة بوساطة مصدر نقطي، كما يتضح من **الشكل 1a–6**، كما يمكن توليدها أيضًا بوساطة عدة مصادر نقطية عندما تتزامن هذه المصادر النقطية جميعها كما في أشعة الليزر كما هو موضح في **الشكل 1b–6**، وتحدث ظاهرة التداخل بوساطة تراكب الموجات الضوئية الناتجة عن المصادر الضوئية المترابطة.

أثبت الفيزيائي الإنجليزي توماس يونج أنه يكون للضوء خصائص موجية عندما أَنتج نمط تداخل من إسقاط ضوء من مصدر نقطي أحادي منتظم نحو شقين قريبين وضيّقين في حاجز، وعندما ينبعث الضوء من الشقين يتداخل ويسقط على الشاشة مولدًا نمطًا مكوّن من حزم مضيئة وأخرى معتمة، سمّاها يونج أهداب التداخل. وقد فسّر يونج ذلك بأن هذه الحزم تتكون نتيجة التداخل البنّائي والتداخل الهدمي للموجات الضوئية المنبعثة من الشقين.

في تجربة تداخل الشق المزدوج (تجربة يونج)، حيث تم استعمال ضوء **أحادي اللون**، وهو ضوء له طول موجي واحد فقط، أنتج التداخل البنّائي حزمة ضوئية مركزية مضيئة (هدبًا مضيئًا) بلون معين على الشاشة، كما أنتج على كل جانب حزمًا مضيئة أخرى تفصلها فراغات متساوية تقريبًا، وعرضها متساوٍ تقريبًا، كما يتضح من **الشكلين 6 2a – و 2b – 6**. وتتناقص شدة إضاءة الأهداب المضيئة كلما ابتعدنا عن الهدب المركزي، ويمكنك ملاحظتها بسهولة في **الشكل 2a– 6**. وتوجد بين الأهداب المضيئة مساحات معتمة (أهداب معتمة)، حيث يحدث التداخل الهدمي. وتعتمد مواقع حزم التداخل البنائي والهدمي على الطول الموجي للضوء الساقط. وعندما يُستعمل الضوء الأبيض في تجربة شقي يونج فإن التداخل يسبب ظهور أطياف ملوّنة بدلاً من الأهداب المضيئة والمعتمة، كما يتضح من **الشكل 2c–6**. وتتداخل الأطوال الموجية جميعها تداخلاً بنائيًا في الهدب المركزي المضيء، لذا

الشكل 2–6 هذه أنماط تداخل الشق المزدوج للضوء الأزرق (a)، وللضوء الأحمر (b)، وللضوء الأبيض (c).





الشكل 3–6 مصدر الضوء المترابط الذي يتكوّن بوساطة الشق الأحادي الضيّق، يُنتج موجات مترابطة أسطوانية الشكل تقريبًا، تنتقل إلى شقين في الحاجز الثاني. وتغادر موجتان مترابطتان أسطوانيتا الشكل تقريبًا الشق المزدوج.

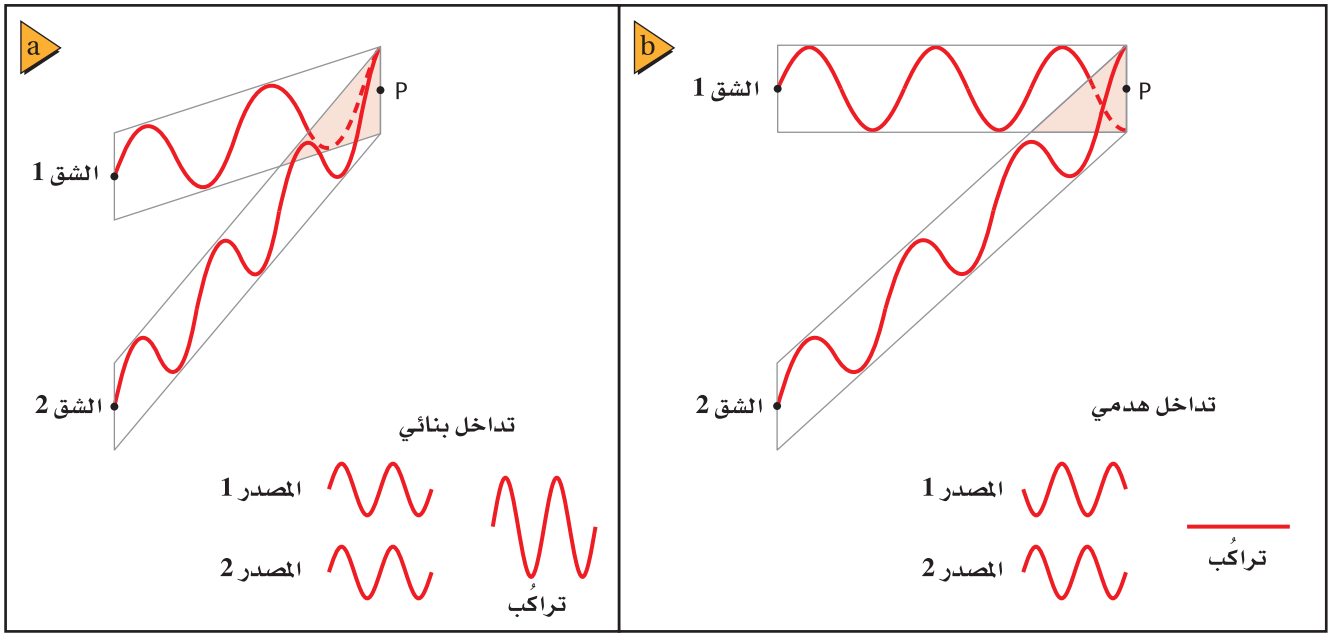
تطبيق الفيزياء

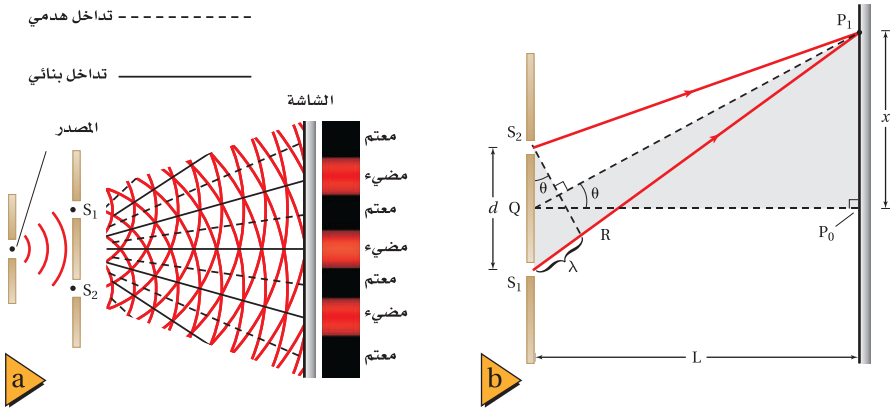
أجريت تجربة تداخل الشق المزدوج باستخدام شعاع من الالكترونات بدلًا من الشعاع الضوئي ونتج عن ذلك نمط تداخل مطابق للنمط المعروف لتداخل الشعاع الضوئي؛ مما يشير إلى أن الجسيمات الصغيرة (الالكترونات هنا) قد تبدو وكأنها تتصرف كالموجات.

يكون هذا الهدب أبيض دائمًا. وتنتج مواقع الأهداب الأخرى الملوّنة عن تراكب أهداب التداخل التي تحدث، حيث تتداخل الأطوال الموجية لكل لون منفصل تداخلاً بنائيًا.

تداخل الشق المزدوج لتوليد ضوء مترابط من ضوء غير مترابط، وضع يونج حاجزًا ضوئيًّا ذا شق ضيّق أمام مصدر ضوئي أحادي اللون، فنفذ الجزء المترابط من الضوء فقط، ثم حاد هذا الجزء بوساطة الشق؛ وذلك لأن عرض الشق كان اصغر من الطول الموجي للضوء الساقط، فتولّدت صدور موجات أسطوانية تقريبًا بسبب حيودها، كما في **الشكل 3–6**، وعندما وصل جزءا صدر الموجة المتفقان في الطور إلى الحاجز الثاني ذي الشقين، فإنهما تكونان صدور موجات مترابطة، وأسطوانية الشكل تقريبًا، يمكنهما أن تتداخلا بعد ذلك، كما في **الشكل 3–6**. تداخلاً بنائيًّا أو هدميًّا اعتمادًا على العلاقة بين طوريهما كما في **الشكل 4 – 6**.

الشكل 4–6 تولّد عند الشقين زوج من الموجات المتفقة بالطور. ويحدث تداخلاً بنائيًّا لتشكيل أهداب مضيئة (a)، أو تداخلاً هدميًّا لتشكيل أهداب معتمة (b).





الشكل 5–6 يولّد تداخل الضوء الأحادي اللون الذي يمر خلال الشق المزدوج أهدابًا مضيئة وأخرى معتمة على الشاشة (**a**). يمثّل هذا الشكل (**b**) تحليلاً للهدبة المضيئة الأولى؛ حيث تكون المسافة بين الشقين والشاشة L أكبر 10^5 مرة من المسافة الفاصلة بين الشقين تقريبًا.

التجربة العملية:

ما الطول الموجي؟

قياس الطول الموجي للضوء بنظرة علوية عن قرب، لصدور موجات أسطوانية الشكل وتجربة الشق المزدوج ليونج الموضحة في **الشكل 5a–6**، نجد أن صدور الموجات تتداخل تداخلاً بنائيًّا، وآخر هدميًّا؛ لتشكيل أنماط الأهداب المضيئة والمعتمة. والرسم التخطيطي النموذجي الموضح في **الشكل 5b–6** يستخدم لتحليل تجربة يونج؛ إذ يقطع الضوء الذي يصل إلى النقطة P_0 المسافة نفسها من كل شق. وتتداخل الموجات تداخلاً بنائيًّا على الشاشة لتكوين الهدب المركزي المضيء عند النقطة P_0؛ لأن الموجات لها الطور نفسه، كما يوجد أيضًا تداخل بنائي عند الهدب المضيء P_1 على كلا جانبي الهدب المركزي؛ لأن القطعة المستقيمة P_1S_1 أطول من القطعة المستقيمة P_1S_2 بمقدار طول موجي واحد λ، لذا تصل الموجات عند النقطة P_1 بالطور نفسه.

ويمكن ايجاد الطول الموجي باستخدام المعادلة التالية:

الطول الموجي من تجربة الشق المزدوج ليونج

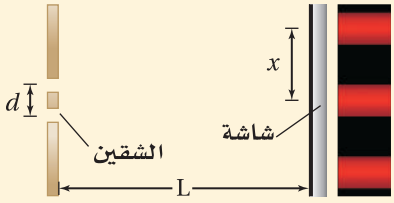
$$\lambda = \frac{xd}{L}$$

الطول الموجي للضوء المقيس بتجربة الشق المزدوج ليونج يساوي المسافة بين الهدب المركزي المضيء والهدب المضيء الأول على الشاشة، مضروبة في المسافة بين الشقين ومقسومة على المسافة بين الشقين والشاشة.

يحدث التداخل البنائي عند الموقع x_m، على جانبي الهدب المركزي المضيء باستخدام المعادلة $m\lambda = \frac{x_m d}{L}$؛ حيث $m = 0, 1, 2, \ldots$، والمحدّدة بوساطة استخدام التبسيطات الناجمة عن كون الزاوية صغيرة. وتتولّد الأهداب المركزية المضيئة عند $m = 0$، ويسمّى الهدب الناتج عند $m = 1$ عادة هدب الرتبة الأولى، وهكذا لسائر المواقع.

مثـــــال 1

الطول الموجي للضوء طبقت تجربة يونج لقياس الطول الموجي للضوء الأحمر عندما كان الشقان يبتعد أحدهما عن الآخر مسافة 0.0190 mm، ووضعت الشاشة على بعد 0.600 m عنهما. فوجد الهدب المضيء ذا الرتبة الأولى على بُعد 21.1 mm من الهدب المركزي المضيء. ما الطول الموجي للضوء الأحمر؟



1 تحليل المسألة ورسمها

- ارسم رسما تخطيطيًّا تبين فيه كلًّا من الشقين والشاشة.
- ارسم نمط التداخل مع الأهداب في مواقعها المناسبة على الشاشة.

المعلوم	المجهول
$d = 1.90\times10^{-5}\ \text{m}$	$\lambda = ?$
$x = 2.11\times10^{-2}\ \text{m}$	
$L = 0.600\ \text{m}$	

2 ايجاد الكمية المجهولة

$$\lambda = xd/L$$

$$= \frac{(2.11\times10^{-2}\ \text{m})(1.90\times10^{-5}\ \text{m})}{(0.600\ \text{m})}$$

بالتعويض عن $x = 2.11\times10^{-2}\ \text{m}, d = 1.90\times10^{-5}\ \text{m}, L = 0.600\ \text{m}$

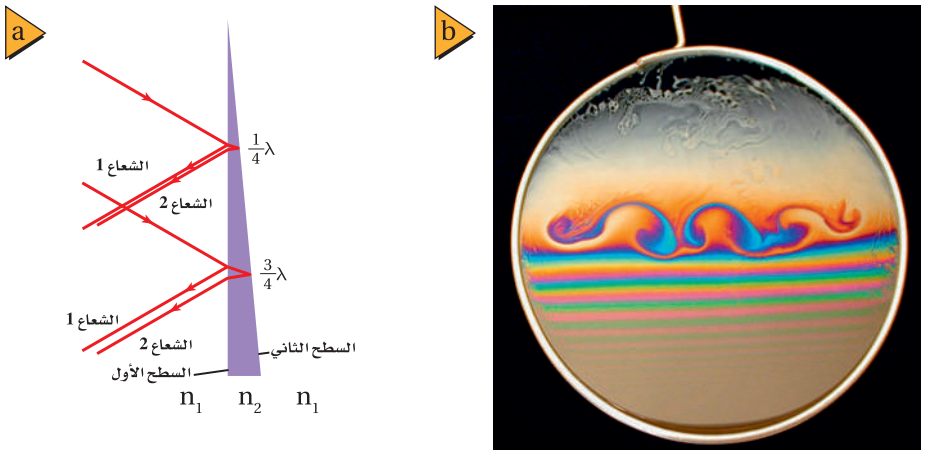
$$= 6.68\times10^{-7}\ \text{m} = 668\ \text{nm}$$

1 تقويم الجواب

- **هل الوحدات صحيحة؟** الإجابة بوحدة الطول، والتي تعد صحيحة بالنسبة للطول الموجي.
- **هل الجواب منطقي؟** الطول الموجي للون الأحمر 700 nm تقريبًا، وللون الأزرق 400 nm تقريبًا، لذا فإن الإجابة منطقية.

مسائل تدريبية

1. ينبعث ضوء برتقالي مصفر من مصباح غاز الصوديوم بطول موجي 596 nm على شقين يبعد أحدهما عن الآخر $1.90\times10^{-5}\ \text{m}$، ما مقدار المسافة بين الهدب المركزي المضيء والهدب الأصفر ذي الرتبة الأولى إذا كانت الشاشة تبعد مسافة 0.600 m عن الشقين؟
2. في تجربة يونج، استخدم الطلاب أشعة ليزر طولها الموجي $\lambda = 632.8\ \text{nm}$، ووضعوا الشاشة على بعد 1.00 m من الشقين، فوجد أن الهدب الضوئي ذا الرتبة الأولى يبعد 65.5 mm عن الخط المركزي. ما مقدار المسافة الفاصلة بين الشقين؟



الشكل 6–6 يزداد الطول الموجي عندما يكون سُمك غشاء الصابون $\frac{\lambda}{4}$ و $\frac{3\lambda}{4}$ و $\frac{5\lambda}{4}$ (a) ولأن كل طول موجي له لون خاص به، فإن سلسلة الأهداب التي تنعكس عن غشاء الصابون تكون ملوّنة (b).

التداخل في الأغشية الرقيقة Thin–film Interference

هل سبق أن شاهدت ألوان الطيف الناجمة عن فقاقيع الصابون أو عن الغشاء الزيتي العائم على سطح التجمعات المائية الصغيرة في ساحة مواقف السيارات؟ هذه الألوان لم تكن ناجمة عن تحليل الضوء الأبيض بوساطة منشور أو ناجمة عن امتصاص الألوان بوساطة الأصباغ، بل كان طيف الألوان هذا نتيجة للتداخل البنائي والهدمي للموجات الضوئية؛ بسبب انعكاسها عن الغشاء الرقيق، وهذه الظاهرة تسمى **التداخل في الأغشية الرقيقة**.

إذا حُمِلَ غشاء الصابون رأسيًّا كما في **الشكل 6–6**، فإن وزنه يجعله أكثر سمكًا عند القاع منه عند القمة، ويتغير السمك تدريجيًّا من أعلى إلى القاع. وعندما تسقط موجات الضوء على الغشاء ينعكس جزء منها، كما يوضح الشعاع 1، بينما ينفذ جزء آخر منها أيضًا. ويكون للموجات المنعكسة والموجات النافذة تردد الموجات الضوئية الأصلية نفسه. وتنتقل الموجة النافذة خلال الغشاء إلى السطح الخلفي، حيث ينعكس جزء منها مرة أخرى، كما يوضح الشعاع 2. إن عملية تجزئة كل موجة ضوئية من المصدر غير المترابط إلى زوج متماثل من الموجات تعني أن الضوء المنعكس عن الغشاء الرقيق هو ضوء مترابط.

ولان سمك الغشاء الرقيق d يكون مقاربا أو اقل من الأطوال الموجية للضوء المرئي، لذلك إذا أضيء الغشاء بلون ابيض عند سمك مناسب؛ فإن التداخل البنائي قد يحدث لأحد الأطوال الموجية الصادرة عن المصدر، ويرى الغشاء بوساطة الضوء المنعكس ملونًا نتيجة لذلك.

تحسين (تعزيز) اللون كيف يمكن زيادة شدة لون ضوء أحادي بالانعكاس؟ يعتمد كون التداخل بنائي أو هدمي على حقيقتين، أولهما: أن الموجة المنعكسة عن السطح الأول من وسط معامل انكساره n_1 إلى وسط معامل انكساره n_2 تخضع لفرق في الطور مقداره 180° عند الإنعكاس عندما يكون $n_2 > n_1$. وتخضع الموجة المنعكسة عن السطح الثاني لفرق في الطور مقداره 0° عندما يكون $n_2 > n_1$، وفي الحالة الممثلة في **الشكل 6a–6** فإن الشعاع 1 يخضع لفرق في الطور مقداره 180° والذي يعادل فرق مسار مقداره $\lambda/2$ حيث تنقلب القمة قاعًا، وينقلب القاع قمة. بينما لا يحدث هذا للشعاع 2، والحقيقة الثانية أن الذي يحدث للشعاع 2 عندما يكون سمك غشاء الصابون مساويًا ربع الطول الموجي $\lambda/4$ هو قطعه مسافة مقدارها $\lambda/2$ أكثر من الشعاع 1 وتغير الطول الموجي في الوسط n_2 حسب العلاقة $\lambda_n = \lambda/n$ قبل أن تتراكب الموجتان في الهواء.

تطبيق الفيزياء

النظارات غير العاكسة

يمكن وضع غشاء رقيق على عدسات النظارات لتمنع الأطوال الموجية المنعكسة للضوء والتي تراها العين البشرية بمقدار كبير؛ ممّا يمنع وهج الضوء المنعكس.

وتتداخل تداخلاً بنائيًا إذا كان سُمك الغشاء يحقق الشرط $d = \frac{\lambda}{4}$ ويكون الفرق في المسافة $2dn=(m+\frac{1}{2})\lambda$، فينعكس لون الضوء عند ذلك الطول الموجي بشدة أعلى فيتحسن اللون نتيجة ذلك؛ لاحظ أن ذلك يحدث لأن الطول الموجي للضوء في الغشاء أقصر من الطول الموجي للضوء في الهواء $d= \frac{\lambda_{\text{غشاء}}}{4}$، وتتداخل تداخلاً هدميًا إذا كان سُمك الغشاء أقل أو أكثر من $\frac{\lambda}{4}$، ويكون الفرق في المسافة $2dn = m\lambda$، حيث $m = 0,1,2,3, \ldots\ldots$،

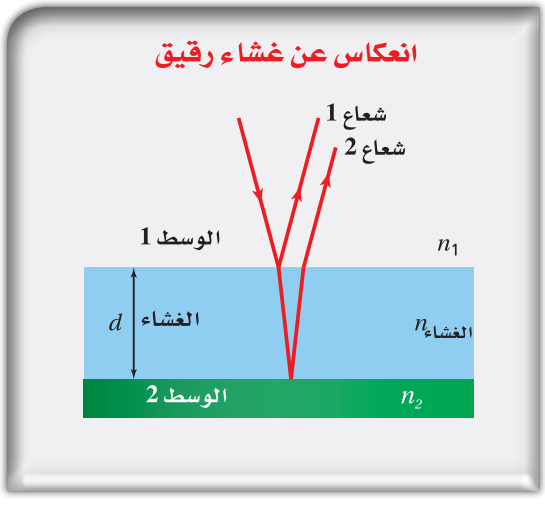
وكما تعلم فإن للألوان المختلفة أطوالًا موجية مختلفة. وأما الغشاء المتباين السمك ـ ومنه الغشاء الموضح في **الشكل 6–6**ـ فإن شرط الطول الموجي سيتحقق عند سمك مختلف للون مختلف. والنتيجة هي تكوّن ألوان قوس المطر. لاحظ تكرار الطيف في **الشكل 6b–6**. وعندما يكون سمك الغشاء $3\lambda/4$ تكون مسافة الذهاب والإياب $3\lambda/2$، ويحدث التداخل البنائي مرة أخرى. أي أنه إذا كان سمك الغشاء مساويًا 1λ و $\frac{3\lambda}{4}$ و $\frac{5\lambda}{4}$ ...إلخ فإنه سيحقق شروط التداخل البنائي لطول موجيّ محدّد.

استراتيجيات حل المسألة — **الرياضيات في الفيزياء**

التداخل في الأغشية الرقيقة

عند حل المسائل المتعلقة بالتداخل في الأغشية الرَّقيقة كوّن المعادلة الخاصة بالمسألة، وذلك باستخدام الاستراتيجيات التالية:

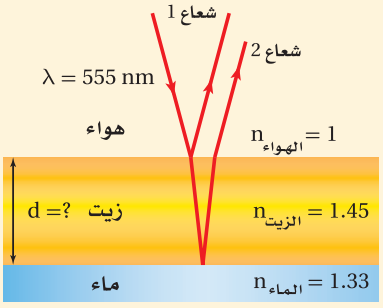
1. ارسم رسمًا توضيحيًّا للغشاء الرقيق وللموجتين المترابطتين. وللتسهيل ارسم الموجات على صورة أشعة.
2. اقرأ المسألة، وحدّد هل حدث تقوية أم إضعاف للضوء المنعكس؟ فإذا حدثت تقوية للضوء المنعكس تكون الموجات المنعكسة قد تداخلت تداخلاً بنائيًّا، أما إذا ضعف فستكون الموجات قد تداخلت تداخلاً هدميًّا.
3. هل تنقلب إحدى الموجتين أو كلتاهما عند الانعكاس؟ إذا تغير معامل الانكسار من قيمة أقل إلى قيمة أعلى تنقلب الموجة، أما إذا تغير معامل الانكسار من قيمة أعلى إلى قيمة أقل فلن تنقلب الموجة.
4. أوجد المسافة الإضافية التي يجب أن تقطعها الموجة الثانية خلال الغشاء الرقيق لتوليد التداخل المطلوب.
   - **a.** إذا أردت تداخلاً بنائيًّا وكانت إحدى الموجتين مقلوبة، أو أردت تداخلاً هدميًّا وكانت كلتاهما مقلوبتين أو غير مقلوبتين فإن الفرق في المسافة يكون عددًا فرديًّا من أنصاف الطول الموجي: $(m+1/2)\lambda_{\text{الغشاء}}$ حيث $m = 0, 1, 2, \ldots$.
   - **b.** إذا أردت تداخلاً بنائيًّا على أن تكون كلتا الموجتين مقلوبتين أو غير مقلوبتين، أو أردت تداخلاً هدميًّا وكانت إحدى الموجتين مقلوبة فإن الفرق في المسافة يكون عددًا صحيحًا من الأطوال الموجية: $m\lambda_{\text{الغشاء}}$، حيث $m = 1, 2, \ldots$.
5. عيّن المسافة الإضافية التي يقطعها الشعاع الثاني بمضاعفة سمك الغشاء ليصبح $2d$.
6. تذكّر مما درسته سابقًا أن $n_{\text{الغشاء}} / \lambda_{\text{الفراغ}} = \lambda_{\text{الغشاء}}$.



مثـــال 2

الزيت والماء لاحظت الحلقات الملوّنة في بركة ماء صغيرة، واستنتجت أنه لا بدّ من وجود طبقة رقيقة من الزيت على سطح الماء. ونظرت مباشرة إلى أسفل نحو البركة فشاهدت منطقة صفراء مخضرة (λ=555 nm) . فإذا كان معامل الانكسار للزيت 1.45، وللماء 1.33، فما أقل سمك لطبقة الزيت التي تسبب هذا اللون؟

1 تحليل المسألة ورسمها



- ارسم رسمًا تخطيطيًّا للغشاء الرقيق وللطبقات فوقه وتحته.
- ارسم الأشعة مبينًا الانعكاس عن سطح الغشاء العلوي وعن سطحه السفلي كذلك.

المعلوم	المجهول
$n_{الماء} = 1.33$	$d = ?$
$n_{الزيت} = 1.45$	
$\lambda = 555\ nm$	

2 ايجاد الكمية المجهولة

لأن $n_{الهواء} < n_{الزيت}$ فسيقود ذلك إلى اختلاف في الطور بمقدار 180° (انقلاب في الطور) في الانعكاس الأول، ولأن $n_{الزيت} < n_{الماء}$ فلن يحدث انقلاب في الطور في الانعكاس الثاني. لذا فإنه يحدث انقلاب موجي واحد فقط. والطول الموجي في الزيت أقل منه في الهواء.

طبّق استراتيجية حل المسألة لتكوين المعادلة:

$$2d = [m + \frac{1}{2}] \frac{\lambda}{n_{الزيت}}$$

ولأنك تريد أقل سمك، فإن $m = 0$

بالتعويض عن $m = 0$

$$d = \frac{\lambda}{4n_{الزيت}}$$

بالتعويض عن $\lambda = 555\ nm,\ n_{الزيت} = 1.45$

$$= \frac{555\ nm}{(4)(1.45)}$$

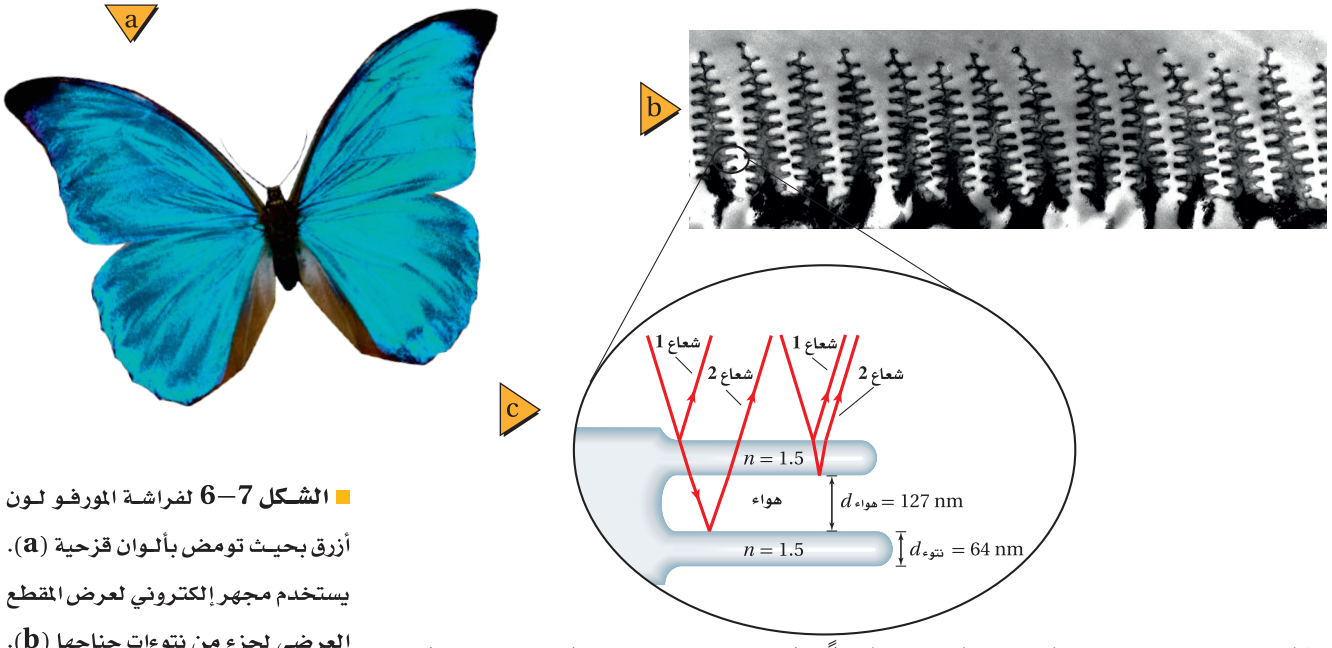
$$= 95.7\ nm$$

3 تقويم الجواب

- **هل الوحدات صحيحة؟** إن الإجابة بوحدة nm، وهي صحيحة لقياس السمك.
- **هل الجواب منطقي؟** إن أقل سمك يكون أقل من طول موجي واحد، والذي يمثل ما يجب أن يكون.

مسائل تدريبية

3. وضع غشاء من فلوريد الماغنسيوم معامل انكساره n=1.38 على عدسة زجاجية مطلية بطبقة غير عاكسة معامل انكسارها n=1.52. كم يجب أن يكون سمك الطبقة الضرورية لمنع انعكاس الضوء الأصفر المخضر؟
4. ما أقل سمك لغشاء صابون معامل انكساره n=1.33 ليتداخل عنده الضوء ذو الطول الموجي $\lambda = 521\ nm$ تداخلاً بنائيًّا مع نفسه؟



الشكل 7–6 لفراشة المورفو لون أزرق بحيث تومض بألوان قزحية (**a**). يستخدم مجهر إلكتروني لعرض المقطع العرضي لجزء من نتوءات جناحها (**b**). للنتوءات البارزة تركيب مشابه للدرج، ويمكن أن تتداخل الأزواج المتماثلة من الأشعة الضوئية المنبعثة من نتوء مفرد والأشعة المنبعثة من نتوءات متعددة (**c**).

كذلك يحدث تداخل الغشاء الرقيق طبيعيًّا في جناحي فراشة المورفو، كما في **الشكل 7a–6**، والضوء الأزرق المتلألئ المنبعث من الفراشة بسبب النتوءات التي تبرز خارجة من القشور الداخلية لجناح الفراشة كما في **الشكل 7 b – 6**. وينعكس الضوء وينكسر خلال سلسلة من التراكيب التي تشبه الدرج، كما في **الشكل 7 c – 6**، مما يؤدي إلى تكوين نمط تداخل أزرق اللون؛ حيث يبدو أن الفراشة تصدر وميضًا يمكن ملاحظته عند النظر إليها.

6-1 مراجعة

5. **سمك الغشاء** غشاء بلاستيكي عاكس معامل انكساره $n = 1.83$، ثبت على نافذة زجاجية، فإذا علمت أن معامل انكسار الزجاج $n=1.52$.
   a. فما أقل سمك ينعكس عنده الضوء الأصفر المخضر؟
   b. إذا كان سمك هذا الغشاء لا يمكن صناعته، فما السمك التالي الذي يحدث التأثير نفسه؟
6. **سمك الغشاء** ينفخ خالد في محلول الصابون مكوّنًا فقاقيع ويمسك بأنبوب الفقاقيع على أن يبقى غشاء الصابون معلّقًا رأسيًّا في الهواء. فما العرض الثاني الأقل سمكًا لغشاء الصابون الذي يتوقع عنده رؤية شريط مضيء، إذا كان الطول الموجي للضوء الذي يضيء الغشاء 575 nm؟ افترض أن معامل الانكسار لمحلول الصابون 1.33.
7. **الأنماط المضيئة والمعتمة** تم تكوين شقين متقاربين جدًّا في قطعة كبيرة من الكرتون، وأضيء الشقان بضوء أحمر أحادي اللون. فإذا وضعت ورقة بيضاء بعيدًا عن الشقين، فشوهد نمط من الأهداب المضيئة والمعتمة على الورقة، فصف كيف تسلك الموجة عندما تقابل شقًّا، وفسّر لماذا تظهر أهداب مضيئة وأخرى معتمة.
8. **أنماط التداخل** وضّح بالرسم النمط الذي وصِف في المسألة 7.
9. **أنماط التداخل** ارسم رسمًا تخطيطيًّا يبين ما يحدث لنمط التداخل في المسألة 7 عندما يستبدل بالضوء الأحمر ضوءًا أزرق.
10. **التفكير الناقد** تستخدم معادلة الطول الموجي المشتقة من تجربة يونج عندما تكون الزاوية θ صغيرة جدًّا، وعندها فإن $\sin\theta \cong \tan\theta$ إلى أي زاوية يبقى التقريب جيدًا؟

الفيزياء في حياتك

تنتج الحفر المجهرية في الأقراص المدمجة وأقراص DVD طيفًا من الضوء المنعكس من خلال الحيود، يمكن للعلماء أيضًا استخدام ظاهرة الحيود لمعرفة الأطوال الموجية للضوء ودراسة التراكيب الجزيئية مثل الحمض النووي.

تساؤلات جوهرية:

- ما العوامل التي تؤثر في عرض الهدب المركزي في حيود الشق الأحادي؟
- كيف تتشكل أنماط الحيود بوساطة محزوزات الحيود؟
- كيف تستخدم أنماط محزوزات الحيود في مطياف الكتلة؟

المفردات:

- نمط الحيود
- محزوز الحيود

تعلمت سابقًا أن لصدور الموجات الضوئية المنتظمة حيودًا عند الحواف. وقد أمكن تفسير ذلك وفقًا لمبدأ هيجنز الذي يبين أن جميع النقاط على صدور الموجات تمثل مصادر ضوئية نقطية؛ فإذا عبر الضوء المترابط بين حافتين متقاربتين ينتج **نمط حيود** يتكون من تداخلات بنائية أو هدمية يمكن جمعه على شاشة.

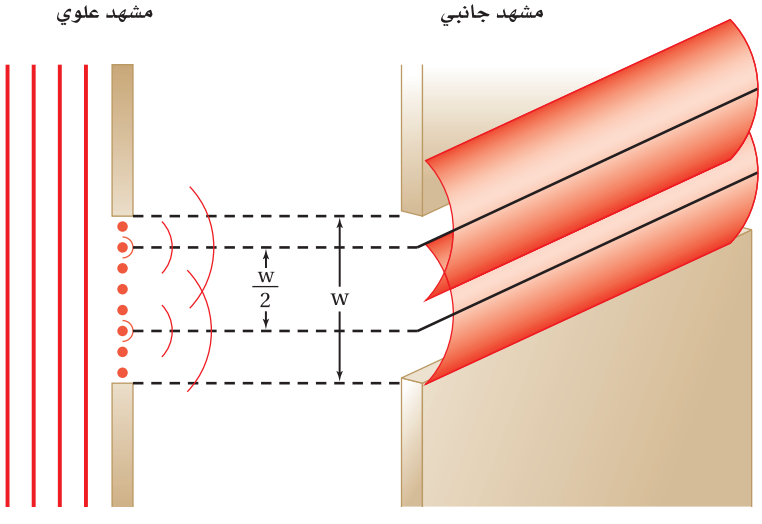
حيود الشق الأحادي Single-Slit Diffraction

عندما يمر الضوء الأزرق المترابط خلال شق أحادي اتساعه أقل من أو يساوي الطول الموجي للضوء فإن الضوء يحيد عن كلتا الحافتين، وتتكون سلسلة من الأهداب المضيئة والمعتمة على شاشة بعيدة، كما في **الشكل 8-6**. وبدلاً من الأنماط التي تفصلها مسافات متساوية والتي تتكوّن من مصدرين ضوئيين متوافقين في تجربة يونج فإن هذا النمط عبارة عن هدب مركزي عريض ومضيء مع أهداب أكثر ضيقًا وأقل إضاءة على كلا الجانبين. ويزداد عرض الهدب المركزي المضيء عندما نستخدم الضوء الأحمر بدلاً من الضوء الأزرق، وعند استخدام الضوء الأبيض يكون النمط مزيجًا من أنماط ألوان الطيف.

ولملاحظة كيف تُنتج مويجات هيجنز نمط الحيود، تخيّل شقًّا عرضه w مُجزّأ إلى عدد زوجي من نقاط هيجنز، كما في **الشكل 9-6**، على أن تعمل كل نقطة من نقاط هيجنز بوصفها مصدرًا نقطيًّا لمويجات هيجنز. قسّم الشق إلى جزأين متساويين، واختر مصدرًا واحدًا من كل جزء، على أن يفصل كل زوجين مسافة $w/2$. وهذا الزوج من المصادر سيُنتج الموجات الأسطوانية المترابطة التي ستتداخل.

أي مويجات هيجنز تتكون في النصف العلوي يتكون مقابلها مويجات هيجنز أخرى في النصف السفلي، تفصلها مسافة $w/2$ والتي قد تتداخل

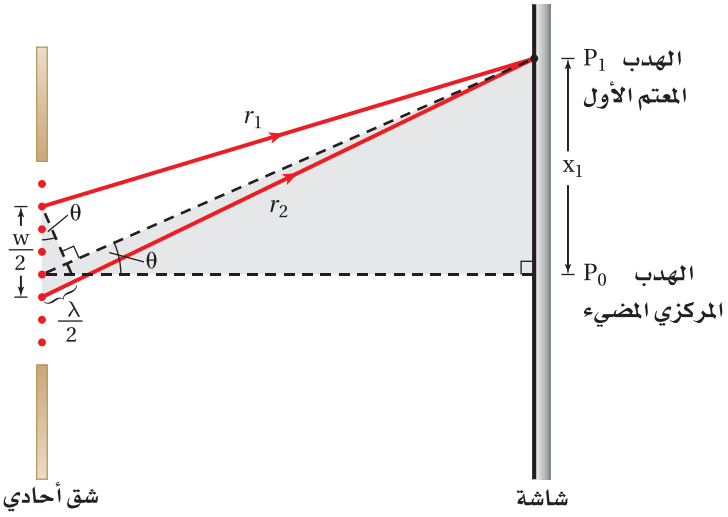
الشكل 8-6 لاحظ الهدب المركزي العريض والأهداب الضيّقة على كلا الجانبين. إن نمط حيود الشق المفرد للضوء الأحمر يكون له هدب مركزي أكثر عرضًا من الضوء الأزرق، وذلك عندما يُستعمل شق له الحجم نفسه لكلا اللونين.



الشكل 9-6 شق عرضه w جُزّئ إلى زوج من الخطوط التي تشكّل مويجات هيجنز، ويفصل بين كل زوج مسافة مقدارها $w/2$.

تداخلاً هدميًا لتكوين هدب معتم على الشاشة، وكل زوج متماثل من موجات هيجنز يتداخل تداخلاً هدميًّا عند الأهداب المعتمة، أو على العكس فقد تتداخل تداخلاً بنائيًا مكونةً أهدابًا مضيئة على الشاشة. وفي المنطقة ذات الإضاءة الخافتة التي تتوسّط الأهداب المضيئة والمعتمة يحدث تداخل هدمي جزئي.

نمط الحيود عندما يُضاء الشق الأحادي يظهر الهدب المركزي المضيء عند الموقع P_0 على الشاشة، كما في **الشكل 10–6**. ويظهر الهدب المعتم الأول عند الموقع P_1.



الشكل 10–6 يمثل هذا الرسم تحليلًا للهدب المعتم الأول؛ حيث إن البعد عن الشاشة L أكبر كثيرًا من عرض الشق w.

وفي هذا الموقع فإن أطوال المسارات r_1، r_2 لموجات هيجنز الاثنتين يختلف بعضها عن بعض بمقدار نصف طول موجي، لذا ينتج هدب معتم نتيجة للتداخل الهدمي. وتنتج الأهداب المعتمة الأخرى من مضاعفات نصف الطول الموجي للفرق بين المسارات w_1، w_2.

كما تظهر الأهداب المضيئة عندما يكون الفرق بين أطوال المسارات w_1، w_2 لموجات هيجنز طول موجي واحد أو مضاعفاته.

ويمكن تطوير معادلة لنمط الحيود الذي ينتج بوساطة الشق الأحادي مستخدمًا التبسيط نفسه الذي استخدم في حالة تداخل الشق المزدوج، بافتراض أن البعد عن الشاشة أكبر كثيرًا من w، والمسافة الفاصلة بين مصادر الموجتين المتداخلتين تساوي $w/2$. ولإيجاد المسافة المقيسة على الشاشة للهدب المعتم الأول x_1 فإن فرق المسار الآن يساوي $\lambda/2$ لأنه يحدث تداخل هدمي عند الهدب المعتم، لذا فإن $\lambda/w = x_1/L$.

من **الشكل 10–6** يمكنك ملاحظة أنه من الصعب قياس المسافة من مركز الهدب المركزي المضيء إلى الهدب المعتم الأول، والطريقة المثلى لحساب x_1 أن تقيس عرض الهدب المركزي المضيء $2x_1$. والمعادلة التالية توضح عرض الحزمة المركزية المضيئة في حيود الشق الأحادي.

عرض الهدب المركزي المضيء في حيود الشق المفرد $2x_1 = \frac{2\lambda L}{w}$

عرض الهدب المركزي المضيء يساوي حاصل ضرب ضعفي الطول الموجي في البعد عن الشاشة مقسومًا على عرض الشق.

اختصر العدد 2 من طرفي المعادلة أعلاه لتحصل على البعد بين مركز الهدب المركزي المضيء إلى حيث يتكون الهدب المعتم الأول. ويمكن إيجاد موقع الأهداب المعتمة الإضافية عن طريق دراسة اختلاف أطوال المسارات بالمقادير $\frac{3\lambda}{2}$ و $\frac{5\lambda}{2}$ وهكذا. ويُعبَّر عنها بالمعادلة $x_m = m\lambda L/w$، حيث $m = 1, 2, 3 \ldots$، مع مراعاة أن تكون الزوايا صغيرة وفقًا للتبسيط الذي تم تناوله، وعند $m=1$ تحدد هذه المعادلة موقع الهدب المعتم ذي الرتبة الأولى، أمّا الهدب المعتم ذو الرتبة الثانية فإنه يحدث عند $m=2$، وهكذا لسائر الأهداب.

مسائل تدريبية

11. يسقط ضوء أخضر أحادي اللون طوله الموجي 546 nm على شق مفرد عرضه 0.095 mm، إذا كان بعد الشق عن الشاشة يساوي 75 cm، فكم يكون عرض الهدب المركزي المضيء؟

12. سقط ضوء أصفر على شق مفرد عرضه 0.0295 mm فظهر نمط على شاشة تبعد عنه مسافة 60.0 cm، فإذا كان عرض الهدب المركزي المضيء 24.0 mm، فما مقدار الطول الموجي للضوء؟

13. سقط ضوء أبيض على شق مفرد عرضه 0.050 mm، فإذا وضعت شاشة على بعد 1.00 m منه، ووضع طالب مرشحًا أزرق– بنفسجيًّا (λ=441 nm) على الشق، ثم وضع مرشحًا أحمر (λ=622 nm)، ثم قاس الطالب عرض الهدب المركزي المضيء؛ أجب عن السؤالين التاليين:

a. أيّ المرشحين ينتج هدبًا ضوئيًّا أكثر عرضًا؟

b. ما عرض الهدب المركزي المضيء لكل من المرشحين؟

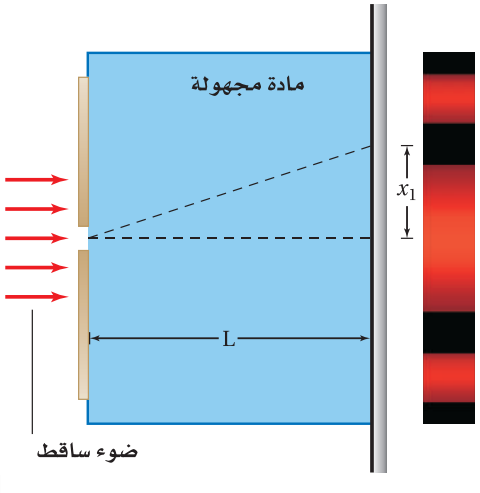
يقدم حيود الشق الأحادي تصورًا واضحًا للطبيعة الموجية للضوء، فعندما يتراوح عرض الشق بين (10 – 100) ضعفًا للطول الموجي للضوء فإن الفتحات الأكبر تكوّن ظلالاً حادة، وكان العالم إسحق نيوتن أول من لاحظ ذلك. وحيث إن الشق الاحادي يعتمد على الطول الموجي للضوء، في حالة وجود عدد كبير من الشقوق بعضها بجانب بعض فإن الحيود يعد أداة فعّالة لقياس الطول الموجي للضوء.

مسألة تحدٍّ

لديك مجموعة من المواد غير المعروفة، وقد أردت أن تتعرف نوع هذه المواد باستخدام جهاز حيود الشق المفرد، فقرّرت وضع عينة من المادة المجهولة في المنطقة بين الشق والشاشة، واستخدمت البيانات التي حصلت عليها لتحديد نوع كل مادة، وذلك بحساب معامل الانكسار. اعتمادًا على ذلك، أجب عما يأتي:

1. اكتب الصيغة العامة لمعامل الانكسار للمواد المجهولة بدلالة الطول الموجي للضوء في الفراغ λ، وعرض الشق w، والمسافة بين الشق والشاشة L، والمسافة بين الهدب المركزي المضيء والهدب المعتم الأول x_1.

2. إذا كان الطول الموجي للمصدر الذي تستخدمه 634 nm، وكان عرض الشق يساوي 0.10 mm، وكان البعد بين الشق والشاشة 1.15 m، ثم غمرت الأداة التي تستخدمها في الماء، حيث معامل الانكسار له $n_{\text{المادة}} = 1.33$، فكم تتوقع أن يكون مقدار عرض الهدب المركزي؟



محزوزات الحيود Diffraction Gratings

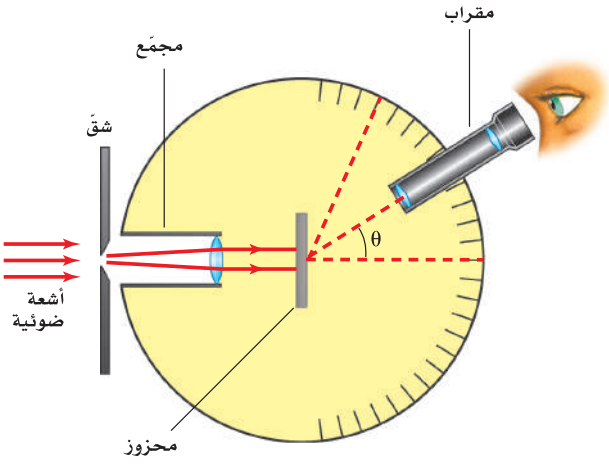
على الرغم من أن تداخل الشق المزدوج وحيود الشق المفرد يعتمدان على الطول الموجي للضوء؛ فإن محزوزات الحيود الموضحة في **الشكل 11–6** تُستخدم لجعل قياسات الطول الموجي أكثر دقة. **ومحزوز الحيود** عبارة عن أداة مكوّنة من شقوق عدة مفردة مستقيمة ومتوازية، تسبب حيود الضوء، وتكوّن نمط حيود ناتجًا عن تداخل أنماط حيود الشق الأحادي. ويمكن أن يتكوّن محزوز الحيود من 10000 شق لكل سنتمتر. لذا فإن المسافة بين الشقوق يمكن أن تكون صغيرة جدًّا تصل إلى 10^{-6} m أو 1000 nm.

أحد أنواع محزوزات الحيود يُسمّى محزوز النفاذ. ويصنع بعمل خدوش على الزجاج في صورة خطوط رفيعة جدًّا، بوساطة رأس من الألماس، والنوع الأقل تكلفة من محزوزات الحيود هو المحزوز طبق الأصل أو المحزوز الغشائي. ويُصنع بضغط صفيحة رقيقة من البلاستيك على محزوز زجاجي، وعندما تسحب صفيحة البلاستيك الرقيقة خارج المحزوز يتكوّن أثر على سطحها مماثل للمحزوز الزجاجي. وتصنع المجوهرات أحيانًا على صورة محزوزات نفاذ تنتج أطيافًا ضوئية كما في **الشكل 12a–6**.

الشكل 11–6 تستخدم محزوزات الحيود لتكوين أنماط الحيود من أجل تحليل مصادر الضوء.

وهناك نوع آخر من محزوزات الحيود يُسمّى محزوزات الانعكاس. ويُصنّع هذا النوع بوساطة حفر خطوط رفيعة جدًّا على طبقة معدنية أو على سطوح الزجاج العاكس مثل القرص المدمج CD أو DVD، كما في **الشكل 12b– 6**. فإذا وجّهت ضوءًا أحاديَّ اللون إلى DVD، فسيكوّن الضوء المنعكس نمط حيود على الشاشة. وتنتج كل من محزوزات النفاذ ومحزوزات الانعكاس أنماط حيود متشابهة، ويمكن تحليلها بالطريقة نفسها.

الشكل 12–6 جوهرة مصنوعة في صورة محزوز نفاذ تنتج أطيافًا ضوئية (**a**). تُعدّ الأقراص المدمجة محزوزة انعكاس، إذ تكوّن نمط طيف الحيود عندما يسقط عليها ضوء أبيض (**b**).



■ **الشكل 13–6** يستخدم المطياف لقياس الأطوال الموجية للضوء المنبعث من المصدر الضوئي.

قياس الطول الموجي يُسمّى الجهاز الذي تُقاس به الأطوال الموجية للضوء ويستعمل محزوز الحيود المطيافَ الضوئي، كما هو موضح في **الشكل 13–6**. حيث يبعث المصدر المراد تحليله ضوءًا يوجّه نحو الشق، وينفذ الضوء عبر الشق ليسقط على محزوز الحيود، فينتج المحزوز نمط حيود يمكن مشاهدته بمقراب المطياف.

تطبيق الفيزياء

حيود الأشعة السينية

من التجارب التي أثبتت الخصائص الموجية للجسيمات (الالكترونات). وتستخدم حاليًا لدراسة الخصائص البنيوية للبلورات، والأغشية الرقيقة والمواد الثانوية.

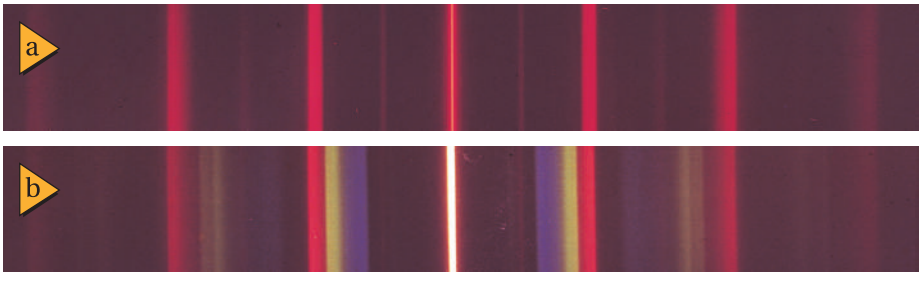
إن نمط الحيود المتكوّن بوساطة محزوز الحيود عبارة عن أهداب مضيئة ضيّقة تفصلها مسافات متساوية، كما في **الشكل 14–6**. ويُنتج العدد الأكبر من الشقوق لكل وحدة طول للمحزوز أهدابًا أكثر ضيقًا في نمط الحيود، ولذا يمكن قياس المسافة بين الخطوط المضيئة باستخدام المطياف بدقة أكبر، مقارنة باستعمال الشق المزدوج.

وتكون الزاوية في محزوز الحيود θ كبيرة، ولذا لا يُطبّق التبسيط الخاص بالزاوية الصغيرة. ويمكن إيجاد الطول الموجي بقياس الزاوية θ بين الهدب المركزي المضيء والهدب المضيء ذي الرتبة الأولى.

الطول الموجي من محزوز الحيود $\lambda = d \sin \theta$

الطول الموجي للضوء يساوي المسافة الفاصلة بين الشقوق مضروبة في جيب الزاوية، حيث يتكوّن الهدب المضيء ذو الرتبة الأولى.

ويحدث التداخل البنائي بوساطة محزوز الحيود عند زوايا على كلا الجانبين للخط المركزي المضيء، ويعبَّر عنه من خلال المعادلة $m\lambda = d \sin \theta$، حيث $m = 0, 1, 2 \ldots$، ويحدث الهدب المضيء المركزي عند m=0.

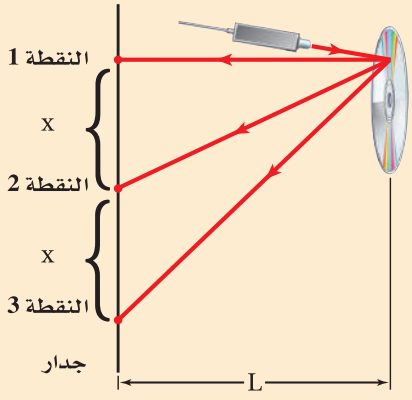


■ **الشكل 14–6** يستعمل المحزوز لإنتاج أنماط الحيود للضوء الأحمر (a) وللضوء الأبيض (b).

مثـــــال 3

استخدام قرص DVD على صورة محزوز حيود لاحظ طالب أن طيفًا جميلاً ينعكس عن قرص DVD، فعندما أسقط شعاع ضوئي من مصدر ضوئي أخضر اللون على قرص الـ DVD وجد ثلاث بقع مضيئة تنعكس على الحائط. وتشير المعلومات الملصقة على المصدر الضوئي أن الطول الموجي للضوء الذي يصدره 532 nm، وقد وجد الطالب أن الفراغات بين النقاط تساوي 1.29 m على الحائط الذي يبعد عنهما مسافة 1.25 m، ما مقدار التباعد بين الفراغات بين الصفوف على قرص الـ DVD؟

1 تحليل المسألة ورسمها



- ارسم رسمًا تخطيطيًّا للتجربة، على أن تبين قرص الـ DVD على أنه محزوز، وتبين البقع على الحائط.

المعلوم	المجهول
$x = 1.29\ \text{m}$	$d = ?$
$L = 1.25\ \text{m}$	
$\lambda = 532\ \text{nm}$	

2 ايجاد الكمية المجهولة

أوجد الزاوية المحصورة بين البقعة المركزية المضيئة وبقعة أخرى تليها مستخدمًا $\tan\theta = x/L$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{x}{L}\right)$$

بالتعويض عن $x = 1.29\ \text{m}$, $L = 1.25\ \text{m}$

$$= \tan^{-1}\left(\frac{1.29\ \text{m}}{1.25\ \text{m}}\right) = 45.9^\circ$$

استعمل الطول الموجي للضوء الساقط على محزوز الحيود، وحلّ المسألة بالنسبة للمتغير d.

$$\lambda = d \sin\theta$$

$$d = \frac{\lambda}{\sin\theta}$$

بالتعويض عن $\theta = 45.9^\circ$, $\lambda = 532 \times 10^{-9}\ \text{m}$

$$= \frac{532 \times 10^{-9}\ \text{m}}{\sin 45.9^\circ}$$

$$= 7.41 \times 10^{-7}\ \text{m}$$

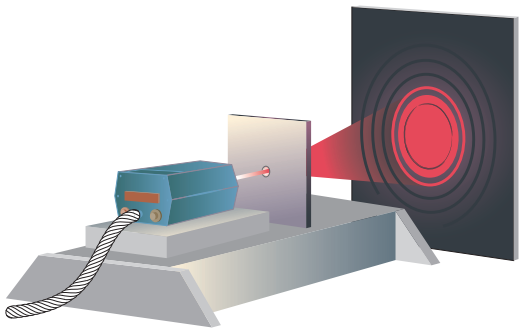
3 تقويم الجواب

- **هل الوحدات صحيحة؟** الإجابة بوحدة m، وهي وحدة صحيحة بالنسبة للمسافة الفاصلة.
- **هل الجواب منطقي؟** عندما يكون لـ x و L المقدار نفسه تكون قيمة d قريبة من قيمة λ.

مسائل تدريبية

14. يُضاء محزوز حيود تفصل بين شقوقه مسافة $8.60\times10^{-7}\ \text{m}$ بوساطة ضوء بنفسجي طوله الموجي 421 nm، فإذا كان البعد بين الشاشة والمحزوز 80.0 cm فما مقدار المسافات الفاصلة بين الأهداب في نمط الحيود؟

15. يشعّ ضوء أزرق على قرص DVD في المثال 3، فإذا كانت المسافات الفاصلة بين النقاط المتكوّنة على الحائط الذي يبعد 0.65 m تساوي 58.0 cm، فما مقدار الطول الموجي للضوء؟



الشكل 15–6 نمط الحيود للثقب الدائري الذي ينتج حلقات مضيئة ومعتمة متعاقبة.

في الأغشية الرقيقة، يمكن رؤية نمط التداخل ضمن زاوية نظر صغيرة، عند النظر رأسيًّا من فوق الغشاء. وهذا هو الحال بالنسبة لفراشة المورفو الزرقاء، ذات نمط التداخل المتلألئ، ولن يحدث ذلك ما لم تكن طبقة القشور الداخلية تشبه طبقة الزجاج؛ إذ تعمل طبقة القشور الداخلية عمل محزوز الحيود، وتسبِّب انتشار نمط تداخل الضوء الأزرق المتلألئ؛ لينتج نمط حيود بزاوية نظر أوسع. ويعتقد العلماء أن ذلك يجعل فراشة المورفو أكثر وضوحًا للزوج المحتمل.

6-2 مراجعة

16. **المسافة بين الأهداب المعتمة ذات الرتبة الأولى** يسقط ضوء أخضر أحادي اللون طول موجته 546 nm على شق مفرد عرضه 0.080 mm. ويقع الشق على بعد 68.0 cm من شاشة. ما المسافات الفاصلة بين الأهداب المعتمة على جانبي الهدب المركزي المضيء؟

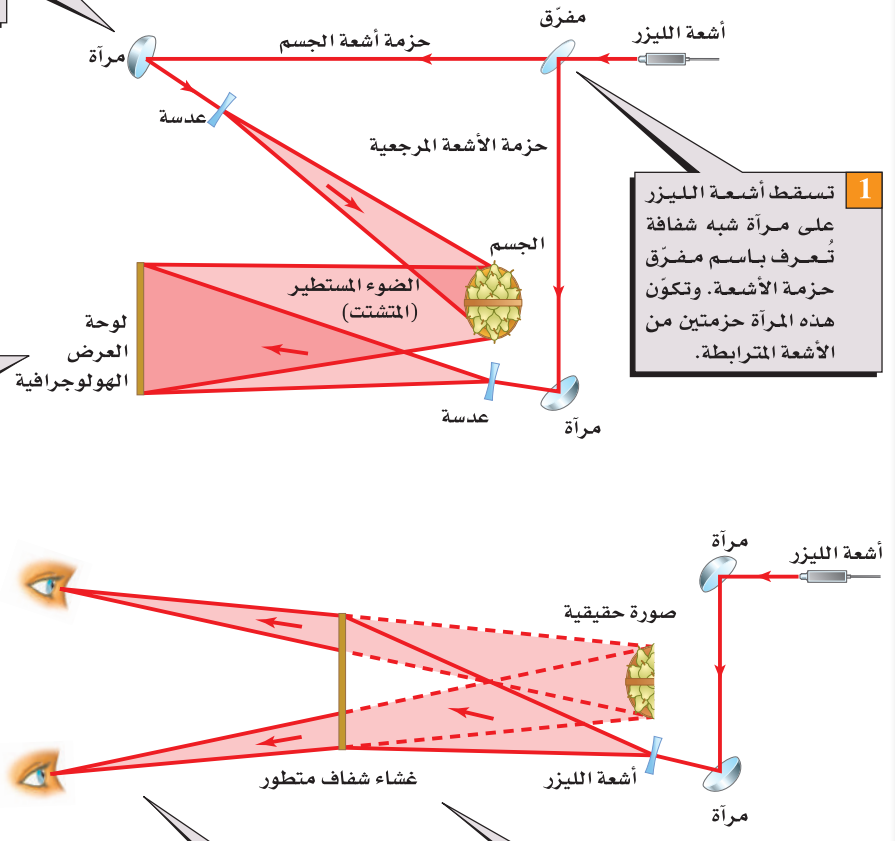
17. **أنماط الحيود** قطعة كرتون تحتوي شقوقًا ضيّقة قريب بعضها من بعض وتفصلها مسافات متساوية، أضيئت الشقوق بضوء أحمر أحادي اللون، وعند وضع قطعة من الورق الأبيض بعيدًا عن الشقوق ظهرت أهداب مضيئة ومعتمة على الورقة. وضّح بالرسم النمط الممكن رؤيته على الشاشة.

18. **التفكير الناقد** شاهدت جهاز المطياف، إلا أنك لا تعلم ما إذا كان الطيف الناتج عنه باستخدام منشور أو محزوز. كيف تعرف ذلك من خلال النظر إلى طيف الضوء الأبيض؟

How it Works كيف يعمل

Holography الهولوجرام؟

يُعدّ الهولوجرام أحد أشكال التصوير الفوتوجرافي الذي يعطي صورة ثلاثية الأبعاد. لقد صنع دينس جابور أول جهاز هولوجرام عام 1947، وبقي التصوير الهولوجرافي غير عملي إلى أن أُخترع ليزر الغاز في عام 1960. ويستخدم الهولوجرام في بطاقات الاعتماد البنكية للمساعدة على منع عمليات التزييف، وهناك تجارب لاستخدامه في تخزين البيانات الفائقة الكثافة. فكيف يصنع الهولوجرام؟



2 توجه حزمة الأشعة المرجعية وأشعة الجسم بوساطة مرايا، ويتباعد بعضها عن بعض باستخدام العدسات

1 تسقط أشعة الليزر على مرآة شبه شفافة تُعرف باسم مفرّق حزمة الأشعة. وتكوّن هذه المرآة حزمتين من الأشعة المترابطة.

3 يتشتت الضوء نتيجة الانعكاس عن الجسم - سلة الكمثرى في هذه الحالة - ويتداخل مع حزمة الأشعة المرجعية. ويسجّل نمط التداخل المتكوّن من حزمتي الأشعة في لوحة العرض الهولوجرافية.

4 عندما يوضع الغشاء الشفاف للوحة الأفلام المتطورة في مسار حزمة أشعة الليزر المتباعدة، يكوّن الضوء المار خلال الغشاء صورة تقديرية ثلاثية الأبعاد للجسم الأصلي بحزم ألوان قوس المطر.

5 يشاهد الشخص الصورة كما لو كان يشاهد الجسم الأصلي من خلال النافذة؛ فإذا حرّك الشخص رأسه تغير المنظر.

التفكير الناقد

1. **استنتج** يُسجّل الهولوجرام النمط المعقّد لأهداب التداخل البنائي والتداخل الهدمي. فلماذا تفترض أن الحصول على نتائج جيدة يتطلب سطح اهتزاز معزولًا؟
2. **استخدام التوضيح العلمي** حدّد أين تحدث الخصائص الموجية التالية في الرسوم البيانية ووضحها: الانعكاس، والانكسار، والتداخل.

الفصل 6
دليل الدراسة

6–1 التداخل Interference

المفردات

- الضوء غير المترابط
- الضوء المترابط
- أهداب التداخل
- الضوء الأحادي اللون
- التداخل في الأغشية الرقيقة

الفكرة الرئيسة: يحدث تداخل الموجات الضوئية عند تراكب الموجات الناتجة عن مصادر الضوء المترابط.

- ضوء بصدور موجية غير متزامنة، ويتكون من موجات مختلفة في التطور.
- ينتج نمط التداخل من تراكب الموجات الضوئية الناتجة عن مصادر الضوء المترابط فقط.
- يبرهن التداخل أن للضوء خصائص موجيّة.
- ينتج الضوء المار خلال شقين ضيقين متقاربين ـ نمطًا من الأهداب المعتمة والمضيئة على الشاشة تُسمّى أهداب التداخل.
- يمكن استخدام أنماط التداخل لقياس الطول الموجي للضوء.

$$\lambda = \frac{xd}{L}$$

- يمكن أن تنتج أنماط التداخل عندما ينتج الضوء المترابط عند حدّ الانكسار للغشاء الرقيق.

6–2 الحيود Diffraction

المفردات

- نمط الحيود
- محزوز الحيود

الفكرة الرئيسة: عند عبور الضوء المترابط من خلال شق ضيق فإن موجاته تتداخل تداخلات بنائية أو هدمية يمكن جمعها على شاشة.

- يحيد الضوء المار خلال شق ضيّق، أو ينتشر بعيدًا عن مسار الخط المستقيم، ويُنتج نمط حيود على الشاشة.
- نمط الحيود من الشق المفرد يمثّل حزمة مركزية مضيئة عرضها يساوي المسافة بين الحزمة المعتمة الأولى على كلا جانبي الحزمة المركزية المضيئة.

$$2x_1 = \frac{2\lambda L}{w}$$

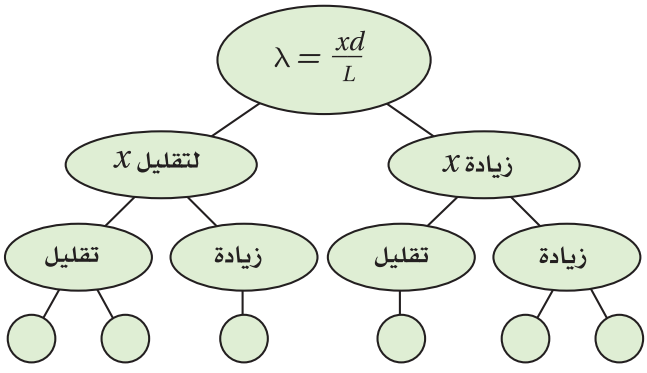
- تتكوّن محزوزات الحيود من عدد كبير من الشقوق القريبة جدًّا بعضها من بعض، وتنتج خطوطًا ضيقة ناتجة عن تراكب أنماط التداخل للشق المفرد ولشقوق المحزوز جميعها.
- يمكن أن تستخدم محزوزات الحيود لقياس الطول الموجي للضوء وبدقة كبيرة، أو أن تُستخدم لتحليل الضوء المتكوّن من أطوال موجية مختلفة.

$$\lambda = d \sin\theta$$

الفصل 6
التقويم

خريطة المفاهيم

19. ضوء أحادي اللون طوله الموجي λ يضيء شقين في تجربة يونج. فإذا كانت المسافة الفاصلة بين الشقين d. وتكوّن النمط على شاشة تبعد مسافة L عن الشقين. أكمل خريطة المفاهيم التالية مستخدمًا الرموز λ و L و d.



إتقان المفاهيم

20. لماذا يُعدّ استعمال الضوء الأحادي اللون مهمًّا في تكوين نمط التداخل في تجربة التداخل ليونج؟

21. وضّح لماذا لا يمكن استعمال موقع الهدب المركزي المضيء لنمط تداخل الشق المزدوج لحساب الطول الموجي للموجات الضوئية؟

22. صف كيف يمكنك استعمال الضوء ذي الطول الموجي المعلوم لإيجاد المسافة بين الشقين؟

23. أُسقط ضوء أبيض نحو محزوز حيود. هل تكون الفراغات بين الخطوط الحمراء الناتجة متقاربة أم متباعدة أكثر مقارنة بالخطوط البنفسجية الناتجة؟ ولماذا؟

24. لماذا يكون المقراب ذو القطر الصغير غير قادر على التمييز بين صورتين لنجمين متقاربين جدًّا؟

25. ما لون الضوء المرئي الذي ينتج خطًّا مشعًّا قريبًا جدًّا من الهدب المركزي المضيء بالنسبة لمحزوز حيود معين؟

تطبيق المفاهيم

26. حدّد لكل من الأمثلة التالية ما إذا كان اللون ناتجًا عن التداخل في الأغشية الرقيقة، أم عن الانكسار، أم نتيجة وجود الأصباغ.

a. فقاقيع الصابون **c.** غشاء زيتي
b. بتلة الوردة **d.** قوس المطر

27. صف التغيرات في نمط حيود الشق المفرد عندما يتناقص عرض الشق.

28. **معرض العلوم** أحد المعروضات في معرض العلوم عبارة عن غشاء كبير جدًّا من الصابون ذي عرض ثابت تقريبًا. ويُضاء بوساطة ضوء طوله الموجي 432 nm، ويظهر السطح كاملاً تقريبًا على صورة ظل جميل أرجواني اللون. فماذا تشاهد في الحالات التالية؟

a. عندما يتضاعف سمك الغشاء.
b. عندما يزداد سمك الغشاء بمقدار نصف الطول الموجي للضوء المشع.
c. عندما يتناقص سمك الغشاء بمقدار ربع الطول الموجي للضوء المشع.

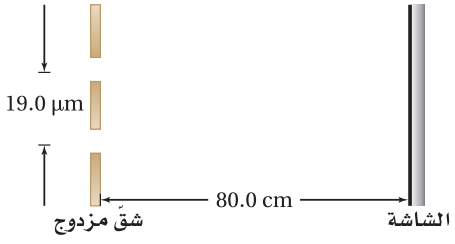
29. **تحدي مؤشر الليزر** إذا كان لديك مؤشرا ليزر، أحدهما أحمر والآخر أخضر، واختلف أحمد وفيصل في تحديد أيهما له طول موجي أكبر، ويصرّ أحمد على أن اللون الأحمر طوله الموجي أكبر، بينما فيصل متأكد أن الضوء الأخضر له طول موجي أكبر. فإذا كان لديك محزوز حيود فصف الدليل الذي يمكن إثباته بوساطة هذه الأداة، وكيف يمكنك توضيح النتائج التي توصّلت إليها لكل من أحمد وفيصل لحل الخلاف بينهما.

تقويم الفصل 6

إتقان حل المسائل

6–1 التداخل

30. يسقط ضوء على شقين متباعدين بمسافة 19.0 μm، ويبعدان عن الشاشة 80.0 cm، كما في **الشكل 15–6**. فإذا كان الهدب المضيء ذو الرتبة الأولى يبعد 1.90 cm عن الهدب المركزي المضيء فما مقدار الطول الموجي للضوء؟



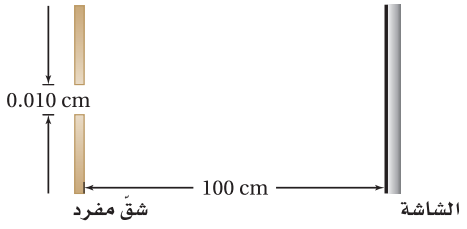
الشكل 15–6

31. **البقع النفطية** خرج أسامة وعمر في نزهة قصيرة بعد المطر، ولاحظا طبقة نفطية رقيقة معامل انكسارها $n=1.45$ على سطح بركة صغيرة، تنتج ألوانًا مختلفة. ما أقل سمك لطبقة النفط، عندما تكوّن تداخلاً بنائيًّا لضوء طوله الموجي 545 nm؟

32. وجّه علي مؤشر ليزر أحمر على ثلاث مجموعات من الشقوق المزدوجة المختلفة. فإذا كانت المسافة الفاصلة بين الشقين في المجموعة A 0.150 mm وبعد الشاشة عن الشقين 0.60 m، أما في المجموعة B فكانت المسافة الفاصلة بين الشقين 0.175 mm وبعد الشاشة عنهما 0.80 m، وفي المجموعة C كانت المسافة الفاصلة بين الشقين 0.150 mm وبعد الشاشة عنهما 0.80 m، فصنّف المجموعات الثلاث اعتمادًا على المسافة الفاصلة بين الأهداب المركزية المضيئة والأهداب المضيئة ذات الرتبة الأولى، وذلك من المسافة الفاصلة الأقل إلى الأكبر.

6–2 الحيود

33. يعبر ضوء أحادي اللون خلال شق مفرد عرضه 0.010 cm، ثم يسقط على شاشة تبعد عنه مسافة 100 cm، كما في **الشكل 16–6**. فإذا كان عرض الهدب المركزي المضيء 1.20 cm، فما مقدار الطول الموجي للضوء؟



الشكل 16–6

34. يمرّ ضوء طوله الموجي 4.5×10^{-5} cm خلال شق مفرد ويسقط على شاشة تبعد 100 cm، فإذا كان عرض الشق 0.015 cm، فما مقدار المسافة بين مركز النمط والهدب المعتم الأول؟

35. يمر ضوء أحادي اللون طوله الموجي 425 nm خلال شق مفرد، ويسقط على شاشة تبعد 75 cm، فإذا كان عرض الحزمة المركزية المضيئة 0.60 cm، فما عرض الشق؟

36. **المطياف** يستعمل في جهاز المطياف محزوز حيود يحوي/cm 12,000 خط، أوجد الزوايا التي توجد فيها الأهداب المضيئة ذات الرتبة الأولى لكل من الضوء الأحمر الذي طوله الموجي 632 nm، وللضوء الأزرق الذي طوله الموجي 421 nm.

مراجعة عامة

37. يوضع طلاء مانع للانعكاس معامل انكساره $n=1.2$ على عدسة، فإذا كان سمك الطلاء 125 nm، فما لون/ ألوان الضوء الناتج عندما يحدث تداخل هدّام بصورة كاملة؟ *مساعدة: افترض أن العدسة مصنوعة من الزجاج.*

تقويم الفصل 6

التفكير الناقد

38. **تطبيق المفاهيم** سقط ضوء أصفر على محزوز حيود، فأصبح بمقدورك أن ترى ثلاث بقع على الشاشة خلف المحزوز: إحداها عند الدرجة صفر حيث لا يحدث الحيود، والثانية عند $+30^\circ$، والثالثة عند -30°، إذا أسقطت الآن ضوءًا أزرق متماثل الشدة في اتجاه الضوء الأصفر نفسه، فما نمط البقع التي ستراها على الشاشة الآن؟

39. **تطبيق المفاهيم** يمر ضوء أزرق طوله الموجي λ عبر شق مفرد عرضه w ، حيث يظهر نمط الحيود على شاشة. فإذا استبدلت الآن بالضوء الأزرق ضوءًا أخضر طوله الموجي $1.5\,\lambda$، فكم يجب أن يكون عرض الشق حتى تسترجع النمط الأصلي؟

الكتابة في الفيزياء

40. ابحث، ثم صف مساهمات العالم توماس يونج في الفيزياء. وقوم تأثير أبحاثه على الفكر العلمي حول طبيعة الضوء.

41. ابحث ثم فسر دور الحيود في كل من الطب وعلم الفلك. صف على الأقل تطبيقين لكل منهما.

مراجعة تراكمية

42. ما الأطوال الموجية لموجات الميكروويف في فرن إذا كان تردّدها 2.4 GHz؟

43. مرآة مقعرة نصف قطرها 48.0 cm، وضع جسم طوله 2.0 cm على بعد 12.0 cm من المرآة. احسب بُعد الصورة وطولها.

44. وضعت شمعة طولها 2.00 cm على بُعد 7.50 cm من عدسة محدبة بعدها البؤري 21.0 cm، استخدم المعادلة العامة للعدسات الرقيقة لحساب بُعد الصورة وطولها.

اختبار مقنن

أسئلة اختيار من متعدد

اختر رمز الإجابة الصحيحة في كل مما يأتي:

1. تبدو ألوان الغشاء الرقيق مثل فقاقيع الصابون أو الزيت على الماء كأنها تتغير وتتحرك؛ لأن:

(A) موجات الحمل الحراري في الهواء التي تلي الغشاء الرقيق تشوّه الضوء.

(B) سمك الغشاء عند أي موقع محدّد يتغير مع الزمن.

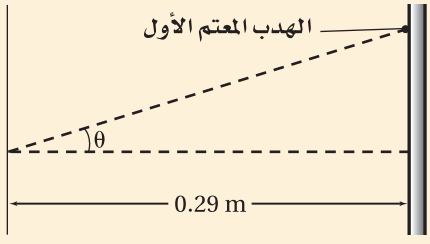
(C) الأطوال الموجية في ضوء الشمس تتغير مع الزمن.

(D) رؤيتك تتغير على نحو قليل مع الزمن.

2. يشع ضوء طوله الموجي 410 nm خلال شق، ثم يسقط على شاشة مسطحة ومستوية، كما في الشكل أدناه. فإذا كان عرض الشق 3.8×10^{-6} m، فما مقدار عرض الهدب المركزي المضيء؟

(A) 0.024 m (C) 0.048 m

(B) 0.031 m (D) 0.063 m



3. ما مقدار الزاوية θ للأهداب المعتمة الأولى في السؤال 2؟

(A) 3.1° (C) 12.4°

(B) 6.2° (D) 17°

4. محزوز حيود المسافة الفاصلة بين شقوقه 0.055 mm، ما زاوية الخط المضيء ذي الرتبة الأولى لضوء طوله الموجي 650 nm؟

(A) 0.012° (C) 1.0°

(B) 0.68° (D) 11 °

5. شعاع ليزر طوله الموجي 638 nm، يضيء شقين ضيقين. فإذا كانت الهدبة ذات الرتبة الثالثة من النمط الناتج تبعد 7.5 cm عن الهدب المركزي المضيء، وكان بعد الشاشة عنهما 2.475 m، فما المسافة التي تفصل بين الشقين؟

(A) 5.8×10^{-8} m (C) 2.1×10^{-5} m

(B) 6.3×10^{-7} m (D) 6.3×10^{-5} m

6. وضعت شاشة مسطّحة على بعد 4.200 m من زوج من الشقوق، وأُضيئ الشقان بحزمة ضوء أحادي اللون. فإذا كانت المسافة الفاصلة بين الهدب المركزي المضيء والهدب المضيء ذي الرتبة الثانية 0.082 m، وكانت المسافة الفاصلة بين الشقوق 5.3×10^{-5} m ، فحدّد الطول الموجي للضوء.

(A) 2.6×10^{-7} m (C) 6.2×10^{-7} m

(B) 5.2×10^{-7} m (D) 1.0×10^{-6} m

الأسئلة الممتدة

7. لمحزوز حيود 6000 شق في كل cm، وينتج نمط حيود له خط مضيء ذو رتبة أولى عند زاوية مقدارها 20° من الخط المركزي المضيء. ما مقدار الطول الموجي للضوء؟

إرشاد

اطلب المساعدة دون خجل أو تردد

إذا كنت تتدرب على إجابة اختبار، وكانت لديك صعوبة في فهم السؤال أو الوصول إلى الإجابة، فاسأل أحد المشرفين على الاختبار ليساعدك. وعليك أن تطلب المساعدة قبل بدء الاختبار لا في أثنائه.

مصادر تعليمية للطالب

- دليل الرياضيات
- الجداول
- المصطلحات

I. الرموز symbols

Δ	التغير في الكمية	$a \times b$	a مضروبة في b
$\pm$	زائد أو ناقص الكمية	ab	
$\propto$	يتناسب مع	$a(b)$	
$=$	يساوي	$a \div b$	a مقسومة على b
$\approx$	تقريبًا يساوي	a/b	
$\cong$	تقريبًا يساوي	$\frac{a}{b}$	
$\leq$	أقل من أو يساوي	$\sqrt{a}$	الجذر التربيعي لـ a
$\geq$	أكبر من أو يساوي	$\lvert a \rvert$	القيمة المطلقة لـ a
$<<$	أقل جدًّا من	$\log_b x$	لوغاريتم x بالنسبة إلى الأساس b
$\equiv$	يعرف كـ		

II. القياسات والأرقام المعنوية Measurement and Significant Digits

ارتباط الرياضيات مع الفيزياء تعتبر الرياضيات لغة الفيزياء؛ فباستعمال الرياضيات يستطيع الفيزيائيون وصف العلاقات بين مجموعة من القياسات عن طريق المعادلات. ويرتبط كل قياس مع رمز معين في المعادلات الفيزيائية، وتسمى هذه الرموز المتغيرات.

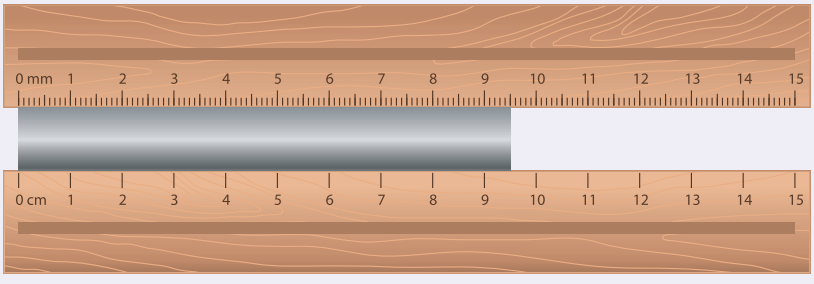
الأرقام المعنوية Significant Digits

إن جميع القياسات تقريبية وتُمثل بأرقام معنوية، بحيث يعبر عدد الأرقام المعنوية عن الدقة في القياس. وتعتبر الدقة مقياسًا للقيمة الحقيقية. ويعتمد عدد الأرقام المعنوية في القياس على الوحدة الأصغر في أداة القياس. ويكون الرقم الأبعد إلى اليمين في نتيجة القياس مقدَّرًا.

مثال: ما الرقم المقدَّر لكل من مسطرة قياس موضحة في الشكل أدناه والمستخدمة لقياس طول القضيب الفلزي؟

باستعمال أداة القياس السفلية نجد أن طول القضيب الفلزي بين 9 cm و 10 cm لذلك فإن القياس سوف يقدَّر إلى أقرب جزء عشري من السنتمتر. وإذا كان الطول المقيس يقع تمامًا عند 9 cm أو 10 cm فإنه يجب عليك تسجيل نتيجة القياس 9.0 cm أو 10.0 cm.

وعند استعمال أداة القياس العليا. فإن نتيجة القياس تقع بين 9.5 cm و 9.6 cm، لذلك فإن القياس سوف يقدر إلى أقرب جزء مئوي من السنتمتر، وإذا كان الطول المقيس يقع تمامًا عند 9.5 cm أو 9.6 cm، فيجب عليك تسجيل القياس 9.50 cm أو 9.60 cm



كل الأرقام غير الصفرية في القياسات أرقام معنوية. وبعض الأصفار أرقام معنوية، وبعضها ليست معنوية، وكل الأرقام من اليسار وحتى الرقم الأخير من اليمين والمتضمنة الرقم الأول غير الصفري تعتبر أرقامًا معنوية.

استعمل القواعد الآتية عند تحديد عدد الأرقام المعنوية:

1. الأرقام غير الصفرية أرقام معنوية.
2. الأصفار الأخيرة بعد الفاصلة العشرية أرقام معنوية.
3. الأصفار بين رقمين معنويين أرقام معنوية.
4. الأصفار التي تستعمل بهدف حجز منازل فقط هي أرقام ليست معنوية.

مثال: حدّد عدد الأرقام المعنوية في كل من القياسات الآتية:

5.0 g يتضمن رقمين معنويين — استعمال القاعدتين 1و2

14.90 g يتضمن أربعة أرقام معنوية — استعمال القاعدتين 1و2

0.0 يتضمن رقمًا معنويًّا واحدًا — استعمال القاعدتين 2و4

300.00 mm يتضمن خمسة أرقام معنوية — استعمال القواعد 1و2و3

5.06 s يتضمن ثلاثة أرقام معنوية — استعمال القاعدتين 1و3

304 s يتضمن ثلاثة أرقام معنوية — استعمال القاعدتين 1و3

0.0060 mm يتضمن رقمين معنويين (6 والصفر الأخير) — استعمال القواعد 1و2و4

140 mm يتضمن رقمين معنويين (1و4 فقط) — استعمال القاعدتين 1و4

مسائل تدريبية

1. حدد عدد الأرقام المعنوية في كل من القياسات الآتية:

a. 1405 m
b. 2.50 km
c. 0.0034 m
d. 12.007 kg
e. 5.8×10^{6} kg
f. 3.03×10^{-5} ml

هناك حالتان تُعتبر الأعداد فيهما دقيقة:

1. الأرقام الحسابية، وهي تتضمن عددًا لا نهائيًّا من الأرقام المعنوية.
2. معاملات التحويل، وهي تتضمن عددًا لا نهائيًّا من الأرقام المعنوية.

التقريب Rounding

يمكن تقريب العدد إلى خانة (منزلة) معينة (مثل المنزلة المئوية أو العشرية) أو إلى عدد معين من الأرقام المعنوية. وحتى تقوم بذلك حدّد المنزلة المراد تقريبها، ثم استعمل القواعد الآتية:

1. عندما يكون الرقم الواقع عن يمين العدد المراد التقريب إليه أقل من 5، فإنه يتم إسقاطه هو والأرقام الأخرى التي تليه، ومن ثَم يبقى الرقم الأخير في العدد المقرّب دون تغيير.
2. عندما يكون الرقم الواقع عن يمين العدد المراد التقريب إليه أكبر من 5 فإنه يتم إسقاطه هو والأرقام الأخرى التي تليه، ومن ثم يزيد الرقم الأخير في العدد المقرّب بمقدار واحد.
3. عندما يكون الرقم الواقع عن يمين العدد المراد التقريب إليه هو 5 متبوعًا برقم غير صفري، فإنه يتم إسقاط ذلك الرقم والأرقام الأخرى التي تليه، ومن ثم يزيد الرقم الأخير في العدد المقرَّب بمقدار واحد.
4. إذا كان الرقم الواقع عن يمين الرقم المعنوي الأخير المراد التقريب إليه يساوي 5 ومتبوعًا بالصفر، أو لا يتبعه أي أرقام أخرى، فانظر إلى الرقم المعنوي الأخير، فإذا كان فرديًّا فزده بمقدار واحد، وإذا كان زوجيًّا فلا تزده.

أمثلة: قرّب الأرقام الآتية للعدد المعيّن إلى الأرقام المعنوية:

8.7645 تقريبه إلى ثلاثة أرقام معنوية ينتج 8.76	استعمال القاعدة 1
8.7676 تقريبه إلى ثلاثة أرقام معنوية ينتج 8.77	استعمال القاعدة 2
8.7519 تقريبه إلى رقمين معنويين ينتج 8.8	استعمال القاعدة 3
92.350 تقريبه إلى ثلاثة أرقام معنوية ينتج 92.4	استعمال القاعدة 4
92.25 تقريبه إلى ثلاثة أرقام معنوية ينتج 92.2	استعمال القاعدة 4

مسائل تدريبية

2. قرّب كل رقم إلى عدد الأرقام المعنوية المتضمنة بين الأقواس الآتية:

a. 1405 m (2)　　**c.** 0.0034 m (1)

b. 2.50 km (2)　　**d.** 12.007 kg (3)

إجراء العمليات الحسابية باستعمال الأرقام المعنوية Operations with Significant Digits

عندما تستعمل الآلة الحاسبة نفّذ العمليات الحسابية بأكبر قدر من الدقة التي تسمح بها الآلة الحاسبة، ثم قرب النتيجة إلى العدد الصحيح من الأرقام المعنوية. يعتمد عدد الأرقام المعنوية في النتيجة على القياسات وعلى العمليات التي تجريها.

الجمع والطرح Addition and subtraction

انظر إلى الأرقام عن يمين الفاصلة العشرية، وقرّب النتيجة إلى أصغر قيمة دقيقة بين القياسات، وهو العدد الأصغر من الأرقام الواقعة عن يمين الفاصلة العشرية.

مثال: اجمع الأعداد 1.456 m ، 4.1 m و 20.3 m

القيم الأقل دقة هي 4.1 m و 20.3 m؛ لأن كليهما يتضمن رقمًا معنويًّا واحدًا فقط يقع عن يمين الفاصلة العشرية.

اجمع الأعداد

$$\begin{array}{r} 1.456\ \text{m} \\ 4.1\ \text{m} \\ +20.3\ \text{m} \\ \hline 25.856\ \text{m} \end{array}$$

وفي النتيجة تكون دقة حاصل عملية الجمع هي دقة الرقم المُضاف الأقل دقة.

قرب النتيجة إلى القيمة الكبرى 25.9m

الضرب و القسمة Multiplication and division

حدد عدد الأرقام المعنوية في كل عملية قياس. ونفذ العملية الحسابية، ثم قرّب النتيجة بحيث يكون عدد الأرقام المعنوية فيها مساويًا لتلك الموجودة في قيمة القياس ذي الأرقام المعنوية الأقل.

مثال: أوجد حاصل ضرب الكميتين 20.1 m و 3.6 m

$$(20.1\ \text{m})(3.6\ \text{m}) = 72.36\ \text{m}^2$$

القيمة الصغرى الدقيقة هي 3.6 m التي تتضمن رقمين معنويين. وحاصل عملية الضرب يجب أن يتضمن فقط عدد الأرقام المعنوية في العدد ذي الأرقام المعنوية الأقل.

قرّب النتيجة إلى رقمين معنويين 72 m

مسائل تدريبية

3. بسّط التعابير الرياضية الآتية مستعملًا العدد الصحيح من الأرقام المعنوية:

a. $2.33\ \text{km} + 3.4\ \text{km} + 5.012\ \text{km}$

b. $45\ \text{g} - 8.3\ \text{g}$

c. $3.40\ \text{cm} \times 7.125\ \text{cm}$

d. $54\ \text{m} \div 6.5\ \text{s}$

المجاميع Combination

عند إجراء الحسابات التي تتضمن عمليات الجمع والطرح والضرب والقسمة استعمل قاعدة عملية الضرب/ عملية القسمة.

أمثلة:

$$d = 19\ m + (25.0\ m/s)(2.50\ s) + \frac{1}{2}(-10.0\ m/s^2)(2.50)^2$$

$$= 5.0 \times 10^1\ m$$

المقدار 19 m يتضمن رقمين معنويين فقط، لذلك يجب أن تتضمن النتيجة رقمين معنويين.

$$m\ (\text{الميل}) = \frac{70.0\ m - 10.0\ m}{29\ s - 11\ s}$$

$$= 3.3\ m/s$$

29 s و 11 s يتضمن كل منهما رقمين معنويين فقط، لذلك يجب أن تتضمن الإجابة رقمين معنويين فقط.

الحسابات المتعددة الخطوات Multistep Calculation

لا تُجرِ عملية تقريب الأرقام المعنوية خلال إجراء الحسابات المتعددة الخطوات. وبدلاً من ذلك قم بالتقريب إلى العدد المعقول من المنازل العشرية، بشرط ألا تفقد دقة إجابتك. وعندما تصل إلى الخطوة النهائية في الحل فعليك أن تقرّب الجواب إلى العدد الصحيح من الأرقام المعنوية.

مثال:

$$F = \sqrt{(24\ N)^2 + (36\ N)^2}$$

$$= \sqrt{576\ N^2 + 1296\ N^2}$$

$$= \sqrt{1872\ N^2}$$

$$= 43\ N$$

لا تجر التقريب إلى $580N^2$ و $1300N^2$

لا تجر التقريب إلى $1800N^2$

النتيجة النهائية، هنا يجب أن نقرّب إلى رقمين معنويين

III. الكسور والنسب والمعدلات والتناسب Fractions, Ratios, Rates, and Proportions

الكسور Fractions

يقصد بالكسر جزء من الكل أو جزء من مجموعة. ويعبّر الكسر أيضًا عن النسبة.

ويتكوّن الكسر من البسط وخط القسمة والمقام.

$$\frac{\text{البسط}}{\text{المقام}} = \frac{\text{عدد الأجزاء المختارة}}{\text{عدد الأجزاء الكليّ}}$$

التبسيط من السهل أحيانًا تبسيط التعبير الرياضي قبل عملية تعويض قيم المتغيرات المعلومة، وغالبًا تُختصر المتغيرات من التعبير الرياضي.

مثال: بسّط $\frac{pn}{pw}$

افصل المتغير P في البسط والمقام، وجزِّئ الكسر إلى حاصل ضرب كسرين.

$$\left(\frac{pn}{pw}\right) = \left(\frac{p}{p}\right)\left(\frac{n}{w}\right)$$

بالتعويض عن $\left(\frac{p}{p}\right) = 1$

$$= (1)\left(\frac{n}{w}\right)$$

$$= \frac{n}{w}$$

عمليتا الضرب والقسمة لإجراء عملية ضرب الكسور اضرب القيم الممثلة للبسط، واضرب القيم الممثلة للمقام.

مثال: أوجد حاصل ضرب الكسر $\frac{s}{a}$ في الكسر $\frac{t}{b}$.

نفّذ عملية ضرب القيم في البسط والقيم في المقام

$$\left(\frac{s}{a}\right)\left(\frac{t}{b}\right) = \frac{st}{ab}$$

ولإجراء عملية قسمة الكسور اضرب الكسر الأول في مقلوب الكسر الثاني. ولإيجاد مقلوب الكسر، اعكس الكسر بحيث يحل كل من البسط والمقام مكان الآخر.

مثال: أوجد عملية القسمة للكسر $\frac{s}{a}$ على الكسر $\frac{t}{b}$.

أوجد حاصل ضرب الكسر الأول في مقلوب الكسر الثاني.

$$\frac{s}{a} \div \frac{t}{b} = \left(\frac{s}{a}\right)\left(\frac{b}{t}\right)$$

اضرب القيم في البسط والقيم في المقام.

$$= \frac{sb}{at}$$

عمليتا الجمع والطرح لإجراء عملية جمع أو طرح كسرين اكتبهما أولاً في صورة كسرين لهما مقام مشترك، أي المقام نفسه. ولإيجاد المقام المشترك أوجد حاصل ضرب مقام كل من الكسرين، ثم اجمع بسطي كل منهما أو اطرحهما واستعمل بعد ذلك المقام المشترك.

مثال: أوجد حاصل جمع $\frac{1}{a}$ و $\frac{2}{b}$.

اضرب كلّ كسر في كسر يساوي 1.

$$\frac{1}{a} + \frac{2}{b} = \left(\frac{1}{a}\right)\left(\frac{b}{b}\right) + \left(\frac{2}{b}\right)\left(\frac{a}{a}\right)$$

اضرب كلًّا من قيم البسط وكلًّا من قيم المقام.

$$= \frac{b}{ab} + \frac{2a}{ab}$$

اكتب كسرًا مفردًا مقامه المقام المشترك.

$$= \frac{b+2a}{ab}$$

مسائل تدريبية

4. نفّذ العمليات التالية، ثم اكتب الإجابة في أبسط صورة.

a. $\frac{y}{3} + \frac{1}{x}$

b. $\frac{3}{b} - \frac{a}{2b}$

c. $\left(\frac{1}{y}\right)\left(\frac{3}{x}\right)$

d. $\frac{1}{2} \div \frac{2a}{5}$

النسب Ratios

تمثل النسب عملية مقارنة بين عددين باستعمال عملية القسمة. ويمكن كتابة النسب بعدة طرائق مختلفة، فالنسبة للعددين 2، 3 يمكن كتابتها بأربع طرائق مختلفة: 2 إلى 3 أو 2 على 3 أو 3:2 أو $\frac{2}{3}$

المعدّلات Rates

المعدل نسبة تقارن بين كميتين لهما وحدات قياس مختلفة. إن معدل الوحدة هو المعدل الذي يمكن تبسيطه بحيث يساوي المقام الرقم 1.

مثال: اكتب 98km في 2.0 ساعة كمعدل وحدة.

$98km$ في 2.0 ساعة عبارة عن النسبة $\frac{98km}{2.0h}$

جزِّئ الكسر إلى حاصل ضرب الكسر العددي بكسر الوحدات

بسّط الكسر العددي

$$\frac{98km}{2.0h} = \left(\frac{98}{2.0}\right)\left(\frac{km}{h}\right)$$
$$= (49)\left(\frac{km}{h}\right)$$
$$= 49 \text{ km per h أو } \text{km/h}$$

التناسبات Proportions التناسب عبارة عن معادلة تنص على أن النسبتين متساويتان: $\frac{a}{d} = \frac{c}{b}$، بشرط أن b، d لا تساويان صفر.

تستعمل التناسبات لحل مسائل النسبة التي تتضمن ثلاثة أرقام ومتغيرًا واحدًا. ويمكنك حل علاقة التناسب لإيجاد قيمة المتغير. ولحل التناسب استعمل الضرب التبادلي.

مثال: حل التناسب $\frac{a}{b} = \frac{c}{d}$ بالنسبة للمتغير a.

بإجراء عملية الضرب التبادلي للتناسب

$$\frac{c}{d} = \frac{a}{b}$$

اكتب المعادلة الناتجة من الضرب التبادلي

$$ad = bc$$

حل المعادلة بالنسبة للمتغير a

$$a = \frac{bc}{d}$$

مسائل تدريبية

5. حل التناسبات التالية:

a. $\frac{2}{3} = \frac{4}{x}$

b. $\frac{n}{75} = \frac{13}{15}$

c. $\frac{s}{16} = \frac{36}{12}$

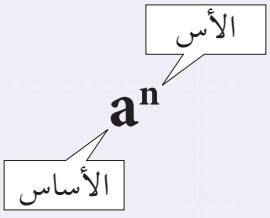
d. $\frac{7.5}{w} = \frac{2.5}{5.0}$

IV. الأسس والقوى والجذور والقيمة المطلقة Exponents, Powers, Roots, and Absolute value

الأسس Exponents

الأس عبارة عن عدد يخبرك بعدد المرات التي استعمل فيها الأساس a كعامل، ويكتب الأس على صيغة رمز علوي، ففي الحد a^n، يمثل الرمز a الأساس ويمثل الرمز n الأس.

ويسمى المقدار a^n القوة النونية للرقم a أو أن الرقم a مرفوع للقوة n.



ارتباط الرياضيات مع الفيزياء إن الرمز السفلي لا يمثل الأس، وفي الفيزياء يمثل الرمز السفلي تعبيرًا آخر للمتغير. فمثلا v_0 يمكن أن تستعمل لتعبر عن السرعة عند الزمن 0، ولذلك فإن الرمز السفلي يعتبر جزءًا من المتغير.

الأس الموجب لأي رقم غير صفري a ، ولأي عدد صحيح n ،

$$a^n = (a_1)(a_2)(a_3)\dots(a_n)$$

مثال: بسّط الحدود الأسية التالية:

$$10^4 = (10)(10)(10)(10) = 10{,}000$$

$$2^3 = (2)(2)(2) = 8$$

الأس الصفري لأي رقم a غير صفري،

$$a^0 = 1$$

مثال: بسّط الحدود الأسية الصفرية التالية:

$$2^0 = 1$$

$$13^0 = 1$$

الأس السالب لأي رقم a غير صفري، ولأي عدد صحيح n ،

$$a^{-n} = \frac{1}{a^n}$$

مثال: اكتب الحدود الأسية السالبة الآتية في صورة كسور.

$$2^{-2} = \frac{1}{2^2} = \frac{1}{4} \qquad 2^{-1} = \frac{1}{2^1} = \frac{1}{2}$$

الجذور التربيعية والجذور التكعيبية Square and Cube Roots

الجذر التربيعي للرقم يساوي أحد معامليه الاثنين المتساويين. ويعبّر الرمز الجذري $\sqrt{\ }$ ، عن الجذر التربيعي. ويمكن أن يُعبّر عن الجذر التربيعي بالأس $\frac{1}{2}$ كما في $\sqrt{b} = b^{\frac{1}{2}}$. ويمكنك استعمال الآلة الحاسبة لإيجاد قيمة الجذور التربيعية.

أمثلة: بسّط حدود الجذور التربيعية الآتية:

$\sqrt{a^2} = \sqrt{(a)\,(a)} = a$

$\sqrt{9} = \sqrt{(3)\,(3)} = 3$

تتضمن الإجابة صفرًا عن يمين الفاصلة العشرية وذلك للإبقاء على رقمين معنويين. $\sqrt{64} = \sqrt{(8.0)\,(8.0)} = 8.0$

ضع صفرين عن يمين إجابة الآلة الحاسبة للإبقاء على أربعة أرقام معنوية. $\sqrt{38.44} = 6.200$

قرّب إجابة الآلة الحاسبة للإبقاء على رقمين معنويين. $\sqrt{39} = 6.244997 = 6.2$

إن الجذر التكعيبي للرقم يمثل أحد معاملاته الثلاثة المتساوية. ويعبر الرمز الجذري $\sqrt[3]{\ }$ أي استعمال الرقم 3، عن الجذر التكعيبي. كما يمكن تمثيل الجذر التكعيبي أيضًا في صورة أس $\frac{1}{3}$ كما في $\sqrt[3]{b} = b^{\frac{1}{3}}$.

مثال: بسّط حدود الجذر التكعيبي التالية:

$\sqrt[3]{125} = \sqrt[3]{(5.00)(5.00)(5.00)} = 5.00$

$\sqrt[3]{39.304} = 3.4000$

مسائل تدريبية

6. أوجد ناتج كل جذر، ومن ثم قرّب الإجابة إلى أقرب مئة.

a. $\sqrt{22}$ **c.** $\sqrt{676}$

b. $\sqrt[3]{729}$ **d.** $\sqrt[3]{46.656}$

7. بسّط الجذور التالية من دون استعمال الرمز الجذري:

a. $\sqrt{16a^2b^4}$ **b.** $\sqrt{9t^6}$

8. اكتب الجذور الآتية على الصورة الأسية:

a. $\sqrt{n^3}$ **b.** $\frac{1}{\sqrt{a}}$

إجراء العمليات باستخدام الأسس Operations With Exponents

لإجراء العمليات التالية باستخدام الأسس فإن كلًّا من a ، b يمكن أن يكونا أرقامًا أو متغيرات.

ضرب القوى: لإجراء عملية ضرب حدود لها الأساس نفسه اجمع الأسس، كما هو موضح في الصيغة التالية:

$(a^m)(a^n) = a^{m+n}$

قسمة القوى: لإجراء عملية قسمة حدود لها الأساس نفسه اطرح الأسس، كما هو موضح في الصيغة التالية:

$a^m / a^n = a^{m-n}$

القوة مرفوعة لقوة: لايجاد ناتج قوة مرفوعة لقوة، استخدم الأساس نفسه واضرب الأسس في بعضها، كما هو موضح في الصفحة التالية: $(a^m)^n = a^{mn}$

الجذر مرفوعة لقوة: لإيجاد ناتج جذر مرفوع لقوة استخدم الأساس نفسه وقسّم أس القوة على أس الجذر، كما هو موضح في الصيغة التالية: $\sqrt[n]{a^m} = a^{m/n}$

القوة لحاصل الضرب: لإيجاد القوة لحاصل الضرب a و b ، ارفع كليهما للقوة نفسها، ثم أوجد حاصل ضربهما معًا، كما في $(ab)^n = a^n b^n$

مسائل تدريبية

9. اكتب الصيغة المكافئة مستعملًا خصائص الأسس.

a. $x^2 t / x^3$ b. $\sqrt{t^3}$ c. $(d^2 n)^2$ d. $x^2\sqrt{x}$

10. بسّط $\frac{m}{q}\sqrt{\frac{2qv}{m}}$

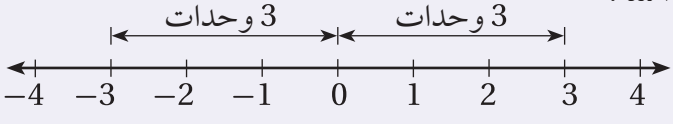
القيمة المطلقة Absolute Value

إن القيمة المطلقة للرقم n عبارة عن قيمته بغض النظر عن إشارته. وتكتب القيمة المطلقة للرقم n على صورة |n|، ولأن المقادير لا تكون أقل من الصفر فإن القيم المطلقة دائمًا أكبر من صفر أو تساوي صفرًا.

أمثلة:

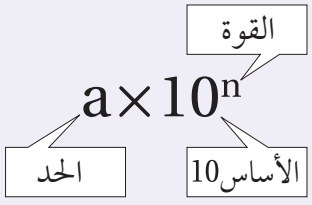
$|3| = 3$

$|-3| = 3$



V. الدلالة العلمية Scientific Notation

إن الرقم على الصيغة $a \times 10^n$ مكتوب بدلالته العلمية، حيث $1 \le a \le 10$، والرقم n عدد صحيح. الأساس 10 مرفوع للقوة n والحد a يجب أن يكون أقل من 10.



ارتباط الرياضيات مع الفيزياء يستعمل الفيزيائيون الدلالة العلمية مع القياسات التي تزيد على 10 أو الأقل من 1 للتعبير عنها، والمقارنة بينها، وحسابها. فمثلاً تكتب كتلة البروتون على صورة 6.73×10^{-28} kg، وتكتب كثافة الماء على الصورة 1.000×10^{3} kg/m³ وهذا يوضح استعمال قواعد الأرقام المعنوية، حيث يساوي هذا القياس 1000 تمامًا، وذلك لأربعة أرقام معنوية. ولذلك فعند كتابة كثافة الماء على الصورة 1000 kg/m³ سوف يشير ذلك إلى أن الرقم يتضمن رقمًا معنويًّا واحدًا، وهذا غير صحيح. لقد ساعدت الدلالة العلمية الفيزيائيين على الحفاظ على المسار الدقيق للأرقام المعنوية.

الأرقام الكبيرة، واستخدام الأسس الموجبة Large Numbers – Using Positive Exponents

إن عملية الضرب للقوة 10 تشبه تمامًا عملية تحريك النقطة العشرية لنفس عدد المنازل إلى يسار العدد (إذا كانت القوة سالبة) أو إلى اليمين (إذا كانت القوة موجبة). وللتعبير عن الرقم الكبير في الدلالة العلمية حدد أولاً قيمة الحد a، $1 \le a < 10$، ثم عد المنازل العشرية من النقطة العشرية في الحد a لغاية النقطة العشرية في العدد. ثم استعمل العدد كقوة للرقم 10. وتبين الآلة الحاسبة الدلالة العلمية باستعمال e للأسس كما في $2.4 \text{ e+11} = 2.4 \times 10^{11}$ وبعض الآلات الحاسبة تستخدم Exp لتبيان الأس أو يوجد غالبًا على الشاشة موضع مخصص، حيث تظهر أرقام ذات أحجام صغيرة نسبيًّا لتمثل الأسس في الآلة الحاسبة.

مثال: اكتب 7,530,000 *بدلالته العلمية.*

إن قيمة a هي 7.53 (النقطة العشرية عن يمين أول رقم غير صفري)، لذلك سيكون الشكل في صورة 7.53×10^{n}.

هناك ستة منازل عشرية، لذلك فإن القوة هي 6 $7{,}530{,}000 = 7.53 \times 10^{6}$

لكتابة الصورة القياسية للرقم المعبَّر عنه بدلالته العلمية اكتب قيمة a، وضع أصفارًا إضافية عن يمين الرقم. استعمل القوة وحرّك النقطة العشرية للرقم a عدة منازل إلى اليمين.

مثال: اكتب الرقم التالي في صورته القياسية

$2.389 \times 10^{5} = 2.38900 \times 10^{5} = 238{,}900$

الأرقام الصغيرة، واستخدام الأسس السالبة Small Numbers–Using Negative Exponents

للتعبير عن الأرقام الصغيرة بدلالتها العلمية حدد أولاً قيمة a ، $1 \le a < 10$ ، ثم احسب عدد المنازل العشرية مبتدئًا من النقطة العشرية للرقم a حتى النقطة العشرية في الرقم.

استعمل ذلك العدد قوةً للأساس 10 . إن عملية ضرب الرقم في قوة سالبة مماثل تمامًا لعملية القسمة على ذلك الرقم مع القوة الموجبة المرافقة.

مثال: اكتب 0.000000285 بدلالته العلمية

إن قيمة a هي 2.85 (النقطة العشرية تقع عن يمين الرقم الأول غير الصفري) لذلك فإن الشكل سيكون في صورة 2.85×10^{n}.

توجد سبعة منازل عشرية، لذلك فإن القوة هي 7 – $0.000000285 = 2.85\times10^{-7}$

وللتعبير عن الأرقام الصغيرة بصورتها القياسية، اكتب قيمة الرقم a، وقم بإضافة أصفار إضافية عن يسار الرقم a. استعمل القوة وحرّك النقطة العشرية في a عدة منازل إلى اليسار.

مثال: $1.6 \times 10^{-4} = 00001.6 \times 10^{-4} = 0.00016$

مسائل تدريبية

11. عبّر عن كل رقم بدلالته العلمية:

a. 456,000,000 **b.** 0.000020

12. عبّر عن كل رقم بصورته القياسية.

a. 3.03×10^{-7} **b.** 9.7×10^{10}

إجراء العمليات الرياضية بدلالتها العلمية Operations with Scientific Notation

لإجراء العمليات الرياضية للأرقام المعبّر عنها بدلالتها العلمية نستخدم خصائص الأسس.

عملية الضرب أوجد حاصل عملية ضرب الحدود، ثم اجمع القوى للأساس 10.

جمّع الحدود والأرقام ذات الأساس 10 $(4.0\times10^{-8})\ (1.2\times10^{5}) = (4.0\times1.2)\ (10^{-8}\times10^{5})$

أوجد حاصل ضرب الحدود $= (4.8)\ (10^{-8+5})$

اجمع القوى للأساس 10 $= (4.8)\ (10^{-3})$

أعد صياغة النتيجة بدلالتها العلمية $= 4.8\times10^{-3}$

عملية القسمة قم بإجراء عملية قسمة الأرقام الممثلة للقواعد، ثم اطرح أسس الأساس 10.

مثال: بسّط

جمّع الحدود والأرقام ذات الأساس 10 $\frac{9.60\times10^{7}}{1.60\times10^{3}} = \left(\frac{9.60}{1.60}\right)\times\left(\frac{10^{7}}{10^{3}}\right)$

قسّم الحدود واطرح القوس للأساس 10 $= 6.00\times10^{7-3}$

$= 6.00\times10^{4}$

عمليتا الجمع والطرح إن إجراء عملية الجمع وعملية الطرح للأرقام بدلالتها العلمية هي عملية تحدٍّ أكبر؛ لأن قوى الأساس 10 يجب أن تكون متماثلة لكي تستطيع جمع أو طرح الأرقام. وهذا يعني أن أحد تلك الأرقام يمكن أن يحتاج إلى إعادة كتابته بدلالة قوة مختلفة للأساس 10، بينما إذا كانت القوى للأساس 10 متساوية فاستعمل الخاصية التوزيعية للأعداد.

مثال: بسّط

جمّع الحدود $(3.2\times10^5) + (4.8\times10^5) = (3.2+4.8)\times10^5$

اجمع الحدود $= 8.0\times10^5$

مثال: بسّط

أعد كتابة 4.8×10^4 على صورة 0.48×10^5 $(3.2\times10^5) + (4.8\times10^4) = (3.2\times10^5) + (0.48\times10^5)$

جمّع الحدود $= (3.2+0.48)\times10^5$

اجمع الحدود $= 3.68\times10^5$

قرّب النتيجة مستعملًا قاعدة الجمع / الطرح للأرقام المعنوية. $= 3.7\times10^5$

مسائل تدريبية

13. احسب نتيجة كل من التعابير التالية، وعبّر عن النتيجة بدلالتها العلمية.

a. $(4.0\times10^8)\ (5.2\times10^{-4})$ **b.** $(2.4\times10^3) + (8.0\times10^4)$

VI. المعادلات Equations

ترتيب العمليات Order of Operations

اتفق العلماء والرياضيون على مجموعة من الخطوات أو القواعد، تسمى ترتيب العمليات، لذلك يفسّر كل شخص الرموز الرياضية بالطريقة نفسها. اتّبع هذه الخطوات بالترتيب عندما تريد تقدير نتيجة تعبير رياضي أو عند استخدام صيغة رياضية معينة.

1. بسّط التعابير الرياضية داخل الرموز التجميعية، مثل القوسين ( )، والقوسين المعقوفين [ ]، والأقواس المزدوجة { }، وأعمدة الكسر.

2. قدّر قيمة جميع القوى والجذور.

3. نفّذ جميع عمليات الضرب و / أو جميع عمليات القسمة من اليسار إلى اليمين.

4. نفّذ جميع عمليات الجمع و / أو جميع عمليات الطرح من اليسار إلى اليمين.

مثال: بسّط التعبير التالي:

ترتيب العمليات: الخطوة 1 $4+3\ (4-1)-2^3 = 4+3\ (3)-2^3$

ترتيب العمليات: الخطوة 2 $=4+3\ (3)-8$

ترتيب العمليات: الخطوة 3 $=4+9-8$

ترتيب العمليات: الخطوة 4 $= 5$

ارتباط الرياضيات مع الفيزياء يوضح المثال السابق تنفيذ عملية ترتيب العمليات خطوة بخطوة. فعند حل المسائل الفيزيائية لا تجري عملية التقريب للرقم الصحيح للأرقام المعنوية إلا بعد حساب النتيجة النهائية. في حالة الحسابات التي تتضمن تعابير رياضية في البسط وتعابير رياضية في المقام عليك معاملة كل من البسط والمقام بوصفهما مجموعتين منفصلتين، ثم جد نتيجة كل مجموعة قبل أن تجري عملية قسمة البسط على المقام، لذلك فإن قاعدة الضرب / القسمة تستخدم لحساب الرقم النهائي للأرقام المعنوية.

حل المعادلات Solving Equations

إن حل المعادلة يعني إيجاد قيمة المتغير الذي يجعل المعادلة تعبيرًا رياضيًّا صحيحًا. وعند حل المعادلات طبّق خاصية التوزيع وخصائص التكافؤ، وإذا طبقت أيًّا من خصائص المتكافئات في أحد طرفي المعادلة وجب أن تطبق الخصائص نفسها في الطرف الآخر.

الخاصية التوزيعية لأي من الأعداد a ، b ، c يكون:

$a(b+c) = ab+ac$ $\qquad$ $a(b-c) = ab-ac$

مثال: استعمل الخاصية التوزيعية لتفكيك التعبير التالي:

$$3(x+2) = 3x + (3)(2)$$
$$= 3x + 6$$

خاصيتا الجمع والطرح للمتكافئات إذا تساوت كميتان وأضيف العدد نفسه أو طرح العدد نفسه من كليهما، فإن الكميات الناتجة متساوية أيضًا.

مثال: حل المعادلة $x - 3 = 7$ *مستعملًا خاصية الجمع*

$$x-3 = 7$$
$$x-3+3 = 7+3$$
$$x=10$$

مثال: حل المعادلة $t + 2 = -5$ *مستعملًا خاصية الجمع*

$$t+2 = -5$$
$$t+2-2 = -5-2$$
$$t = -7$$

خاصيتا الضرب والقسمة للمتكافئات إذا ضربت أو قسمت كميتين متساويتين في/ على العدد نفسه، فستكون الكميات الناتجة متساوية أيضًا.

$$ac = bc$$
$$\frac{a}{c} = \frac{b}{c}, \text{ for } c \neq 0$$

مثال: حل المعادلة $\frac{1}{4}a = 3$ مستعملًا خاصية الضرب

$$\frac{1}{4}a = 3$$
$$\left(\frac{1}{4}a\right)(4) = 3(4)$$
$$a = 12$$

مثال: حل المعادلة $6\,n = 18$ مستخدمًا خاصية القسمة

$$6\,n = 18$$
$$\frac{6n}{6} = \frac{18}{6}$$
$$n = 3$$

مثال: حل المعادلة $2\,t + 8 = 5\,t - 4$ بالنسبة للمتغير t

$$2\,t + 8 = 5\,t - 4$$
$$8 + 4 = 5\,t - 2\,t$$
$$12 = 3\,t$$
$$4 = t$$

فصل المتغير Isolating a Variable

افترض معادلة تتضمن أكثر من متغير، لفصل المتغير– أيْ لحل المعادلة بالنسبة لذلك المتغير– اكتب معادلة ارتباط مكافئة بحيث يتضمن أحد طرفيها المتغير فقط بمعامل يساوي 1.

ارتباط الرياضيات في الفيزياء افصل المتغير P (الضغط) في معادلة قانون الغاز المثالي.

$$PV = nRT$$

قسّم طرفي المعادلة على V

$$\frac{PV}{V} = \frac{nRT}{V}$$

جمّع $(\frac{V}{V})$

$$P(\frac{V}{V}) = \frac{nRT}{V}$$

بالتعويض عن $\frac{V}{V} = 1$

$$P = \frac{nRT}{V}$$

مسائل تدريبية

14. حل المعادلات الآتية بالنسبة للمتغير x.

a. $2 + 3\,x = 17$

b. $x - 4 = 2 - 3x$

c. $t - 1 = \frac{x+4}{3}$

d. $a = \frac{b+x}{c}$

e. $6 = \frac{2x+3}{x}$

f. $ax + bx + c = d$

خاصية الجذر التربيعي Square Root Property

إذا كان كل من a ، n أعدادًا حقيقية، $n > 0$ و $a^2 = n$ ، فإن $a = \pm \sqrt{n}$.

ارتباط الرياضيات مع الفيزياء حل المعادلة بالنسبة للمتغير v في القانون الثاني لنيوتن لقمر يدور حول الأرض.

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{Gm_E m}{r^2}$$

اضرب طرفي المعادلة كليهما في المتغير r

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{rGm_E m}{r^2}$$

بالتعويض عن $\frac{r}{r} = 1$

$$mv^2 = \frac{Gm_E m}{r}$$

قسّم طرفي المعادلة على m .

$$\frac{mv^2}{m} = \frac{Gm_E m}{rm}$$

بالتعويض عن $\frac{m}{m} = 1$

$$v^2 = \frac{Gm_E}{r}$$

ضع الجذر التربيعي على طرفي المعادلة

$$\sqrt{v^2} = \pm\sqrt{\frac{Gm_E}{r}}$$

استعمل القيمة الموجبة للسرعة.

$$v = \sqrt{\frac{Gm_E}{r}}$$

عندما تستعمل خاصية الجذر التربيعي من المهم الانتباه للمتغير الذي ستقوم بحل المعادلة بالنسبة له. لأننا قمنا بحل المعادلة السابقة بالنسبة للسرعة v، لذلك لم يكن من المنطق أن نستعمل القيمة السالبة للجذر التربيعي، وأنت بحاجة أيضًا للأخذ بعين الاعتبار ما إذا كانت القيمة السالبة أو الموجبة ستعطيك الحل الصحيح، فمثلاً عندما تستعمل خاصية الجذر التربيعي لحل المعادلة بالنسبة للمتغير t فإن القيمة السالبة تشير إلى الفترة الزمنية قبل بدء الحالة التي تدرسها.

المعادلات التربيعية Quadratic Equations

التعبير العام للمعادلة التربيعية $ax^2 + bx + c = 0$ ، حيث $a \neq 0$، وتتضمن المعادلة التربيعية متغيرًا واحدًا مرفوعًا للقوة (الأس) 2 بالإضافة إلى المتغير نفسه مرفوعًا للأس 1 . كما يمكن تقدير حلول المعادلة التربيعية بوساطة التمثيل البياني باستعمال الآلة الحاسبة الراسمة بيانيًا. إذا كانت $b = 0$ فإن الحد x غير موجود في المعادلة التربيعية. ويمكن حل المعادلة بفصل المتغير المربع، ثم إيجاد الجذر التربيعي لكل من طرفي المعادلة باستخدام خاصية الجذر التربيعي.

الصيغة التربيعية Quadratic Formula

إن حلول أي معادلة تربيعية يمكن إيجادها باستعمال الصيغة التربيعية، لذلك فإن حلول المعادلة $ax^2 + bx + c = 0$، حيث $a \neq 0$، تعطى من خلال المعادلة التالية:

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

وكما في حالة خاصية الجذر التربيعي، من المهم الأخذ بعين الاعتبار ما إذا كانت حلول الصيغة التربيعية تعطيك الحل الصحيح للمسألة التي بصدد حلّها. فعادةً يُمكنك إهمال أحد الحلول لكونه حلاً غير حقيقي. تتطلب حركة المقذوف غالبًا استعمال الصيغة التربيعية عند حل المعادلة، لذلك حافظ على واقعية الحل في ذهنك عند حل المعادلة.

مسائل تدريبية

15. حل المعادلات الآتية بالنسبة للمتغير x.

a. $4x^2 - 19 = 17$

b. $12 - 3x^2 = -9$

c. $x^2 - 2x - 24 = 0$

d. $24x^2 - 14x - 6 = 0$

حسابات الوحدات Dimensional Calculations

عند إجراء الحسابات عليك أن ترفق وحدة كل قياس مكتوبة في الحسابات، وجميع العمليات التي تتم في صورة أعداد تُجرى أيضًا مرفقة بوحداتها.

ارتباط الرياضيات مع الفيزياء إن معادلة تسارع الجاذبية الأرضية a يعطى من خلال المعادلة $a = \frac{2\Delta x}{\Delta t^2}$. فإذا سقط جسم سقوطًا حرًّا على القمر مسافة 20.5 m خلال 5.00 s . أوجد التسارع a على سطح القمر.

يقاس التسارع بوحدة m/s^2.

$$a = \frac{2\Delta x}{\Delta t^2}$$

$$a = \frac{2(20.5\ m)}{(5.00\ s)^2}$$

العدد 2 عدد دقيق، لذلك لن يؤثر في حساب الأرقام المعنوية

$$a = \frac{1.64\ m}{s^2}$$

احسب وقرّب حتى ثلاثة أرقام معنوية

مثل

$$a = 1.64\ m/s^2$$

أو مثل

تحويل الوحدة استعمل معامل التحويل للتحويل من وحدة قياس إلى وحدة قياس أخرى من النوع نفسه، من وحدة الدقائق مثلاً إلى وحدة الثواني، وهذا يكافئ عملية الضرب في العدد 1 .

ارتباط الرياضيات مع الفيزياء جد x عندما $v_0 = 67\ m/s$ و $\Delta t = 5.0\ min$. استخدم المعادلة $\Delta x = v_0 \Delta t$.

$$\frac{60\ s}{1\ min} = 1$$

$$\Delta x = v_0 \Delta t$$

$$\Delta x = \frac{67\ m}{s}\left(\frac{5.0\ min}{1}\right)\left(\frac{60\ s}{1\ min}\right)$$

اضرب في معامل التحويل $\left(\frac{60\ s}{1\ min}\right)$

$$\Delta x = 20100\ m = 2.0 \times 10^4\ m$$

احسب ثم قرّب إلى رقمين معنويين. إن العددين 60 s و 1 min مضبوطين ودقيقين، لذلك لن يؤثرا في حساب الأرقام المعنوية.

مسائل تدريبية

16. بسّط المعادلة $\Delta t = \frac{4.0 \times 10^2 \text{ m}}{16 \text{ m/s}}$

17. احسب السرعة المتجهة لقطعة قرميد ساقطة بعد مضي 5.0 s ، استعمل $a = -9.80 \text{ m/s}^2$ و $v = a\,\Delta t$.

18. أوجد حاصل ضرب الحدود: $\left(\frac{60 \text{ min}}{1 \text{h}}\right)\left(\frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}}\right)\left(\frac{32 \text{ cm}}{1 \text{s}}\right)\left(\frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}}\right)$

19. في سجلّ الألعاب الأولمبية تم قطع المسافة 100.00 m خلال 9.87 s. ما السرعة بوحدة الكيلومترات لكل ساعة؟

تحليل الوحدات Dimensional Analysis

يعتبر تحليل الوحدات طريقة لتنفيذ العمليات الجبرية باستعمال الوحدات، وغالبًا ما يستعمل لاختبار صحة وحدات النتيجة النهائية وصحة المعادلة المستعملة، من دون إعادة تنفيذ الحسابات بصورة كاملة.

مثال فيزيائي تحقق من أن الإجابة النهائية للمعادلة $d_f = d_i + v_i t + \frac{1}{2} at^2$ وحدتها m

d_i تقاس بوحدة m

t تقاس بوحدة s

v_i تقاس بوحدة m/s

a تقاس بوحدة m/s^2

بالتعويض عن وحدات كل متغير

$$d_f = \text{m} + \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)(\text{s}) + \frac{1}{2}\left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)(\text{s})^2$$

بسّط الكسور مستعملًا الخاصية التوزيعية

$$= \text{m} + (\text{m})\left(\frac{\text{s}}{\text{s}}\right) + \frac{1}{2}(\text{m})\left(\frac{\text{s}^2}{\text{s}^2}\right)$$

بالتعويض عن $\text{s/s} = 1$، $\text{s}^2/\text{s}^2 = 1$

$$= \text{m} + (\text{m})(1) + \frac{1}{2}(\text{m})(1)$$

جميع الحدود أعطت الوحدة m لذلك فإن d_f بوحدة m

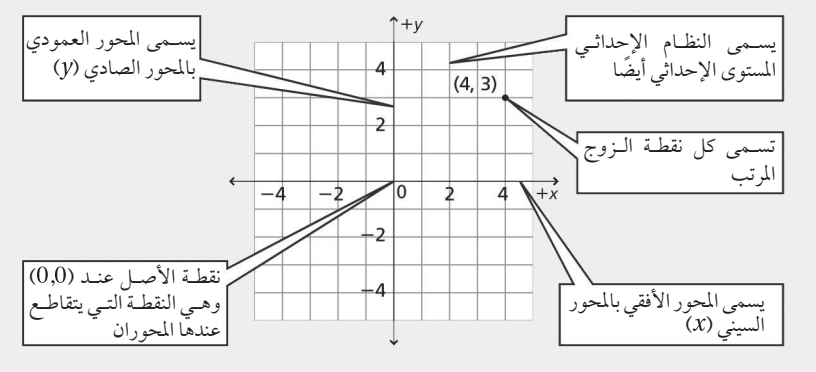
$$= \text{m} + \text{m} + \frac{1}{2}\text{m}$$

لا يطبّق المعامل $\frac{1}{2}$ في المعادلة أعلاه بالنسبة للوحدات، ويطبّق فقط لأي من القيم العددية التي يتم تعويضها بدلاً من المتغيرات لحل المعادلة. ومن السهل إزالة المعاملات الرقمية مثل الرقم $\frac{1}{2}$ عندما تبدأ بإجراء تحليل الوحدات.

VII. التمثيل البياني للعلاقات Graphs of Relations

المستوى الإحداثي (الديكارتي) The Coordinate Plane

تعين النقاط بالنسبة إلى خطين مدرّجين متعامدين يطلق على كل منهما اسم المحور، و يسمى خط الأعداد الأفقي المحور السيني (x). أما خط الأعداد العمودي فيسمى المحور الصادي (y). ويمثل المحور السيني عادة المتغير المستقل، فيما يمثل المحور العمودي المتغير التابع، بحيث تُمثّل النقطة بإحداثيين (x،y) يسميان أيضًا الزوج المرتب. وتَرد دائماً قيمة المتغير التابع (x) أولًا في الزوج المرتب الذي يمثل (0,0) نقطة الأصل، وهي النقطة التي يتقاطع عندها المحوران.

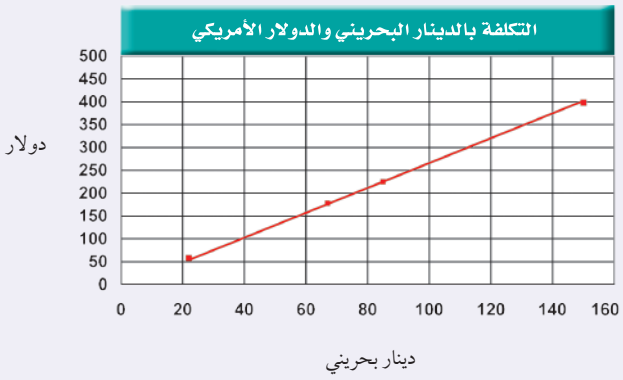


استعمال التمثيل البياني لتحديد العلاقة الرياضية Grahping Data to Determine Relationships

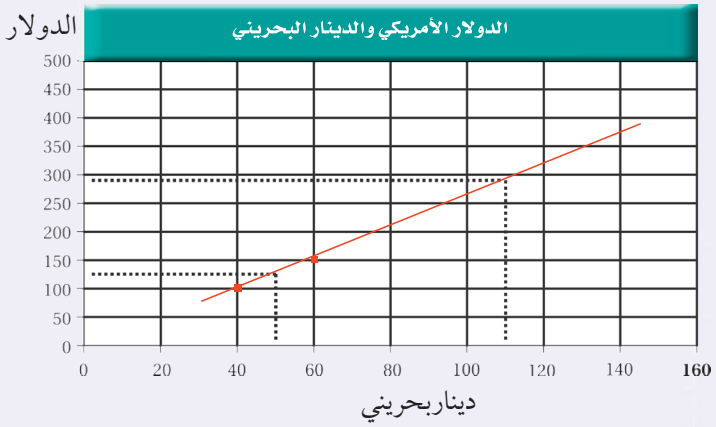
استعمل الخطوات الآتية لعمل رسوم بيانية:

1. ارسم محورين متعامدين.
2. حدّد المتغيرات المستقلة والمتغيرات التابعة، وعيّن محور كل منهما مستعملًا أسماء المتغيرات.
3. عيّن مدى البيانات لكل متغير، لتحديد المقياس المناسب لكل محور، ثم حدّد ورقّم المقاييس.
4. عيّن كل نقطة بيانيًّا.
5. عندما تبدو لك البيانات واقعة على خط مستقيم واحد ارسم الخط الأكثر ملاءمة خلال مجموعة النقاط. وعندما لا تقع النقاط على خط واحد ارسم منحنى بيانيًّا بسيطًا، بحيث يمر بأكبر عدد ممكن من النقاط. وعندما لا يبدو هناك أي ميل لاتجاه معين فلا ترسم خطًّا أو منحنًى.
6. اكتب عنوانًا يصف بوضوح ماذا يمثل الرسم البياني.

نوع الخدمة	دينار	دولار
الفندق (الإقامة)	150	398
الوجبات	85	225
الترفيه	67	178
المواصلات	22	58



الاستيفاء والاستقراء Interpolating and Extrapolating



تستعمل طريقة الاستيفاء في تقدير قيمة تقع بين قيمتين معلومتين على الخط الممثل لعلاقة ما، في حين أن عملية تقدير قيمة تقع خارج مدى القيم المعلومة تسمى الاستقراء. إن معادلة الخط الممثل لعلاقة ما تساعدك في عمليتي الاستيفاء والاستقراء.

مثال: مستعينًا بالرسم البياني استعمل طريقة الاستيفاء لتقدير القيمة (السّعْر) المقابلة لـ 50 دينارًا.

حدد نقطتين على كل من جانبي القيمة 50 (40 دينارًا، 60 دينارًا)، ثم ارسم خطًّا مستمرًّا يصل بينهما.

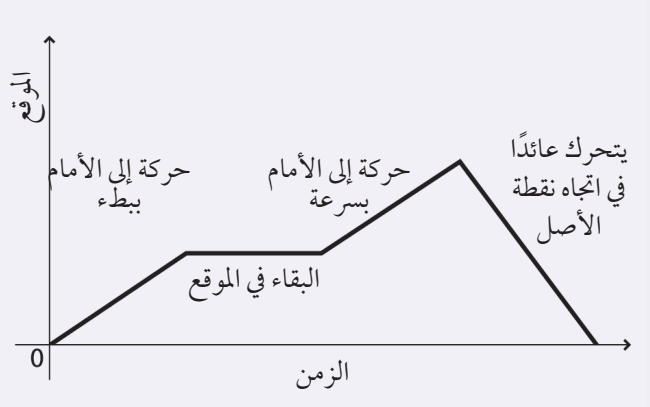
ارسم الآن خطًّا متقطعًا عموديًّا من النقطة (50 دينارًا) على المحور الأفقي حتى يتقاطع مع الخط المرسوم، ثم ارسم من نقطة التقاطع خطًّا متقطعًا أفقيًّا يصل إلى المحور الرأسي. سوف تجد أنه يتقاطع معه عند القيمة 131 أو 132 دولارًا.

مثال: استعمل الاستقراء لتحديد القيمة المقابلة لـ 1100 دينار.

ارسم خطًّا متقطعًا من النقطة (1100 دينار) على المحور الأفقي حتى يتقاطع مع الخط المستمر الذي رسمته في المثال السابق، ثم ارسم من نقطة التقاطع خطًّا متقطعًا أفقيًّا. ستجد أنه يتقاطع مع المحور الرأسي عند النقطة 290 دولارًا.

تفسير الرسم البياني الخطي Interpreting Line Graph

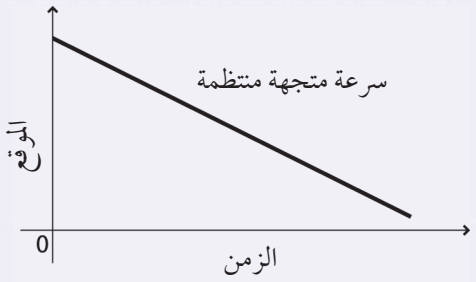
يوضح الرسم البياني الخطي العلاقة الخطية بين متغيرين. وهناك نوعان من الرسوم البيانية الخطية التي تصف الحركةتستخدم عادة في الفيزياء.



ارتباط الرياضيات مع الفيزياء

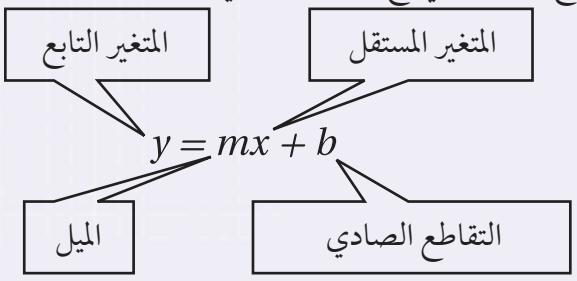
a. يوضح الرسم البياني علاقة خطية متغيرة بين (الموقع – الزمن).

b. يوضح الخط البياني علاقة خطية ثابتة بين متغيرين (الموقع – الزمن)



المعادلة الخطية Linear Equation

يمكن كتابة المعادلة الخطية بالشكل: $y = mx + b$، حيث m ، b أعداد حقيقية، و(m) يمثل ميل الخط، و(b) يمثل التقاطع الصادي؛ وهي نقطة تقاطع الخط البياني مع المحور الصادي.



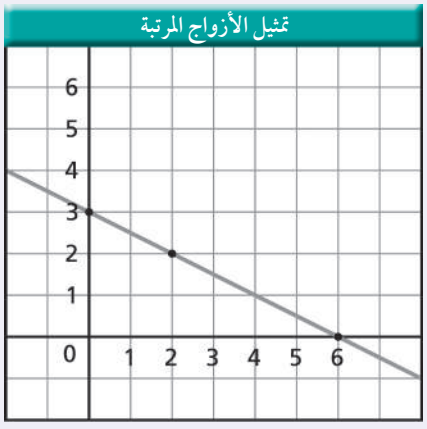
تمثل المعادلة الخطية بخط مستقيم، ولتمثيلها بيانيًّا قم باختيار ثلاث قيم للمتغير المستقل (يلزم نقطتان فقط، والنقطة الثالثة تستخدم لإجراء اختبار). احسب القيم المقابلة للمتغير التابع، ثم عيّن زوجين مرتبين (x, y)، وارسم أفضل خط يمر بجميع النقاط.

مثال: مثّل بيانيًّا المعادلة

$$y = -\left(\frac{1}{2}\right)x + 3$$

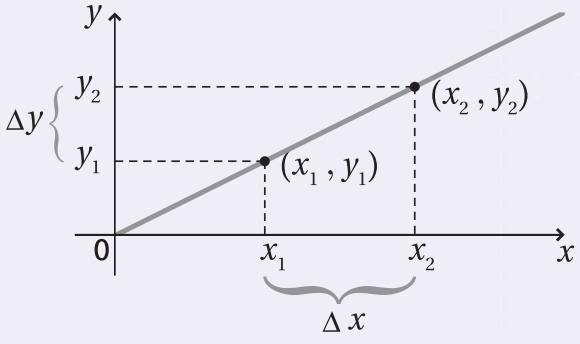
احسب ثلاثة أزواج مرتبة للحصول على نقاط لتعيينها.

الأزواج المرتبة	
x	y
0	3
2	2
6	0



الميل Slope

ميل الخط هو النسبة بين التغير في الإحداثيات الصادية، والتغير في الإحداثيات السينية، أو النسبة بين التغير العمودي (المقابل) والتغير الأفقي (المجاور). وهذا الرقم يخبرك بكيفية انحدار الخط البياني، ويمكن أن يكون رقمًا موجبًا أو سالبًا. ولإيجاد ميل الخط قم باختيار نقطتين (x_1 , y_1) ، (x_2 , y_2)، ثم احسب الاختلاف (الفرق) بين الإحداثيين السينيين $\Delta x = x_2 - x_1$، والاختلاف (الفرق) بين الإحداثيين الصاديين $\Delta y = (y_2 - y_1)$، ثم جد النسبة بين Δy و Δx .



$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

التغير الطردي Direct variation

إذا احتوت المعادلة على ثابتٍ غير صفري m، بحيث كانت $y = mx$، فإن y تتغير طرديًّا بتغير x؛ وهذا يعني أنه عندما يزداد المتغير المستقل x فإن المتغير التابع y يزداد أيضًا، ويقال عندئذٍ إن المتغيرين x و y يتناسبان تناسبًا طرديًّا. وهذه معادلة خطية على الصورة $y = mx + b$ حيث قيمة b صفر، ويمر الخط البياني من خلال نقطة الأصل $(0,0)$.

ارتباط الرياضيات مع الفيزياء في معادلة القوة المعيدة (المُرجعة) للنابض المثالي $F = -kx$ ، حيث **F** القوة المُرجعة، k ثابت النابض و x استطالة النابض، تتغير القوة المرجعة للنابض طرديًّا مع تغير استطالته؛ ولذلك تزداد القوة المرجعة عندما تزداد استطالة النابض.

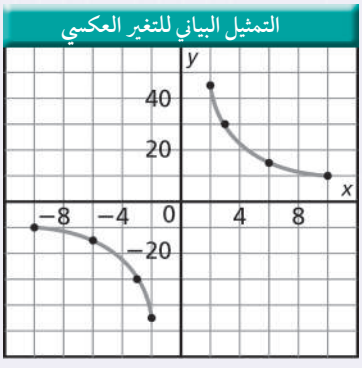
التغير العكسي Inverse Variation

إذا احتوت المعادلة على ثابت غير صفري m، بحيث كانت $y=m/x$ ، فإن y تتغير عكسيًّا بتغير x ؛ وهذا يعني أنه عندما يزداد المتغير المستقل x فإن المتغير التابع y يتناقص، ويقال عندئذ إن المتغيرين x و y يتناسبان تناسبًا عكسيًّا. وهذه ليست معادلة خطية؛ لأنها تشتمل على حاصل ضرب متغيرين، والتمثيل البياني لعلاقة التناسب العكسي عبارة عن قطع زائد. ويمكن كتابة هذه العلاقة على الشكل:

$$xy = m$$
$$y = m\,\frac{1}{x}$$
$$y = \frac{m}{x}$$

مثال: مثِّل المعادلة $xy = 90$ بيانيًّا

الأزواج المرتبة	
x	y
-10	-9
-6	-15
-3	-30
-2	-45
2	45
3	30
6	15
10	9



ارتباط الرياضيات مع الفيزياء في معادلة سرعة الموجة $\lambda = \frac{v}{f}$ ، حيث λ الطول الموجي، f التردد، و v سرعة الموجة، نجد أن الطول الموجي يتناسب عكسيًّا مع التردد؛ وهذا يعني أنه كلما يزداد تردد الموجة فإن الطول الموجي يتناقص، أما v فتبقى قيمتها ثابتة.

التمثيل البياني للمعادلة التربيعية Quadratic Graph

الصيغة العامة للعلاقة التربيعية هي:

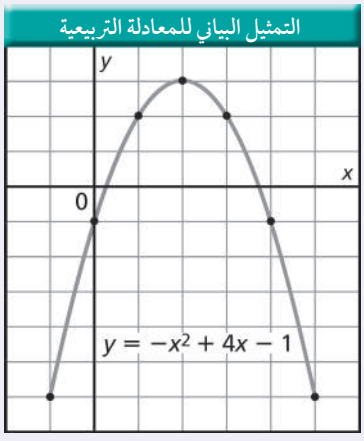
$$y = ax^2 + bx + c$$

حيث $a \neq 0$

التمثيل البياني للعلاقة التربيعية يكون على صورة قطع مكافئ، ويعتمد اتجاه فتحة هذا القطع على معامل مربع المتغير المستقل (a)، إذا كان موجبًا أو سالبًا.

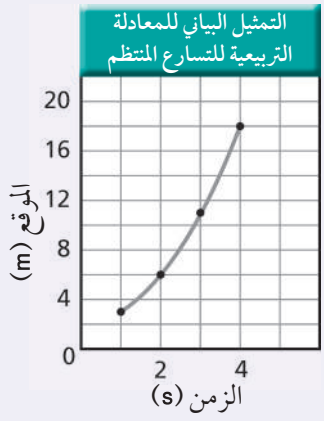
مثال: مثّل بيانيًّا المعادلة $y = -x^2 + 4x - 1$

الأزواج المرتبة	
x	y
−1	−6
0	−1
1	2
2	3
3	2
4	−1
5	−6



ارتباط الرياضيات مع الفيزياء عندما يكون منحنى (الموقع – الزمن) على شكل المنحنى البياني للمعادلة التربيعية فهذا يعني أن الجسم يتحرك بتسارع منتظم.

الأزواج المرتبة	
الزمن (s)	الموقع (m)
1	3
2	6
3	11
4	18



VIII. علم الهندسة والمثلثات (Geometry and Trigonometry)

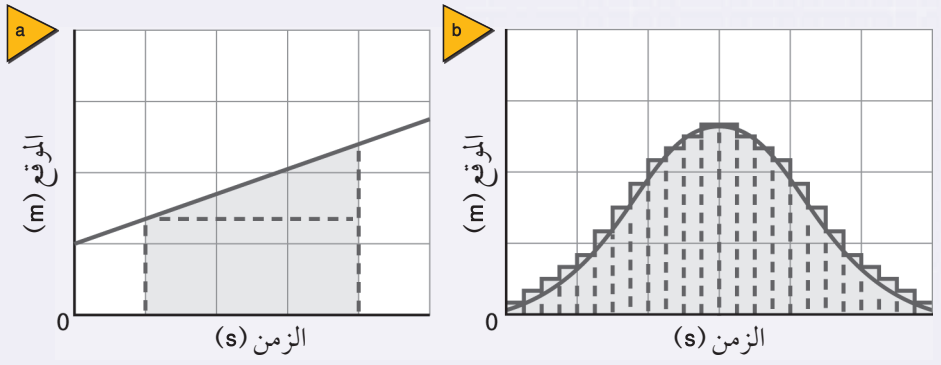
المحيط (Perimeter)، والمساحة (Area)، والحجم (Volume)

	المحيط وحدات خطية	المساحة وحدات مربعة	مساحة السطح وحدات مربعة	الحجم وحدات مكعبة
المربع الضلع a	$P = 4a$	$A = a^2$		
المستطيل الطول l العرض w	$P = 2l + 2w$	$A = lw$		
المثلث القاعدة b الارتفاع h		$A = (\frac{1}{2})\, bh$		
المكعب الضلع a			$SA = 6a^2$	$V = a^3$
الدائرة نصف القطر r	$C = 2\pi r$	$A = \pi r^2$		
الأسطوانة نصف القطر r الارتفاع h			$SA = 2\pi rh + 2\pi r^2$	$V = \pi r^2 h$
الكرة نصف القطر r			$SA = 4\pi r^2$	$V = (\frac{4}{3})\pi r^3$

ارتباط الرياضيات مع الفيزياء ابحث في مسائل الفيزياء التي درستها عن أشكال هندسية، يمكن أن تكون ثلاثية الأبعاد أو ذات بعدين. ويمكن أن تمثل الأشكال ذات البعدين السرعة المتجهة أو متجهات الموقع.

المساحة تحت المنحنى البياني Area Under a Graph

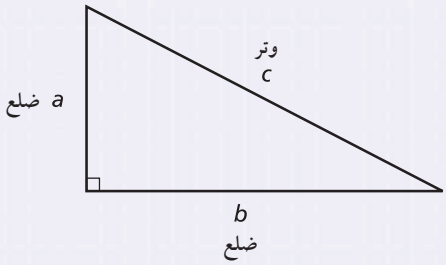
لحساب المساحة التقريبية الواقعة تحت المنحنى البياني، قسم المساحة إلى عدة أجزاء أصغر، ثم أوجد مساحة كل جزء مستعملًا الصيغ الرياضية في الجدول السابق. لإيجاد المساحة التقريبية الواقعة تحت الخط البياني، قسم المساحة إلى مستطيل ومثلث، كما هو موضح في الشكل a. ولإيجاد المساحة تحت المنحنى ارسم عدة مستطيلات من المحور السيني كما في الشكل b. إن رسم مستطيلات أكثر ذات قاعدة أصغر تمنحنا دقة أكثر في حساب المساحة المطلوبة.



المساحة الإجمالية تساوي
المساحة 1 + المساحة 2 + المساحة 3 + ...

المساحة الإجمالية تساوي
مساحة المستطيل + مساحة المثلث

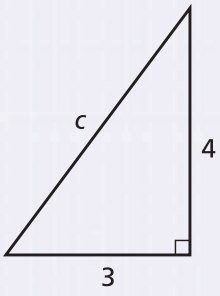
المثلثات القائمة Right Triangles



تنص نظرية فيثاغورس على أنه إذا كان كل من a، b يمثلان قياس ضلعي المثلث القائم الزاوية وكانت c تمثل قياس الوتر فإن $c^2 = a^2 + b^2$ ولحساب طول الوتر استعمل خاصية الجذر التربيعي. ولأن المسافة موجبة فإن القيمة السالبة للمساحة ليس لها معنى.

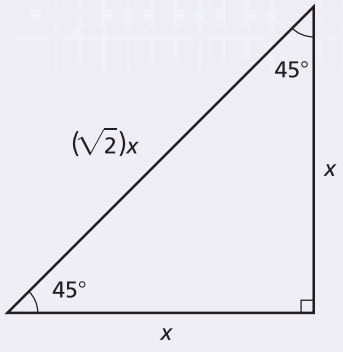
$$c = \sqrt{a^2 + b^2}$$

مثال: احسب طول الوتر c في المثلث حيث $a = 4\text{ cm}$ و $b = 3\text{ cm}$

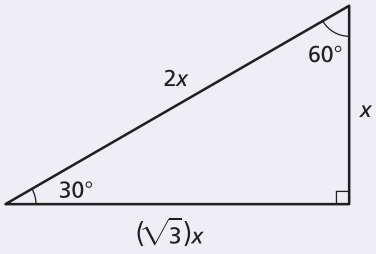


$$\begin{aligned} c &= \sqrt{a^2 + b^2} \\ &= \sqrt{(4\text{ cm})^2 + (3\text{ cm})^2} \\ &= \sqrt{16\text{ cm}^2 + 9\text{ cm}^2} \\ &= \sqrt{25\text{ cm}^2} \\ &= 5\text{ cm} \end{aligned}$$

إذا كان قياس زوايا المثلث القائم الزاوية ˚45 ، ˚45، ˚90 فإن طول الوتر يساوي $\sqrt{2}$ مضروبًا في طول ضلع المثلث.



إذا كان قياس زوايا المثلث القائم الزاوية ˚90، ˚60، ˚30 فإن طول الوتر يساوي ضعفي طول الضلع الأقصر، وطول الضلع الأطول يساوي $\sqrt{3}$ مضروبًا في طول الضلع الأصغر.



النسب المثلثية Trigonometric Ratios

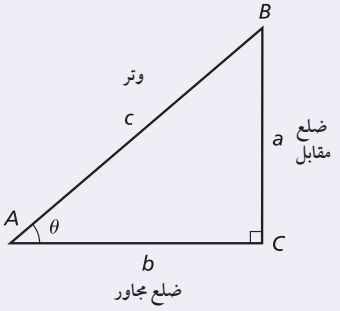
النسب المثلثية عبارة عن نسب أطوال أضلاع المثلث القائم الزاوية. والنسب المثلثية الأكثر شيوعًا هي الجيب $\sin\theta$، جيب التمام $\cos\theta$ والظل $\tan\theta$. ولاختصار هذه النسب تعلم الاختصارات التالية SOH–CAH–TOA. حيث ترمز SOH إلى جيب ، مقابل، الوتر، في حين ترمز CAH إلى جيب تمام، مجاور، الوتر. أما TOA فترمز إلى ظل تمام، مقابل، المجاور.

التعابير	مساعدة الذاكرة	الرموز
يشير الـ sin إلى نسبة المقابل للزاوية إلى طول الوتر	$\sin\theta = \frac{\text{المقابل}}{\text{الوتر}}$	$\sin\theta = \frac{a}{c}$
يشير الـ cos إلى نسبة طول الضلع المجاور للزاوية إلى طول الوتر.	$\cos\theta = \frac{\text{المجاور}}{\text{الوتر}}$	$\cos\theta = \frac{b}{c}$
يشير الـ tan إلى نسبة طول الضلع المقابل للزاوية إلى طول الضلع المجاور للزاوية	$\tan\theta = \frac{\text{المقابل}}{\text{المجاور}}$	$\tan\theta = \frac{a}{b}$

مثال: في المثلث القائم الزاوية ABC. إذا كانت $a = 3\text{ cm}$ ، $b = 4\text{ cm}$ ، $c = 5\text{ cm}$ ، فأوجد كلًّا من $\cos\theta$ و $\sin\theta$

$$\sin\theta = \frac{3\text{ cm}}{5\text{ cm}} = 0.6$$

$$\cos\theta = \frac{4\text{ cm}}{5\text{ cm}} = 0.8$$



مثال: في المثلث القائم الزاوية ABC، إذا كانت $\theta = 30.0^\circ$ ، $c = 20.0\text{ cm}$، فأوجد a و b .

$$\sin 30.0^\circ = \frac{a}{20.0\text{ cm}} \qquad \cos 30.0^\circ = \frac{b}{20.0\text{ cm}}$$

$$a = (20.0\text{ cm})(\sin 30.0^\circ) = 10.0\text{ cm}$$

$$b = (20.0\text{ cm})(\cos 30.0^\circ) = 17.3\text{ cm}$$

قانون جيب التمام وقانون الجيب Law of Cosines and Law of Sines

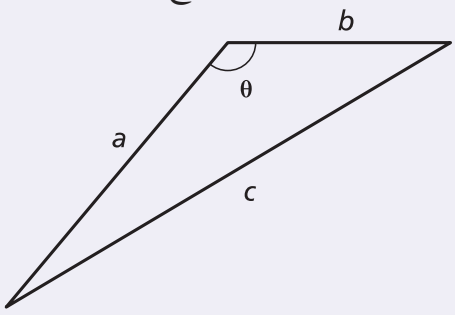
يمنحك قانونا جيب التمام والجيب القدرة على حساب أطوال الأضلاع والزوايا في أي مثلث.

قانون جيب التمام يشبه قانون جيب التمام نظرية فيثاغورس باستثناء الحد الأخير. وتمثل θ الزاوية المقابلة للضلع c. فإذا كان قياس الزاوية $\theta = 90^\circ$ فإن جتا $\theta = 0$ والحد الأخير يساوي صفرًا.

وإذا كان قياس الزاوية θ أكبر من 90° فإن جتا θ يُصبح عبارة عن رقم سالب.

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab\cos\theta$$

مثال: احسب طول الضلع الثالث للمثلث، إذا كان $a = 10.0\text{ cm}$ ، $b = 12.0\text{ cm}$ ، $\theta = 110.0°$.



$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab\cos\theta$$

$$c = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab\cos\theta}$$

$$= \sqrt{(10.0\text{ cm})^2 + (12.0\text{ cm})^2 - 2(10.0\text{ cm})(12.0\text{ cm})(\cos 110.0°)}$$

$$= \sqrt{1.00 \times 10^2\text{ cm}^2 + 144\text{ cm}^2 - (2.40 \times 10^2\text{ cm}^2)(\cos 110.0°)}$$

$$= 18.1\text{ cm}$$

قانون الجيب عبارة عن معادلة مكوّنة من ثلاثة نسب، حيث **c**، **b**، **a** الأضلاع المقابلة للزوايا **C**، **B**، **A** بالترتيب.

استعمل قانون الجيب عندما يكون قياس زاويتين وأي من الأضلاع الثلاثة للمثلث معلومة.

$$\frac{\sin A}{a} = \frac{\sin B}{b} = \frac{\sin C}{c}$$

مثال: في المثلث **ABC** إذا كان $C = 60.0°$ ، $a = 4.0\text{ cm}$، $c = 4.6\text{ cm}$، احسب قياس الزاوية **A**.

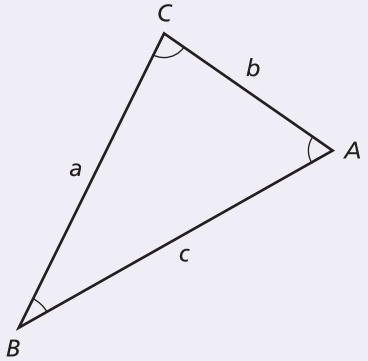
$$\frac{\sin A}{a} = \frac{\sin C}{c}$$

$$\sin A = \frac{a\sin C}{c}$$

$$= \frac{(4.0\text{ cm})(\sin 60.0°)}{4.6\text{ cm}}$$

$$= 0.75$$

$$A = 49°$$



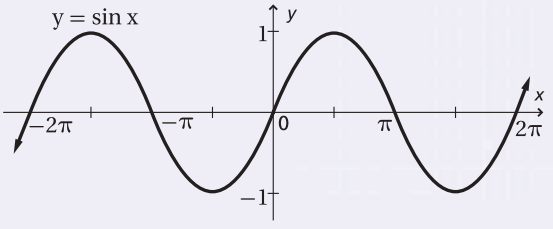
معكوس الجيب، ومعكوس جيب التمام، ومعكوس الظل Inverses of Sine, Cosine, and Tangent

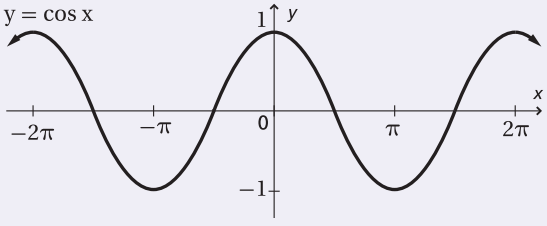
إن معكوس كل من الجيب، وجيب التمام، وظل التمام يمنحك القدرة على عكس اقترانات الجيب وجيب التمام وظل التمام، ومن ثم إيجاد قياس الزاوية. والاقترانات المثلثية ومعكوسها على النحو الآتي:

الاقتران المثلثي	المعكوس	
$y = \sin x$	$x = \sin^{-1} y$	أو معكوس $x = \sin y$
$y = \cos x$	$x = \cos^{-1} y$	أو معكوس $x = \cos y$
$y = \tan x$	$x = \tan^{-1} y$	أو معكوس $x = \tan y$

التمثيل البياني للاقترانات المثلثية Graphs of Trigonometric Functions

إن كل اقتران الجيب، $y = \sin x$ و اقتران جيب التمام، $y = \cos x$ هي اقترانات دورية. والزمن الدوري لكل اقتران يساوي 2π، وتكون قيمة x أي عدد حقيقي، أما قيمة y فتكون أي عدد حقيقي بين -1 و 1.





IX. اللوغاريتميات Logarithms

اللوغاريتميات للأساس b

افترض أن b و x عددان موجبان، بحيث $b \neq 1$. فإن لوغاريتم x للأساس b يكتب في صورة $(\log_b x)$ ويساوي y، حيث تمثل y الأس الذي يجعل المعادلة $x = b^y$ صحيحة. إن لوغاريتم x للأساس b يساوي العدد الأسي (y) الذي ترفع إليه العدد b للحصول على x.

$\log_b x = y$ إذا وفقط إذا $b^y = x$

مثال: أوجد ناتج كل من اللوغاريتمات التالية:

لأن $2^{-4} = \frac{1}{16}$ $\log_2 \frac{1}{16} = -4$

لأن $10^3 = 1000$ $\log_{10} 1000 = 3$

عندما تريد إيجاد لوغاريتم عددٍ ما يمكنك استعمال الآلة الحاسبة.

ارتباط الرياضيات مع الفيزياء يستعمل الفيزيائيون اللوغاريتمات للعمل بقياسات تمتد إلى مقادير متعددة القيمة أو القوة للعدد 10، ويستعمل الجيوفيزيائيون مقياس ريختر وهو مقياس لوغاريتمي يوفر لهم القدرة على تقدير معدل الزلازل من 5 إلى 7 أو أكبر، وتختلف قوة الزلازل بمقدار 7 أو بقوى أكبر للأساس 10.

اللوغاريتمات الطبيعية Common Logarithms

تسمى اللوغاريتمات للأساس 10 اللوغاريتمات الطبيعية، وتكتب غالبًا بدون الرقم الدليل 10.

$$\log_{10} x = \log x \quad x > 0$$

المقابلات اللوغاريتيمة أو معكوس اللوغاريتمات Antilogarithms or Inverse Logarithms

المقابل اللوغاريتمي هو معكوس اللوغاريتم، ويمثل العدد الذي له لوغاريتم.

مثال: حل $\log x = 4$ بالنسبة للمتغير x

$$\log x = 4$$

10^4 هي المقابل اللوغاريتمي للعدد 4 $\quad x = 10^4$

ارتباط الرياضيات مع الفيزياء إن معادلة مستوى الصوت L، بوحدة الديسبل، هي $L = 10 \log_{10} R$. حيث R الشدة النسبية للصوت. احسب R لشوكة رنانة تصدر صوتًا بمستوى صوت مقداره 130 ديسيبل.

قسّم طرفي المعادلة على العدد 10 $\quad 130 = 10 \log_{10} R$

استعمل قاعدة اللوغاريتم $\quad 13 = \log_{10} R$

$$R = 10^{13}$$

عندما تعلم قيمة اللوغاريتم لعدد وتريد معرفة العدد نفسه يمكنك استعمال الآلة الحاسبة لإيجاد معكوس اللوغاريتم.

مسائل تدريبية

20. اكتب الصيغة الأسية للمعادلة $\log_3 81 = 4$

21. اكتب الصيغة اللوغاريتمية للمعادلة $10^{-3} = 0.001$

22. إذا كان $\log x = 3.125$، فأوجد قيمة x.

الوحدات الأساسية SI		
الكمية	الاسم	الرمز
الطول	meter	m
الكتلة	kilogram	kg
الزمن	second	s
درجة الحرارة	kelvin	K
مقدار المادة	mole	mol
التيار الكهربائي	ampere	A
شدة الإضاءة	candela	cd

وحدات SI المشتقة				
القياس	الوحدة	الرمز	معبرة بالوحدات الأساسية	معبرة بوحدات SI أخرى
التسارع		m/s^2	m/s^2	
المساحة		m^2	m^2	
الكثافة		kg/m^3	kg/m^3	
الشغل، الطاقة	joul	J	$kg.m^2/s^2$	N.m
القوة	newton	N	$kg.m/s^2$	
القدرة	watt	W	$kg.m^2/s^3$	J/s
الضغط	bascal	Pa	$kg/m.s^2$	N/m^2
السرعة		m/s	m/s	
الحجم		m^3	m^3	

ثوابت فيزيائية			
الكمية	الرمز	المقدار	القيمة التقريبية
وحدة كتلة الذرة	u	$1.66053886\times 10^{-27}$ kg	1.66×10^{-27} kg
عدد أفوجادرو	N_A	6.0221415×10^{23} mol^{-1}	6.022×10^{23} mol^{-1}
ثابت بولتزمان	k	1.3806505×10^{-23} $Pa.m^3/K$	1.38×10^{-23} $Pa.m^3/K$
ثابت الغاز	R	8.314472 $Pa.m^3/mol.K$	8.31 $Pa.m^3/mol.K$
ثابت الجاذبية	G	6.6742×10^{-11} $N.m^2/kg^2$	6.67×10^{-11} $N.m^2/kg^2$

البادئات		
البادئة	الرمز	الدلالة العلمية
femto	f	10^{-15}
baico	p	10^{-12}
nano	n	10^{-9}
micro	μ	10^{-6}
mile	m	10^{-3}
cm	c	10^{-2}
disa	d	10^{-1}
dica	da	10^{1}
hecto	h	10^{2}
kilo	k	10^{3}
mega	M	10^{6}
giga	G	10^{9}
terra	T	10^{12}
beta	P	10^{15}

كثافة بعض المواد الشائعة	
المادة	الكثافة (g/cm^3)
ألومنيوم	2.702
كادميوم	8.642
نحاس	8.92
جرمانيوم	5.35
ذهب	19.31
هيدروجين	8.99×10^{-5}
إنديوم	7.30
حديد	7.86
رصاص	11.34
زئبق	13.546
أكسجين	1.429×10^{-3}
سليكون	2.33
فضة	10.5
ماء (4 c°)	1.000
خارصين	7.14

درجات الانصهار والغليان لبعض المواد		
المادة	درجة الذوبان (c°)	درجة الغليان (c°)
ألومنيوم	660.37	2467
نحاس	1083	2567
جرمانيوم	937.4	2830
ذهب	1064.43	2808
إنديوم	156.61	2080
حديد	1535	2750
رصاص	327.5	1740
سيليكون	1410	2355
فضة	961.93	2212
ماء	0.000	100.000
خارصين	419.58	907

السعة الحرارية النوعية لبعض المواد الشائعة			
	الحرارة النوعية (J/kg.K)	المادة	الحرارة النوعية (J/kg.K)
ألومنيوم	897	رصاص	130
نحاس أصفر	376	ميثانول	2450
كربون	710	فضة	235
نحاس	385	بخار	2020
زجاج	840	ماء	4180
جليد	2060	خارصين	388
حديد	450		

الحرارة الكامنة للانصهار وحرارة التبخر لبعض المواد الشائعة		
المادة	حرارة الانصهار (J/kg)	حرارة التبخر(J/kg)
نحاس	2.05×10^5	5.07×10^6
ذهب	6.30×10^4	1.64×10^6
حديد	2.66×10^5	6.29×10^6
رصاص	2.04×10^4	8.64×10^5
زئبق	1.15×10^4	2.72×10^5
ميثانول	1.09×10^5	8.78×10^5
فضة	1.04×10^5	2.36×10^6
ماء (جليد)	3.34×10^5	2.26×10^6

الأطوال الموجية للضوء المرئي	
الطول الموجي (nm) بالنانومتر	اللون
430–380	الضوء البنفسجي
450–430	الضوء النيلي
500–450	الضوء الأزرق
520–500	الضوء الأزرق الداكن
565–520	الضوء الأخضر
590–565	الضوء الأصفر
625–590	الضوء البرتقالي
740–625	الضوء الأحمر

سرعة الصوت في أوساط مختلفة	
m/s	الوسط
331	هواء (0°)
343	هواء (20°)
972	هيليوم (0°)
1286	هيدروجين (0°)
1493	ماء (25°)
1533	ماء البحر (0°)
1600	مطاط
3560	نحاس (25°)
5130	حديد (25°)
5640	زجاج التنور
12000	ألماس

المصطلحات

أ

الاستضاءة illuminance: معدل اصطدام الضوء بسطح أو معدل الضوء الساقط على وحدة المساحة، وتُقاس بوحدة اللومن لكل متر مربع، lm/m^2 أو لوكس **lx**.

الاستقطاب polarization: الضوء الذي تتذبذب موجاته في مستوى واحد فقط.

انزياح دوبلر Doppler shift: الفرق بين الطول الموجي المُلاحظ للضوء والطول الموجي الأصلي للضوء، والذي يعتمد على السرعة النسبية للملاحظ، أو المراقب، وسرعة مصدر الضوء.

الانعكاس غير المنتظم diffuse reflection: انعكاس مضطرب متشتّت ناتج عن سطح خشن.

الانعكاس الكلي الداخلي total internal reflection: يحدث عندما يسقط الشعاع الضوئي في وسطٍ معاملُ انكساره كبيرٌ إلى وسطٍ معاملُ انكساره أقلّ، على أن يصطدم بالحد الفاصل (الحاجز) بزاوية أكبر من الزاوية الحرجة، مما يؤدي إلى انعكاس الضوء جميعه وارتداده إلى الوسط الذي معامل انكساره أكبر.

الانعكاس المنتظم specular reflection: انعكاس ناتج عن سطح أملس، بحيث تنعكس الأشعة متوازية عندما تسقط متوازية.

الانكسار refraction: التغير في اتجاه الموجة عند الحد الفاصل بين وسطين مختلفين.

أهداب الحيود fringes interference: نمط من حزم مضيئة ومعتمة يتكوّن على شاشة، نتيجة التداخل الهدّام والتداخل البنّاء لموجات الضوء المارة خلال شقين – في حاجز – متقاربين.

ب

البؤرة focal point: النقطة التي تتجمع فيها الأشعة الضوئية الساقطة بصورة موازية للمحور الرئيس بعد أن تنعكس عن المرآة.

بطن الموجة antinode: النقطة ذات الإزاحة الكبرى عند التقاء نبضتي موجة.

البعد البؤري focal length: بعد البؤرة عن سطح المرآة على امتداد المحور الرئيس.

البندول pendulum: أداة توضح الحركة التوافقية البسيطة، ويتكوّن من جسم ثقيل يُسمَّى ثقل البندول، يُعلّق بوساطة خيط أو قضيب خفيف، ثم يسحب ثقل البندول إلى أحد الجانبين ويترك ليتأرجح جيئةً وذهابًا.

المصطلحات

ت

تأثير دوبلر Doppler effect: التغير في تردد الصوت الناتج عن تحرك مصدر الصوت أو المراقب أو كليهما.

التداخل interference: نتيجة تراكب موجتين أو أكثر، ويمكن أن يكون التداخل بنائيًا (إزاحات الموجة في الاتجاه نفسه)، ويمكن أن يكون التداخل هدميًا (اتساعات الموجات متساوية ولكن متعاكسة).

التداخل في الأغشية الرقيقة thin-film interference: الظاهرة التي ينتج عنها طيف الألوان بسبب التداخل البنائي والتداخل الهدمي لموجات الضوء المنعكسة عن الغشاء الرقيق.

التدفق الضوئي luminous flux: المعدل الذي تُبعث فيه الطاقة الضوئية من المصدر الضوئي، وتُقاس بوحدة اللومن lm.

التردّد frequency: عدد الذبذبات الكاملة التي تحدثها الموجة في الثانية الواحدة، وتُقاس بوحدة الهرتز Hz.

التردّد الأساسي fundamental: أقل تردّد للصوت الذي يحدث الرنين في الآلات الموسيقية.

تردّد الضوء المُلاحظ observed light frequency: تردّد الضوء كما يراه مراقب.

التفريق dispersion: فصل الضوء الأبيض وتحليله إلى ألوان الطيف باستخدام منشور زجاجي أو قطرات الماء في الغلاف الجوي.

التكبير magnification: مقدار الزيادة أو النقصان في حجم الصورة بالنسبة إلى حجم الجسم.

ج

الجسم object: مصدر أشعة ضوئية مضيء ذاتيًا أو مُضاء.

الجسم شبه الشفاف translucent: وسط يُنفذ جزءًا من الضوء ويعكس الجزء الآخر، ولا يمكنك رؤية الأجسام بوضوح من خلاله.

الجسم الشفاف transparent: وسط ينفذ الضوء ويعكس أيضًا جزءًا منه، ويسمح برؤية الأجسام بوضوح من خلاله.

الجسم غير الشفاف (المعتم) opaque: الوسط الذي يمتص الضوء ويعكس جزءًا منه بدل أن ينفذه، ولا يمكن الرؤية من خلاله أو رؤية الأجسام الأخرى.

ح

الحركة التوافقية البسيطة simple harmonic motion: الحركة التي تحدث عندما تتناسب قوة الإرجاع المؤثرة في جسم طرديًا مع إزاحة الجسم عن وضع الاتزان.

الحركة الدورية periodic motion: أي حركة تتكرر في دورة منتظمة.

الحيود diffraction: انحناء الموجات الضوئية أو الصوتية حول حاجز.

المصطلحات

ر

الرنين resonance: حالة خاصة في الحركة التوافقية البسيطة تحدث عندما تُطبّق قوى صغيرة في فترات منتظمة على جسم مهتز، مما يؤدي إلى زيادة اتساع الاهتزاز.

ز

الزاوية الحرجة critical angle: هي زاوية السقوط التي ينكسر عندها الشعاع على امتداد الحد الفاصل بين الوسطين.

الزمن الدوري periode: مقدار الزمن الذي يحتاج إليه الجسم حتى يكمل دورة واحدة من الحركة.

الزيغ الكروي spherical aberration: عيب في المرآة الكروية، بحيث لا يسمح للأشعة الضوئية المتوازية البعيدة عن المحور الرئيس بالتجمع في البؤرة، فتكوّن المرآة نتيجة لذلك صورة مشوشة غير تامة.

الزيغ اللّوني chromatic aberration: عيب في العدسات الكروية يؤدي إلى تركيز الضوء المار خلال العدسات في نقاط مختلفة، مما يؤدي إلى ظهور الجسم المرئي خلال العدسة محاطًا بحزم ملونة.

س

سعة الموجة amplitude: أقصى مسافة يتحركها الجسم عن موضع اتزانه في أي حركة دورية.

ش

الشعاع ray: الخط الذي يبين اتجاه الموجة المنتقلة، ويُرسم عموديًّا على قمة الموجة.

ص

صدر الموجة wave front: الخط الذي يمثّل قمة الموجة في بعدين، والذي يبيّن طولها الموجي ولا يبيّن سعتها عند رسمها ضمن مقياس رسم.

الصورة الحقيقية real image: صورة مقلوبة مصغرة أو مكبرة، وتتكوّن نتيجة تجمّع الأشعة الضوئية.

الصورة التقديرية virtual image: الصورة المتكوّنة من تباعد الأشعة الضوئية، وتتكوّن عادة في الجهة المعاكسة للمرآة من الجسم.

المصطلحات

ض

الضربة beat: اهتزاز سعة الموجة الناتجة عن تراكب موجتي صوت لهما تردّدان متماثلان تقريبًا.

الضوء الأحادي اللون monochromatic light: الضوء الذي له طول موجي واحد فقط.

الضوء غير المترابط incoherent light: ضوء بصدور موجية غير متزامنة تضيء الأجسام بضوء أبيض منتظم، أو هو ضوء يتكون من موجات مختلفة في الطور؛ قِممُها وقيعانها غير متوافقة.

الضوء المترابط coherent light: ضوء من مصدرين أو أكثر، يولّد تراكبه موجة ذات صدور منتظمة، أو هو موجات ضوء تكون في درجات متطابقة في القمم والقيعان.

ط

الطول الموجي wavelength: أقصر مسافة بين النقاط التي يعيد نمط الموجة نفسه فيها، كالمسافة بين قمة وقمة، أو المسافة بين قاع وقاع.

طول النظر farsightendness: عيب في الرؤية، حيث لا يستطيع الشخص المصاب به رؤية الجسم القريب بوضوح؛ بسبب تكوّن الصورة خلف الشبكيّة، ويمكن تصحيحه بعدسة محدبة.

ع

العدسة lens: قطعة من مادة شفافة، مثل الزجاج أو البلاستيك، تستخدم في تجميع الضوء وتكوين الصور.

العدسة اللالونية achromatic lens: تراكب يتكوّن من عدستين أو أكثر مختلفتين في معاملي الانكسار (عدسة مقعرة مع عدسة محدبة مثلاً) والتي تستخدم لتقليل الزيغ اللّوني.

العدسة المحدّبة convex lens: عدسة مجمّعة، سميكة في وسطها وأقل سمكًا عند أطرافها، تجعل الأشعة المتوازية الساقطة عليها تتجمّع في نقطة عندما تكون محاطة بمادة معامل انكسارها أقل من معامل انكسار العدسة، وتكوّن صورًا مصغّرة ومقلوبة وحقيقية أو مكبرة ومعتدلة وتقديرية.

العدسة المقعّرة concave lens: عدسة مفرّقة، وسطها أقل سمكًا من أطرافها، تشتّت الضوء الساقط عليها والمار بها عندما يكون معامل انكسار الوسط المحيط بها أقل من معامل انكسارها، وتكوّن صورًا تقديرية ومعتدلة.

العقدة node: النقطة الثابتة التي تلتقي فيها نبضتان موجيتان في الموقع نفسه، حيث تصبح الإزاحة الناتجة صفرًا.

ق

قانون الانعكاس law of reflection: ينصّ على أن زاوية انعكاس الشعاع المحصورة بين العمود المقام والشعاع المنعكس تساوي زاوية السقوط المحصورة بين العمود المقام والشعاع الساقط.

المصطلحات

قانون سنل في الانكسار Snell's law of refraction: ينص على أن حاصل ضرب معامل انكسار وسط السقوط في جيب زاوية السقوط يساوي حاصل ضرب معامل انكسار وسط الانكسار في جيب زاوية الانكسار.

قانون مالوس Malus's law: ينصّ على أن شدة الضوء الخارج من مرشّح الاستقطاب الثاني تساوي شدة الضوء المستقطَب الخارج من مرشّح الاستقطاب الأول مضروبًا في مربع جيب تمام الزاوية المحصورة بين محوري الاستقطاب للمرشّحين.

قانون هوك Hooke's law: ينصّ على أن القوة المؤثرة في نابض تتناسب طرديًّا مع مقدار الاستطالة الحادثة فيه.

قصر النظر nearsightedness: عيب في الرؤية؛ حيث لا يستطيع الشخص المصاب به رؤية الجسم البعيد بوضوح؛ لأن الصورة تتكوّن أمام الشبكية، ويُصحّح باستخدام عدسة مقعرة.

القمة crest: أعلى نقطة في الموجة.

ل

اللّون الأساسي (الأساس) primary color: الألوان الأحمر والأخضر والأزرق، التي تكوّن اللون الأبيض عندما تتحد معًا، كما تُنتج الألوان الثانوية، وهي الأصفر، والأزرق المخضر، والأرجواني، عند مزجها في أزواج.

اللّون الثانوي secondary color: ينتج كلّ من اللّون الأصفر واللّون المخضر واللّون الأرجواني عن اتحاد لونين أساسيّين.

اللون المتمّم complementary color: لون الضوء الذي يعطي ضوءًا أبيض عند تراكبه مع ضوء آخر.

م

مبدأ التراكب principle of superposition: ينصّ على أن إزاحة الوسط الناتجة عن موجتين أو أكثر هي المجموع الجبري لإزاحات الموجات، وهي منفردة.

محزوز الحيود diffraction grating: أداة تتكوّن من عدد كبير من الشقوق المفردة المتقاربة جدًّا. ويؤدي المحزوز إلى حيود الضوء، وتكوين نمط الحيود الذي يتكوّن نتيجة تراكب أنماط حيود الشق المفرد، ويستخدم الحيود في قياس الطول الموجي للضوء بدقة أو لفصل الضوء وفق الأطوال الموجة المختلفة.

المحور الرئيس principle axis: خط مستقيم عمودي على سطح المرآة حيث يقسمها إلى نصفين.

المرآة المحدّبة convex mirror: مرآة تعكس الضوء عن سطحها المقوّس (المنحني) إلى الخارج، وتكوّن صورًا معتدلة ومصغّرة وتقديرية.

المرآة المستوية plane mirror: سطح أملس ناعم يعكس الضوء انعكاسًا منتظمًا، ويكوّن صورة تقديرية ومعتدلة لها حجم الجسم نفسه وهيئته، ولها أيضًا البعد نفسه الذي يبعده الجسم عن المرآة.

المرآة المقعّرة concave mirror: مرآة تعكس الضوء عن سطحها المقوّس (المنحني) إلى الداخل، وتكوّن صورًا معتدلة وهميّة أو مقلوبة وحقيقية.

المصطلحات

المصطلحات

معادلة العدسة الرقيقة thin lens equation: تنصّ على أن مقلوب البعد البؤري لعدسة كروية يساوي مجموع مقلوب كلٍّ من بعد الصورة وبعد الجسم.

المصدر المستضيء (المُضاء) illuminated source: جسم، مثل القمر، يظهر مضيئًا نتيجة انعكاس الضوء عنه.

المصدر المضيء luminous source: جسم يبعث الضوء، كالشمس أو المصباح.

معادلة المرآة mirror equation: علاقة تربط بين البعد البؤري، وموقع الجسم، وموقع الصورة في المرآة الكروية.

معامل الانكسار index of refraction بالنسبة لوسط ما: هو النسبة بين سرعة الضوء في الفراغ إلى سرعة الضوء في ذلك الوسط.

الموجة wave: اضطراب ينقل الطاقة خلال وسط ناقل أو في الفراغ، كما أنه ينقل الطاقة ولا ينقل جزيئات الوسط الناقل.

الموجة الدورية periodic wave: موجة ميكانيكية تتحرك إلى أعلى وإلى أسفل بالمعدل نفسه.

الموجة الساقطة incident wave: الموجة التي تصطدم بالحد الفاصل بين وسطين.

الموجة السطحية surface wave: موجة ميكانيكية ناتجة عن تحرك دقائق الوسط في كلا الاتجاهين: في اتجاه حركة الموجة نفسه، وفي الاتجاه المتعامد مع اتجاه حركتها.

الموجة الصوتية sound wave: انتقال تغيرات الضغط خلال مادةٍ على شكل موجة طولية، ويحدث لها انعكاس وتداخل، كما أن لها ترددًا، وطول موجة، وسرعة، وسعة.

الموجة الطولية longitudinal wave: موجة ميكانيكية ينتقل الاضطراب فيها في اتجاه حركة الموجة نفسه؛ أي موازيًا لها.

الموجة المستعرضة transverse wave: موجة ميكانيكية تتذبذب عموديًّا على اتجاه حركة الموجة

الموجة المنعكسة reflected wave: الموجة المرتدة الناتجة عن انعكاس بعض طاقة نبضة الموجة الساقطة إلى الخلف.

الموجة الموقوفة (المستقرة) standing wave: الموجة التي تظهر واقفة وساكنة، وتتولّد نتيجة تداخل موجتين تتحركان في اتجاهين متعاكسين.

ن

نبضة الموجة wave pulse: اضطراب مفرد أو نبضة مفردة تنتقل خلال وسط.

نمط الحيود diffraction pattern: نمط يتكوّن على الشاشة، ينتج عن التداخل البنائي والتداخل الهدمي لموجات هيجنز.

التعليم
مستقبل البحرين

ارابيان امبريشنز
طباعة • نشر • تواصل
arabian impressions
PRINT • PUBLISH • COMMUNICATE