إنّ الانعكاس عن سطح الماء الهادئ، كما الانعكاس عن مرآة زجاجيّة، يمكن تحليلهما باستعمال النّموذج الشّعاعيّ للضّوء.

هل تقف هذه الصورة بصورةٍ صحيحة؟ كيف يمكنك إثبات ذلك؟ ما براهينك؟ إنّ مخطّطات الأشعّة كما ستتعلمها في هذا الفصل ستخبرنا بأنها مقلوبة.

في هذا الفصل الأول عن الضّوء والبصريّات، سنستخدم طريقة الأشعّة لفهم تكوين الأخيلة في المرايا بنوعيها المستوية والكرويّة، كما في العدسات أيضًا، التي تعدّ البند الأساسيّ في كثير من الأجهزة الضّوئيّة.

الفصل 23

الضَّوء: البصريّات الهندسيّة

إنّ حاسّة الإبصار مهمّةٌ جدّا لنا؛ لأنّها تزوّدنا بجزءٍ كبيرٍ من المعلومات عن العالم. كيف نرى؟ ما هو هذا الشّيء المُسَمّى بالضّوء الذي يدخل عيوننا ويسبب الإحساس بالرّؤية؟ كيف يتصرف الضّوء بحيث نرى كلّ شيء نعمله؟ لقد رأينا في (الفصل 22) أنّ الضّوء يمكن اعتباره نوعًا من الإشعاع الكهرومغناطيسيّ. وسوف نتناول موضوع الضّوء بالتفصيل في الفصول الثلاثة القادمة.

يصل الضّوء إلى عيوننا من: 1- الجسم كمصدر. 2 - انعكاس الضوء عن الجسم.

نستطيع رؤية الأشياء بواحدة من طريقتين: 1- قد يكون الجسم مصدرًا للضّوء، كالمصباح، واللهب، حيث نرى الضّوء المنبعث من المصدر مباشرة، أو بصورة أشمل . 2- رؤية الجسم بواسطة الضّوء المنعكس عنه. في الحالة الثانية، قد يكون الضّوء في الأصل ناتج من الشّمس، أو مصدر صناعيّ، أو نار مخيم.

إنّ كيفيّة إصدار الأجسام الضّوء لم يتمّ فهمها إلّا في عشرينيّات القرن العشرين، وهذا ما سنناقشه في (الفصل 27). وأمّا عن كيفية انعكاس الضّوء عن الأجسام، فقد أمكن التّوصّل إليه قبل ذلك بكثير، وسنناقشه في (البند 23-2).

23-1 نموذج الشّعاع الضّوئيّ

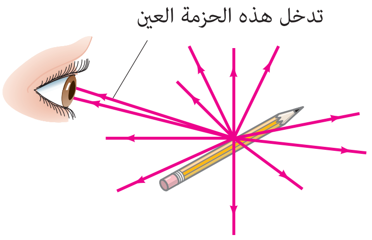
تقترح الكثير من العلامات والدلائل أنّ *الضّوء ينتقل في خطوط مستقيمة* تحت ظروف كثيرة. فمثلًا، يلقي مصدرٌ نقطيٌّ للضّوء مثل الشّمس بظلال بعيدة، وحزمة الضّوء الوميضي تبدو كخط مستقيم. وفي الحقيقة، فإنّنا نحدد أماكن الأجسام المحيطة بفرض أنّ الضّوء يتحرّك من الجسم إلى عيوننا في مسارات مستقيمة. ويعتمد تنظيمنا للعالم الفيزيائي على هذا الفرض المعقول الذي أدى إلى نموذج الشّعاع الضّوئيّ.

الأشعّة الضّوئيّة

يفرض هذا النّموذج أنّ الضّوء ينتقل في مسارات خطّيّة مستقيمة تسمى **الأشعّة**. وفي الحقيقة، الشّعاع شيء مثالي؛ ونعني به أنه يمثل حزمة ضيقة جدًا من الضّوء.

عندما نرى جسمًا وفقًا للنموذج الشّعاعيّ، يصل الضّوء إلى عيوننا من كلّ نقطة في الجسم. على الرّغم من أنّ الأشعّة الضّوئيّة تغادر كلّ نقطة في الجسم في اتّجاهات شتى. وفي العادة، فإنّ حزمة ضيقة من هذه الأشعّة تستطيع عبور فتحة البؤبؤ في عين المشاهد. كما هو مبين في (الشّكل 23-1). إذا تحرّك رأس المشاهد جانبًا، فإنّ حزمة مختلفة من الأشعّة سوف تدخل العين من كلّ نقطة.

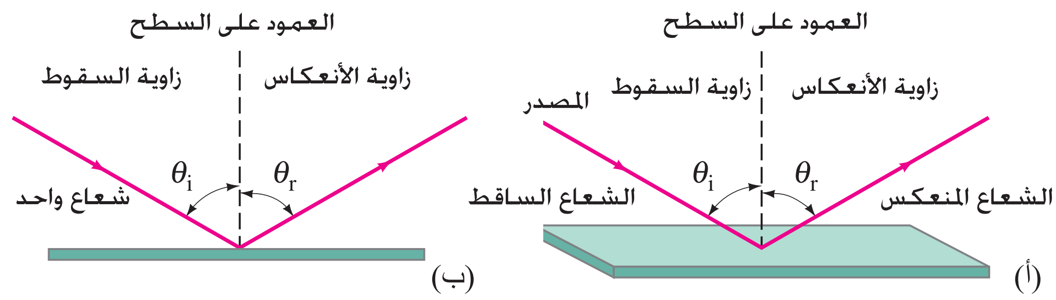
لقد رأينا في (الفصل 22) أنّ الضّوء يمكن اعتباره موجة كهرومغناطيسية. وعلى الرّغم من أنّ النّموذج الشّعاعيّ للضّوء لا يعالج هذا الموضوع (سوف نناقش الطبيعة الموجية للضّوء في الفصل 24)، إلا أنّ نموذج الشّعاع الضّوئيّ نجح في وصف وجوه كثيرة للضّوء كالانعكاس، والانكسار، وتكوين الأخيلة بواسطة المرايا والعدسات. ولأنّ التفسيرات احتوت الكثير من الأشعّة الضّوئيّة بزوايا مختلفة، فإنّ هذا الموضوع يُقالُ له الضّوء الهندسيّ.



الشّكل 23-1 تأتي الأشعّة الضّوئيّة من كلّ نقطة في الجسم. تخرج حزمة صغيرة من الأشعّة من نقطة واحدة، وتدخل في عين شخص ما.

2-23 الانعكاس؛ تكون الصورة في المرآة المستوية

عندما يصطدم الضّوء بسطح جسم ما، ينعكس بعضه. وقد يمتص الجزء الباقي من قِبل الجسم (ويتحول أخيرًا إلى طاقة حراريّة) أو، إذا كان الجسم شفّافًا مثل الزّجاج، أو الماء، بحيث ينفذ جزء منه من خلاله. وأمّا في الجسم المصقول جدًا، مثل مرآة مفضّضة، فإنّ أكثر من 95% من الضّوء يمكن أن ينعكس.



الشّكل 23-2 قانون الانعكاس (أ) يبين منظرًا ثلاثيّ الأبعاد لشعاع ساقط ينعكس فوق سطح مستوٍ؛ (ب) يبين منظرًا جانبيًّا، وهو ما سنستعمله نظرًا لوضوحه.

عندما تصطدم حزمة ضيقة من الضّوء بسطح مستوٍ (الشّكل 23-2). نعرف **زاوية السّقوط**، θ_i، لتكون الزاوية التي يصنعها الشّعاع السّاقط مع العموديّ على السّطح. **وزاوية الانعكاس**، θ_r، الزاوية التي يصنعها الشّعاع المنعكس مع العموديّ على السّطح. وقد وُجد أنّ الشّعاعيْن السّاقط والمنعكس العموديّين على السّطح يقعان في مستوى واحد.

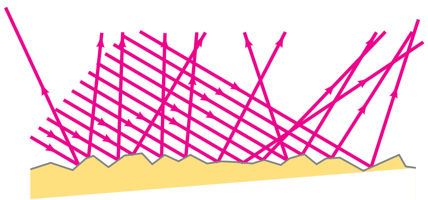
زاويتا السّقوط والانعكاس (تقاسان مع العمودي ⊥ على السّطح)

قانون الانعكاس

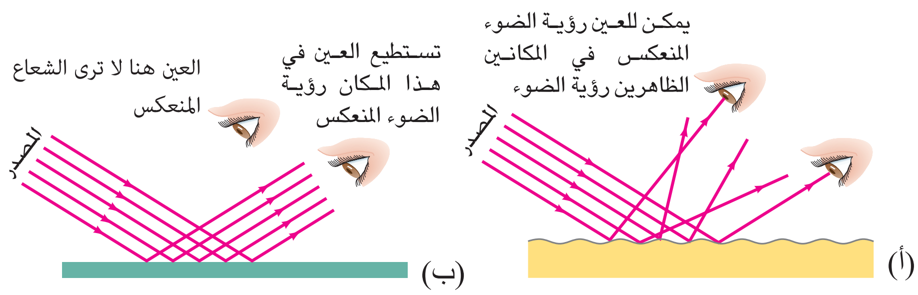
وأنّ زاوية الانعكاس تساوي زاوية السّقوط، $\theta_r = \theta_i$؛

وهذا هو قانون الانعكاس، وهو موضح في (الشّكل 23 - 2). لقد كان هذا القانون معروفًا للإغريق القدماء، ويمكنك برهانه بنفسك باسقاط حزمة ضيقة ضوئية على مرآة في غرفة معتمة.

عند سقوط الضّوء على سطح خشن، وحتى لو كان خشنًا مجهريًّا كهذه الصفحة، فإنّه ينعكس في اتّجاهات كثيرة، (الشّكل 23-3). وفي هذه الحالة يدعى الانعكاس المنتشر. ويبقى قانون الانعكاس ساري المفعول، ولكن على جزء صغير من السّطح. وبسبب الانعكاس المنتشر في الاتّجاهات جميعها، يمكن رؤية الجسم العادي من زوايا مختلفة بواسطة الضّوء المنعكس عنه. وعندما تحرّك رأسك جانبًا، تصل عينيك أشعّة منعكسة مختلفة من كلّ نقطة على الجسم، (مثل هذه الصفحة)، (شكل 23-4 أ). دعنا نقارن الانعكاس المنتشر بالانعكاس عن مرآة، والذي يُسَمّى انعكاسًا منتظمًا؛ عندما تسقط حزمة ضوئية ضيقة على مرآة، لن يصل الضّوء إلى عينيك، إلّا إذا كانت العين في الموضع الصحيح حيث يتحقق قانون الانعكاس، كما هو واضح في (الشّكل 23-4 ب). وهذا هو الذي يؤدي إلى تكوين الأخيلة في المرايا.



الشّكل 23-3 الانعكاس المنتشر من سطح خشن.

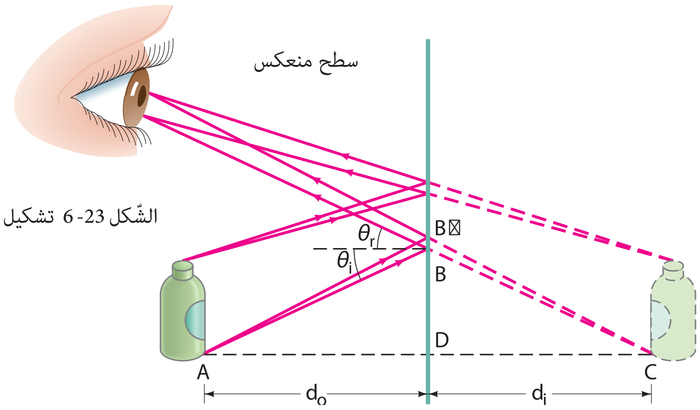


الشّكل 23-4 حزمة ضوئية تسقط على: (أ) ورقة بيضاء. (ب) مرآة. في البند (أ) تستطيع أن ترى الضّوء الأبيض المنعكس من أماكن مختلفة بسبب الانعكاس المنتشر. ولكن في البند (ب) تستطيع فقط أن ترى الضّوء المنعكس إذا كانت عيناك فقط في الموضع الذي يحقق ($\theta_r = \theta_i$). وهذا هو الانعكاس المنتظم. (بين جاليليو بمثل هذه المناقشة أنّ سطح القمر خشن وليس أملسًا كما يعتقد بعضهم).

عندما تنظر مباشرةً في مرآة، فسترى ما يبدو أنّه نفسك بالإضافة لأشياء مختلفة حولك وخلفك. (الشّكل 23-5). ويبدو وجهك والأجسام الأخرى كأنها أمامك خلف المرآة، ولكنها ليست كذلك. إنّ ما تراه في المرآة هو خيال الأجسام، بما في ذلك نفسك، التي أمام المرآة.

الشّكل 23-5 عندما تنظر في مرآة، ترى خيالا لنفسك والأجسام المحيطة بك. إنك لا ترى نفسك كما يراك الآخرون؛ لأنّ اتجاهيّ اليمين واليسار يظهران معكوسين في الصورة.

المرآة المستوية هي ذات سطحٍ مستوٍ أملس عاكس. ويبين (الشّكل 23-6)، كيفية تكوّن الصورة بمرآة مستوية وفقا للنموذج الشّعاعيّ. نحن ننظر إلى مرآة عند الجانب، في (شكل 23-6). وتبين الأشعّة منعكسة عن السّطح الأمامي (المرايا الجيدة تصنع عادةً بواسطة وضع طبقة فلزية عالية الانعكاسية على سطح واحد من قطعة زجاجيّة مصقولة جيّدًا. ويبين (الشّكل 23-6). أشعة من نقطتين مختلفتين على جسم (قنينة). شعاعان يخرجان من نقطة واحدة (قمة القنينة)، وآخران من القاعدة. إنّ الأشعّة التي تنبعث من نقطة واحدة على الجسم تتفرق في الاتجاهات جميعها، ولكن الظاهرة هي فقط الحزمة التي تدخل العينين من كلّ من النقطتين. تبدو كلّ مجموعة متباعدة من الأشعّة التي تدخل العينين قادمة من نقطة واحدة (تدعى الصورة) خلف المرآة، كما هو مبين من الخطوط المنقطة. أي أنّ عيوننا وأدمغتنا تفسّر أيّ أشعة تدخل العينين كأنها انتقلت في خطوط مستقيمة. إنّ النقطة التي تبدو كلّ حزمة قادمة منها هي نقطة واحدة على الصورة. ولكلّ نقطة على الجسم، هناك نقطة مناظرة على الصورة.



الشّكل 23-6 تشكيل خيال وهميّ بواسطة مرآة مستوية.

دعنا نركز على الشّعاعين المنبعثين من النقطة A على الجسم في (الشّكل 23-6)، ويصطدمان بالمرآة عند النقطتين B، وB′. نستعمل الهندسة الآن للأشعة عند B. الزاويتان ADB و CDB قائمتان؛ وبسبب قانون الانعكاس، $\theta_i = \theta_r$ عند النقطة B. لذلك، من الهندسة، الزاويتان ADB و CBD متساويتان كذلك. ولهذا، يكون المثلثان ADB و CBD متشابهين، والطول $AD = CD$. أي أنّ الصورة يظهر على بعد يساوي بعد الجسم عن المرآة. أي أنّ بعد الصورة d_i (المسافة من المرآة للخيال) (شكل 23-6). يساوي بعد الجسم d_o (المسافة من الجسم إلى المرآة).

بعد الصورة = بعد الجسم (مرآة مستوية)

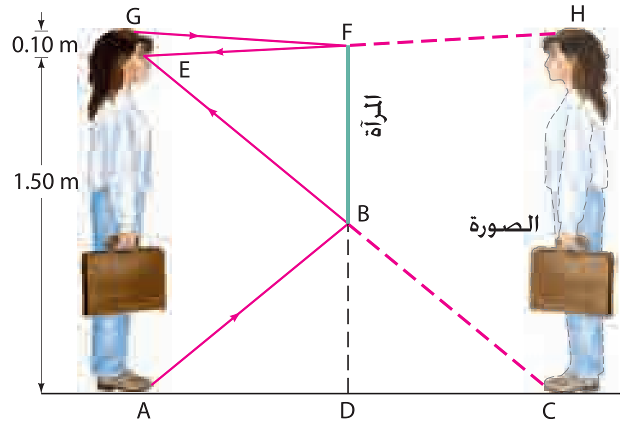
ونرى كذلك هندسيًا أنّ ارتفاع الصورة يساوي ارتفاع الجسم.

لن تمرّ الأشعّة في الواقع خلال موقع الصورة في (الشّكل 23-6). (لاحظ أنّ الخطوط الحمراء المتقطعة تبين أنّ هذه هي الامتدادات وليست الأشعّة الحقيقية). ولن يظهر الصورة على ورقة أو فيلم لو وضع في مكان الصورة. لذلك يسمى **خيالا وهميًا**، لتمييزه عن **الصورة الحقيقي**، حيث تمر الأشعّة فعلًا خلال الصورة. ولذلك، يمكن جمعها على ورقة أو فيلم لو وضع مكان الصورة. وباستطاعة عيوننا رؤية كلا الصورتين: الحقيقي والوهمي ما دامت الأشعّة تدخل البؤبؤ. وسوف نرى أنّ المرايا المكورة والعدسات يمكنها أن تكوّن خيالات حقيقية ووهمية أيضًا. عدسة جهاز الإسقاط السّينمائيّ مثلا، تنتج خيالا حقيقيًّا يمكن رؤيته على الشاشة.

الأخيلة الحقيقية والوهمية

المثال 23-1 ماذا يجب أن يكون ارتفاع مرآة لتكوّن خيالا كاملا لجسم الإنسان؟

طول سيدة 1.60 m تقف أمام مرآة مستوية عمودية. ما أصغر ارتفاع للمرآة؟ وماذا يجب أن يكون ارتفاع طرفها السفلي عن أرض الغرفة، إذا كانت قادرة على رؤية جسمها كاملا؟ (افرض أنّ عينيها على بعد 10 cm تحت قمة رأسها).



الشّكل 23-7 الإنسان يرى نفسه في المرآة.
(المثال 23-1)

النّهج: كي ترى جسمها كاملًا؛ يجب أن تنعكس الأشعّة الضّوئيّة الصادرة من قمة رأسها، وأخمص قدميها عن المرآة وتدخل عينيها؟ انظر (الشّكل 23-7). لم نبين شعاعين صادرين من كلّ نقطة كالسابق، حيث كان هدفنا أن نبين مكان تكوّن الصورة. وحيث نعرف الآن أنّ بعد الصورة عن المرآة خلفها يساوي بعد الجسم أمامها؛ فنحن بحاجة إلى أن نبيّن شعاعًا واحدًا خارجًا من النقطة G (قمة الرأس) وشعاعًا واحدًا آخر خارجًا من النقطة A (أصبع القدم). ومن ثمّ نستعمل الهندسة البسيطة.

الحلّ: افرض أولًا أنّ الشّعاع الذي يصدر من القدم عند A ينعكس عند B، ويدخل العين عند E. المرآة ليست بحاجة إلى الامتداد أسفل B. ولأنّ زاوية الانعكاس تساوي زاوية السّقوط، فإنّ ارتفاع BD يساوي نصف الارتفاع AE. ولأنّ الطول $AE = 1.60\ m - 0.10\ m = 1.50\ m$، فإنّ $BD = 0.75\ m$. وبصورة مشابهة، إذا كان على السيدة أن ترى قمة رأسها، فعلى قمة المرآة أن تكون عند النقطة F التي تقع 5 cm تحت قمة رأسها (نصف $GE = 10\ cm$). ولذلك، $DF = 1.55\ m$. إذن، يجب أن يكون ارتفاع المرآة $(1.55\ m - 0.75\ m) = 0.80\ m$ فقط، وأن يكون ارتفاع حافتها السفلية عن الأرض 0.75.

ملحوظة: نرى أنّ الإنسان بحاجة إلى مرآة طولها يساوي نصف طوله كي يستطيع (أو تستطيع) رؤية نفسه (أو نفسها).

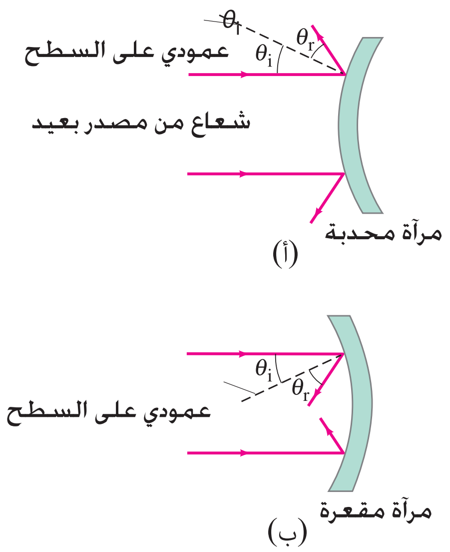
تمرين أ: هل تعتمد نتيجة (المثال 23 - 1) على بعد الشخص عن المرآة؟ (حاول ذلك، لترى أنّ ذلك ممتع).

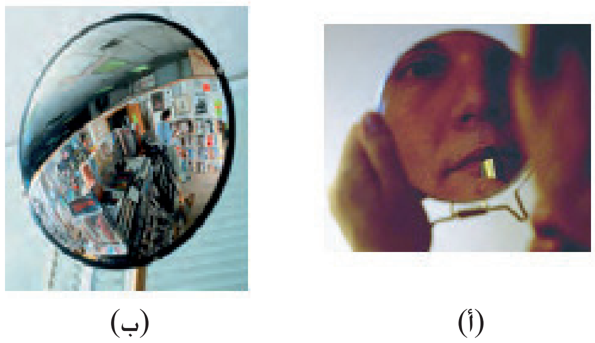
تطبيق الفيزياء
كم طول المرآة التي تحتاج إليها لرؤية انعكاس لجسمك كاملا؟

3-23 تكوين الأخيلة في المرايا الكروية

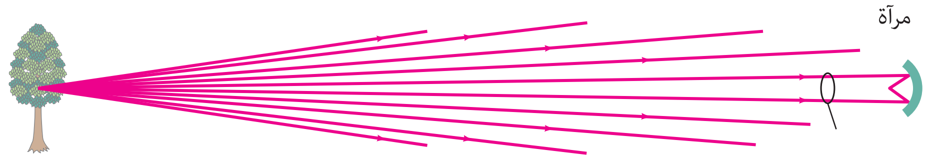
إنّ السّطوح العاكسة ليس من الضروري أن تكون مستوية؛ فمعظم المرايا المنحنية كروية، أي أنّها تشكل جزءًا من كرة. تُسَمّى المرآة الكروية محدّبة إذا حصل الانعكاس على السّطح الخارجي للشكل الكروي بحيث يظهر مركز سطح المرآة نحو الناظر (الشكل 23 - 8أ). في حين تُسَمّى المرآة مقعّرةً إذا كان السّطح العاكس على السّطح الداخلي للكرة بحيث يغور مركزه بعيدًا عن الناظر (مثل مغارة). (الشكل 23-8 ب). تستعمل المرايا المقعّرة للحلاقة أو الزينة (الشكل 23 - 9أ). في حين تستعمل المرايا المحدبة أحيانًا في السيارات والشاحنات (لتعطي خيالا للمناظر الخلفية). وفي المحلات التجارية (لمراقبة اللصوص)؛ لأنّها تعرض مشاهد واسعة (الشكل 23 - 9 ب).

الشّكل 23-8 مرايا ذات سطوح محدبة ومقعرة كروية. لاحظ $\theta_r = \theta_i$ لكلّ شعاع.





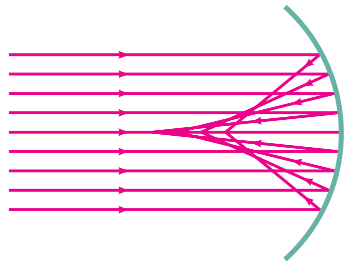
الشّكل 23-9. (أ) مرآة مقعرة تعطي خيالا مكبرًا. (ب) مرآة محدبة في محل تجاري تصغّر الصورة، ولذلك تتضمن مشهدًا واسعًا.



الشّكل 23-10 إذا كان بعد الجسم كبيرًا بالمقارنة مع أبعاد المرآة (أو العدسة)، فإنّ الأشعّة تكون متوازية تقريبًا. وتكون متوازية في حالة جسم يقع في اللانهاية

البؤرة والبعد البؤري

سنناقش الآن كيفية تكوّن الأخيلة بالمرايا الكروية. نفترض أولا جسمًا بعيدًا جدًّا من مرآة مقعرة. بالنسبة لجسم بعيد، كما هو مبين في (الشّكل 23 - 10)، الأشعّة الصادرة من كلّ نقطة على الجسم، والتي تصطدم بالمرآة تكون متوازية تقريبًا. أمّا بالنسبة لجسم بعيد جدًّا كالشمس والنجوم، فإنّ الأشعّة تكون متوازية تمامًا. الآن، افترض أشعة متوازية تسقط على مرآة مقعّرة كما في (الشّكل 23 - 11). ينطبق قانون الانعكاس لكلّ واحدٍ من هذه الأشعّة عند كلّ نقطة يصطدم بها على المرآة، وكما نرى، فإنّها لا تصل إلى النقطة نفسها.

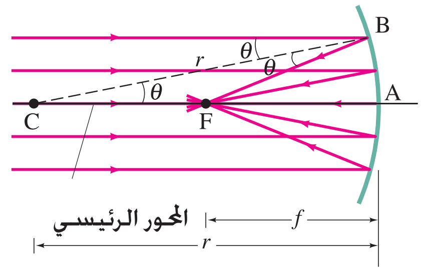


الشّكل 23-11 الأشعّة المتوازية تسقط على مرآة كروية لا تلتقي كلّها في نقطة واحدة. (يسمى هذا "العيب الزّيغ الكروي").

ولتكوين صورة واضحة؛ يجب أن تصل الأشعّة إلى النقطة نفسها. لذا، فإنّ المرآة الكروية لا تعطي خيالًا محدّدَ المعالم كما هو الحال في المرآة المستوية. ولكن، وكما سنبيّن لاحقًا، إذا كانت المرآة صغيرة نسبة إلى نصف قطر تكورها، بحيث يكون الشّعاع المنعكس فقط زاوية صغيرة مع الشّعاع الساقط (2θفي الشكل 23-12)، عندها سوف تتقاطع الأشعّة تقريبًا عند نقطة منفردة، هي **البؤرة**.

وفي الحالة المبينة في (الشّكل 23 - 12)، نشاهد أنّ الأشعّة توازي **المحور الرئيس**، والذي يعرف بأنه الخط المستقيم العمودي على السّطح المنحنى عند مركزه (الخط CA في الرسم). وتسمى النقطة F، حيث تلتقي الأشعّة المتوازية بعد الانعكاس، بؤرة المرآة. وتسمى المسافة بين F ومركز المرآة، الطول FA، **البعد البؤري**، f، للمرآة. البؤرة هي نقطة الصورة لجسم على بعد لا نهائي من المرآة يقع على المحور الرئيس؛ فخيال الشّمس مثلا، سيكون عند النقطة F.

الشّكل 23-12 الأشعّة الموازية للمحور الرئيس لمرآة كروية مقعرة تصل إلى البؤرة F، ما دامت المرآة صغيرة من حيث العرض مقارنة بنصف قطر تكورها، r. لذلك، تكون الأشعّة محورية؛ أي أنها تصنع زاوية صغيرة مع المحور.



وسنلاحظ الآن، أنّه في المرآة التي يكون سطحها العاكس صغيرا بالمقارنة مع نصف قطر تكورها، فإنّ الأشعّة ستلتقي عند نقطة منفردة، F، وسوف نحسب البعد البؤري، f. في هذا التقريب، نعتبر فقط الأشعّة التي تصنع زاوية صغيرة مع المحور الرئيس؛ هذه الأشعّة تدعى بالأشعّة المحورية، وزواياها يبالغ بها قليلا في (الشّكل 23-12) للتوضيح. نعتبر أولًا الشّعاع الذي يسقط على المرآة عند B في (الشّكل 23 - 12). النقطة C هي مركز تكور المرآة (مركز الكرة التي تشكّل المرآة جزءًا منها).

لذلك، فإنّ الخط المتقطع CB يساوي r، نصف قطر التكور، وCB عمودي على سطح المرآة عند B. الشّعاع القادم الذي يصطدم بالمرآة عند B يصنع زاوية θ مع العمودي. وعليه، يصنع الشّعاع المنعكس BF كذلك زاوية θ مع العمودي (قانون الانعكاس). لاحظ أنّ الزاوية BCF هي كذلك θ كما هو واضح. المثلث CBF متساوي الساقين لأنّ زاويتين فيه متساويتان، لذلك لدينا الطول$CF = BF$. ونعرف أنّ سطح المرآة صغير مقارنة بنصف قطر تكورها. لذا، فالزوايا صغيرة، والطول FB تقريبا يساوي الطول FA. في هذا التقريب $FA = FC$، ولكن $FA = f$، البعد البؤري، و$CA = 2 \times FA = r$. لذلك، فالبعد البؤري نصف قطر التكور:

البعد البؤري للمرآة

$$f = \frac{r}{2} \qquad \textbf{(1 - 23)}$$

فرضنا فقط أنّ الزاوية θ كانت صغيرة. لذلك، تنطبق هذه النتيجة على الأشعّة المحورية الساقطة. إذن، فالأشعّة المحورية كلّها تمرّ بالنقطة F نفسها.

مرآة قطع مكافئ

وبما أنه تقريبا صحيح القول إنّ الأشعّة تصل إلى البؤرة F، كلما كانت المرآة منحنية أكثر، وكلما كان التقريب أسوأ (الشكل 23-11)، وكذلك كلما كان الصورة ضبابيا (غير واضح) . يسمى هذا العيب في المرايا الكروية **"الزيغ الكروي"**، وسوف نناقشه بالتفصيل في حالة العدسات في (الفصل 25). إنّ عاكس القطع المكافئ في المقابل سوف يعكس الأشعّة إلى بؤرة تامة. وعلى أيّ حال، فإنّ سطوح القطع المكافئ يصعب تصنيعها، وبذلك تكون مكلفة. ولهذا، تستخدم المرايا الكروية لمعظم الأغراض. (كثير من المناظير الفلكية تستخدم القطع المكافئ كعاكسات). وسوف نستعمل المرايا الكروية لأنها صغيرة بالمقارنة مع أنصاف أقطار تكورها. ولذلك، تبقى (المعادلة 23-1) سارية المفعول.

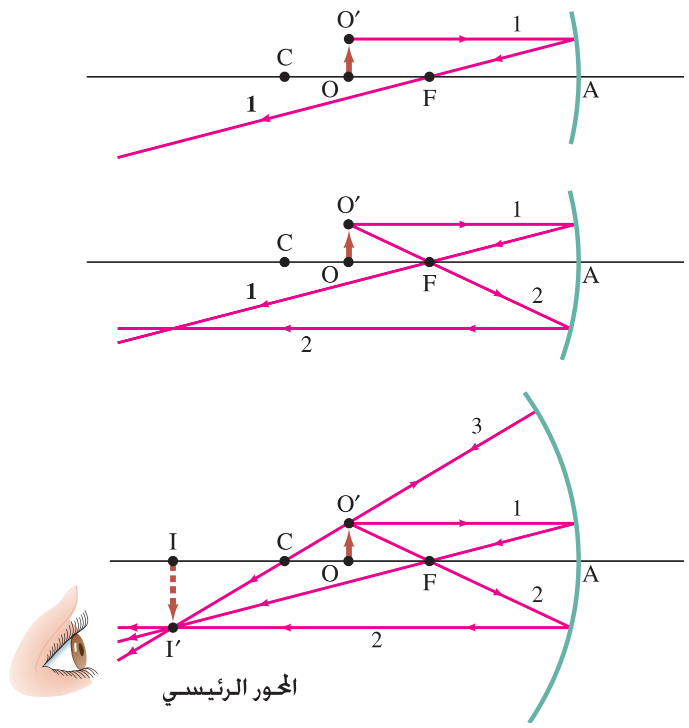
تكوين الصورة ـ مخطّطات الأشعّة

عندما يكون موضع الجسم في اللانهاية، يكون موضع الصورة في بؤرة المرآة المقعّرة الكروية، حيث $f = r/2$ ولكن، أين ستتكوّن الصورة لجسمٍ ليس في اللانهاية؟ افترض أوّلاً الجسم المبيّن كسهمٍ في (الشّكل 23-13). والذي يوضع بين F، و C عند النقطة O , O تعني الجسم). دعنا نحدد أين سيتكوّن الصورة لنقطة O′ عند قمة السهم. لعمل ذلك، يمكننا رسم عدة أشعة، ونتأكد أنها تنعكس عن المرآة بحيث تساوي زاويةُ السّقوط زاويةَ الانعكاس. كثير من الأشعّة يمكن رسمها، ولكن تحديد مكان الصورة يمكن تبسيطه إذا تعاملنا مع ثلاثة أشعة سهلة بصورة خاصة. هذه الأشعّة موسومة بالأرقام 1، 2، 3 في (الشكل 23-13) ونرسمها صادرة من O′ كما يلي:

يرسم الشّعاع 1 موازيًا للمحور، لذا، فإنّ بعد الانعكاس سوف يمر بالنقطة F (كما رأينا في الشّكل 12-23 ويرسم هنا في الشكل 23-13أ).
يخرج الشّعاع 2 من O′، ويمرر خلال F، ولذلك، ينعكس موازيًا للمحور (الشّكل 23-13ب).
يمر الشّعاع 3 خلال C، مركز التكور، أي على امتداد نصف قطر السّطح الكروي، أي العمودي على المرآة، ولهذا، ينعكس نحو الخلف على نفسه (الشّكل 23-13جـ).

نقطة الصورة تكون حيث تتقاطع الأشعّة المنعكسة.

تخرج الأشعة الثلاثة من النقطة O′ على الجسم، وبعد الانعكاس من سطح المرآة الصغيرة، فإنّ نقطة تقاطع هذه الأشعة هي الصورة I′. وسوف تمرّ الأشعة الأخرى كلّها التي تخرج من نقطة الجسم نفسها أيضًا بنقطة الصورة ذاتها. ولإيجاد الصورة لأيّ نقطة على الجسم، يلزم فقط رسم هذه الأشعة الثلاثة اثنان منها فقط ضروريان، والثالث يخدم للاختبار.



(أ) الشّعاع 1 يخرج من O′ موازيا المحور وينعكس مارا بـ F.

(ب) يمر الشّعاع 2 خلال F ثم ينعكس موازيا للمحور.

(جـ) الشّعاع 3 يختار عموديًا على المرآة. لذلك، يجب أن ينعكس على نفسه ليمر عبر C (مركز التكور).

الشّكل 23-13. يصدر الشعاع من O′ على الجسم (السهم). هنا يبين الأشعة الثلاثة الأكثر فائدة لتحديد موضع تكوّن الصورة I′.
(لاحظ أنّ مرآتنا ليست صغيرة بالمقارنة مع f. لذا، فإنّ رسمنا لا يعطي موقع الصورة بدقة).

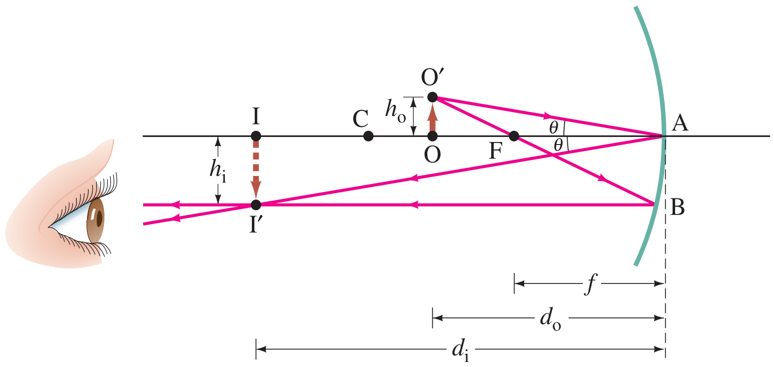
وضّحنا نقطة الصورة في (الشّكل 23-13) لنقطة واحدة فقط على الجسم. النقاط الأخرى تتكوّن أخيلتها مجاورة، وبذلك نحصل على خيال كامل للجسم، كما هو مبيّن بالسهم المنقط في (الشّكل 23-13جـ). ولأنّ الضّوء يمرّ في الواقع خلال الصورة نفسه، فهذا خيالٌ حقيقي، ويتكوّن على قطعة ورق أو فيلم يُوضع هناك.
وهذا يمكن مقارنته مع خيالٍ وهميٍّ مكّونٍ بواسطة مرآةٍ مستوية (الضّوء لا يمرّ في الواقع خلال الصورة الشّكل 23-6).
إنّ الصورة في (الشّكل 23-13) يمكن رؤيته بالعينين عند وضعهما إلى اليسار من الصورة بحيث يمكن لبعض الأشعّة المتفرقة من كلّ نقطة على الصورة (مثل النقطة I′) أن تدخل العينين كما في (الشّكل 23-13 جـ). (انظر أيضًا الشّكلين 23-1 و 23-6).

معادلة المرآة والتكبير

تم قياس المسافة من d_o إلى d_i من مركز المرآة.

يمكن تحديد نقاط الصورة تقريبًا بواسطة رسم الأشعّة الثلاثة كما وصفنا، الشّكل 23-13؛ ولكن من الصعب رسم الزوايا الصغيرة للأشعة "المحورية" كما فرضنا. ومن أجل الوصول إلى نتائج أكثر دقة، نشتق معادلة تعطي بُعد الصورة إذا كان بُعدُ الجسم ونصف قطر التكور للمرآة معلومين. ولعمل ذلك نعود الى (الشّكل 23-14). **بُعد الجسم**، d_o، هو بعد الجسم (نقطة O) من مركز المرآة. **بُعد الصورة**، d_i، هو بعد الصورة (النقطة I) من مركز المرآة. طول الجسم OO' يسمى h_o، وطول الصورة $I'I$، هو h_i. شعاعان يخرجان من O' مبينان: $O'FBI'$ (الشيء نفسه مثل شعاع 2 في الشّكل 23-13) و$O'AI'$، وهو نوعٌ رابعٌ من الأشعّة ينعكس عند مركز المرآة، ويمكن استعماله كذلك لإيجاد نقطة خيال. الشّعاع $O'AI'$ يتبع قانون الانعكاس. لذا، المثلثان قائما الزاوية $O'AO$ و $I'AI$ متشابهان. ولذلك

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



الشّكل 23-14. رسم تخطيطي لحساب معادلة المرآة، للاشتقاق نفرض أنّ المرآة صغيرة بالمقارنة بنصف قطر تكورها.

للشعاع الآخر المبين، $O'FBI'$، المثلثان $O'FO$ و AFB متشابهان كذلك؛ لأنّ الزوايا متساوية. ونستعمل التقريب $AB = h_i$ (المرآة صغيرة بالمقارنة بنصف قطر تكورها). كذلك $FA = f$، البعد البؤري للمرآة، ولذلك

$$\frac{h_o}{h_i} = \frac{OF}{FA} = \frac{d_o - f}{f}$$

الجانب الأيسر لكلٍّ من المعادلتين هو نفسه. لذلك، يمكننا مساواة الجانبين الأيمنين

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

نقسم الطرفين على d_o، وننظّم الحدود للحصول على

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f}. \qquad \textbf{(2 - 23)}$$

معادلة المرآة

هذه هي المعادلة التي نريدها، وهي تُسَمّى **معادلة المرآة**، وتربط بين كلٍّ من بعد الجسم، وبعد الصورة، والبعد البؤري f (حيث $f = r/2$). التكبير، m، لمرآة هو ناتج قسمة طول الصورة على طول الجسم، من المجموعة الأولى من مثلثاتنا المتشابهة أو أول معادلة على هذ الصفحة، يمكننا كتابة ما يلي:

$$m = \frac{h_i}{h_o} = -\frac{d_i}{d_o} \qquad \textbf{(3 - 23)}$$

تكبير مرآة كروية

أُدخلت الإشارة السالبة في (المعادلة 23-3) كاصطلاح، وفي الواقع، يجب علينا أن نكون حريصين حول إشارة الكميات كلّها في (المعادلتين 23-2، و 23-3). تختار اصطلاح الإشارات بحيث تعطي الأمكنة الصحيحة، وأوضاع الأخيلة كما استنتجنا.

إنّ اصطلاح الإشارات الذي نستعمله هو: ارتفاع الصورة h_i موجب إذا كان الصورة معتدلًا، وسالب إذا كان مقلوبًا بالنسبة للجسم (بفرض أنّ h_o موجب). d_i أو d_o موجبان إذا كان الجسم أو الصورة أمام المرآة (كما في الشّكل 23-14)؛ إذا كان أيّ من الجسم أو الصورة خلف المرآة، فالمسافة المرافقة تكون سالبة. (يمكن رؤية مثال في الشّكل 23-16، والمثال 23-3). ولذلك، فالتكبير (معادلة 23-3) موجب لخيال معتدل وسالب لخيال مقلوب (رأسا على عقب).
وسنلخص اصطلاح الإشارات بصورة وافية بعد مناقشة المرايا الكروية في هذا البند.

تنويه:
اصطلاح الإشارات

تمرين ب: هل تنطبق معادلة المرآة، (المعادلة 23-2)، على المرآة المستوية؟ فسّر ذلك.

أمثلة على المرايا المقعّرة

المثال 23-2 الصورة في المرآة المقعّرة

ارتفاع خاتم الماس 1.50 cm، وُضِعَ على بعد 20.0 cm من مرآة مقعّرة نصف قطر تكورها 30.0 cm.
احسب: (أ) موقع الصورة. (ب) طول الصورة .

النّهج: نحدّد البعد البؤري للمرآة من نصف قطر التكور. (معادلة 23-1)

$$f = r/2 = 15.0\text{ cm}$$

يشبه مخطط الأشعّة في الأساس ذلك الذي في (الشّكل 23-13، أو الشّكل 23-14)، حيث يقع الجسم بين F، و C. إنّ موقع الصورة وطوله يمكن إيجادهما من (المعادلتين 23 - 2، و 23 - 3).

الحلّ. بالعودة إلى (الشّكل 23 - 14)، لدينا $CA = r = 30.0\text{ cm}$، وكذلك $FA = f = 15.0\text{ cm}$
$OA = d_o = 20.0\text{ cm}$

(أ) من (معادلة 23-2)

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d_o} = \frac{1}{15.0\text{ cm}} - \frac{1}{20.0\text{ cm}} = 0.0167\text{ cm}^{-1}$$

لذلك، $d_i = 1/(0.0167\ \text{cm}^{-1}) = 60.0\text{ cm}$. لأنّ d_i موجبة، فإنّ الصورة على بعد 60.0 cm أمام المرآة.

فيجهة الجسم نفسها.

(ب) من (معادلة 23-6)، التكبير هو

$$m = -\frac{d_i}{d_o} = -\frac{60.0\text{ cm}}{20.0\text{ cm}} = -3.00$$

طول الصورة ثلاثة أمثال طول الجسم ويساوي

$$h_i = mh_o = (-3.00)\ (1.5\ \text{cm}) = -4.5\ \text{cm}.$$

تذكرنا الإشارة السالبة أنّ الصورة مقلوب، كما في (الشّكل 23-14).

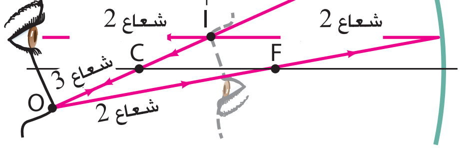
ملحوظة: إذا كان الجسم أبعد من البؤرة في المرآة المقعّرة، فيمكننا أن نرى من (الشّكلين 23-14، أو 23-14) أنّ الصورة يكون دائمًا مقلوبًا وحقيقيًّا.

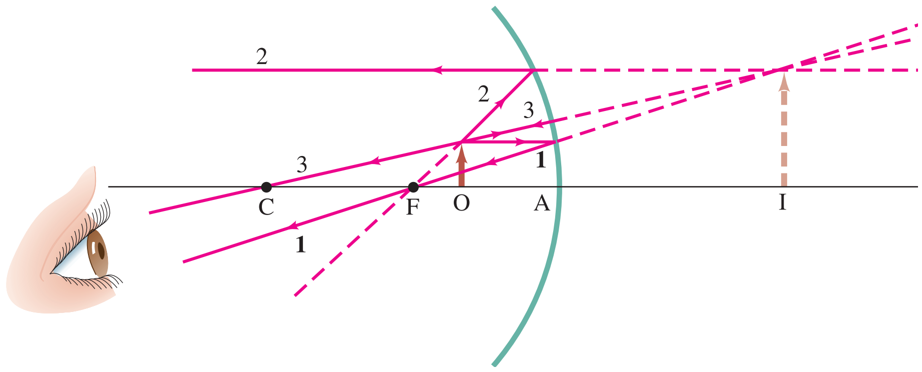
تنويه:
تذكّر أنْ تأخذ المقلوب.

ولكي ترى العينان خيالا واضحًا، يجب أن تكونا في مكان بحيث تعترض طريق الأشعّة المتباعدة من نقاط الصورة، كما هو الحال في موقع العينين في (الشّكلين 23 - 13، و 23 - 14). عيوننا مصممة لترى الأجسام الطبيعية، والذي يعني دائمًا أنّ الأشعّة تتباعد دائمًا نحو العينين كما في (الشّكل 23 - 1) (أو بالنسبة للأجسام البعيدة جدًّا مثل النجوم، تصبح الأشعّة في الواقع متوازية — (انظر الشّكل 23-10). إذا وضعت عينيك بين O، I في (الشّكل 23-14)، مثلا، الأشعّة المتقاربة من الجسم OO' سوف تدخل عينيك، ولا تستطيع عدساتهما أن تجمعها، وسترى خيالًا ضبابيًّا. سوف نناقش موضوع العين بتفصيل أكثر في (الفصل 25).

لو كنت الجسم OO' في (الشّكل 23-14)، ووضعت بين F، و C، وتحاول رؤية نفسك في المرآة، فسوف ترى خيالا ضبابيّا، لكن الشخص الذي عينه مبينة في (الشّكل 23-14) يستطيع رؤيتك بوضوح. تستطيع أن ترى نفسك بوضوح ولكن بصورة مقلوبة، إذا كنت إلى يسار C في (الشّكل 23-14)، لذلك $d_o > 2f$ لماذا؟ لأنّ الأشعّة المنعكسة عن الصورة ستكون متباعدة في مكانك كما في (الشّكل 23-15)، ويمكن لعينيك أن تجمعها، وتستطيع كذلك رؤية نفسك بوضوح وبصورة معتدلة إذا كنت أقرب إلى المرآة من البؤرة $(d_o < f)$ كما في (المثال 23 - 3 الشّكل23-16).

الشّكل 23-15 يمكنك أن ترى خيالاً واضحًا مقلوبًا لوجهك إذا كنت أبعد من $C\ (d_o > 2f)$ لأنّ الأشعّة التي تصل عينيك تكون متباعدة. الشّعاعان العياريان 2 و 3 يخرجان من النقطة O على أنفك.
الشّعاع 2 (والأشعّة المجاورة) تدخل عينيك. لاحظ أنّ الأشعّة تتباعد عند انتقالها إلى يسار الصورة I.





الشّكل 23-16 الجسم موضوع أقرب من البؤرة F. الصورة خلف المرآة وهو وهميّ. (مثال 23-6) (لاحظ أنّ التّدريج الرّأسيّ (ارتفاع الجسم = 1.0 cm) يختلف عن الأفقيّ (OA = 10.0 cm) لسهولة الرسم، ويؤثّر في دقة الرسم.

المثال 23-3 الجسم أقرب إلى المرآة المقعّرة

وُضِعَ جسمٌ ارتفاعه 1.00 cm على بعد 10.0 cm من مرآة مقعرة نصف قطر تكورها 30.0 cm. (أ) ارسم مخطّطًا شعاعيًّا لتحديد مكان الصورة على وجه تقريبيّ. (ب) حدّد مكان الصورة والتكبير بطريقة تحليلية.

النّهج: نرسم المخطط الشّعاعيّ باستخدام الأشعّة في (الشّكل 23 - 13). الحلّ بالطريقة التحليلية يستند إلى (المعادلتين 23-1، 2، و 23-3).

الحلّ: (أ) بما أنّ $f = r/2 = 15.0\,\text{cm}$. إذن، فالجسم بين المرآة والبؤرة. نرسم الأشعّة الثلاثة كما وصفنا سابقًا (الشّكل 23-13). وهي تبدو وكأنها تغادر قمة الجسم (الشّكل 23 - 16). يخرج الشّعاع 1 من قمة الجسم متجهًا نحو المرآة موازيًا للمحور، وينعكس مارًا بـ F. أمّا الشّعاع 2 فلا يتجه نحو F لأنّه، عندها، لا يصل المرآة. ولذلك يرسم الشعاع 2 كما لو أنه يبدأ عند F (الخط المتقطع) ويتجه للمرآة، ثم ينعكس موازيًا للمحور الرّئيس. في حين يكون الشّعاع 3 عموديًا على المرآة، كما في السابق. تتباعد الأشعّة المنعكسة عن المرآة ، وبذلك لا يمكن أن تلتقي عند نقطة. ولكنها تبدو كما لو أنها قادمة من نقطة خلف المرآة. هذه النقطة تحدد موقع رأس السهم. وهكذا، فالصورة يقع خلف المرآة، وهو وهميّ. لماذا؟

(ب) نستعمل (المعادلة 23 - 2) لإيجاد d_i عندما $d_o = 10.0\,\text{cm}$

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d_o} = \frac{1}{15.0\,\text{cm}} - \frac{1}{10.0\,\text{cm}} = \frac{2-3}{30.0\,\text{cm}} = -\frac{1}{30.0\,\text{cm}}$$

وهكذا $d_i = -30.0\,\text{cm}$. تعني إشارة السالب أنّ الصورة خلف المرآة. التكبير $m = -d_i/d_o = -(-30.0\,\text{cm})/(10.0\,\text{cm}) = +3.00$ أي أنّ الصورة أكبر بثلاث مرات من الجسم. أمّا الإشارة الموجبة، فتعني أنّ الجسم معتدل (مثل الجسم) وهذا يتفق مع المخطط الشّعاعيّ (الشّكل 23-16).

ملحوظة: لا يمكن استنتاج بُعد الصورة بدقة على (الشّكل 23-6)؛ لأنّ الشّكل الذي رسمناه يتنافى مع فرض الأشعّة المحورية (كي نجعل الأشعّة جميعها واضحة).

ملحوظة: عندما يكون الجسم داخل البؤرة للمرآة المقعّرة $(d_o < f)$. يكون الصورة دائمًا وهميًّا معتدلا. وعندما يكون الجسم "O" في (الشّكل 23-16) هو أنت، فسترى نفسك بوضوح؛ لأنّ الأشعّة المنعكسة عند "O" متباعدة. وخيالك سيكون معتدلًا ومكبّرًا.

رؤيتك لنفسك معتدلا ومكبرًا في مرآة مقعرة.

من المفيد مقارنة (الشّكلين 23-13، و 23-16). ويمكننا ملاحظة أنه إذا كان الجسم ضمن البؤرة $(d_o < f)$ ، كما في (الشّكل 23-16) فسيكون الصورة وهميًّا، معتدلا ومكبّرا. وهكذا تستعمل مرآة الحلّاقة أو الزّينة - يجب وضع رأسك أقرب إلى المرآة من البؤرة إذا أحببت "أن ترى نفسك معتدلا (الشّكل 23-9 أ). إذا كان الجسم أبعد من البؤرة، كما في (الشّكل 23-16). فسيكون الصورة حقيقيًّا ومقلوبًا (رأسا على عقب – ويصعب استعمالها!).

تطبيق الفيزياء
المرآة المكبرة (للحلاقة، للتزيين).

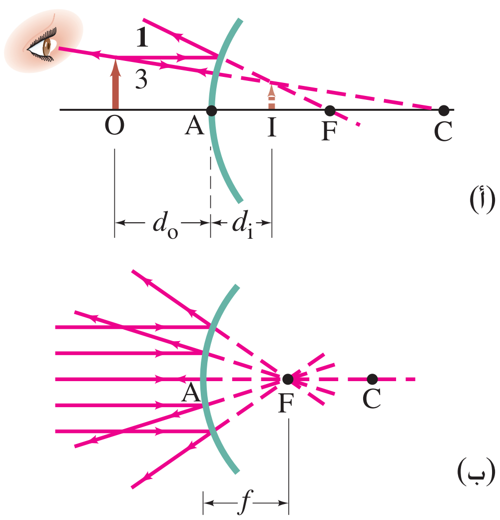
عندما يكون التكبير أكبر من 1 في الحالة الأخيرة أو أقلّ، فإنّ هذا يعتمد على مكان الجسم بالنسبة لمركز التكور النقطة C.

المرايا المحدّبة

إنّ التّحليل الذي استعمل في المرايا المقعّرة يمكن تطبيقه في **المرايا المحدبة**. حتى معادلة المرآة (المعادلة 23 - 2) تنطبق أيضًا على المرآة المحدبة. علمًا أنّ الكميات الداخلة في المعالجة يجب تعريفها جيدًا. يبين (الشّكل 23 - 17أ) أشعة متوازية تسقط على مرآة محدبة. كما أنّ الزّيغ الكرويّ سيكون موجودًا هنا أيضًا (الشّكل 23 - 11). لكننا نفرض أنّ حجم المرآة سيكون صغيرًا بالنسبة لنصف قطر تكورها. تتباعد الأشعّة المنعكسة. ولكنها تبدو قادمة من النقطة F خلف المرآة. هذه هي البؤرة. وبُعدها عن مركز المرآة هو **البعد البؤري** f. يمكن إثبات أنّ $f = r/2$ بسهولة. ونرى أنّ جسمًا في اللانهاية ينتج خيالًا وهميًّا في المرآة المحدبة. وفي الواقع، لا يهم أين يقع الجسم، وعلى الجانب العاكس للمرآة المحدبة، سيكون الصورة وهميًّا ومعتدلًا كما هو مبيّن في (الشّكل 23 - 17 ب).

ولتحديد مكان الصورة: نرسم الشّعاعين 1 و 3 تبعًا للقواعد المذكورة آنفًا في المرآة المقعّرة، كما يبين (الشّكل 23 - 17 ب). لاحظ أنه بالرغم من أنّ الشّعاعين 1 و3 لا يمرّان في النقطتين F و C، إلا أنّ الخطين على امتدادهما يمران (مبينان كخطوط مقطعة).

تنطبق معادلة المرآة: (المعادلة 23-2) على المرايا المحدبة. ولكن يجب اعتبار البعد البؤري f سالبًا، وكذلك نصف قطر التكور. يترك البرهان كمسألة لتبين أنّ (المعادلة 23-3) للتكبير تنطبق أيضًا في هذه الحالة.



الشّكل 23-17 المرآة المحدبة:
(أ) البؤرة، F، خلف المرآة.
(ب) الصورة I للجسم O يكون وهميّا، معتدلا، وأصغر من الجسم. (الرسم ليس وفق المقياس للمثال 23-4).

إرشادات حلّ المسائل	المرايا الكرويّة

1. دائمًا، ارسم **مخطّطًا شعاعيًّا** حتى لو حللت السؤال بطريقة تحليلية (رياضيّة)، حيث يعمل المخطّط كاختبار، حتى لو لم يكن دقيقًا. من نقطة واحدة على الجسم ارسم على الأقل اثنين، ويفضل ثلاثة، من الأشعّة السهل رسمها مستعملاً القواعد الموصوفة في (الشّكل 23 - 13). وتكون نقطة الصورة حيث تلتقي الأشعّة المنعكسة، أو تبدو كذلك.

2. طبّق **معادلة المرآة**: (المعادلة 23 - 2)، و**معادلة التكبير**: (المعادلة 23 - 3). من المهم جدًّا اتباع اصطلاح الإشارات – النقطة التالية.

3. اصطلاح الإشارات

(أ) عندما يكون الجسم أو الصورة أو البؤرة على الجانب العاكس للمرآة (على يسار الرسم)، يفترض أن تكون المسافة المرافقة موجبة. أمّا إذا كان أيّ من هذه النقاط خلف المرآة (على اليمين) فمن المفروض أن تكون المسافة المرافقة سالبة.*

(ب) يكون ارتفاع الصورة h_i موجبا إذا كان معتدلا، ويكون سالبًا إذا كان الصورة مقلوبًا بالنسبة للجسم (h_o تؤخذ دائما موجبة).

4. اختبر أنّ الحلّ التحليلي (الرّياضيّ) يتفق مع مخطط الأشعّة.

المثال 23-3	المنظر الخلفي في المرآة المحدبة

تكون المرآة الخارجية للمنظر الخلفي في السيارة محدّبة بنصف قطر تكور 16.0 m (الشّكل 23-18). حدّد مكان الصورة وتكبيره لجسم على بعد 10.0 m من المرآة.

النّهج: نتبع الخطوات المذكورة في إرشادات حلّ المسائل.

الحلّ: (1) **رسم مخطط الأشعّة**: سيكون مخطط الأشعّة كما في (الشّكل 23 - 17). ولكن مسافة الجسم الكبيرة ($d_o = 10.0\,\text{m}$) تجعل الرسم الدقيق صعبًا. لدينا مرآة محدبة. لذا. فإنّ r سالبة حسب الاصطلاح.

(2) معادلات المرآة والتكبير: مركز تكور المرآة المحدبة يكون خلفها، وكذلك بؤرتها، لذلك نعتبر r وf سالبتين.

$(f = r/2 = -8.0\,\text{m})$ الجسم أمام المرآة، لذلك، $d_o = 10.0\text{m}$، ونحلّ (معادلة المرآة 23-2)

لإيجاد $1/d_i$ فنجد:
$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d_o} = \frac{1}{-8.0\,\text{m}} - \frac{1}{10.0\,\text{m}} = \frac{-10.0 - 8.0}{80.0\,\text{m}} = -\frac{18}{80.0\,\text{m}}$$

وهكذا، فإنّ $d_i = -80.0\,\text{m}/18 = -4.4\,\text{m}$. (معادلة 23-3) تعطى التكبير الآتي:

$$m = -\frac{d_i}{d_o} = -\frac{(-4.4\,\text{m})}{(10.0\,\text{m})} = +0.44$$

(3) **اصطلاح الإشارات**: بعد الصورة سالب، 4.4 m-. لذلك، يكون الصورة خلف المرآة. التكبير $m = +0.44$، ولهذا، يكون الصورة معتدلاً (اتّجاه الجسم نفسه) وأقلّ من نصف طول الجسم.

(4) اختبر: تتفق نتائجنا مع (الرسم 23-17 ب).

تطبيق الفيزياء
مرآة المنظر الخلفي المحدبة

الشّكل 23-18 (المسألة 23-4)

* تكون مسافات الأجسام موجبة للأجسام المادية ولكنها يمكن أن تكون سالبة في النظم التي تتكون من أكثر من عدسة أو مرآة، انظر الجزء 23-9.

تحمل مرايا المنظر الخلفيّ في السيارات تحذيرًا أحيانًا في أنّ الأجسام تكون أقرب ممّا تبدو في المرآة. حقيقة أنّ d_i يمكن أن تكون أصغر من d_o (كما في المثال) تبدو وكأنّها تناقض هذه المعلومة. والسبب الحقيقيّ هو أنّ الجسم يبدو أبعد، لأنّ خياله في المرآة المحدّبة يكون أصغر. وأنّنا نحكم على مسافة الأجسام العادية مثل السيارات بواسطة حجمها.

4-23 معامل الانكسار

رأينا في (الفصل 22) أنّ سرعة الضّوء في الفراغ هي

$$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$$

والتي نقرّبها عادةً إلى

$$c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}.$$

عندما لا تكون النتائج مطلوبةً بدقّةٍ متناهية. فإنّ هذه السرعة تنطبق على الموجات الكهرومغناطيسيّة كلّها. بما فيها الضّوء المرئيّ.

في الهواء. تكون السرعة أقلّ قليلًا. وأمّا في المواد الشفافة الأخرى. كالزّجاج والماء. فإنّ السرعة دائمًا أقلّ مما هي عليه في الفراغ. فمثلا. يسير الضّوء في الماء بسرعة حوالي $\frac{3}{4}c$. تُسَمّى النسبةُ بين سرعة الضّوء في الفراغ إلى السرعة v في مادة ما **معاملَ الانكسار** n للمادة.

$$n = \frac{c}{v} \tag{4-23}$$

لا يمكن أن يكون معامل الانكسار أقلّ من 1. وقيمته للمواد المختلفة تعطى في (القائمة 23-1). وكما سنرى لاحقًا. فإنّ n تختلف مع طول موجة الضّوء – ما عدا في الفراغ – لذلك. خصصت طول موجة معينة في القائمة. وهي للضّوء الأصفر الذي طول موجته $\lambda = 589$ nm.

الجدول 23 - 1 معاملات الانكسار*

الوسط	$n = c/v$
الفراغ	1.00000
الهواء (STP)	1.0003
الماء	1.33
كحول الايثير	1.36
الزّجاج	
الكوارتز	1.46
الزّجاج التّاجيّ	1.52
الزّجاج الصوانيّ	1.58
الزّجاج الصّفيريّ	1.51
كلوريد الصوديوم	1.53
الياقوت	2.42

* $\lambda = 589$ nm معامل الانكسار

المثال 5-23 سرعة الضّوء في الألماس

احسب سرعة الضّوء في الألماس.

النّهج: نستعمل (المعادلة 23 - 4). وجد من (القائمة 23 - 1) أنّ $n = 2.42$ للألماس.

الحلّ: سرعة الضّوء المنتقل خلال الألماس هي

$$v = \frac{c}{n} = \frac{c}{2.42} = 0.413c$$

أو

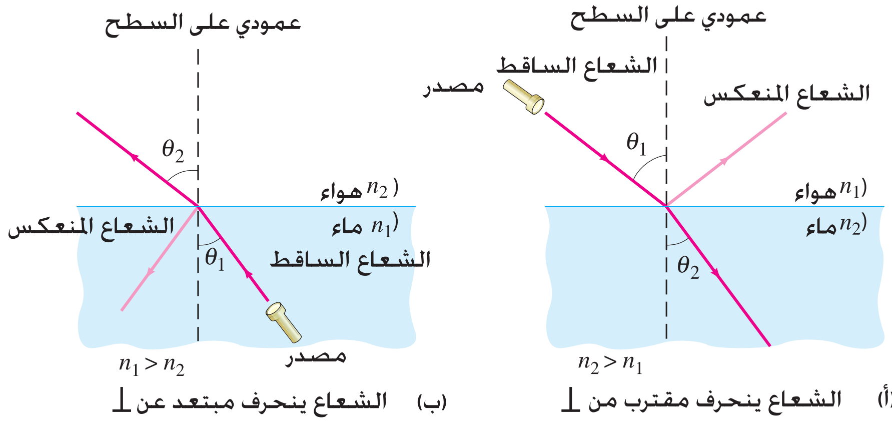
$$v = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{2.42} = 1.24 \times 10^8 \text{ m/s}.$$

ولأنّ الضّوء يسير بسرعة أبطأ في المواد منه في الفراغ يمكن تفسيره على المستوى الذري. ويعزى إلى الامتصاص وإعادة الإشعاع للضّوء من قبل ذرات المادة وجزيئاتها.

5-23 الانكسار: قانون سنيل

عندما يعبر الضّوء من وسط إلى آخر بمعامل انكسار مختلف. فإنّ جزءًا منه ينعكس عند الحدّ الفاصل. في حين ينفذ الباقي إلى الوسط الشفاف الجديد. إذا سقط شعاع ضوئيّ بزاوية معينة على السّطح (غير الشّعاع العمودي). يغيّر الشّعاع اتجاهه عند دخوله إلى الوسط الجديد.

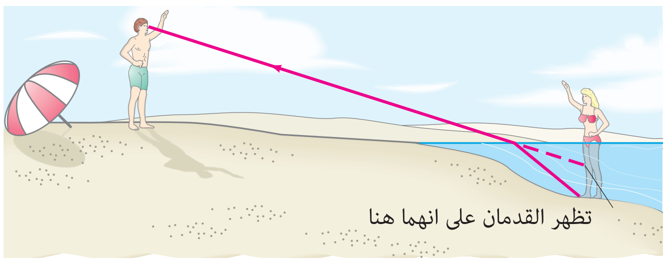
ويُسَمّى التغيّرُ في الاتجاه. أو الانحناء **الانكسارَ**.



الشّكل 23-19 الانكسار.
(أ) ينكسر الضَّوء عند عبوره من الهواء (n_1) إلى الماء (n_2): $n_1 < n_2$.
(ب) ينكسر الضَّوء عند عبوره من الماء (n_1) إلى الهواء (n_2): $n_1 > n_2$.

يبين (الشّكل 23-19أ) شعاعًا يمرّ من الهواء إلى الماء. الزاوية θ_1 هي الزاوية بين الشّعاع السّاقط والعموديّ على السّطح وتُسَمّى **زاوية السّقوط**. أمّا θ_2 فهي **زاوية الانكسار**. وهي التي تقع بين الشّعاع المنكسر والعمودي على السّطح. لاحظ أنّ الشّعاع ينحني نحو العموديّ عند دخوله إلى الماء. وهذه هي الحالة عندما ينتقل الشّعاع من وسط سرعته فيه أقلّ (معامل انكساره أكبر المعادلة 23-4). وإذا انتقل الضَّوء من وسط إلى آخر حيث سرعته أكبر. ينحني الشّعاع مبتعدًا عن العمودي؛ وهذا واضح في (الشّكل 23 - 19 ب) لشعاع ينتقل من الماء إلى الهواء.

زاوية الانكسار



الشّكل 23-20 مخطط شعاعيّ يبين لماذا تبدو ساق الشخص أقصر عندما يقف في ماء عميق. مسار الضَّوء الصادر من قدم الشّخص إلى عينيّ الناظر ينحني عند سطح الماء، ودماغنا يُفسّر الضَّوء على أنه قد سار في خطّ مستقيم من مكان أعلى (الخط المنقط).

الشّكل 23-21 يبدو القلم في الماء مكسورًا علما أنه ليس كذلك.

تطبيق الفيزياء
الخدع البصرية

يفسّر الانكسار عددًا من الخدع البصريّة الشائعة. فمثلًا، تبدو أرجل الشّخص الذي يقف في ماء عميق أقصر. وكما يبدو في (الشّكل 23-20). فإنّ الأشعّة الصادرة من قدم الشّخص تنحني عند سطح الماء. ويفترض دماغ الناظر أنّ الأشعّة سارت في خطوط مستقيمة (الخطّ المنقّط الأحمر). ولذلك تبدو الأرجل أعلى ممّا هي عليه في الواقع. ومثال آخر كذلك هو أنّ القلم يبدو مكسورًا عند وضعه في الماء. (الشّكل 23-21).

قانون سنيل

تعتمد زاوية الانكسار على سرعة الضَّوء في كلّ من الوسطين. وعلى زاوية السّقوط كذلك. وهناك علاقة رياضية بين θ_1 ، و θ_2 تم التوصل إليها تجريبيا في عام 1621 من قِبَل (1591-1626) *W. Snell*. تدعى قانون سنيل الذي يكتب بالصورة الآتية:

قانون سنيل
(قانون الانكسار)

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 . \quad \textbf{(5-23)}$$

θ_1 هي زاوية السّقوط. أمّا θ_2 فهي زاوية الانكسار. في حين أنّ n_1، و n_2 هما معاملا الانكسار للوسطين. انظر (الشّكل 23-19). الشّعاعان: السّاقط والمنكسر يقعان في مستوى واحد. والذي يحتوي أيضًا العمود المقام على السّطح. ويعدّ قانونُ سنيل القانونَ الأساسيَّ في الانكسار. (تم اشتقاق قانون سنيل في (البند 14-11) حيث (المعادلة 20-11) هي تركيب من المعادلتين 23-5، و23-4).

تنويه:
الزاويتان θ_1، و θ_2 تقاسان مع العمود وليس مع السّطح.

ويتضح من قانون سنيل أنّه إذا كان $n_2 > n_1$، فإنّ $\theta_2 < \theta_1$ وهذا يعني أنّه لو دخل ضوء إلى وسط حيث n أكبر (سرعته أقلّ). فإنّ الشّعاع سينكسر مقتربًا من العموديّ. أمّا إذا كان $n_2 < n_1$، عندها $\theta_2 > \theta_1$ وينكسر الشّعاع مبتعدًا عن العموديّ. وهذا ما رأيناه في (الشّكل23-14).

تمرين ج: يمرُّ الضَّوءُ من وسط معاملٍ انكساره $n = 1.3$ إلى وسط آخر معامل انكساره $n = 1.5$. هل سينكسر الضَّوء مبتعدًا عن العمودي علىّ السّطح الفاصل أم مقتربًا منه؟

المثال 23-6 الانكسار خلال زجاج منبسط

يسير ضَوء في الهواء، ويسقط على قطعة منبسطة من زجاج سمكها ثابت بزاوية 60°، كما يبدو في (الشّكل 23 - 22). إذا كان معامل انكسار الزّجاج $n = 1.50$ (أ) ما زاوية الانكسار θ_A في الزّجاج؟ (ب) ما الزاوية θ_B التي ينفذ بها الشّعاع من الزّجاج؟

التّهج: نطبق قانون سنيل على السّطح الأول، حيث يدخل الضَّوء إلى الزّجاج، ثمّ نطبّقه مرّةً أخرى على السّطح الثاني عندما يغادر الضَّوء الزّجاج الى الهواء.

الحلّ: (أ) الشّعاع ساقط في الهواء، لذلك، $n_1 = 1.00$، و $n_2 = 1.50$. ينطبق قانون سنيل بزاوية سقوط ($\theta_1 = 60^\circ$) وجد

$$\sin\theta_A = \frac{1.00}{1.50}\sin 60^\circ = 0.577$$

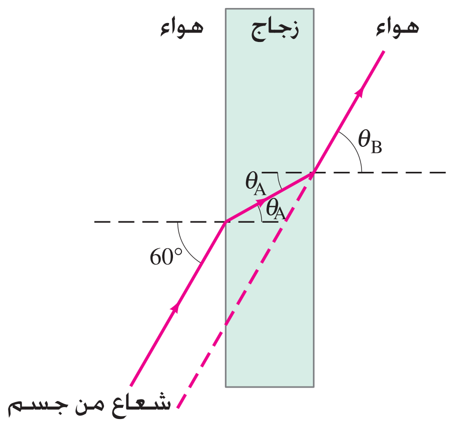
وهكذا، فإنّ $\theta_A = 35.2^\circ$

(ب) بما أنّ وجهي الزّجاج متوازيان، فإنّ زاوية السّقوط على السّطح الثاني ستكون θ_A (هندسة بسيطة). وعليه، $\sin\theta_A = 0.577$. عند هذا السّطح الثاني $n_1 = 1.5.0$ ، $n_2 = 1.00$. وهكذا يدخل الشّعاع إلى الهواء بزاوية $\theta_B\ (= \theta_2)$ وتعطى بـ

$$\sin\theta_B = \frac{1.50}{1.00}\sin\theta_A = 0.866$$

أي $\theta_B = 60^\circ$ وهكذا، فإنّ اتجاه الشّعاع لا يتغير عند عبوره قطعة منبسطة من الزّجاج سمكها منتظم.

ملحوظة: من الواضح أنّ الحلّ صحيح مهما بلغت زاوية السّقوط. يُزاح الشّعاع قليلا إلى أحد الجانبين. ويمكنك مشاهدة ذلك بالنظر خلال صفيحة زجاجيّة؛ قرّب حافتها من جسم معين، ثم أملْ رأسَك قليلا إلى الجانب، سترى عندئذٍ أنّ الجسم "يقفز".



الشّكل 23-22. الضّوء المار خلال قطعة من الزّجاج (مثال 23-6)

المثال 23-7 العمق الظاهري لبركة

ألقت سبّاحة بنظارتها الواقية إلى قعر بركةٍ ضحلةٍ عمقها $1.0\ \mathrm{m}$. ولكن النظارة لا تبدو عند ذلك العمق. لماذا؟ وعلى أيّ عمق تبدو النظارة عندما ننظر إليها عموديًّا في الماء؟

التّهج: نرسم شعاعين يصعدان نحو الأعلى من نقطة في النظارة بزاوية صغيرة، وتنكسر عند سطح الماء (المنبسط). وهذا مبين في (الشّكل 23 - 22). كما تبين الخطوط المتقطعة لماذا تبدو النظارات أقرب من حقيقتها.

الشّعاعان المتجهان نحو الأعلى من النظارة ينكسران ويبتعدان عن العمود عند خروجهما من الماء. ولذلك تبدو منفرجة من نقطة فوق النظارة (الخطوط المتقطعة).

الحلّ: لحساب العمق الظاهري d' (الشّكل 23-23). العمق الحقيقي $d = 1.0\ \mathrm{m}$ نستعمل قانون سنيل حيث $n_1 = 1.33$ للماء، و $n_2 = 1$ للهواء

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

نستعمل هنا زوايا صغيرة فقط، حيث $\sin\theta \approx \tan\theta \approx \theta$ وتقاس θ بالراديان. ليصبح قانون سنيل

$$\theta_2 \approx n_1\theta_1$$

من (الشّكل 23-23) نرى أنه

$$\theta_1 \approx \tan\theta_1 = \frac{x}{d} \quad \text{و} \quad \theta_2 \approx \tan\theta_2 = \frac{x}{d'}$$

ونضع ذلك في قانون سنيل $\theta_1 \approx n_2\theta_2$ لنجد

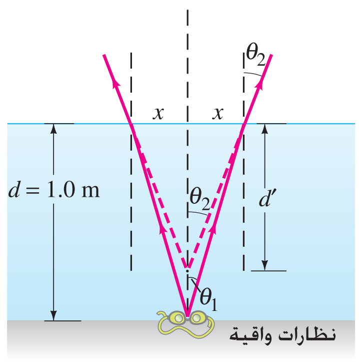
$$\frac{x}{d'} \approx n_1\frac{x}{d}$$

أو

$$d' \approx \frac{d}{n_1} = \frac{1.0\ \mathrm{m}}{1.33} = 0.75\ \mathrm{m}$$

تبدو البركة على عمق يساوي ثلاثة أرباع عمقها الحقيقيّ فقط.

الشّكل 23-23 (مثال 23-7)



6-23 الانعكاس الداخليّ الكلّيّ، الألياف الضّوئيّة

عند انتقال الضّوء من مادة إلى أخرى حيث معامل الانكسار أقلّ (مثل، من الماء إلى الهواء) ينكسر الضّوء بعيدًا عن العموديّ، كالشّعاعيين I و J في (الشّكل 23-24). وعند زاوية سقوط معينة، ستكون زاوية الانكسار $90°$، وفي هذه الحالة سوف يلامس الشّعاعُ المنكسرُ السّطحَ (الشّعاع K). وتُسَمّى زاويةُ السّقوط التي يحصل عندها هذا **الزاويةَ الحرجة**، θ_C.

الزاوية الحرجة

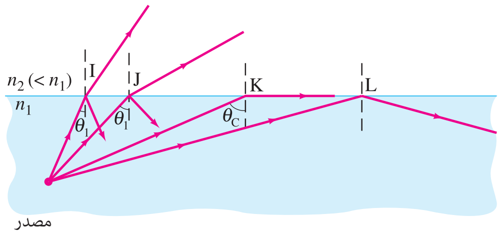
من قانون سنيل، تعطى θ_C بـ

$$\sin \theta_C = \frac{n_2}{n_1} \sin 90° = \frac{n_2}{n_1} \qquad (6 - 23)$$

تنويه: تحصل الانعكاس الكليّ فقط إذا كان معامل انكسار الوسط الثاني (الذي ينقل إليه الضّوء) أقلّ.

وعند أيّ زاوية سقوط أقلّ من θ_C، سيكون هناك شعاع منكسر، على الرّغم من أنّ جزءًا من الضّوء سوف ينعكس على السّطح. ولكن، عند زوايا سقوط أكبر من θ_C، يعطينا قانون سنيل $\sin \theta_C$ أكبر من 1. وعندئذٍ، ليس هناك أيّ شعاع منكسر إطلاقًا، وسوف ينعكس الضّوء كلّه، مثل شعاع L في (الشّكل 23-24).

يُعرف هذا الأثر بالانعكاس الداخليّ الكليّ. ولكن، لاحظ أنّ الانعكاس الداخلي الكليّ يحصل فقط عندما يسقط الضّوء على الحدّ الفاصل حيث معامل انكسار الوسط الآخر أقلّ.



الشّكل 23 - 24 بما أنّ $n_2 < n_1$، فإنّ الأشعّة الضّوئيّة تنعكس كليًّا إذا كانت زاوية السّقوط $\theta_1 < \theta_C$ مثل الشّعاع L. أما إذا كانت $\theta_1 > \theta_C$ مثل الأشعّة I، J، فإنّ جزءًا من الضّوء سينعكس فقط، في حين ينكسر الجزء الباقي.

المثال المفاهيمي 23-8 النظر نحو الأعلى من تحت سطح الماء

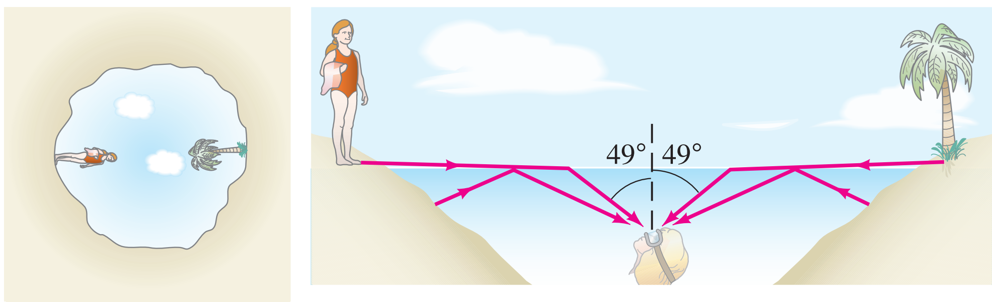
صِفْ ماذا سيرى شخص ينظر إلى العالم من تحت سطحٍ مستوٍ تمامًا لبحيرةٍ أو بركة سباحة.

الحل: إذا كان السّطح الفاصل هو بين الماء والهواء، فإنّ الزاوية الحرجة تُعطى بالعلاقة

$$\sin \theta_C = \frac{1.00}{1.33} = 0.750$$

$\theta_C = 49°$. لذلك، سيرى هذا الشخص العالم مضغوطًا ضمن دائرة تصنع حافتها زاوية $49°$ مع العموديّ. ولكن خارج هذه الزاوية، سيرى الشخص انعكاسات من الجوانب، ومن قعر البركة أو البحيرة. (الشّكل 23 - 25).

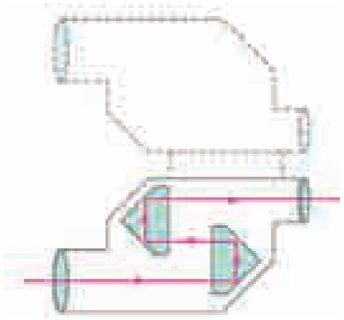
تمرين د: يسقط الضّوءُ الذي ينتقل في الهواء على سطح معامل انكساره $n = 1.48$. لأيّ مدى من الزوايا سوف يحدث الانعكاس الداخليّ الكليّ؟



(ب) (أ)

الشّكل 23-25 (أ) أشعة ضَوئيّة. (ب) المنظر كما يبدو لشخص ينظر صوب الأعلى من تحت سطح الماء (يجب أن يكون السّطح أملسًا تمامًا). (مثال 23 - 8).

هناك الكثير من الأدوات الضّوئيّة، كالمنظار، تستخدم الانعكاس الداخليّ الكليّ من خلال منشور يعكس الضَّوء. وتكمن الفائدة هنا في أنّ نحو 100% من الضَّوء سينعكس، أمّا المرايا، وحتى الممتازة منها، فتعكس أقلّ من 100%. ولذلك، يكون الصورة أوضح خاصة بعد عدة انعكاسات. للزجاج $n = 1.50$، $\theta_C = 41.8°$. ولهذا، فإنّ المنشور ذا الزاوية 45° سوف يعكس الضَّوء كلّه داخليًّا، إذا تمّ توجيهه كما في (الشّكل 23-26).



الشّكل 23-26 الانعكاس الداخليّ الكليّ في المناشير داخل المنظار.

تمرين هـ: إذا استعملت عدسات بلاستيكية زاويتها 45° في منظار، فما أقلّ معامل انكسار لهذه العدسات؟

تمرين و: ماذا سيحدث لو أنّ المناشير الزّجاجيّة 45° المستعملة في تمرين هـ غمرت في الماء؟

الألياف الضّوئيّة

إنّ الانعكاس الداخليّ الكليّ هو المبدأ الأساس وراء عمل **الألياف الضّوئيّة**. وهناك أليافٌ زجاجيّةٌ وبلاستيكية بسمك ميكرومترات قليلة أصبحت شائعة. وتُسمّى الحزمة من هذه الألياف أنبوبا ضوئيًّا، أوكيبلا ضوئيًّا. والضَّوء* يمكن نقله داخلها دون أيّ ضياع بسبب الانعكاس الداخليّ الكليّ. يبين (الشّكل 23-27) كيف أنّ الضَّوء المرسل داخل هذه الألياف يعمل فقط اصطداما مائلا مع جدران هذه الأوعية بحيث يحصل الانعكاس الداخليّ الكليّ. حتى لو ثني الأنبوب الضّوئيّ بصورة معقدة، لا تتجاوز الزاوية الحرجة. وهكذا ينقل الضَّوء إلى الطرف الثاني دون أيّ نقص. وهناك ضياع قليل جدًّا بسبب الانعكاسات عند الأطراف وكذلك بسبب الامتصاص ضمن الأنبوب.

الشّكل 23-27 الضَّوء المنعكس كليّا على السّطح الداخليّ للزجاج أو البلاستيك الشفاف

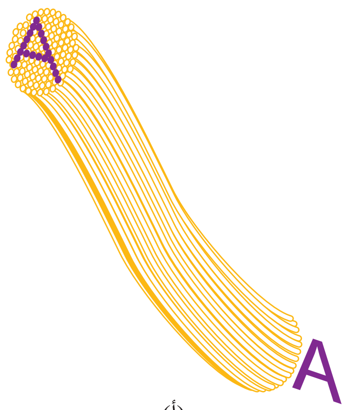
وهناك تطبيقات مهمّةٌ للألياف البصريّة في الاتصالات والطب، حيث تمّ استعمالها بدلًا من الأسلاك لنقل المكالمات الهاتفية، وإشارات الفيديو، والبيانات الحاسوبية. إنّ الإشارة هي شعاع ضوئيّ يمكن التحكم به (يمكن تغيير شدته)، وهي قادرة على نقل البيانات بمعدل أكبر بكثير، وبفقد قليل، وبتداخل قليل أيضًا مقارنة مع الإشارات الكهربائيّة التي تنقل بواسطة أسلاك النحاس. لقد تمّ تطوير ألياف يمكن أن تحمل أكثر من مئة طول موجة منفصلة، ويمكن التّحكّم بكلّ منها لتحمل إلى 10 جيجابت (10^{10} bits) من المعلومات في الثانية. وهذا يصل إلى (10^{12} bits) بيت في الثانية لكلّ المئة طول موجة. كما أنّ الاستعمال المعقد للألياف البصرية لنقل صورة واضحة مهمّ جدًّا في مجال الطّبّ. (الشّكل 23-28). مثلا، يمكن فحص رئتي مريض بإدخال أنبوب ضَوئيّ عن طريق القصبة الهوائيّة من الفم. يرسل الضَّوء عبر مجموعة خارجية من الألياف لإضاءة الرئتين. ويُعاد الضَّوء المنعكس بواسطة مجموعة من الألياف. وعند الطرف الآخر، يرى الناظر سلسلة من النقاط المضيئة والمعتمة كشاشة التلفزيون، أي أنّه يرى صورة لما يحدث في الطرف المقابل. تستعمل العدسات لجعل الأشعّة عند الطرف متوازية كما في التلسكوب. ويمكن رؤية الصورة مباشرة أو بواسطة جهاز عرض. ويجب أن تكون الألياف معزولة عن بعضها بواسطة مادة طلائية رقيقة بمعامل انكسار أقلّ من مادة الألياف. وكلّما كان عدد الألياف أكبر، وكلما كانت أصغر قطرًا، حصلنا على صورة أكثر تفصيلا.

إنّ مثل هذه الأدوات لتنظير الرئتين والقولون والمعدة ذات فائدة جمّة لفحص الأجزاء التي يصعب الوصول إليها.

تطبيق الفيزياء
الألياف الضّوئيّة في الاتصالات.

تطبيق الفيزياء
الطب – في تنظير الرئتين والقولون والمعدة.

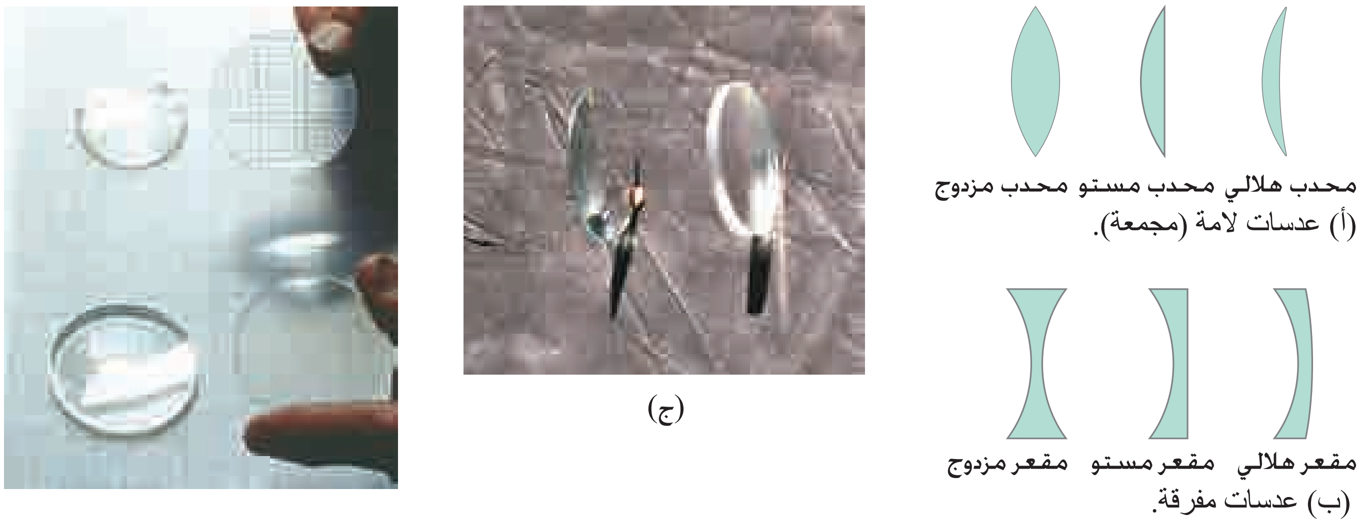
* إنّ الألياف الضّوئيّة مفيدة في الأشعّة تحت الحمراء وفوق البنفسجية والميكروويّة، وليس في الضَّوء المرئيّ فقط .



(أ)

(ب)

الشّكل 23-28 (أ) كيف نحصل على خيال في الألياف البصرية. (ب) مثال على جهاز يعمل بالألياف داخل الأنف، وترى الصورة.



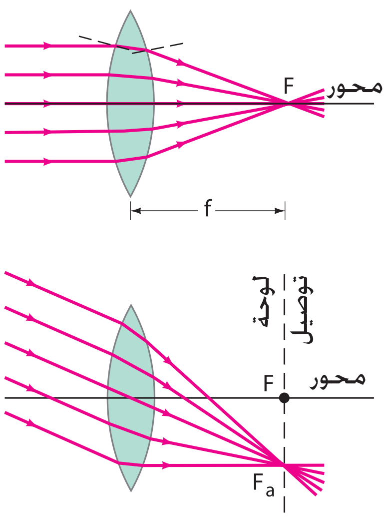
الشّكل 23-29 (أ) عدسات لامّة (مجمعة). (ب) عدسات مفرّقة مبينة مثل مقاطع. (جـ) صورة لعدسة لامّة (إلى اليسار)، وعدسة مفرقة (إلى اليمين) (S) عدسات لامة (فوق)، وعدسات مفرقة (تحت) منبسطة ومرفوعة فوق الورقة لتشكيل أخيلة.

7-23 عدسات رقيقة؛ رسم الأشعّة

إنّ أكثر الأدوات الضّوئيّة البسيطة أهمية بلا منازع هي العدسة الرقيقة. يعود تطوير الأجهزة البصرية باستعمال العدسات تاريخيًّا إلى القرنين السّادس عشر والسّابع عشر، على الرّغم من أنّ أول سجلّ لعدسات النظارات يعود إلى نهاية القرن الثّالث عشر. أما اليوم، فنجد استعمال العدسات في النظارات، وآلات التصوير، وأدوات التكبير، والتلسكوبات، والمناظير، والميكروسكوبات، والأجهزة الطبية. وفي العادة، تكون العدسة الرقيقة دائرية الشّكل، ووجهاها أجزاء من كرة. (على الرّغم من أنّ الأسطوانة أيضًا واردة، إلّا أنّنا سنركز على الكروية). ويمكن أن يكون السّطحان مقعّرين، أو محدّبَين، أو مستويَين. وهناك عدة أنواع مبينة في (الشّكل 23-29)، بصورة مقطعية. وتعود أهمية العدسات إلى قدرتها على تكوين أخيلة للأجسام، كما في (الشّكل 23-30).

الشّكل 23-30 عدسة لامة (مجمّعة) (موضوعة على حامل) تكوّن خيالا (""F كبيرة على شاشة إلى اليمين لجسم لامع ("F" مضاءة إلى اليسار).

الشّكل 23-31 (تحت) أشعة متوازية تجمع في البؤرة بواسطة عدسة رقيقة لامّة.



تأمَّل أشعةً متوازيةً تسقط على عدسةٍ محدّبةِ الوجهين، كما في (الشّكل 23-31 أ). افرض أنّ العدسة مصنوعة من الزّجاج أو البلاستيك الشفاف، حيث معامل انكسارها أكبر من معامل انكسار الهواء المحيط بها. **محور** العدسة هو خطّ مستقيم يمرّ في مركز العدسة، ويكون عموديًا على وجهيها (الشّكل 23-31). من قانون سنيل، نرى أنّ كلّ شعاع في (الشّكل 23-31 أ) ينحني نحو المحور عند دخوله العدسة وخروجه منها. (لاحظ أنّ الخطوطَ المتقطعة عموديةٌ على السّطح للشعاع العلوي). إذا سقطت أشعة موازية للمحور الرئيس لعدسة رقيقة، فإنّها تتجمع في نقطة تسمى البؤرة، F. وهذا ليس بالغ الدقة بالنسبة لعدسة سطحاها كُرويّان. ولكن سيكون هذا صحيحا لدرجة كبيرة – أي أنّ الأشعّة سوف تتجمع في بقعة كنقطة تقريبًا – إذا كان قطر العدسة صغيرًا مقارنة بنصفي قطري تكوّر سطحيها. إنّ هذا المعيار تحققه العدسة الرقيقة، تلك الرقيقة بالنسبة لقطرها، وسوف نعتبر هنا العدسات الرقيقة فقط.

إنّ الأشعّة الآتية من نقطةٍ في جسمٍ بعيد تُعدُّ متوازيةً تقريبًا - انظر (الشّكل 23-10). لذلك نقول: إنّ البؤرة هي نقطة الصورة لجسمٍ في اللانهاية على محور العدسة. وهكذا، يمكن إيجاد البؤرة لعدسة بتحديد النقطة التي تتجمع فيها أشعة الشّمس (وأيّ جسم آخر بعيد). (الشّكل 23-32).

البعد البؤري للعدسة

يسمّى بُعْدُ البؤرة عن مركز العدسة البُعدَ البؤريَّ f. ويمكن أن تُقلبَ العدسة بحيث يدخل الضّوء خلالها من الجانب المقابل. البعد البؤري هو نفسه من الجهتين، كما سنرى لاحقًا، حتى لو كان تحدب (انحناء) الوجهين مختلفًا. إذا سقطت أشعة متوازية على وجه العدسة بزاوية كما في (الشّكل 23-32 ب)، فإنّها تتجمع في نقطة F_a. ويسمّى المستوى الذي تتجمع فيه النقاط كلّها مثل F ، F_a المستوى البؤريّ للعدسة.

الشّكل 23-32. خيال الشّمس يحرق ثقبا في قطعة من الورق.

أي عدسة* تكون أسمك في المنتصف من الأطراف سوف تعمل على تجميع الأشعّة المتوازية في نقطة، وعندئذٍ تسمّى عدسةً لامّةً (مُجمِّعة) (انظر الشّكل 23-29أ).

أمّا العدسات التي يكون سمكها في المنتصف أقلّ من الأطراف (الشّكل 29-23ب) فتسمى عدساتٍ مفرقةً لأنّها تحرف الأشعّة المتوازية، كما في (الشّكل 23-33).

تعرف بؤرة العدسة F، المفرّقة بأنها النقطة التي تبدو منها الأشعّة المنكسرة خارجة، والتي تنشأ من أشعة متوازية ساقطة، كما في (الشّكل 23-33). ويُسمى البُعْدُ بين F والعدسة البعدَ البؤريَّ f، مثل العدسة اللاّمة.

قدرة العدسة

يستعمل المختصون في البصريّات وأطباء العيون مقلوب البعد البؤري لتحديد قوة عدسات النظارات (أو العدسات اللاصقة)، بدلا من استعمال البعد البؤري. ويعرف ذلك **بقدرة العدسة** p

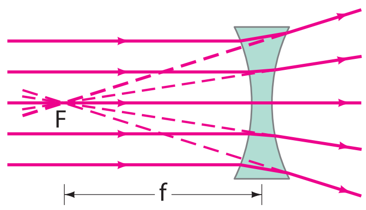
$$P = \frac{1}{f} \qquad \textbf{(7-23)}$$

وحدة قدرة العدسة هي **ديوبتر** (D) وهي مقلوب المتر $1\,D = 1\,m^{-1}$. فمثلا، عدسة بعدها البؤري 20 cm لها قدرة في الأساس، $P = 1/(0.20\,m) = 5.0\,D$ سوف نستعمل البعد البؤري، ولكننا سنعود إلى قدرة العدسة عند مناقشة عدسات النظارات في (الفصل 25).

إنّ أهم عامل في العدسة هو بعدها البؤري f. ولعدسة لامة، يمكن قياس f بسهولة بإيجاد نقطة الصورة للشّمس، أو أيّ جسم بعيد. وعند معرفة f يمكن حساب مكان الصورة لأيّ جسم آخر. إنّ إيجاد الصورة بواسطة رسم الأشعّة يعدّ عملاً صعبًا؛ لأنّ علينا معرفة معامل الانكسار، وكذلك زاوية السّقوط والخروج من سطحي العدسة. ويمكن تجاوز هذا العناء باستخدام بعض الحقائق المعروفة لدينا، مثل شعاع يوازي المحور الرئيس يمرّ (بعد الانكسار) بالبؤرة. ولتحديد نقطة الصورة يلزمنا فقط اعتبار الأشعّة الثلاثة المبينة في (الشّكل 23-34)، حيث نستخدم سهما ليدل على الجسم، وعدسة لامّة تكوّن الصورة إلى اليمين. هذه الأشعّة تصور من نقطة واحدة على الجسم، وترسم كما لو كانت العدسة رقيقة جدًّا، ونبين انحناءة واحدة عند مركز العدسة بدل الانكسارات على السّطحين. وترسم هذه الأشعّة كما يلي:

الشّكل 23 - 33.

عدسة مفرقة



مخطط الأشعّة إيجاد موقع الصورة المكون بواسطة عدسة رقيقة.

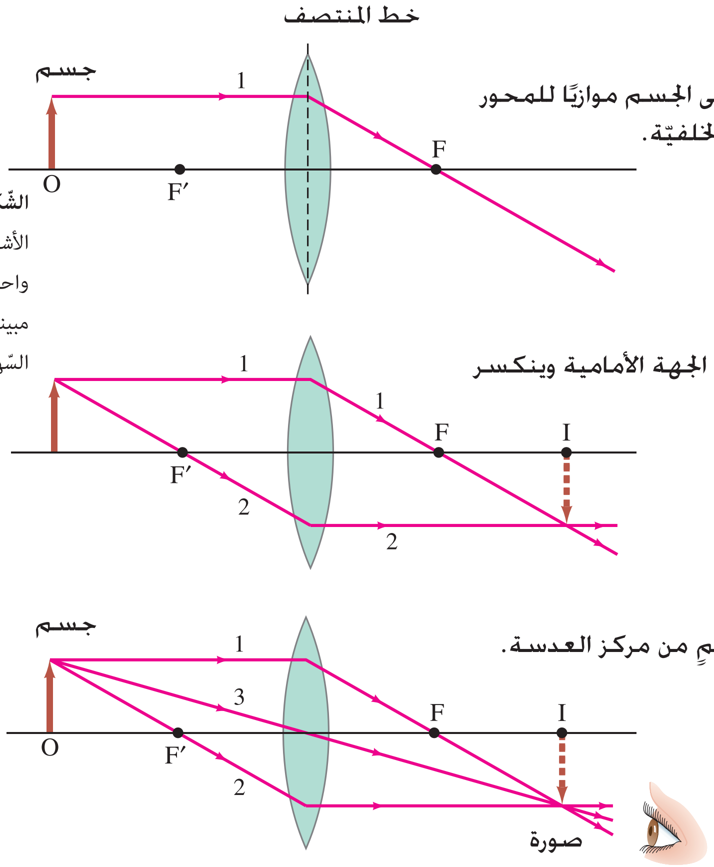
الشّعاع 1، يُرسم موازيًا للمحور الرّئيس، ولذلك ينكسر مارًّا بالبؤرة F خلف العدسة، (الشّكل 23-34 أ)، انظر لذلك (الشّكل 23-31أ).

الشّعاع 2، يُرسم على شكل خطٍّ يمرُّ في البؤرة الثانية F' الجانب الأول للعدسة في (الشّكل 23-34)، ثم يخرج من العدسة موازيا للمحور الرئيس.

الشّعاع 3، يوجّه نحو مركز العدسة حيث يكون السّطحان متوازيين، وهذا الشّعاع يمرُّ موازيًا لنفسه، ويُزاح قليلا فقط؛ لأنّ العدسة رقيقة. كما أنّه يرسم بصورة خطٍّ مستقيم. (الشّكل 23-34 جـ).

النقطة التي تتقاطع عندها هذه الأشعّة الثلاثة هي نقطة الصورة لنقطة الجسم المختارة. وفي الواقع، فإنّ أيّ شعاعين من الثلاثة يكونان كافيَيْن لتحديد مكان الصورة، ولكن رسم الشّعاع الثالث يلزم فقط كاختبار.

* نعرف أنّ معامل انكسار مادة العدسة أكبر من محيطها، مثل عدسة زجاجيّة في الهواء، وهو الوضع المألوف.



(أ) الشعاع 1 ينطلق من نقطةٍ على الجسم موازيًا للمحور و ينكسر مارًّا في البؤرة في الجهة الخلفيّة.

(ب) الشعاع 2 يمّر خلال البؤرة في الجهة الأمامية وينكسر موازي للمحور في الجهة الخلفية.

(ج) الشعاع 3 يمّر بشكلٍ مستقيمٍ من مركز العدسة. (بفرض أنّ العدسة رقيقة)

الشّكل 23-34 إيجاد الصورة بواسطة رسم الأشعّة لعدسة لامّة. تخرج الأشعّة من نقطة واحدة على الجسم (سهم).
مبينة أفضل ثلاثة أشعة تخرج من قمة السّهم لتحديد موقع الصورة.

باستعمال هذه الأشعّة الثلاثة لنقطة واحدة من الجسم، يمكننا إيجاد نقطة الصورة لنقطة الجسم هذه (قمة السّهم الشّكل 23-34). ويمكن إيجاد نقاط الصورة الأخرى لنقاط الجسم المختلفة بالطريقة نفسها لرسم الصورة كاملا. ولأنّ الأشعّة الحقيقية تمرّ من نقاط الصورة، فإنّه يُعدّ **خيالاً حقيقيًّا** (انظر صفحة 634). ويمكن الكشف عن الصورة بواسطة فيلم أو شاشة بيضاء توضع في مكان الصورة (الشّكل 23-35).

رؤية الصورة

كما يمكن رؤية الصورة مباشرة أيضًا بالعين عند وضعها خلفه، كما هو مبيّنٌ في (الشّكل 23 - 34 جـ)، بحيث إنّ بعض الأشعّة المتفرقة من كلّ نقطة عليه تدخل العين. ونستطيع أن نرى خيالا واضحًا (حادًّا) فقط للأشعة المتفرقة (الصادرة) من كلّ نقطة في الصورة، لأنّنا نرى الأجسام العادية عندما ندخل الأشعّة الصادرة من كلّ نقطة في الصورة إلى العين كما يُرى من (الشّكل 23-1).

لا تستطيع العين أن تركز أشعة متجمعة عليها؛ إذا وضعت العين بين النقطتين F و I في (الشّكل 23-34 جـ)، فلن ترى خيالا واضحا. (سندرس الكثير عن عيوننا في البند 25-2).

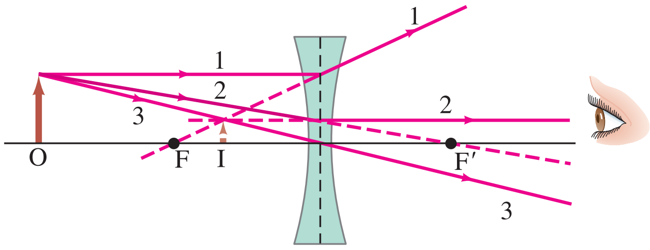

(ب) (أ)

الشّكل 23-35. (أ) تستطيع العدسة اللامة تكوين خيال حقيقيّ (هنا لبناية بعيدة مقلوبة) على شاشة. (ب) الصورة نفسه كما تراه العين.
[(**الشّكل 23-29 د**) يبين أخيلة تراها العين مكونة بواسطة عدسات مفرّقة وأخرى مُجمّعة].

العدسة المفرّقة

يمكننا تحديد موقع الصورة الذي تكوّنه عدسةٌ مفرّقةٌ بواسطة رسم الأشعّة الثلاثة نفسها التي تصدر عند نقطة واحدة في الجسم، كما هو مبيّن في (الشّكل 23-36). لاحظ أنّ الشّعاع 1 المرسوم موازيا للمحور الرّئيس لا يمرّ خلال البؤرة F′ خلف العدسة، ولكنه يبدو قادما من البؤرة F أمام العدسة (الخطّ المتقطع). أمّا الشّعاع 2، فموجّه مباشرة إلى F′، وينكسر موازيًا للمحور الرّئيس، في حين يمرّ الشّعاع 3 مباشرة خلال مركز العدسة.

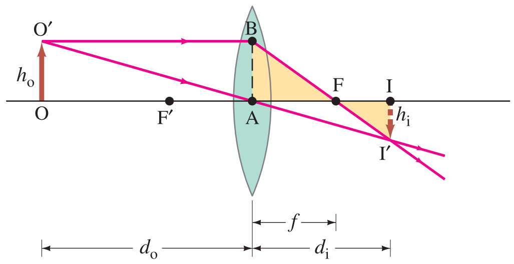
تبدو الأشعّة المنكسرة كلّها كأنها صادرة من نقطة إلى يسار العدسة، وهذه هي نقطة الصورة I. ولأنّ الأشعّة لا تمرّ حقيقة في الصورة، لذا، فهو **خيال وهميّ**. لاحظ أنّ العين لا تميّز بين خيالٍ حقيقيٍّ وآخر وهميٍّ؛ كلاهما يمكن رؤيته.



الشّكل 23-36 إيجاد الصورة بواسطة رسم الأشعّة لعدسة مفرقة.

8-23 معادلة العدسة الرقيقة؛ التكبير

سنشتق الآن معادلة تربط بين كلٍّ من بُعد الجسم، وبُعد الصورة، والبُعد البؤريّ لعدسة رقيقة. هذه المعادلة تجعل إيجاد موقع الصورة أسرع وأكثر دقة من رسم الأشعّة. افرض أنّ d_o هي بُعد الجسم؛ أي بُعده عن مركز العدسة، وأنّ d_i بُعد الصورة؛ أي بُعده عن مركز العدسة. وافرض أنّ h_o هو طول الجسم، و h_i طول الصورة. خذ الشّعاعين المبينين في (الشّكل 23 - 37) لعدسة لامّة. يفترض أنها رقيقة. المثلثان القائمان FI′I، و AFB (ملونان بالأصفر) متشابهان؛ لأنّ الزاوية AFB تساوي الزاوية IFI′. لذلك،



الشّكل 23-37 اشتقاق معادلة العدسة، العدسة لامّة.

IFI′

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

ولأنّ الطول $AB = h_o$، فإنّ المثلثين OAO′، و IAI′ متشابهان. ولهذا، فإنّ

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

نساوي الجانبين على اليمين لهاتين المعادلتين، الجانبان على اليسار في المعادلتين متساويان، ثم نقسم على d_i لنجد

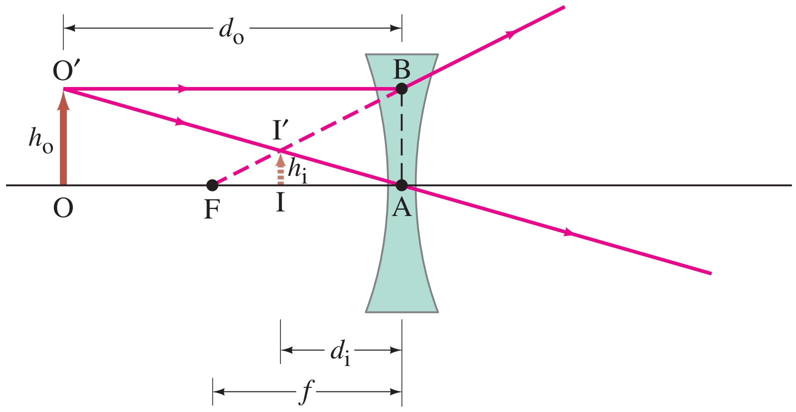
$$\frac{1}{f} - \frac{1}{d_i} = \frac{1}{d_o}$$

أو

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f}. \quad \textbf{(8-23)}$$

معادلة العدسة الرقيقة

تسمى d_o هذه **معادلةَ العدسة الرقيقة**. إنّها تربط بُعْدَ الصورة d_i ببُعدِ الجسم والبُعد البؤريّ f، وهي أكثر معادلة أهميّة في الضّوء الهندسيّ. (ونظرًا للأهمية نشير إلى أنّها تحمل صيغة معادلة المرآة نفسها، المعادلة 23-2). إذا كان الجسم في اللانهاية، عندها $1/d_o = 0$. وهكذا، فإنّ $d_i = f$، أي أنّ البُعد البؤري هو بُعد الصورة لجسم في اللانهاية، كما ذكرنا سابقًا.



الشّكل 23-38 اشتقاق معادلة العدسات لعدسة مفرقة.

يمكننا اشتقاق معادلة العدسة لعدسة مفرقة باستعمال (الشّكل 23-38). المثلثان IAI′ و OAO′ متشابهان. وكذلك المثلثان IFI′ و AFB متشابهان أيضا. وهكذا (مع ملاحظة أنّ الطول $AB = h_o$)

$$\frac{h_i}{h_o} = \frac{d_i}{d_o} \quad \text{و} \quad \frac{h_i}{h_o} = \frac{f - d_i}{f}$$

وعند مساواة الطرفين على اليمين في المعادلتين مع التبسيط، نجد أنّ

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

تنويه:

البعد البؤريّ للعدسة المفرّقة سالب.

هذه المعادلة تصبح (كمعادلة 23-8) إذا جعلنا f و d_i سالبين. أي أنّنا نعتبر f سالبة للعدسة المفرّقة، و d_i سالبًا عندما يكون الصورة في الجهة نفسها من العدسة كالجسم، أي التي يأتي منها الضّوء. وهكذا تصبح (المعادلة 23-8) سارية المفعول لكلتا العدستين المجمعة والمفرّقة وللأوضاع جميعها، إذا استعملنا **اصطلاحات الإشارات** التالية:

1. البعد البؤري موجب للعدسة اللامة، وسالب للعدسة المفرّقة.
2. بعد الجسيم موجب إذا كان الجسم على الجانب من العدسة الذي يسقط منه الضّوء (هذه هي الحالة المعتادة، علمًا أنّ ذلك قد يختلف عندما تستعمل مجموعة من العدسات معًا). ما عدا ذلك سيكون سالبًا.
3. بعدُ الصورة موجبٌ إذا كان الصورة في الجهة المقابلة من العدسة للجهة التي يسقط منها الضّوء؛ وإذا كان الصورة في الجهة نفسها، فإنّ d_i سالب. وهذا يكافئ: بعد الصورة الحقيقي موجب وللوهمي سالب.
4. طول الصورة h_i موجب إذا كان معتدلًا، وسالب إذا كان مقلوبًا بالنسبة للجسم. (h_o تؤخذ دائمًا موجبة).

تكبير العدسة

التكبير m للعدسة يعرف بأنّه النسبة بين طول الصورة إلى طول الجسم، $m = h_i/h_o$ من (الشّكلين 23-37، و 23-38) والاصطلاحات التي سبق ذكرها والتي تحتاج إلى إشارة سالبة لتنسجم معها، نحصل على

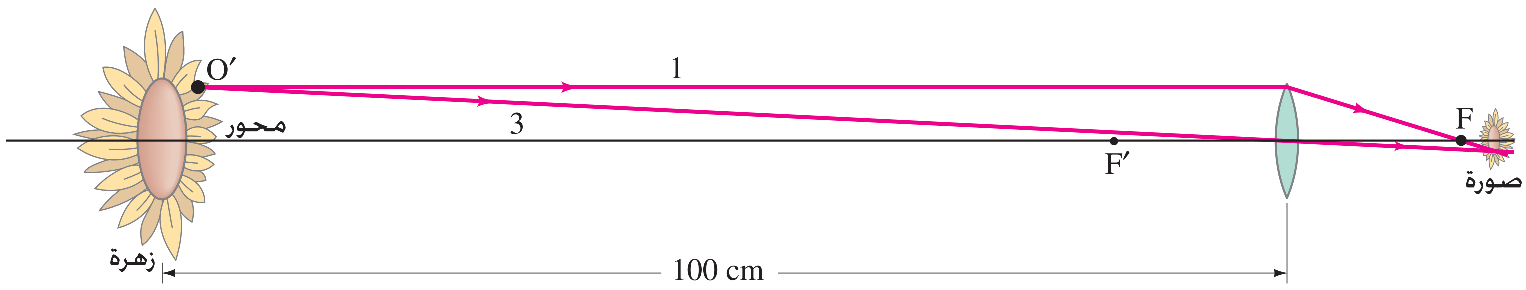
$$m = \frac{h_i}{h_o} = -\frac{d_i}{d_o}. \qquad \textbf{(9-23)}$$

ويكون التكبير موجبًا للخيال المعتدل، وسالبًا للخيال المقلوب.

من مصطلح الإشارات 1، يترتب على ذلك أنّ القدرة (معادلة 23-7) للعدسة اللامة، موجبة، في حين تكون القدرة للعدسة المفرّقة سالبة. وتُدعى العدسةُ اللامة أحيانًا **العدسةَ الموجبةَ**، و**العدسةُ المفرّقةُ** العدسةَ السالبةَ.

طريقة حلّ الأسئلة: المجال المغناطيسيّ

1. ارسم **مخطّطًا** للأشعة بدقة متناهية؛ فالمخطط التقريبي يمكنه دعم النتائج الرياضية (التحليلية). اختر نقطة على الجسم، وارسم شعاعين على الأقلّ، ويفضل ثلاثة من الأشعّة التي يسهل رسمها، والتي وصفت في (الشّكلين 23-34، و 23-36). وتكون نقطة الصورة عند تقاطع هذه الأشعّة.
2. في الحلّ الرّياضيّ، حلَّ المعادلات لإيجاد مجاهيل في معادلة **العدسة الرقيقة** (المعادلة 23-8). **والتّكبير** (المعادلة 23-9). معادلة العدسة تحتوي على مقلوب الكميات، وتذكّر أن تأخذ المقلوب.
3. اتبع **اصطلاح الإشارات** آنفة الذكر.
4. تحقق من توافق نتائجك التحليلية مع مخطط الأشعّة.



الشّكل 23-39 (مثال 23-9) (ليس وفقا لمقياس رسم).

المثال 23-9 خيال مكوّن بواسطة عدسة لامّة

زهرةٌ طولها 7.6 cm موضوعةٌ على بعد 1.00 m من عدسة كاميرا بعدها البؤري +50.0 mm. ما: (أ) موقعها؟ (ب) طول خيالها؟

النّهج: نتبع الخطوات المذكورة في إرشادات حلّ المسائل بوضوح.

الحلّ:

(1) رسم مخطط الأشعّة: (الشّكل 23-39) هو مخطط أشعة تقريبي يبين الشّعاعين 1 و 3 لنقطة واحدة على الزهرة. نرى أنّ الصورة على بعد قليل خلف البؤرة F إلى يمين العدسة.

(2) معادلات العدسة الرقيقة والتكبير: (أ) نجد بُعْدَ الصورة رياضيًّا باستعمال معادلة العدسة، (المعادلة 23-8). عدسة الكاميرا لامة وبعدها البؤري $f = +5.00$ cm، و $d_o = 100$ cm. وهكذا نجد من معادلة العدسة

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d_o} = \frac{1}{5.00 \text{ cm}} - \frac{1}{100 \text{ cm}}$$

$$= \frac{20.0 - 1.0}{100 \text{ cm}} = \frac{19.0}{100 \text{ cm}}$$

وهكذا، فإنّ

$$d_i = \frac{100 \text{ cm}}{19.0} = 5.26 \text{ cm}$$

(ب) التكبير هو

$$m = -\frac{d_i}{d_o} = -\frac{5.26 \text{ cm}}{100 \text{ cm}} = -0.0526$$

ولذلك، $h_i = mh_o = (-0.0526)(7.6 \text{ cm}) = -0.40$ cm

إذن، طول الصورة 4.0 mm.

(3) اصطلاح الإشارات. وجد ألفا بُعدُ الصورة d_i موجب. لذا، فالصورة خلف العدسة. كما أن طول الصورة $h_i = -0.40$ cm. وتعني أشارة السالب أن الصورة مقلوبة.

(4) التوافق: تتفق النتائج التحليلية في الخطوتين الثانية والثالثة مع مخطَّطِ الأشعّة (الشّكل 23-39): حيث أن الصورة خلف العدسة ومقلوبة.

ملحوظة: يشير الفرع (أ) إلى أنّ الصورة تبعد 2.6 mm عن العدسة أكثر من خيال جسمٍ في اللانهاية، والذي يساوي بعده البعد البؤري ومقداره 50.0 mm. وفي الواقع، عند ضبط عدسة الكاميرا، كلّما وُجِدَ وضع العدسة في أبعد مسافة عن الفليم، كان الجسم أقرب إلى الكاميرا.

تمرين ز: إذا حركت الزهرة (الجسم) في (المثال 23 - 9) وأبعدت عن العدسة، فهل يقترب الصورة من آلة التصوير؟ أم يبتعد عنها؟ (لا تحسب!).

المثال 23-10 الأجسام القريبة من عدسة لامّة

إذا وُضع جسمٌ على بعد 10 cm من عدسة لامّة. بعدُها البؤري 15 cm. فحدّد موقع الصورة وطوله: (أ) رياضيا. (ب) باستعمال مخطط أشعة.

النّهج: نستعمل أولا (المعادلتين 23 - 8، و 23 - 9) للحصول على حلّ تحليليّ. ثمّ نتأكّد بواسطة المخطط الشّعاعيّ باستعمال الأشعّة 1، و 2، و 3 لنقطة من الجسم منفردة.

الحلّ: (أ) أعطينا $f = 15\text{ cm}$، و $d_o = 10\text{ cm}$، لذلك

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{15\text{ cm}} - \frac{1}{10\text{ cm}} = -\frac{1}{30\text{ cm}}$$

وهكذا $d_i = -30\text{ cm}$ (تذكر أنّ تأخذ المقلوب) لأنّ d_i سالبة يجب أن يكون الصورة وهميًّا. وفي الجهة من العدسة نفسها التي يقع فيها الجسم.

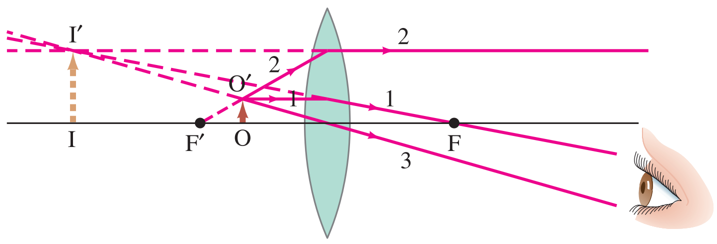
تنويه:
تذكّر أن تأخذ المقلوب.

$$m = -\frac{d_i}{d_o} = -\frac{-30\text{ cm}}{10\text{ cm}} = 3.0.$$

طولُ الصورةِ ثلاثةُ أمثالِ طولِ الجسم. والصورة معتدل. تستخدم هذه العدسة كعدسة

تكبير بسيطة والتي سنناقشها بتفصيل أكثر في (البند 25-3). (ب) مخطط الأشعّة مبين في (الشّكل 23-40) ويؤكد النتائج في الفرع (أ). نختار النقطة O' قمة الجسم ونرسم الشّعاع 1. وهذا سهل. أمّا الشّعاع 2 فيحتاج إلى تفكير: لو رسمناه متجها إلى F'. فإنّه سيذهب في الطريق الخطأ. لذا. سنرسمه كما لو كان قادمًا من F' (ولذلك نرسمه متقطعا). يصطدم بالعدسة. ثم يخرج موازيا محورها. ثم نسقطه للخلف. كما يجب أن نعمل في الشعاع 1 أيضًا. لتحديد موقع تقاطعهما. في حين يُرسم الشّعاع 3 مارًا بمركز العدسة. ويتقاطع مع الشّعاعين السّابقين عند النقطة I'.

ملحوظة: من (الشّكل 23-40). يمكننا ملاحظة أنه إذا كان الجسم موضوعًا بين البؤرة والعدسة اللامة. فإنّ الصورة وهميّ.



الشّكل 23-40 جسم موضوع أقرب من البؤرة لعدسة لامة ينتج خيالا وهميًا. (مثال 23-10)

المثال 23-11 عدسة مفرقة

أين يجب وضع حشرة صغيرة من عدسة مفرقة بعدها البؤري 25 cm لتكون خيالًا وهميًا على بعد 20 cm أمام العدسة؟

النّهج: المخطّط هو في الأساس المبيّن في (الشّكل 23 - 38) لأنّ العدسة هنا مفرقة والصورة أمام العدسة ضمن البعد البؤري.

(قد يكون تمرينًا مهمًّا أن ترسم المخطّطَ الشّعاعيَّ وفقَ مقياس رسمٍ بدقة). يمكن حسابُ بُعد الحشرة d_o من معادلة العدسة.

الحلّ: العدسة مفرقة. ولذلك. تكون f سالبة: $f = -25\text{ cm}$

ويجب أن يكون بعد الصورة سالبا؛ لأنّه أمام العدسة (اصطلاح الإشارات). لذلك $d_i = -20\text{ cm}$.

وتعطينا (المعادلة 23 - 38)

$$\frac{1}{d_o} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d_i} = -\frac{1}{25\text{ cm}} + \frac{1}{20\text{ cm}} = \frac{-4+5}{100\text{ cm}} = \frac{1}{100\text{ cm}}$$

إذن. يجب أن يكون الجسم على بعد 100 cm أمام العدسة.

تمرين ح: إذا وُضع جسمٌ على بعد 12 cm من عدسة بعدها البؤري 15 cm. فهل سيكون الصورة حقيقيّا أم وهميّا إذا كانت العدسة: (أ) لامة؟ (ب) مفرقة؟

تمرين ط: حدّد موقع الصورة الناتج من عدسة مجمعة بعدها البؤري 15.0 cm عند وضع جسم على بُعد 13.0 cm أمامها.

9-23 تراكيب العدسات *

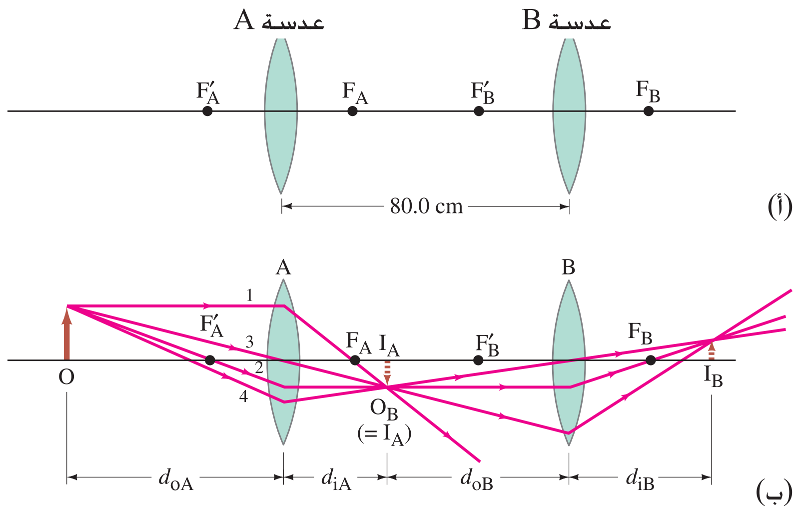
سنناقش الآن كيفيَّةَ التعامل مع العدسات المستعملة كمجموعة. عندما يمرّ الضَّوء في أكثر من عدسة، نجد الصورة المكوّن بالعدسة الأولى كما لو كانت وحدها. ويصبح هذا الصورة هو الجسم للعدسة الثانية، ثمّ نجد الصورة المكوّن في العدسة الثانية، والذي سيكوّن الصورة النّهائيّ. وفي حال وجود عدستين فقط، فإنّ التكبير الكليّ سيكون حاصل ضرب تكبير كلّ من العدستين بصورة منفصلة.

وتبقى هذه الطريقة صالحة حتى لو اعترضت العدسة الثانية طريق الضَّوء من العدسة الأخرى قبل أن يتشكّل الصورة.

العدسات المتعددة: الصورة المكوّن بالعدسة الأولى يعمل جسمًا للعدسة الثانية.

المثال 12-23 نظام العدسات الثنائية

وُضعت عدستان لامتان A، و B بعداهما البؤريان $f_A = 20.0$ cm و $f_B = 25.0$ cm، بحيث كان البُعد بينهما 80.0 cm كما هو مبين في (الشّكل 23 - 41أ). ووضع جسم على بعد 60.0 cm أمام العدسة الأولى كما هو مبين في (الشّكل 23 - 41ب). حدّد: (أ) موقع الصورة النهائي الناتج من نظام العدستين. (ب) التكبير لهذا الصورة.



الشّكل 23-41.
عدستان A، و B تستعملان كمجموعة، (مثال 23-12).
الأرقام الصغيرة تعود إلى الأشعّة التي يسهل رسمها.

النّهج: نبدأ بقسمة الجسم O . نرسم الأشعّة 1، 2، 3 للعدسة الأولى A، وكذلك الشّعاع 4 الذي بعد مروره في العدسة A يعمل كشعاع "3" (خلال المركز) للعدسة الثانية B. يخرج الشّعاع 2 للعدسة A موازيا، لذلك سيكون الشّعاع 1 للعدسة B. لتحديد الصورة I_A الذي تكونه العدسة A؛ نستعمل (المعادلة 23-8) حيث $f_A = 20.0$ cm و $d_{oA} = 60.0$ cm بُعد الصورة I_A عن العدسة B هو بُعد الجسم d_{oB} عن العدسة B. ونجد الصورة النهائيّ باستعمال معادلة العدسة، ولكن في هذه المرّة، تنسب المسافات كلّها للعدسة B. وللفرع (ب)، نجد التكبيرين من (معادلة 23-9) لكلّ عدسة على الترتيب.

الحلّ: (أ) الجسم على بعد $d_{oA} = +60.0$ cm من العدسة A.

نجد بُعد الصورة باستعمال معادلة العدسة كما يلي:

$$\frac{1}{d_{iA}} = \frac{1}{f_A} - \frac{1}{d_{oA}} = \frac{1}{20.0\text{ cm}} - \frac{1}{60.0\text{ cm}} = \frac{3-1}{60.0\text{ cm}} = \frac{1}{30.0\text{ cm}}$$

لذلك، بُعد الصورة I_A يساوي $d_{iA} = 30.0$ cm خلف العدسة الأولى. وتُصبح هذه الصورةُ الجسمَ بالنسبة للعدسة الثانية B.

ويبعد $d_{oB} = 80.0\text{ cm} - 30.0\text{ cm} = 50.0\text{ cm}$ أمام العدسة B، كما يبين (الشّكل 23-41ب). الصورة المكوّنة بالعدسة B ثانية باستعمال معادلة العدسة، يكون على بعد d_{oB} من العدسة B:

$$\frac{1}{d_{iB}} = \frac{1}{f_B} - \frac{1}{d_{oB}} = \frac{1}{25.0\text{ cm}} - \frac{1}{50.0\text{ cm}} = \frac{2-1}{50.0\text{ cm}} = \frac{1}{50.0\text{ cm}}$$

وهكذا، فإنّ $d_{iB} = 50.0$ cm خلف العدسة B. وهذه هي الصورة النهائيّة. انظر (الشّكل 23-41ب).

تنويه:
لاحظ أنّ بُعْدَ الجسم عن العدسة الثانية لا يساوي بُعْدَ الصورة النّاتج من العدسة الأولى

(ب) تكبير العدسة A (معادلة 9-23)

$$m_A = -\frac{d_{iA}}{d_{oA}} = -\frac{30.0\ \text{cm}}{60.0\ \text{cm}} = -0.500$$

إذن، تكون الصورة الأولى مقلوبة وطولها يساوي نصف طول الجسم.

$$h_{iA} = m_A h_{oA} = -0.500 h_{oA}$$

تعتبر العدسة B هذه الصورةَ جسمًا، وتغيّر طوله بمعامل

$$m_B = -\frac{d_{iB}}{d_{oB}} = -\frac{50.0\ \text{cm}}{50.0\ \text{cm}} = -1.000$$

تعكس العدسة الثانية الصورة (الإشارة السالبة)، ولكنها لا تغيّر من طوله. حيث يكون طول الصورة النهائي هو (تذكّر أنّ h_{oB} تساوي h_{iA})

$$h_{iB} = m_B h_{oB} = m_B h_{iA} = m_B m_A h_{oA} = (m_{total}) h_{oA}$$

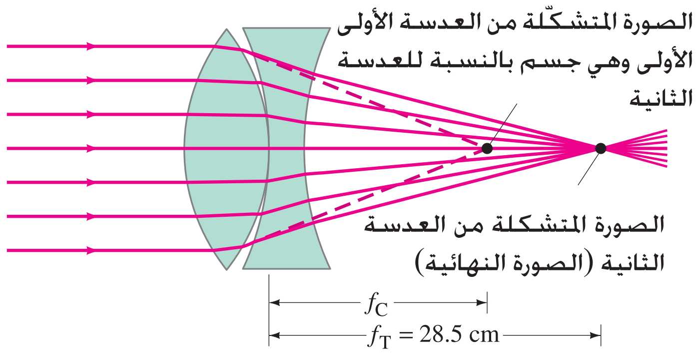
التكبير الكليّ يساوي

$m_{total} = m_A m_B$

فيكون التكبير النهائي هو حاصل ضرب m_A في m_B، وهذا يساوي

$$m_{total} = m_A m_B = (-1.000)(-0.500) = +0.500$$

أو نصف الطول الأصلي، حيث تكون الصورة النهائية معتدلة.



الشّكل 42-23 تحديد البعد البؤري لعدسة مفرقة (مثال 13-23)

المثال 13-23 قياس f لعدسة مفرقة

لقياس البعد البؤري لعدسة مفرقة، تُوضع عدسةٌ لامّة ملامسة لها، كما يبين (الشّكل 23 - 42). تتجمع أشعة الشّمس بواسطة هذا الترتيب عند نقطة على بعد 28.5 cm خلف العدستين. إذا كان البعد البؤري للعدسة اللامة f_C يساوي 16.0 cm. فما البعد البؤري للعدسة المفرّقة f_D؟ افرض أنّ العدستين رقيقتان، وأنّ الحيز بينهما مهمل.

النّهج: بُعْدُ الصورة في العدسة الأولى يساوي بعدَها البؤري (16.0 cm)؛ لأنّ بُعْدَ الجسم ما لا نهايّ (∞). ويعمل بُعدُ هذا الصورة الذي لا يتشكل في الواقع كجسم للعدسة الثانية (المفرّقة). ونطبق معادلة العدسة الرقيقة على العدسة المفرّقة لنجد مكان تكوّن الصورة النهائيّ.

الحلّ: تتجمّع الأشعّة من الشّمس على بعد 28.5 cm من المجموعة. لذا، فالبعد البؤريّ الكليّ للمجموعة يساوي $f_T = 28.5$ cm. ولو كانت العدسة المفرّقة غائبة، فستكوّن العدسةُ المجمعة الصورةَ في الوسط؛ أي على بعد $f_C = 16.0$ cm خلفها (الخطوط المقطعة في الشّكل 23-42). وعند إدخال العدسة المفرّقة خلف العدسة اللامة، فسنعامل الصورة المكوّن من العدسة الأولى كجسم بالنسبة للعدسة الثانية. ولأنّ هذا الجسم يأتي على يمين العدسة، فإنّ بعده d_o سالب (انظر اصطلاح الإشارات صفحة 651). وهكذا بالنسبة للعدسة المفرّقة، الجسم وهميّ وبعده سالب $d_o = -16.0$ cm. العدسة المفرّقة تكوّن خيالا لهذا الجسم على بعد $d_i = 28.5$ cm. لذا

$$\frac{1}{f_D} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{-16.0\ \text{cm}} + \frac{1}{28.5\ \text{cm}} = -0.0274\ \text{cm}^{-1}$$

ونأخذ المقلوب لنجد $f_D = -1/(0.0274\ \text{cm}^{-1}) = -36.5$ cm.

ملحوظة: إذا أريد لهذا النّظام أن يعمل؛ فيجب أن تكون العدسة اللامة "أقوى" من العدسة المفرّقة؛ أي يجب أن يكون بعدها البؤري أقلّ من البعد البؤريّ للعدسة المفرّقة.

* 10-23 معادلة صانعي العدسات

هناك معادلةٌ مفيدةٌ تُعرف بمعادلة **صانعي العدسات**. تربط البعدَ البؤريَّ للعدسة بنصفي قطري تكور سطحيها R_1، و R_2 ومعامل انكسارها n:

معادلة صانعي العدسات

$$\frac{1}{f} = (n - 1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \quad \textbf{(10-23)}$$

إذا كان السّطحان محدّبين، فإنّ R_1، و R_2 موجبان* .
وبالنسبة إلى السّطح المقعّر، يجب اعتبار نصف القطر سالبًا.
لاحظ أنّ (المعادلة 23-10) متماثلة بالنسبة إلى R_1، و R_2. لذلك، إذا قُلبت العدسة بحيث يسقط الضّوء على الوجه الآخر للعدسة، فإنّ البُعد البؤري هو نفسه حتى لو كان السّطحان مختلفين.

المثال 23-14 حساب البُعد البؤريّ لعدسة لامّة

عدسةٌ هلاليةٌ محدّبةٌ (الشّكلان 23 - 29أ، و 23 - 43) مصنوعةٌ من زجاج معامل انكساره $n = 1.50$. نصف قطر تكور السّطح المحدب 22.4 cm وذلك للسطح المقعر 46.2 cm. احسب البعد البؤريّ.

النّهج: نستخدم معادلة صانعي العدسات. (المعادلة 23-10) لحساب f.

الحلّ: $R_1 = 22.4\text{ cm}$، و $R_2 = -46.2\text{ cm}$ (السّطح المقعر). ثم

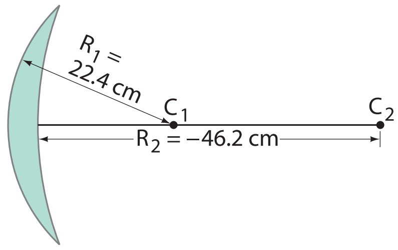
$$\frac{1}{f} = (1.50 - 1.00)\left(\frac{1}{22.4\text{ cm}} - \frac{1}{46.2\text{ cm}}\right) = 0.0115\text{ cm}^{-1}$$

وهكذا

$$f = \frac{1}{0.0115\text{ cm}^{-1}} = 87\text{ cm}$$

والعدسة لامة لأنّ $f > 0$

ملحوظة: إذا قلبنا العدسة بحيث $R_1 = -46.2\text{ cm}$، و $R_2 = +22.4\text{ cm}$، فسنحصل على النتيجة نفسها.



الشّكل 23-43 (مثال 23-14).

* تستعمل بعض الكتب اصطلاحات مختلفة، فمثلًا، تعتبر R_1، R_2 موجبة إذا كانت مراكز التكور إلى يمين العدسة، وفي مثل هذه الحالة لتستبدل إشارة + بالإشارة المعادلة لها في (المعادلة 23-10)

ملخص

يبدو أنّ الضَّوء ينتقل في خطوط مستقيمة تُسَمّى "**أشعة**" بسرعة v التي تعتمد على **معامل الانكسار** n للمادة.

$$n = \frac{c}{v} \quad \textbf{(4-23)}$$

حيث c سرعة الضَّوء في الفراغ.

عندما ينعكس الضَّوء عن سطح مستوٍ، فإنّ زاوية الانعكاس تساوي زاوية السّقوط. يبين **قانون الانعكاس** هذا كيف تكوَّنُ المرايا الأخيلةَ.

في **مرآة مستوية**، الصورة وهميّ، معتدل، وله طول الجسم نفسه، وعلى بعد خلف المرآة يساوي بعد الجسم عن المرآة.

المرآة الكروية يمكن أن تكون محدّبة أو مقعّرة.

المرآة المقعّرة تجمع الأشعّة الضّوئيّة المتوازية (أي القادمة من مصدر بعيد) في نقطة تسمى البؤرة، وتسمى المسافةُ من هذه النقطة الى المرآة **البعدَ البؤري** f للمرآة و

$$f = \frac{r}{2} \quad \textbf{(1-23)}$$

حيث r هو نصف قطر تكور المرآة.

تنعكس الأشعّة المتوازية السّاقطة على **مرآة محدّبة** عن المرآة كما لو أنّها تتفرّق من نقطةٍ مشتركة خلف المرآة. بعد هذه النقطة عن المرآة هو البعد البؤري للمرآة، ويعدّ سالبًا للمرآة المحدبة.

لجسمٍ معيّن، يمكن إيجاد كلّ من الموقع التقريبي وطول الصورة المتكون في المرآة بواسطة رسم الأشعّة. جبريًا، تُعطى العلاقةُ بين مسافات الأخيلة والأجسام، d_i، و d_o والبعد البؤري **بمعادلة المرآة** الآتية:

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} \quad \textbf{(2-23)}$$

النسبة بين طول الصورة h_i إلى طول الجسم h_o تساوي التكبير m للمرآة، وتساوي

$$m = \frac{h_i}{h_o} = -\frac{d_i}{d_o} \quad \textbf{(3-23)}$$

إذا تجمّعت الأشعّة ومرّت في الصورة فعليًّا بحيث تظهر الصورة على فيلم أو شاشة، يُقال إنّ هذا **الصورة حقيقيّة**. ولكن إن لم تمرّ الأشعّة فعليًّا في الصورة، فإنّ **الصورة وهميّة**.

عند مرور الضّوء من وسطٍ شفّافٍ إلى آخر، فإنّ الأشعّة تنحرف أو تنكسر. **قانون الانكسار (قانون سنيل)** ينصّ على ما يلي:

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \qquad \textbf{(5-23)}$$

حيث n_1، وθ_1 هما معامل الانكسار والزاوية مع العموديّ على السّطح للشعاع السّاقط، و n_2، و θ_2 هما للشعاع المنكسر.

عند وصول الأشعّة إلى السّطح الفاصل للمادة حيث يقلّ معامل الانكسار، فإنّ الأشعّة **تنعكس انعكاسًا كليًّا** إذا كانت زاوية السّقوط θ_1 حسب قانون سنيل $\sin\theta_2 > 1$. وهذا يحدث إذا تجاوزت θ_1 الزاوية الحرجة θ_c التي تعطى بـ

$$\sin\theta_C = \frac{n_2}{n_1} \qquad \textbf{(6-23)}$$

تستعمل العدسة الانكسار لتنتج خيالًا حقيقيًّا أو وهميًّا. تتجمّع الأشعّة المتوازية في نقطة تُسَمّى البؤرةَ بواسطة عدسة لامّة . ويُسمّى البعدُ بين البؤرة والعدسة **البعدَ البؤريَّ** f للعدسة.

يَبْعُدَ مرور الأشعّة المتوازية من عدسة **مفرّقة**. تبدو وكأنها تتفرق من نقطة بؤرتها. ويعدّ بُعدها البؤريّ سالبًا.

القدرة P لعدسة والتي تساوي (المعادلة 23-7) $P = 1/f$ تقاس بـ "الديوبتر" وهي وحدة معكوس المتر (m^{-1}).

لجسم ما. موقع الصورة وطوله الناتج من عدسة يمكن إيجادهما بالتقريب برسم الأشعّة. جبريًّا، تُعطى العلاقةُ بين بُعدي الصورة والجسم، d_i، و d_o والبُعد البؤري f بمعادلة العدسة

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} \qquad \textbf{(8-23)}$$

نسبة طول الصورة إلى طول الجسم والتي تساوي التكبير m للعدسة، هي

$$m = \frac{h_i}{h_o} = -\frac{d_i}{d_o} \qquad \textbf{(9-23)}$$

عند استعمال المعادلات المختلفة للضّوء الهندسيّ من المهمّ أنْ نتذكّر اصطلاح **الإشارات للكميات** جميعها؛ ومراجعته بعناية (الصفحتان 641، و 651) عند حلّ المسائل.

[*عند استعمال عدستين (أو أكثر) كمجموعة للحصول على الصورة، تستعمل معادلة العدسة الرقيقة لكلّ عدسة على الترتيب. الصورة النّاتج من العدسة الأولى يكون كجسم للعدسة التي تليها. **معادلة صانعي العدسات** تربط بين تكوّر كلّ من السّطحين ومعامل انكسار العدسة وبعدها البؤريّ].

أسئلـــة

1. كيف سيكون مظهر القمر لو أنّ له: (أ) سطحًا خَشِنًا؟ (ب) سطحًا مصقولًا كالمرآة؟

2. يُقال إنّ أرخميدس أحرق كامل الأسطول الرومانيّ في خليج سوراكوز بتجميع أشعة الشّمس بواسطة مرآةٍ كرويّةٍ ضخمة. هل هذا معقول؟

3. على الرّغم من أنّ المرآة المستوية تبدو بأنّها تبادل اليمين واليسار إلا أنّها لا تبادل الأعلى والأسفل. فسّر ذلك.

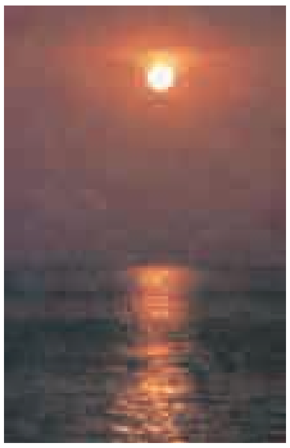
4. إذا كانت المرآة المقعّرة تنتج خيالًا حقيقيًّا، فهل من الضروريّ أن تكون الصورة مقلوبة؟ فسّر.

5. إذا وُضع جسمٌ على امتداد المحور الرئيس لمرآة كروية، وكان تكبير الجسم 3.0–، فهل تكون الصورة حقيقيّة أم وهميّة؟ مقلوبة أم معتدلة؟ وهل المرآة مقعرة أم محدّبة؟ وفي أيّ جانب من المرآة يقع الصورة؟

6. باستخدام القواعد للأشعة الثلاثة التي تمّت مناقشتها بالرجوع إلى (الشّكل 23-13)، ارسم الشّعاع الثّاني (للشّكل 23-17 ب).

7. ما البُعد البؤري لمرآة مستوية؟ وماذا يساوي التكبير لمرآة مستوية؟

8. عندما تنظر إلى انعكاس القمر على سطح بحر متموّج، فإنّه يبدو ممتدًّا (شكل 23-44). علّل ذلك.



الشّكل 23-44 (سؤال 8)

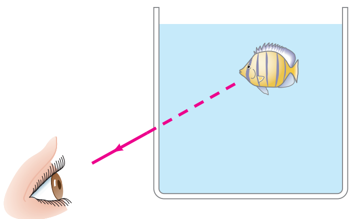
9. ما زاوية الانكسار عندما يُقابل شعاعٌ ضوئيٌّ السّطحَ الفاصلَ بين مادتين عموديًّا؟

10. كيف يمكنك تحديد سرعة الضّوء في جسم صلب، شفاف على شكل متوازي مستطيلات؟

11. عندما تنظر إلى بركة سباحة أو بحيرة، فهل يحتمل أن تقدّر عمقها أقلّ أم أكثر من الواقع؟ فسّر ذلك. كيف يتغير العمق الظاهريّ مع زاوية النظر؟ (استعمل رسمًا للأشعة).

12. ارسم مخطّطًا للأشعة لتبين لماذا تبدو العصا مكسورة إذا وُضع جزء منها تحت الماء (الشّكل 23-21).

13. تنظر عيناك خلال حوض أسماك للزينة لترى سمكة في الداخل. أحد الأشعّة الخارج من الحوض مبين في (شكل 23-45). إضافة إلى الموقع الظاهري للسمكة. بيّن الموقع التقريبيّ للسمكة الحقيقيّة بالرسم. وبرّر إجابتك باختصار.



الشّكل 23-45 (سؤال 13).

14. كيف تستطيع أن "ترى" قطرة ماء على سطح طاولة مع العلم أنّ الماء شفاف وعديم اللون؟

15. عندما تنظر إلى جسم في الهواء من نقطة تحت سطح بركة سباحة، هل سيبدو الجسم بالحجم نفسه كما تراه في الهواء؟ فسّر

16. كيف يكون للمرآة الكروية بعد جسمٍ سالب؟

17. تنحرف الأشعّة الضّوئيّة من النّجوم (بما فيها الشّمس) دائمًا نحو الاتّجاه العموديّ في أثناء مرورها في الغلاف الجويّ الأرضي. (أ) لماذا يبدو ذلك معقولًا؟ (ب) ماذا تستنتج من المواقع الظاهرية للنجوم كما تبدو من الأرض؟

18. أين يجب أن يُوضع فيلمٌ إذا كان على عدسة الكاميرا تكوين صورة واضحة لجسم بعيد جدًّا؟

19. ما نوع المرايا المبينة في (الشّكل 23-46)؟ فسّر ذلك.

الشكل 23-46(سؤال 19)

20. مصوّر يقترب أكثر ممّا يريد تصويره. ثم يعيد ضبط البؤرة (التّبْئير). هل تتحرّك عدسة الكاميرا أقرب إلى الفيلم أم أبعد عنه. فسّر ذلك.

21. هل تستطيع عدسة مفرقة تكوين خيالٍ حقيقيٍ. تحت أيّ ظرف؟ فسّر.

22. استعمل مخطّطاتٍ شعاعيّةٍ لتبيّن أنّ الصورةَ الحقيقيّة النّاتجة من عدسة رقيقة تكون دائمًا مقلوبة. أما الصورة الوهميّ فهو معتدل دائما إذا كان الجسم حقيقيًا.

23. يُقال إنّ الأشعّة الضّوئيّة "عكوسة" هل يتفق ذلك مع معادلة العدسة الرقيقة؟ فسّر ذلك.

24. هل يمكن إسقاط الأخيلة الحقيقيّة على شاشة؟ هل يمكن ذلك للأخيلة الوهمية؟ هل يمكن تصوير أيّهما؟ ناقش ذلك بالتفصيل.

25. قربت عدسة لامّة رقيقة من جسم. فهل يحدث تغير للصورة من حيث (أ) المكان؟ (ب) الطول؟ إذا كان الجواب نعم. فكيف ذلك؟

26. عدسة مصنوعة من مادة معامل انكسارها $n = 1.30$ في الهواء هي عدسة لامّة. هل ستبقى عدسة لامّة إذا وُضِعَتْ في الماء؟ فسّر ذلك باستعمال مخطط أشعة.

27. يواجه كلبٌ عدسة لامّة وذيله في الهواء. إذا تمّ تكوين صورة للأنف والذيل على شاشة على الترتيب. فأيّهما سيكون له تكبيرٌ أكبر؟

28. تقف قطة أمام عدسة محدبة وذيلها في الهواء. تحت أيّ ظروف (إذا وجدت) سيكون خيال الأنف وهميّا وخيال الذيل حقيقيًّا؟ أين سيكون خيال باقي جسم القطة؟

29.* لماذا يكون البُعد البؤريّ للعدسة اللامة في (المثال 23-13) أقلّ من البعد البؤريّ للعدسة المفرّقة إذا أردنا قياس البعد البؤري للمفرقة عن طريق جمعهما؟

30.* فسّر كيفية الحصول على جسم خيالي.

31.* تكوّن عدسة غير متماثلة (مستوية محدبة) خيالًا لجسم قريب. هل يتغيّر موقع الصورة لو قلبنا العدسة؟

32.* كلّما زاد سمكُ العدسة في الوسط مقارنة بالحواف. كان البعد البؤري أصغر. فسّر ذلك.

33.* تأمّل عدستين لامّتين تفصلهما مسافةٌ ما. وُضِعَ جسمٌ بحيث تقع الصورة الناتجة من العدسة الأولى في بؤرة العدسة الثانية تمامًا. هل سينتج هذا النظام خيالا؟ إذا كان كذلك فأين؟ وإلا فَلِمَ لا؟

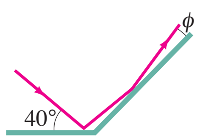
مسائل

2-23 الانعكاس؛ المرايا المستوية

1. (I) إذا أردت التقاط صورة لنفسك عند نظرك لخيالك في مرآة مستوية تبعد 2.5 m عنك. فعلى أيّ بعدٍ يجب ضبط عدسة الكاميرا؟

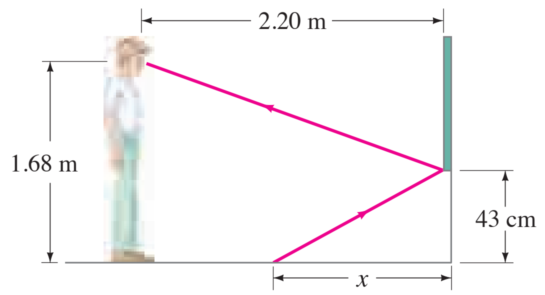
2. (I) عندما تنظر إلى نفسك في مرآة مستوية طولها 60-cm، فسترى المقدار نفسه من جسمك سواء كنت قريبًا أو بعيدًا عنها. (جرّب ذلك). استعمل مخطط أشعة لتبين كيف يكون ذلك حقيقيا.

3. (II) تتقابل مرآتان بزاوية ْ135. الشّكل (23-47). إذا سقطت أشعة ضوئية على إحدى المرآتين بزاوية °40 كما هو مبين. فبأيّ زاوية ϕ سوف تغادر الأشعّة المرآة الثانية.



الشّكل 23-47 (مسألة 3).

4. (II) شخص ارتفاع عينيه عن الأرض 1.68 m. يقف على بُعد 2.20 m أمام مرآة عمودية ترتفع حافتها السفلية عن الأرض 43 cm. (الشّكل 23 − 48). ما المسافة الأفقية x إلى قاعدة الجدار الذي يحمل المرآة لأقرب نقطة من أرض الغرفة يراها تنعكس في المرآة؟



الشّكل 23-48 (مسألة 4)

5. (II) افرض أنّك على بعد 90 cm من مرآة مستوية. ما المسافة بين المرآة التي تستعمل لعكس الأشعّة لتدخل في إحدى العينين ورأس أنفك إذا كان قطر البؤبؤ 5.5 mm؟

6. (III) بين أنّه إذا التقت مرآتان مستويتان بزاوية ϕ، فإنّ شعاعاً ينعكس على التتابع عن المرآتين سينحرف بزاوية 2ϕ بغضّ النظر عن زاوية السّقوط. افرض أنّ $\phi < 90°$ وأنّ هناك انعكاسين فقط؛ واحد عن كلّ مرآة.

3-23 المرايا الكروية

7. (I) سخّان شمسيّ حقيقة هو مرآة مقعرة موجهة نحو الشّمس. تجمع أشعّة الشمس في نقطة على بعد 18.0 cm أمامها. ما نصف قطر الكرة التي صنعت منها المرآة؟

8. (I) على أيّ بعدٍ من مرآة مقعرة (نصف قطر تكورها 23.0 cm) يجب وضع جسم ليتكون خياله في اللانهاية؟

9. (II) إذا نظرت إلى نفسك في كرة لامعة لشجرة عيد ميلاد قطرها 9.0 cm عندما يكون وجهك على بعد 30.0 cm منها. فأين سيكون خيالك؟ هل هو حقيقيّ أم وهميّ؟ هل سيكون معتدلا أم مقلوبًا؟

10. (II) مرآة في مدينة ألعاب ترويحية تعطي صورة معتدلة لأيّ شخص يقف على بعد 1.4 m منها. إذا كان طول الصورة ثلاثة أمثال طول الشّخص، فما نصف قطر التّكوّر؟

11. يريد طبيب أسنان استعمال مرآة صغيرة، بحيث عندما تكون على بعد 2.20 cm من السّنّ تنتج خيالا × 4.5 معتدلا. أيّ نوع من المرايا يجب أن يستعمل؟ وما نصف قطر تكورها؟

12. (II) تظهر مرايا المنظر الخلفيّ في السّيارة خيالا للسيارات خلفك أصغر من الصورةات التي تكونها لو كانت مستوية. فهل هذه المرايا مقعّرة أم محدّبة؟ ما نصف قطر تكورها إذا كانت السيارة على بعد 20.0 m منها تبدو × 0.33 طولها الحقيقيّ؟

13. (II) وُضِع جسمٌ مضيءٌ ارتفاعُه 3.0 mm على بعد 20.0 cm. أمام مرآة محدّبة نصف قطر تكوّرها 20.0 cm (أ) بيّن بواسطة المخطّط الشّعاعيّ أنّ بعد الصورة وهميّ، واحسب بعد الصورة. (ب) بين أنّ البعد (السالب) للخيال يمكن حسابه من (المعادلة 23-2) باستعمال بُعدٍ بؤريّ قدره -10.0 cm. (جـ) احسب طول الصورة. (المعادلة 23-3).

14. (II) إذا وقفت على بعد 3.0 m من مرآة محدّبة في محلٍّ تجاريّ، وقدّرت ارتفاع خيالك بنصف طولك الأصليّ. فاحسب نصف قطر التكورّ للمرآة.

15. (II) (أ) أين يجب وضع جسمٍ أمام مرآة مقعّرة بحيث تتكوّن الصورة في موقع الجسم نفسه؟ (ب) هل الصورة حقيقيّة أم وهميّة؟ (جـ) هل الصورة مقلوبة أم معتدلة؟ (د) احسب تكبير الصورة.

16. (II) خيال شجرة بعيدة وهميّ وصغير جدًّا ناتج من مرآة منحنية. تبدو الصورة على بعد 18.0 cm خلف المرآة. ما نوع هذه المرآة؟ وما نصف قطر تكورها؟

17. (II) استعمل طريقتين مختلفتين: الرسم الشّعاعيّ، ومعادلة المرآة لتبين أنّ تكبير المرآة المقعرة أقلّ من 1 إذا كان الجسم خارج مركز التكور C $(d_o > r)$، وأكبر من 1 إذا كان الجسم داخل مركز التكور C $(d_o < r)$.

18. (II) بين باستعمال مخطّط الأشعّة أنّ التكبير m لمرآة محدبة هو $m = -d_i/d_o$، تمامًا مثل مرآةٍ مقعّرة. (مساعدة: افرض شعاعًا من قمّة الجسم ينعكس عند مركز المرآة).

19. (II) استعمل مخطّطات الأشعّة لتبيّن أنّ معادلة المرآة (المعادلة 23-2) تنطبق على مرآة محدبة ما دمنا نستعمل f سالبة.

20. (II) تكبير مرآة محدبة يساوي × 0.65 + لأجسام على بعد 2.2 m من المرآة. ما البعد البؤري للمرآة؟

21. (II) جسمٌ طولُه 4.5 cm موضوعٌ على بعد 28 cm أمام مرآة كرويّة. نحتاج إلى تكوين خيال وهمي معتدل طوله 3.5 cm. (أ) ما نوع المرآة التي سوف نستعملها؟ (ب) أين سيكون الصورة؟ (جـ) ما البعد البؤري للمرآة؟ (د) ما نصف قطر تكوّرها؟

22. (III). مرآة حلاقة مصمّمة لتكبير الوجه بمعامل 1.33 عند وضع الوجه على بعد 20.0 cm أمامها. (أ) أيّ نوع من المرايا هي؟ (ب) صِفْ نوع الصورة الذي تكوّنه للوجه. (جـ) احسب نصف قطر التكور للمرآة المطلوبة.

4-23 معامل الانكسار

23. (I) ما سرعة الضّوء في: (أ) الزّجاج التاجي؟ (ب) الليوسيت؟ (جـ) كحول الإيثايل؟

24. (I) تساوي سرعة الضّوء في الجليد 2.29×10^8 m/s. ما معامل انكساره ؟

25. (II) سرعة الضّوء في مادة ما 89% من قيمتها في الماء. ما معامل انكسارها؟

5-23 الانكسار: قانون سنيل

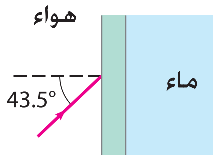
26. (I) تسقط حزمة ضوئيّة على سطح مستوٍ من الزّجاج (n= 1.58) وبزاوية 36° مع العموديّ. ما قيمة زاوية الانكسار؟

27. (I) يسلّط غواص حزمة ضوئيّة نحو الأعلى من تحت سطح الماء، وبزاوية 42.5° مع العموديّ. عند أيّ زاوية يخرج الشّعاع من سطح الماء؟

28. (I) شعاعٌ ضوئيٌّ صادرٌ من مصدرٍ تحت الماء ويخرج من سطح الماء بزاوية 66.0° مع العموديّ. عند أيّ زاوية سقوط يسقط الشّعاع على الحدّ الفاصل بين الهواء والماء من تحت السّطح؟

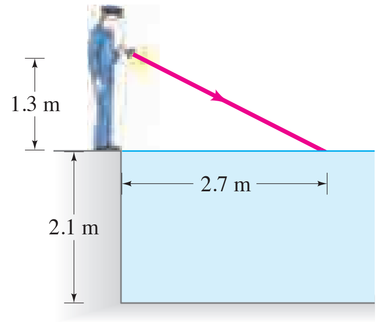
29. (I) تُشاهَدُ أشعة الشّمس بأنّها تصنع زاوية 31.0° مع العموديّ تحت سطح الماء. عند أيّ زاوية مع الأفق تقع الشّمس؟

30. (II) حوض مائيّ مملوء بالماء ذو سطوح جانبية زجاجيّة معامل انكسارها 1.52. وهناك شعاع ضوئيّ من خارج الحوض يسقط على الزّجاج بزاوية 43.5° مع العموديّ (الشّكل 23-49). ما زاوية هذا الشّعاع الضّوئيّ عندما يدخل: (أ) الزّجاج؟ (ب) الماء؟ وماذا ستكون زاوية الانكسار إذا دخل هذا الشّعاع الماء مباشرة؟



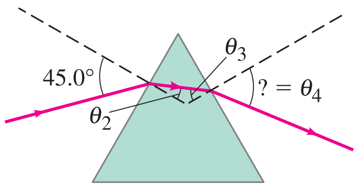
الشّكل 23-49 (مسألة 30)

31. (II) عند البحث في قاعدة بركة في الليل، يسلّط مراقب شعاعًا رفيعًا من الضّوء من ارتفاع 1.3 m على سطح الماء عند نقطة تبعد 2.7 m من حافة البركة (الشّكل 23-50). أين تصطدم بقعة الضّوء بقعر البركة، مقاسًا من الجدار تحت قدم المراقب إذا كان عمق البركة 2.1 m؟



الشّكل 23-50 (مسألة 31)

32. (II) يسقط الضّوء على منشور زجاجيّ متساوي الأضلاع بزاوية 45° مع أحد أوجهه، (الشّكل 23-51). احسب الزاوية التي يخرج بها الشّعاع من الوجه المقابل افرض أنّ $n = 1.58$.



الشّكل 23-51 (المسألتان 32 و 40)

33. (II) يسقط شعاع ضوئيّ في الهواء على صفيحة من الزّجاج ($n = 1.52$) حيث ينعكس جزءٌ منه، في حين ينكسر الجزء الآخر. احسب زاوية السّقوط إذا كانت زاوية الانعكاس ضعف زاوية الانكسار.

34. (II) برهن بصورةٍ عامّةٍ أنّه لشعاع ضوئيّ يسقط على سطح صفيحة من مادة شفافة، كما في الشّكل 23-22، فإنّ اتجاه الشّعاع الخارج يكون موازيًا للشّعاع السّاقط، بغضّ النظر عن زاوية السّقوط θ. افرض وجود الهواء على جانبي الصفيحة.

35. (II) يسقط شعاعٌ ضوئيٌّ على سطح صفيحةٍ زجاجيّةٍ معامل انكسارها n كما في (الشّكل 23-22). بيّن أنه إذا كانت زاوية السّقوط صغيرة، فإنّ الشّعاع الخارج يزاح جانبيًّا مسافة $d = t\theta(n-1)/n$ عن الشّعاع السّاقط، حيث t سمك الزّجاج θ وبالراديان. (مساعدة: للزاوية الصغيرة θ. $\sin\theta \approx \tan\theta \approx \theta$)

23-6 الانعكاس الداخليّ الكليّ

36. (I) ما الزّاوية الحرجة عند السّطح الفاصل بين الماء واللّيوسيت؟ وفي أيّ مادة يجب أن يبدأ الضّوء كي يحدث الانعكاس الداخليّ الكلّيّ؟

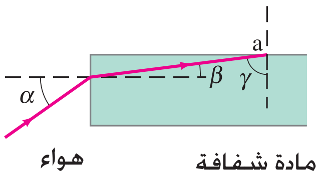
37. (II) الزّاوية الحرجة عند سطح سائلٍ ما مع الهواء تساوي 47.7°. احسب معامل انكسار السّائل.

38. (II) أُطلق شعاعٌ ضوئيٌّ من تحت سطح بركة ماء على عمق 62 m. أين يجب أن يصطدم بالحدّ الفاصل بين الماء والهواء بالنسبة للنقطة فوقه مباشرة بحيث لا يخرج الضّوء من سطح الماء؟

39. (II) ينبعث شعاع ضوئيّ من نقطة على عمق 8.0 cm تحت سطح سائل، ويصطدم بالسّطح عند نقطة على بعد 7.0 cm من النقطة التي فوق المصدر مباشرة. إذا حدث انعكاس داخليّ كليّ، فماذا تقول عن معامل انكسار السائل؟

40. (II) افرض شعاعًا ضوئيًّا يسقط على الوجه الأيسر للمنشور في (الشّكل 23-51). بزاوية 45.0° كما هو مبين، ولكنه انعكس كليّا على السّطح المقابل. إذا كانت زاوية رأس المنشور $\phi = 75.0°$، فماذا تقول عن معامل انكسار المنشور؟

41. (II) يدخل شعاع ضوئيّ نهاية أحد الألياف الضّوئيّة (الشّكل 23-52). بيّن أننا نضمن انعكاسا كليّا على السّطح (عند النقطة (a)) إذا كان معامل الانكسار نحو 1.52. أي أنّ الضّوء ينعكس داخليا عند النقطة a بغض النظر عن الزاوية α.



الشّكل 23-52
(مسألة 41)

42. (II) (أ) ما أقلّ قيمة لمعامل انكسار منشور زجاجيّ أو بلاستيكيّ يستعمل في منظار (الشّكل 23-26) بحيث يحصل انعكاس داخليّ كليّ عند زاوية 45°؟ (ب) هل سيعمل المنظار ($n = 1.50$) لو وُضع تحت سطح الماء؟ (جـ) ما أقلّ معامل انكسار مطلوب إذا غُمِر المنظار في الماء؟

23 – 7، و 23 – 8 العدسات الرّقيقة

43. (I) يقع خيال واضح عند 78.0 mm خلف عدسة لامّة بعدها البؤريّ 65.0 mm. جدْ موقع الجسم باستعمال: (أ) مخطّط شعاعيّ. (ب) الحساب.

44. (I) لوحظ أنّ أشعة الشّمس تتجمع عند نقطة 18.5 cm خلف عدسة. (أ) ما نوع العدسة؟ (ب) ما قدرة العدسة بالديوبتر؟

45. (I) تجمع عدسة الضّوء من جسم يبعد عنها 2.75 m في خيال يبعد 48.3 cm في الجهة الأخرى من العدسة. ما نوع العدسة؟ ما هو بعدها البؤري؟ هل الصورة حقيقيّ أم وهميّ؟

46. (I) (أ) ما قدرة عدسة بعدها البؤري 20.5 cm؟ (ب) ما البعد البؤري لعدسة قدرتها 6.25 – ديوبتر؟ (جـ) ما نوع هاتين العدستين؛ لامتان أم مفرقتان؟

47. (II) يستعمل جامع طوابع عدسة لامة بعدها البؤري 24 cm لمشاهدة طابع على بعد 18 cm أمام العدسة. (أ) أين يقع الصورة؟ (ب) ما التكبير الناتج؟

48. (II) وُضِعَتْ عدسةٌ قدرتها ‎-5.5 D‎ على بعد ‎14.0 cm‎ من جسم طوله ‎4.0 mm‎. ما هو: الموقع؟ النوع؟ ارتفاع الصورة؟

49. (II) تُستخدمُ عدسةٌ بعدُها البؤري ‎80 mm‎ لتكوين خيالٍ لجسمٍ على فيلم كاميرا. أكبرُ مسافةٍ مسموحةٍ بين العدسة والفيلم هي ‎120 mm‎. ما بعد العدسة أمام الفيلم إذا كنّا نصوّر جسمًا يبعد عن العدسة: (أ) ‎10.0 m‎ ؟ (ب) ‎3.0 m‎؟ (جـ) ‎1.0 m‎؟ وما أقربُ جسمٍ يمكن لهذه العدسة أن تصوّره بوضوح؟

50. (II) يُراد تكبيرُ مادة للقراءة بمعدّل ‎2.5×‎ عند وضع الكتاب على بعد ‎8.0 cm‎ خلف عدسة. (a) ارسم مخطّطا شعاعيًّا، وصِفْ نوعَ الصورة الذي نحصل عليه. (ب) ما نوع العدسة التي نحتاج إليها؟ (جـ) ما قدرة العدسة بـالديوبتر؟

51. (II) وُضع جسم على بعد ‎1.5 m‎ أمام عدسة قدرتها ‎8.0 D‎. ما المسافة التي يتحرّكها الصورة إذا تحرّك الجسم: (أ) ‎1.0 m‎ نحو العدسة؟ (ب) ‎1.0 m‎ بعيدًا عن العدسة؟

52. (II) على أيّ بعد من عدسة لامّة بعدها البؤريّ ‎25 cm‎ يوضع جسم للحصول على خيال حقيقيّ له طول الجسم نفسه؟

53. (II) (أ) ما بُعدُ الجسم عن عدسةٍ لامّةٍ، بعدُها البؤريُّ ‎50.0-mm‎ إذا أردنا الحصول على خيال مكبر ‎2.00×‎ وحقيقي؟ (ب) ماذا سيكون الجواب لو كان الصورة وهميّا ومكبرًا ‎2.00×‎؟

54. (II) أعدْ حلّ (المسألة 53) بعدسة بعدها البؤريّ ‎-50.0 mm‎. [مساعدة: افرض أجسامًا حقيقيّةً أو وهميّةً (مكونة من أدوات ضوئية أخرى)].

55. (II) (أ) حشرة طولها ‎2.00 cm‎ على بعد ‎1.20 m‎ من عدسة بعدها البؤري ‎135 mm‎. أين سيكون الصورة؟ ما طوله؟ ما نوعه؟ (ب) ماذا لو كانت $f = -135\ \text{mm}$؟

56. (II) جِدِ البعدَ بين الجسم والصورة المتكوّن بواسطة عدسة لامّة بعدها البؤريّ ‎75 cm‎ إذا كان الصورة حقيقيّا ومكبرًا ‎2.5×‎ قدر الجسم.

57. (II) البعد بين جسم لامع وشاشة عرض هو ‎66.0 cm‎. في أيّ موقع (أو مواقع) بين الجسم والشاشة توضع عدسة بعدها البؤريّ ‎12.5 cm‎ بحيث تنتج خيالا واضحا على الشّاشة؟ [مساعدة: ارسم مخطّطا عند البدء].

*9-23 تراكيب العدسات

*58. (II) عدستان لامّتان: البعد البؤريّ لكلٍّ منهما ‎28.0 cm‎ تفصلهما ‎16.5 cm‎. وُضع جسمٌ على بعد ‎36.0 cm‎ أمام إحداهما. أين يقع الصورة النهائي المكوّن بالعدسة الثانية؟ جِدِ التكبيرَ الكليّ؟

*59. (II) وُضِعَتْ عدسةٌ مفرقة بعدها البؤريّ $f = -31.5\ \text{cm}$ على بعد ‎14.0 cm‎ خلف عدسة لامة بعدها البؤريّ $f = 20.0\ \text{cm}$. أين سيكون خيال جسم موضوع في اللانهاية؟

*60. (II) عدسةٌ لامّةٌ بعدُها البؤريُّ ‎31.0 cm‎، وُضِعَتْ على بُعد ‎21.0 cm‎ خلف عدسة مفرقة. تسقط أشعة ضوئيّة متوازية على العدسة المفرّقة. بعد مرور الأشعّة من العدسة اللامة، تخرج متوازية مرة أخرى. احسب البعد البؤريّ للعدسة المفرّقة؟ [مساعدة: ارسم مخطّطًا شعاعيًّا عند البدء].

*61. (II) العدستان اللّامتان في (المثال 23-12) وضعتا الآن فقط على بعد ‎20.0 cm‎ بينهما. الجسم لايزال على بعد ‎60.0 cm‎ أمام العدسة الأولى كما في (الشّكل 23-41). في هذه الحالة، حدّد كلا من: (أ) موقع الصورة النهائي. (ب) التكبير الكلّيّ. وارسم المخطّطَ الشّعاعيّ لهذا النظام.

*62. (II) عدستان لامّتان وضعتا والبعد بينهما ‎30.0 cm‎. البعد البؤريّ للعدسة إلى اليمين ‎20.0 cm‎، والبعد البؤريّ للعدسة إلى اليسار ‎15.0 cm‎. وُضع جسمٌ إلى يسار العدسة ذات البعد البؤريّ ‎15.0-cm‎. فتكوّن خيال نهائيّ من العدستين، وكان مقلوبا، وفي نقطة عند منتصف المسافة بين العدستين. ما بُعد الجسم الذي إلى يسار العدسة ذات البعد البؤريّ ‎15.0-cm‎؟

*63. (II) وُضعت عدسة مفرقة بعدها البؤريّ ‎– 14 cm‎ على بعد ‎12 cm‎ إلى يمين عدسة لامة بعدها البؤريّ ‎18 cm‎. ووُضع جسم على بعد ‎33 cm‎ إلى يسار العدسة اللامة. (أ) أين سيكون الصورة النهائي؟ (ب) أين سيكون الصورة لو كانت العدسة المفرّقة على بعد ‎38 cm‎ من العدسة المجمعة؟

*64. (II) عدستان: إحداهما لامّة ‎(20.0 cm)‎ والأخرى مفرّقة ‎(– 10.0 cm)‎. وضعتا متباعدتين بـ ‎25.0 cm‎. وُضع جسمٌ على بعد ‎60.0 cm‎ أمام العدسة اللامة. حدّد كلًّا من: (أ) الموقع. (ب) التكبير للخيال النهائي الناتج. وارسم مخطّطًا شعاعيًّا لهذا النظام.

*65. (II) وُضِعَتْ عدسةٌ مفرقة بجانب عدسة لامّة بعدها البؤري f_C. كما في (الشّكل 23-42). إذا كان f_T هو البعد البؤري للمجموعة. فبيّن أنّ البعد البؤريّ للعدسة المفرّقة f_D يعطى بـ:

$$\frac{1}{f_D} = \frac{1}{f_T} - \frac{1}{f_C}$$

*10-23 معادلة صانعي العدسات

*66. (I) عدسةٌ مقعّرةُ الوجهين، نصفا قطري تكور سطحيها ‎34.2 cm‎ و ‎23.8 cm‎. ما بعدها البؤريّ إذا كانت $n = 1.52$؟

*67. (II) نصف قطر كل من سطحي عدسة محدّبة الوجهين يساوي ‎31.0 cm‎. إذا كان البعد البؤريّ ‎28.9 cm‎، فما معامل الانكسار لمادة العدسة؟

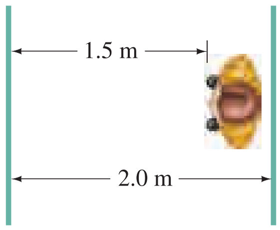
*68. (II) عدسة مستوية مقعرة ‎$(n = 1.50)$‎ بعدها البؤري ‎- 23.4 cm‎. ما نصف قطر تكور سطحها المقعر؟

*69. (II) عدسة ليوسيت مستوية – محدّبة (انظر الشّكل 23-29 ب) لها سطحٌ مستوٍ وآخر له $R = -18.4\ \text{cm}$. ما بعدها البؤريّ؟

*70. (II) لعدسة متماثلة التحدّب بُعدُ بؤريّ ‎25.0 cm‎. يُراد صنعها من زجاج معامل انكساره ‎1.52‎. ماذا سيكون نصف قطر التّكوّر لكلّ سطح؟

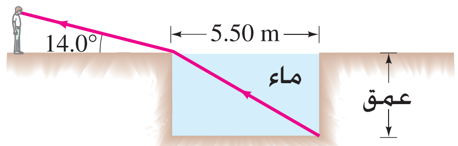
*71. (II) تعليماتٌ لعدسةٍ تصحيحيّةٍ تطلب ‎+1.50 D‎. صانع العدسة ينحتها من "خام" معامل انكساره $n = 1.56$ وسطح أمامي محدب نصف قطر تكوره ‎40.0 cm‎. ماذا سيكون نصف قطر تكوّر السّطح الثاني؟

72. مرآتان مستويتان متقابلتان، والبعد بينهما 2.0 m كما في (الشّكل 53-23). إذا وقفتَ على بُعد 1.5 m من إحداهما ونظرت إليها، فسترى أخيلة متعددة لنفسك. (أ) ما بعد أول ثلاثة أخيلة عنك؟ (ب) هل أوجه هذه الأخيلة الثلاثة الأولى نحوك أم بعيدًا عنك؟



الشّكل 53-23
(مسألة 72)

73. نريد قياس عمق بركة سباحة مملوءة بالماء. قسنا عرضها ($x = 5.50$ m) ولاحظنا أنّ حافة البركة السفلية تبدو مرئية عند زاوية $14.0°$ فوق الأفق كما هو مبين في (الشّكل 23 -54). احسب عمق البركة.

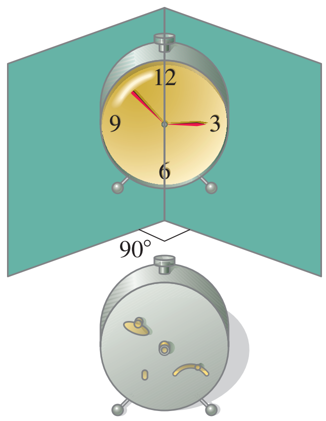


الشّكل 23-54. (مسألة 73)

74. إذا كانت الزاوية الحرجة لقطعة بلاستيك في الهواء تساوي $\theta_C = 37.3°$، فما الزاوية الحرجة للقطعة نفسها لو غُمرت في الماء.

75. (أ) المرآة المستوية يمكن اعتبارها حالة حدّيّة من المرآة الكروية. حدّد ما هذه الحالة الحدّيّة. (ب) جِدْ معادلة تربط بين بُعدي الجسم والصورة عن المرآة المستوية في هذا الحدّ. (جـ) جِدِ التكبيرَ للمرآة المستوية. عند هذه الحالة الحدّيّة. هل تتفق نتائجك في الجزأين ب. جـ مع المناقشة في (البند 23 - 2) عن المرايا المستوية؟

76. تقف مرآتان مستويتان بحيث تصنعان معًا زاوية قائمة $90°$ كما في (الشّكل 23 - 55). عندما تنظر في هذه المرآة المزدوجة، فإنّك ترى نفسك كما يراك الآخرون. بدلا من أن يكون الصورة معكوسًا كما في المرآة المتفردة. ارسم بعناية تخطيطًا شعاعيًّا لتبين كيفية حصول ذلك.

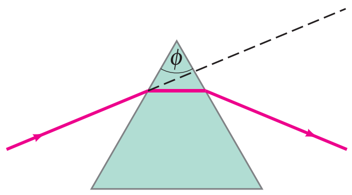


الشّكل 23-55 (مسألة 76)

77. بيّن تحليليًّا (حسابيًّا) أنّ العدسة المفرّقة لا يمكن أن تكوّن خيالا حقيقيًّا لجسمٍ حقيقيٍّ. هل يمكن أن تصف وضعًا تنتج فيه العدسة المفرّقة خيالا حقيقيّا؟

78. طُلِبَ إلى كلّ طالب في مختبر الفيزياء إيجاد مكان الجسم المضيء بحيث تنتج مرآة مقعرة نصف قطر تكورها $r = 40$ cm خيالا مكبّرًا ثلاث مرّات. أنجز طالبان المهمّة في وقتين مختلفين واستعملا أدوات متماثلة. ولكن عندما قارنّا ملاحظاتهما لاحقًا، اكتشفا أنّ إجابتيهما لبعد الجسم غير متشابهتين. فسّر سبب عدم حاجتهما إلى إعادة التجربة، وبرّر استجابتك بعمليّة حسابيّة.

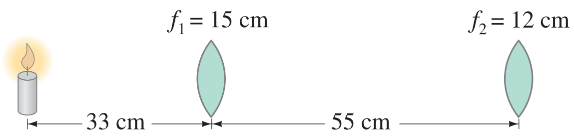
79. إذا كانت زاوية رأس منشور $\phi = 72°$ (انظر الشّكل 23-56). فما أقلّ زاوية سقوط لشعاع إذا كان على الشّعاع الخروج من الوجه المقابل (لا ينعكس انعكاسًا داخليًّا كليًّا). علمًا أنّ $n = 1.50$؟



الشّكل 23-56 (المسألة 79)

80. وجها النهايتين لقضيب زجاجيّ أسطوانيّ عموديّان على الجوانب ($n = 1.54$). بين أنّ شعاعًا يدخل عند أيّ من النهايتين. وبأيّ زاوية سوف ينعكس انعكاسًا داخليًّا كليًّا على الجوانب. افرض أنّ القضيب في الهواء. ماذا يحصل لو كان القضيب في الماء؟

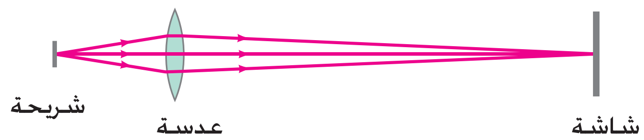
***81.** وُضِعَتْ شمعةٌ مضيئةٌ على بعد 33 cm من عدسةٍ لامّة بعدها البؤري $f_1 = 15$ cm، والتي بدورها تبعد 55 cm أمام عدسة أخرى لامّة بعدها البؤريّ $f_2 = 12$ cm. (انظر الشّكل 23-57). (أ) ارسم مخطّطًا شعاعيًّا، وخمّن الموقع والطول النسبيّ للخيال النهائيّ. (ب) احسب الموقع والطول النسبيّ النهائيّ لهذه الصورة.



الشّكل 23-57 (المسألة 81)

82. وُضعَ جسمٌ مضيء على أحد جانبي عدسة لامّة بعدها البؤري f وشاشة بيضاء لمشاهدة الصورة على الجانب الآخر. ظلّت المسافةُ $d_T = d_i + d_o$ بين الجسم والشاشة ثابتةً، ولكن العدسة يمكن تحريكها. (أ) بين أنه إذا كانت $d_T > 4f$، فسيكون هناك مكانان يمكن وضع العدسة فيهما مع إنتاج خيال واضح على الشاشة. (ب) إذا كانت $d_T < 4f$، فبيّن أنّه لايوجد أيّ مكان يمكن وضع العدسة فيه بحيث تكوّن خيالًا واضحًا. (جـ) جدْ علاقة للبعد بين موقعي العدسة. في البند (أ)، والنسبة بين طولي الصورتين.

83. في جهاز عرض سينمائيّ يعمل الفيلم كجسمٍ يتكوّن خياله على شاشة (الشّكل 23-58). إذا استعملت عدسة بعدها البؤريّ 105 mm لتسقط خيالًا على شاشة تبعد 8.0 m، فعلى أيّ بعد من العدسة يجب أن تكون الشريحة؟ إذا كان عرض الشريحة 36 mm، فما عرض الصورة على الشاشة؟



الشّكل 23-58. (مسألة 83)

84. شريحة 35 mm (أبعاد الصورة عادة 36×24 mm) يراد إسقاطها على شاشة أبعادها 2.70×1.80 m. موضوعة على بعد 7.50 m من جهاز العرض. ما البعد البؤريّ للعدسة المستعملة إذا كان على الصورة تغطية الشاشة؟

85. بيّن بالتحليل أنّ الصورة المتكوّن بعدسة لامّة يكون حقيقيًّا ومقلوبًا إذا كان الجسم أبعد من البؤرة $(d_o > f)$ ويكون وهميًّا ومعتدلًا إذا كان الجسم أقرب من البؤرة $(d_o < f)$. صِفِ الصورةَ إذا كان الجسم هو نفسه خيالًا ناجًا من عدسة أخرى بحيث إنّ موقعه خارج العدسة: أي $0 < -d_o < f$ و $-d_o > f$.

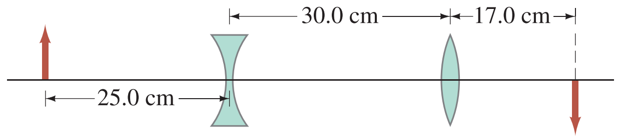
86. ضبطت نجمة سينمائية مصورًا يلتقط لها صورًا في البيت. ادعت أنّ المصور كان ينتهك حرمة بيتها. ولاثبات حجتها؛ قدمت الفيلم الذي وضعت يدها عليه كدليل. كان طولها البالغ 8.25 mm (1.75 m) على الفيلم، والبعد البؤريّ لعدسة الكاميرا 210 mm. فعلى أيّ بعد منها كان المصور واقفًا؟

87. ما طول خيال الشّمس على فيلم كاميرا بـ: (أ) عدسة بعدها البؤريّ 28 mm؟ (ب) عدسة بعدها البؤريّ 50 mm؟ (جـ) عدسة بعدها البؤري 135 mm؟ (د) إذا اعتبرت العدسة 50 mm طبيعية لهذه الكاميرا، فما التكبير النسبيّ لكلّ من العدستين الأخريين؟ قطر الشّمس 1.4×10^6 km وبعدها 1.5×10^8 km.

88. (أ) جسم على بعد 34.5 cm أمام عدسة معينة. تكوّن له خيال أمام العدسة على بعد 8.20 cm (على جانب الجسم نفسه). ما نوع هذه العدسة؟ ما بعدها البؤريّ؟ هل الصورة حقيقيّ أم وهميّ؟ (ب) إذا كان موقع الصورة على بعد 41.5 cm أمام العدسة، فما نوع العدسة عندها؟ وما هو بعدها البؤريّ؟

89. عند وضع جسم على بعد 60.0 cm من عدسة لامّة، كوّنتْ له خيالًا حقيقيًّا. وعند تحريك الجسم 40.0 cm من العدسة، تحرّك الصورة 10.0 cm أبعد عن العدسة. احسب البعد البؤريّ للعدسة.

90. جسمٌ صغيرٌ على بعد 25.0 cm من عدسة مفرقة كما هو مبين في (الشّكل 23-59). وُضعت عدسة لامّة بعدها البؤريّ 12.0 cm على بعد 30.0 cm إلى يمين العدسة المفرّقة. كوّن هذا النظام من العدستين خيالًا حقيقيًّا مقلوبًا على بعد 17.0 cm إلى يمين العدسة اللامّة. ما البعد البؤريّ للعدسة المفرّقة؟



الشّكل 23-59 (مسألة 90)

91. وُضع جسم على بعد 15 cm من مرآة معيّنة. كان الصورة نصف طول الجسم، مقلوبا وحقيقيا. ما بعد الصورة عن المرآة؟ وما نصف قطر تكوّرها؟

92. (أ) بيّن أنه يمكن كتابة معادلة العدسات بصيغة نيوتن
$$xx' = f^2$$
حيث x بعد الجسم عن البؤرة في الجهة الأمامية للعدسة، وx' هو بعد الصورة عن البؤرة من الجانب الآخر للعدسة. احسب موقع الصورة إذا وُضع الجسم على بعد 45.0 cm أمام عدسة محدبة بعدها البؤريّ $f = 32.0$ cm باستعمال (ب) الشّكل العادي لمعادلة العدسات (جـ) الصيغة النيوتونية المذكورة آنفًا.

93.* وُضعتْ عدسة لامّة بعدها البؤريّ 10.0 cm ملامسة لعدسة مفرقة بعدها البؤريّ -20.0 cm. ما البعد البؤريّ للمجموعة؟ هل هذه المجموعة لامّة أم مفرقة؟

94.* (أ) بيّن أنه إذا وضعت عدستان رقيقتان، بعداهما البؤريان f_1، f_2 متلاصقتين، فإنّ البُعدَ البؤريّ للمجموعة يعطى بالعلاقة $f_T = f_1 f_2/(f_1 + f_2)$ (ب) أثبت أنّ القدرة P للمجموعة من العدستين هي مجموع قدرتيهما P_1، P_2 أي $P = P_1 + P_2$.

إجابات التمارين

أ: لا

ب: نعم، لمرآة مستوية $r = \infty$ لذلك $f = \infty$، وعندما (المعادلة 23-2) تعطي $1/d_o + 1/d_i = 0$ أو $d_i = -d_o$

ج: مقتربًا منه.

د: لا يوجد

هـ: 1.414

و: ليس هناك انعكاسٌ داخليٌّ كلّيٌّ $\theta_C > 45°$

ز: أقرب إليها

ر: (أ) خياليّ. (ب) خياليّ.

ي: -97.5 cm (أي على بعد 97.5 cm أمام العدسة)