

البصريات الهندسية *Geometrical Optics*

بعد أن يكمل القارئ هذا الفصل، ويستوعب المفاهيم والأفكار والمبادئ التي وردت خلاله، من المتوقع أن يكون قادراً على:

- أن يعرف ما هو المقصود بالبصريات الهندسية.
- أن يقرر بأن للضوء طبيعة موجية وأخرى كمية.
- أن يفسر عمليتي الانعكاس والانكسار من السطوح المستوية.
- أن يفسر المعنى الصحيح لقانون العالم سنل.
- أن يعرف العلاقة العلمية بين زاوية بربوستر وصناعة النظارات الشمسية.
- أن يخبر الفرق بين مختلف أنواع المرايا.
- أن يصف العدسات الرقيقة من خلال تحديد العلاقة بين ثوابتها.
- أن يعرف المعنى الصحيح لقوة العدسة، ويتعرف على مقياس قوة العدسة.
- أن يشتق المعادلة الرياضية المعروفة باسم معادلة صانعي العدسات.

البصريات الهندسية

Geometrical Optics

14-1 المقدمة Introduction :

قبل البدء بإعطاء فكرة محددة وتعريف مبسط عن البصريات الهندسية، لابد من التأكيد على أن كل الخصائص المعروفة للضوء قد تم تحديدها بدلالة تجارب مخبرية سمت بها إلى مرحلة اليقين، مثل انتشار الضوء بخطوط مستقيمة وانعكاسه عن السطوح الناعمة الصقيلة، وانكساره عند السطوح الفاصلة بين وسطين مختلفين كالهواء والزجاج، تداخل الضوء، قياس سرعة الضوء، تحليل الضوء باستخدام المنشور الزجاجي، استقطاب الضوء، إلى ما هنالك من حقائق أخرى.

كما لابد من التأكيد أيضاً أن الضوء هو سبيل من الجسيمات تتبع من المصادر الضوئية وتسير بعد انبعاثها بخطوط مستقيمة.

وتقتضي الضرورة هنا وجوب بيان مسألتين على درجة كبيرة من الأهمية، تتعلق بالإجابة عن السؤال الجوهري هنا وهو: هل يمتلك الضوء طبيعة موجية أم طبيعة كمية؟

وحقيقة الأمر أن للضوء طبيعة موجية وأخرى كمية تظهر كل منهما أثناء التجارب العملية، أي أن الضوء يمتلك هاتين الطبيعتين معاً، وسنبين ما هو المقصود بكل منهما:

1- النظرية الضوئية *light wave theory*: لقد فسرت هذه النظرية كثيراً من الظواهر الهامة كالحييد *diffraction* والتداخل *interference*، وفي مثل هذه الظروف يظهر الضوء على شكل موجات *light waves*.

2- النظرية الكمية *light quantum theory*: لقد فسرت هذه النظرية كثيراً من الظواهر ذات الأهمية التي لا تقل أهمية عن الظواهر التي فسرتها النظرية الضوئية، مثل انبعاث الضوء من الذرات *photoemission*، والظاهرة الكهروضوئية *photoelectric* والتي يتم فيها انبعاث الإلكترونات من سطح موصل عندما تسقط عليه أشعة ضوئية، على أساس أن الضوء ينبعث من المصدر على شكل دفعات من الطاقة سميت بالكم *quanta* أو الفوتونات *photons*.

ولعل التناقض بين النظريتين واضح تماماً، ولكنهما ضروريتان في الوقت ذاته لوصف الضوء وصفاً كاملاً وصحيحاً.

بعد هذا الإيضاح سنقدم مفهوماً مبسطاً عن البصريات الهندسية، إن الطول الموجي للصوت هو أكبر بكثير من الطول الموجي للضوء، ولعل استماعك للصوت القادم من المذياع مثلاً لا يشترط

رؤيتك له، بل تستطيع سماع الصوت حتى لو كان هناك حاجز بينك وبينه، إلا أن عينك لا بد أن تقع عليه كي تتمكن من رؤيته. فالطول الموجي للصوت من رتبة ($\lambda = 1 \text{ meter}$) بينما الطول الموجي للضوء المرئي هو ($5 \times 10^{-7} \text{ nm}$).

إن الأسطح الصقيلة الناعمة كالمرايا والعدسات تمتلك مساحات بطبيعتها الهندسية أكبر بكثير من أبعاد الطول الموجي، ولهذا يمكننا أن نصف انتشار الضوء بدلالة الخطوط المستقيمة. إن هذه العملية وما يرافقها من قوانين مطلوبة لضبطها، هو ما نطلق عليه بالبصريات الهندسية، *geometrical optics*.

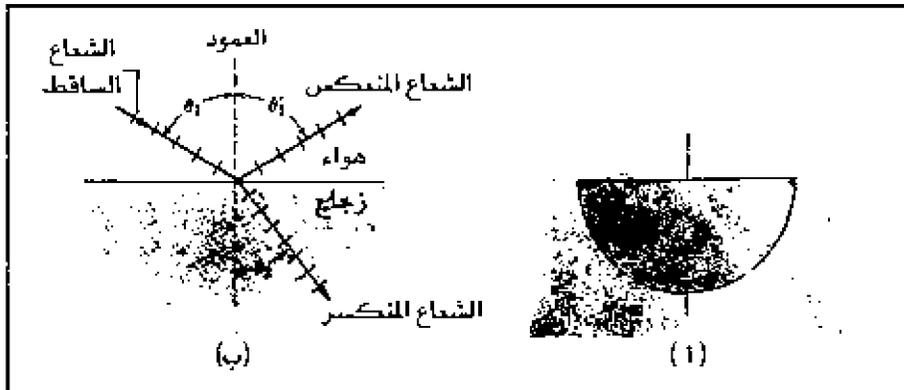
14-2 الانعكاس والانكسار من السطح المستوي *Reflection and Refraction from a plane*

Surfaces:

قبل أن نتناول هاتين المسألتين الهامتين في علم البصريات الهندسية، سنعمد إلى تصنيف المواد من حيث نفاذيتها للأشعة الضوئية.

إن الصنف الأول هو الذي يشتمل على مجموعة المواد التي تصنع منها الأجسام المعتمة وهي التي لا ينفذ الشعاع الضوئي خلالها، كقطعة من الحديد أو الخشب. أما الصنف الثاني فيشتمل على مجموعة المواد التي تصنع منها الأجسام نصف الشفافة *semitransparent* وهي التي ينفذ الضوء خلالها جزئياً بنسبة أو أخرى، وأخيراً المواد التي تصنع منها الأجسام الشفافة *transparent* وهي التي ينفذ معظم الشعاع الضوئي خلالها، مثل الزجاج العادي *glass* والهواء. وسوف نعتمد مفهوم الشعاع الضوئي *light ray*، وهو خط هندسي وهمي يعتبر عملياً أضيق حزمة ضوئية يمكن الحصول عليها في دراستنا هذه.

ولدراسة كل من ظاهرتي الانعكاس والانكسار، بدايةً تأمل الشكل (14-1).



الشكل (14-1) أ، ب

يبين الشعاع المنعكس والشعاع المنكسر عن الشعاع الساقط على السطح الزجاجي المستوي

نرى بوضوح في الشكل (14-1 أ، ب) حزمة ضوئية ساقطة من الوسط الأول وهو الهواء، على سطح ثانٍ (الوسط الثاني) وهو الزجاج، وهو كما يظهر على الشكل ذو سطح مستوي.

إنَّ جزءاً من الحزمة الضوئية الساقطة *incident ray* سوف ينعكس *reflected* بواسطة السطح الزجاجي وهو ما نسميه الحزمة المنعكسة *reflected ray* بالاتجاه البعيد عن السطح الزجاجي، أما الجزء المتبقي من الحزمة الضوئية فسينكسر *refracted* أيضاً عند السطح الزجاجي ولكن مخترباً إياه *refracted ray*، ما لم يكن الشعاع الساقط عمودياً فإن الشعاع سوف يغير اتجاهه كلياً وينعكس مبتعداً عن السطح الزجاجي منطبقاً على اتجاه سقوطه الأصلي ويقال عن الشعاع في هذه الحالة شعاعاً منثنياً *bent ray*.

وقبيل أن نقدم الصيغة الرياضية لقانوني الانعكاس والانكسار، لعله من المناسب أن نعرّف بإيجاز أوليات تلك القوانين والمفاهيم الفيزيائية البصرية الواردة فيهما.

14-2-1 زاوية السقوط *Angle of Incidence*:

وهي الزاوية المحصورة بين الشعاع الساقط والعمود المقام على السطح *the normal* عند نقطة تلاقيهما على سطح العاكس، انظر الشكل (14-1 ب) حيث تمثل الزاوية (θ_i) زاوية السقوط.

14-2-2 زاوية الانعكاس *Angle of Reflection*:

وهي الزاوية المحصورة بين الشعاع المنعكس والعمود المقام على السطح عند نقطة تلاقيهما على سطح العاكس، انظر الشكل (14-1 ب) حيث تمثل الزاوية (θ_r) زاوية الانعكاس.

14-2-3 زاوية الانكسار *Angle of Refraction*:

وهي الزاوية المحصورة بين الشعاع المنكسر وامتداد العمود المقام على السطح داخل جسم السطح العاكس حيث تحدث ظاهرة الانكسار، انظر الشكل (14-1 ب) حيث تمثل الزاوية (θ_t) زاوية الانكسار.

14-2-4 مستوى السقوط *Plane of Incidence*:

هو المستوى الذي يحتوي على كلٍ من الشعاع الساقط والعمود المقام على السطح، وهو عبارة عن مستوى الصفحة في الشكل (14-1).

ومن الجدير بالذكر هنا أن الشعاع الساقط والشعاع المنكسر والعمود المقام على السطح تقع جميعها في مستوى واحد عمودي على السطح العاكس، وهو ما يصنّفه بعض المدارس على أنه قانون الانعكاس الأول، وهذا ما سوف لن نفعله في هذا الكتاب.

14-2-5 قانون الانعكاس *Law of Reflection* :

كل من الشعاع الساقط والشعاع المنكسر يقعان في مستوٍ واحد ويصنعان زاويتين متساويتين مع العمود المقام على السطح.

$$\theta_i = \theta_r \quad (14-1)$$

14-2-6 قانون الانكسار *Law of Refraction* :

كل من الشعاع الساقط والشعاع المنكسر يقعان في مستوٍ واحد ويصنعان زاويتين مختلفتين (θ_i) ، (θ_r) ترتبطان بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$n_1 \sin(\theta_i) = n_2 \sin(\theta_r) \quad (14-2)$$

حيث إن (n) تمثل ثابت معامل الانكسار للوسط الأول، *the index of refraction*، وهو عديم الوحدة لأنه عبارة عن النسبة بين سرعة الضوء في الفراغ وسرعة الضوء في الوسط، ويعرف بصفة عامة على النحو الآتي:

$$n = \frac{\text{سرعة الضوء في الفراغ (m/s)}}{\text{سرعة الضوء في الوسط (m/s)}}$$

ويمكن التعبير عن ذلك بالعلاقة:

$$n = \frac{c}{v} \quad (14-3)$$

حيث إن (c) هي سرعة الضوء في الفراغ وتساوي $(3 \times 10^8 \text{ m/s})$ ، وتكون سرعة الضوء ثابتة تقريباً في الفراغ على اختلاف أطوال موجاته، بينما تختلف سرعة الضوء في الأوساط الشفافة الأخرى كالزجاج أو الماء. ويمكن اعتبار سرعة الضوء في الفراغ مساوية لسرعته في الهواء، وذلك لأن الفرق بينهما ضئيل جداً. وسرعة الضوء في الفراغ كما رأينا كبيرة جداً، والبعض بحث لديه إشكال بين سرعة الضوء *speed of light* وسرعة الصوت *speed of sound*، إلا أن الفرق بينهما هائل للغاية ذلك أن سرعة الصوت في الهواء عند درجة الصفر المئوي تساوي (331 m/s) والدليل لطبيعي على ذلك هو أننا نرى البرق قبل سماع صوت الرعد على الرغم من أنهما يحدثان في ذات اللحظة، ولكل من العلماء غاليليو *Galileo* ورومر *Rohmer* ومايكلسون *Michelson* محاولاتهم المثمرة في تحديد هذا الثابت الطبيعي الهام (سرعة الضوء)، إلا أن الطريقة الفضائية هي الطريقة التي أعطت أفضل النتائج، وتتلخص هذه الطريقة بمرآة تم تثبيتها على سطح القمر بواسطة رواد الفضاء، تتكون هذه المرآة من مجموعة من الأسطح العاكسة للأشعة، ثم بعد ذلك إرسال أشعة ليزر *laser beam* ذات طول موجي قصير *short wave length* من على سطح الأرض باتجاه تلك المرآة والتي تقوم

بدورها يعكسه إلى الأرض. وبحساب الزمن الذي يستغرقه الشعاع من لحظة مفارته للمصدر الضوئي لحين أول وصوله إلى الأرض مرة أخرى منعكساً من على سطح القمر، يتم حساب سرعته من القانون العام والمعروف:

$$c = \frac{s}{t} \quad (14-4)$$

حيث إن (s) تساوي المسافة التي قطعها الضوء، وهي ضعف المسافة بين الأرض والقمر. أي أن $(s = 2d)$ حيث (d) هي المسافة بين الأرض والقمر، وعلى سبيل المثال عند استخدام أشعة ليزر لهذا الغرض، استغرقت زمناً قدره $(t = 2.56 \text{ s})$ ، فما هي سرعة الضوء؟

$$\begin{aligned} c &= \frac{s}{t} = \frac{2d}{t} \\ &= \frac{2 \times 3.84 \times 10^8 \text{ m}}{2.56 \text{ s}} \\ &= 3 \times 10^8 \text{ m/s} \end{aligned}$$

ويختلف معامل الانكسار من وسط لآخر، وذلك لأن المعادلة سابقة الذكر (14-3) سوف يتغير مقدار المقام فيها كلما تغير الوسط، والجدول (14-1) يعطي مقادير عددية لبعض معاملات الانكسار.

ومن الجدير بالذكر هنا أن المعادلة (14-2) التي تعبر عن قانون الانكسار تحمل اسم العالم سنل *Snell's Law*.

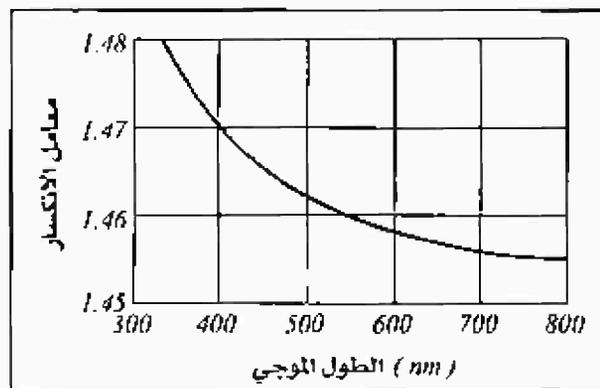
إن معامل الانكسار يعتمد على الطول الموجي للضوء المستخدم داخل الوسط، باستثناء الفراغ، حيث يعتبر ثابتاً في هذه الحالة، ولتوضيح ذلك انظر الشكل (14-2).

معامل الانكسار <i>Index</i>	الوسط <i>Medium</i>	معامل الانكسار <i>Index</i>	الوسط <i>Medium</i>
1.52	زجاج نقي	<i>exactly 1</i>	الفراغ
1.54	كلوريد الصوديوم	1.00029	الهواء (<i>stp</i>)
1.55	بولسترين	1.33	الماء (20°C)
1.63	ثاني كبريت الكبرون	13.6	الأسيتون
1.65	زجاج صواني جيد	1.36	الكحول الإيثيلي

معامل الانكسار <i>Index</i>	الوسط <i>Medium</i>	معامل الانكسار <i>Index</i>	الوسط <i>Medium</i>
1.77	ياقوت أزرق	1.38	محلول السكر (7.30%)
1.89	زجاج صواني عالي الجودة	1.46	الماء المصفى
2.42	الألماس	1.49	محلول السكر (7.80%)

الجدول (14-1)

هذه المقادير لمعامل الانكسار جرى حسابها باستخدام ضوء الصوديوم الأصفر عند الطول الموجي (589 nm)

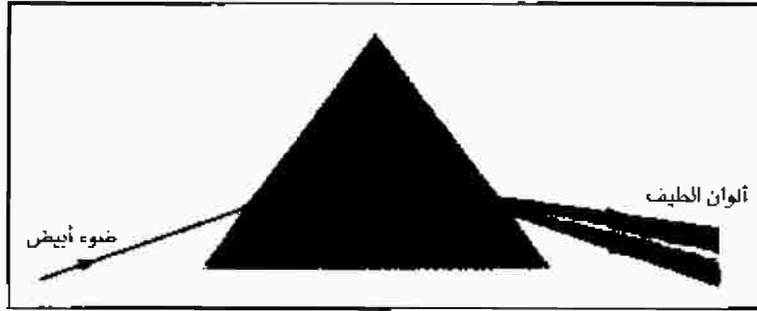


الشكل (14-2)

يبين كيف يكون معامل الانكسار تابعاً للطول الموجي

من خلال الشكل (14-2) نجد أن مقدار معامل الانكسار يتغير بتغير الطول الموجي. فهو ذو مقادير كبيرة عند الأطوال الموجية القصيرة، بينما يقل مقداره عند الأطوال الموجية الكبيرة، والشكل يبيّن كيف يتغير معامل الانكسار لمادة المايكا *quartz*.

ولابد من التأكيد على أن الشعاع الضوئي المستخدم في الشكل (14-2) أحادي الطول الموجي *monochromatic*، وذلك لأن معامل الانكسار يعتمد على الطول الموجي للأشعة الضوئية، وهذا ما يؤكد على أن الضوء المركب من عدة أطوال موجية *chromatic* يمتلك أكثر من سرعة واحدة داخل وسط ما، أي أنّ الضوء في هذه الحالة سوف ينكسر بزوايا متعددة تساوي عدد الأطوال الموجية التي تكوّن الموجة الساقطة. وهذا ما يسمى التشتت اللوني *chromatic dispersion*، ذلك أن لكل لون طول موجي مميّز خاص به، وهذا تماماً ما يحدث عند سقوط الضوء الأبيض على وجه المتشور الزجاجي *prism*، انظر الشكل (14-3).

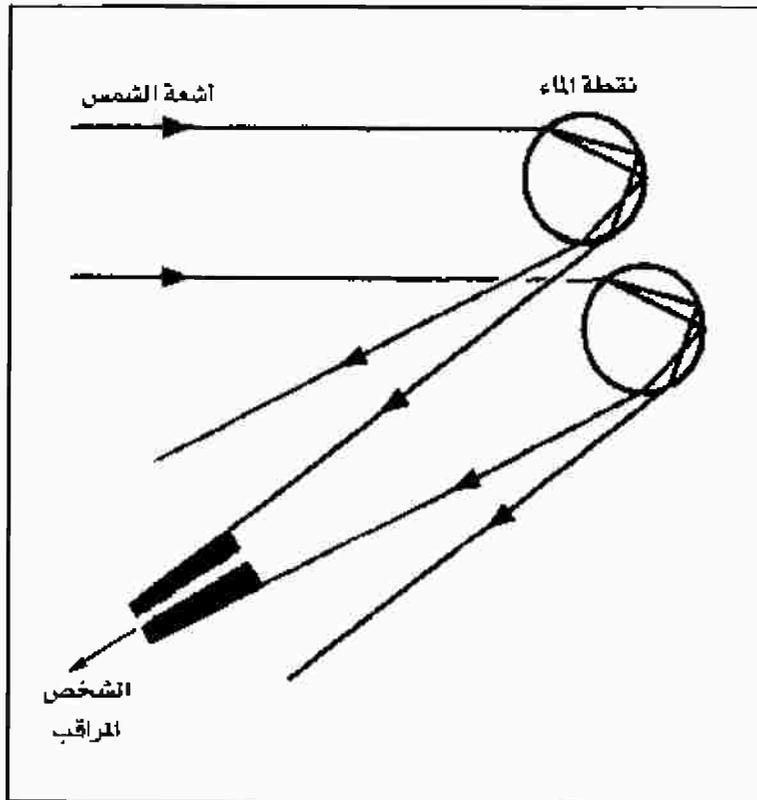


الشكل (14-3)

يبين كيف يتحلل الضوء الأبيض إلى مكوناته من الألوان الستة عندما ينكسر في المرة الأولى،
ثم يزداد التحلل عندما تنكسر الألوان الستة مبعثرة عن الوجه الآخر.

كما أن هذه الظاهرة يمكن رؤيتها عندما تشرق الشمس في يوم ماطر، وتسمى قوس قزح
rainbow، وذلك عند انكسار الأشعة الشمسية داخل وخارج عن قطرات ماء المطر، انظر الشكل

(14-4).



الشكل (14-4)

يبين ظاهرة قوس قزح

إن ظاهرة انتشار الضوء هذه والمسماة قوس قزح تحدث انقساماً لونياً، حيث ترى اللون الأحمر في الأعلى واللون الأزرق في الأسفل بينهما باقي الألوان، كل حسب طوله الموجي، ولو تأملت نقطة مقابلة تماماً للشمس تجد أن الأشعة المنتشرة تضع زاوية مقدارها (42°) مع هذه النقطة.

مثال (14-1): Example

سقطت حزمة ضوئية على مستوٍ صقيل لوجه المايكا حيث كانت تصنع زاوية مقدارها (31.25°) مع العمود المقام على سطح المستوي، فإذا علمت أن هذه الحزمة تتكون من طولين موجيين، الأول (404.7nm) ومعامل انكساره في المايكا يساوي (1.4697) والثاني (508.6nm) ومعامل انكساره في المايكا يساوي (1.4619) .

أوجد حسابياً مقدار الزاوية بين الشعاعين المتكسرين، إذا علمت أن معامل الانكسار للهواء يساوي (1.0003) .

الحل Solution:

باستخدام قانون الانكسار:

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

(n_1) : معامل الانكسار للهواء.

(n_2) : معامل الانكسار للمايكا.

من الواضح أن لكل من الموجتين معامل انكسار مختلف عن الآخر، إذن لا بد من إيجاد زاوية الانكسار لكل منهما، ومن ثم إيجاد الفرق بين الزاويتين:

الطول الأول:

$$1.0003 \sin(31.25^\circ) = 1.4697 \sin(\theta_{21})$$

$$\theta_{21} = \sin^{-1} \left[\left(\frac{1.0003}{1.4697} \right) \sin 31.25 \right]$$

$$= 20.676$$

الطول الثاني:

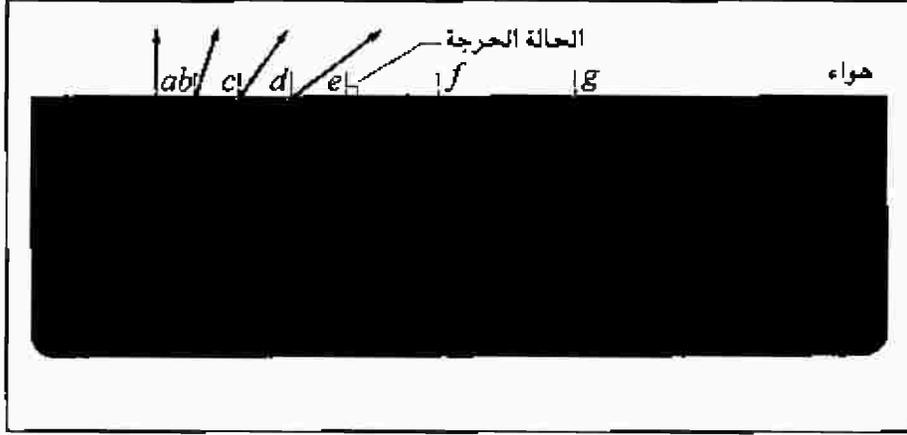
$$1.0003 \sin(31.25^\circ) = 1.4697 \sin(\theta_{22})$$

$$\theta_{22} = \sin^{-1} \left[\left(\frac{1.0003}{1.4697} \right) \sin 31.25 \right]$$

$$\theta_{22} = 20.791^\circ$$

$$\Delta\theta = \theta_{22} - \theta_{21} = 20.791^\circ - 20.676^\circ = 0.115^\circ$$

14-3 الانعكاس الكلي الداخلي Total Internal Reflection :



الشكل (14-5)

يبين الانعكاس الكلي الداخلي للأشعة الضوئية المنبعثة من المصدر (s)

يهدف التوصل إلى استيعاب مفهوم الانعكاس الكلي تأمل بدقة ملاحظتك الشكل (14-5)، ستجد أن مجموعة من الإشعاعات الضوئية light rays منبعثة من المصدر الضوئي source (s) داخل الزجاج حيث تصل جميعها السطح الفاصل بين حدود المادة الزجاجية والهواء.

من الواضح أن الشعاع (a) واتساقط عمودياً على السطح الفاصل سوف ينعكس جزء بسيط منه إلى داخل الزجاج أما الباقي فسوف يتابع سيره دون أي تغيير في الاتجاه.

أما لأشعة الضوئية (e, d, c, b) التي لها زوايا سقوط أكبر من زاوية سقوط الشعاع (a)، فمن الواضح أن جزءاً منها سوف ينعكس إلى الداخل والجزء الآخر سوف يتكسر إلى الخارج، وتزداد نسبة الكمية المنعكسة كلما زادت زاوية السقوط، وبتعبير آخر: كلما زادت زاوية السقوط تزداد زاوية الانكسار حتى تصل إلى المقدار ($\theta_c = 90^\circ$) عند الشعاع الساقط (e)، والتي تشير إلى أن الشعاع المنكسر منطبق تماماً على السطح الفاصل بين الوسطين الزجاج والهواء. وزاوية السقوط في هذه الحالة تسمى زاوية السقوط الحرجة critical angle والتي يرمز لها (θ_c)، انظر الشكل (14-5)، بحيث إذا زادت زاوية الشعاع الساقط عن (θ_c) فإن الأشعة الساقطة تنعكس بكاملها دون أن ينكسر عنها شيء وهذه الظاهرة هي ظاهرة الانعكاس الكلي الداخلي total internal reflection، ويمكن حساب مقدار الزاوية (θ_c) بتطبيق قانون الانكسار وذلك على النحو الآتي:

$$\theta_c = 90^\circ \Rightarrow \sin 90^\circ = 1$$

$$\therefore \theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} \tag{14-5}$$

وبملاحظة المعادلة (14-5)، وحيث إن أكبر مقدار لجيب الزاوية هو الواحد، نجد أن معامل الانكسار (n_2) لا يمكن أن تكون أكبر من معامل الانكسار (n_1)، وهذا يجعلنا نستنتج أن هذه الظاهرة، ظاهرة الانعكاس الكلي لا تحدث إلا إذا كان المصدر الضوئي يقع في الوسط ذي معامل الانكسار الأعلى.

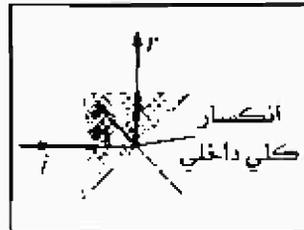
ومن التطبيقات المفيدة للانعكاس الكلي الداخلي، استخدام حزمتين من الألياف البصرية *optical fibers* وإدخالها من قم المريض إلى معدته لفرض التأكد من وجود القرحة المعدية *ulcer* حيث يتم إدخال الضوء عن طريق إحدى الحزمتين للألياف البصرية، وبوجود ظاهرة الانعكاس الكلي مهما تحديت أو تقعرت الألياف فإنها سوف تنقل الضوء إلى داخل المعدة، ثم تقوم الحزمة الناقية بنقل الصورة من المعدة حيث يتم رصدها وتحويلها إلى صورة مكبرة باستخدام شاشة خاصة يراها الطبيب بوضوح كامل.

إن السراب الصحراوي *mirage* هو الآخر ظاهرة طبيعية تُفسر على أساس الانعكاس الداخلي الكلي وذلك لارتفاع مقدار معامل انكسار الوسط الذي تسري خلاله الأشعة الشمسية في المناطق البعيدة عن الرؤيا، بسبب ارتفاع درجات الحرارة صيفاً.

مثال (14-2): Example

في الشكل (14-6) منشور زجاجي على شكل مثلث في الهواء، حيث يسقط الشعاع (i) عمودياً على الوجه الموضوح في الشكل، ثم ينعكس كلياً عند الوسط الفاصل (زجاج - هواء) (*glass - air interface*)، فإذا كان مقدار الزاوية ($\theta_c = 45^\circ$).

أوجد حسابياً مقدار معامل الانعكاس للزجاج.



الشكل (14-6)، المثال (14-2)

الحل Solution:

لسهولة الحل افترض أن معامل انكسار الهواء يساوي واحداً:

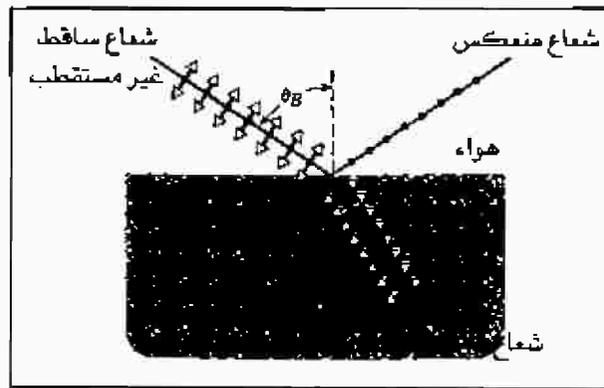
$$\therefore \theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} = \sin^{-1} \frac{1}{n}$$

ويعني أن الانعكاس الداخلي الكامل هو الظاهرة الضوئية هنا، لذا فإن الزاوية الحرجة سوف تكون أقل من زاوية السقوط (θ_c).

$$\begin{aligned} \therefore \sin^{-1} \frac{1}{n} &< 45^\circ \\ \frac{1}{n} &< \sin 45^\circ \\ n &> \frac{1}{\sin 45^\circ} = \frac{1}{0.707} = 1.4 \\ n &> 1.4 \end{aligned}$$

وهكذا فإن معامل الانكسار للزجاج المستعمل يجب أن يكون أكبر من (1.4) حتى نحصل على ظاهرة الانعكاس الكلي الداخلي.

14-4 استقطاب الضوء بواسطة الانعكاس : Polarization of Light by Reflection



الشكل (14-7)

يبين استقطاب الضوء بواسطة الانعكاس

تأمل بدقة الشكل (14-7)، إن الشعاع الساقط عبارة عن شعاع ضوئي غير مُستقطب، إن متجهات المجال الكهربائي في الحزمة الضوئية يمكن تحليلها إلى مركبات عمودية على مستوى سقوط الحزمة ومركبات موازية لهذا المستوى (أي واقعة فيه) *electric field vectors*، الموازية والتي تمثلها القطع الصغيرة برأسي سهمين نحو اليمين واليسار والعمودية والتي تمثلها النقاط المستديرة. إذن هذه الأشعة الساقطة وبزاوية مقدارها (θ_B) وكما هو واضح في الشكل (14-7)، وتسمى زاوية بريوستر *Brewster angle*، وذلك نسبة للعالم بريوستر *Brewster*، وهي الزاوية التي إذا سقط بها شعاع ضوئي على سطح عازل *dielectric* فإن المركبة الاتجاهية الموازية للمجال الكهربائي للأشعة المنعكسة تساوي صفراً. وهذا يعني بالضرورة أن الشعاع المنعكس من على سطح هذه المادة في هذه الحالة يكون مُستقطباً بالكلية، حيث يكون مستوى تذبذبه عمودياً على مستوى الأشعة الساقطة، كما نلاحظ أن الشعاع المنعكس أيضاً يصنع الزاوية نفسها مع العمود المقام على سطح

المادة المستخدمة، بينما ينكسر الشعاع داخل المادة بزاوية انكسار مقدارها (θ_1) . إن كلاً من الشعاعين المنعكس والمنكسر يصنعان زاوية مقدارها (90°) فيما بينهما، أي أنهما عموديان على بعضهما البعض، وبملاحظة الشكل (14-7) نجد أن:

$$\theta_2 - \theta_1 = 90^\circ \quad (14-6)$$

ويتطبيق قانون الانكسار على هذه الحالة نجد أن:

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

ولكن المعادلة (14-6) تفيد أن:

$$\theta_2 = 90^\circ - \theta_1$$

$$\therefore n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin (90^\circ - \theta_1)$$

ومن المعلوم أن:

$$\sin(90^\circ - \theta_1) = \cos \theta_1$$

$$\therefore n_1 \sin \theta_1 = n_2 \cos \theta_1$$

$$\tan(\theta_1) = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad (14-7)$$

والمعادلة الرياضية (14-7) تستخدم لحساب زاوية بريوستر، وإذا كان الوسط الذي تمر خلاله الأشعة الضوئية الساقطة هو الهواء فإن المعادلة (14-7) تزول إلى الشكل الآتي:

$$\theta_1 = \tan^{-1} n \quad (14-8)$$

حيث إن (n) معامل انكسار الوسط وتساوي (n_2) ، أما (n_1) فتساوي الواحد والزاوية (θ_1) ، وهي الزاوية التي تصنع على أساسها عدسات النظارات الشمسية، والتي تؤدي إلى انكسار الأشعة الضوئية الساقطة على العين وتقيها من المركبة الأفقية، وبغية الحصول على ذلك يتم تثبيت العدسات في النظارات الشمسية بحيث يكون محور استقطابها عمودياً.

مثال (14-3): Example

استخدمت قطعة من الزجاج مقدار معامل انكسارها يساوي $(n=1.57)$ ، وذلك لاستقطاب الضوء في الهواء.

- ١- أوجد حسابياً مقدار زاوية الاستقطاب الكامل للضوء المنكسر.
- ٢- ما هو مقدار زاوية الانعكاس المقابلة لذلك؟ أوجد مقدارها حسابياً.

الحل Solution:

-1

$$\theta_B = \tan^{-1} \frac{n_2}{n_1}$$

ولكن الزجاج موجود في الهواء، إذن:

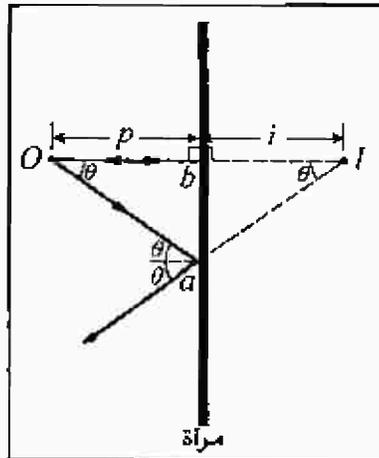
$$\begin{aligned} n_2 &= n, n_1 = 1 \\ \therefore \theta_B &= \tan^{-1} n = \tan^{-1} (1.57) \\ &= 57.5^\circ \end{aligned}$$

-2

$$\begin{aligned} \theta_B + \theta_r &= 90^\circ \\ \theta_r &= 90^\circ - \theta_B = 90^\circ - 57.5^\circ \\ \theta_r &= 32.5^\circ \end{aligned}$$

14-5 المرايا المستوية Plane Mirrors:

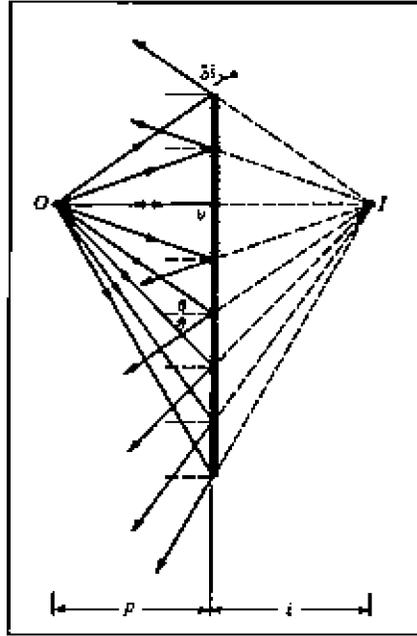
تأمن الشكل (14-8)، إن النقطة (O) تمثل نقطة مضيئة تعتبر مصدراً للضوء، والتي نطلق عليها الاسم المتعارف عليه في عالم البصريات، الجسم *object*، وهو موضوع أمام المرآة وعلى مسافة عمودية عنها مقدارها (P). إن الضوء الصادر من الجسم المضيء، (O) يرسل أشعة مركز انطلاقها هو الجسم ذاته، وهي تمثل هنا الأشعة الساقطة *incident rays* تنعكس وفقاً لقانون الانعكاس الذي مر ذكره سابقاً والأشعة المنعكسة *reflected rays* هي ذات اتجاه مخالف للأشعة الساقطة، وإذا ما مددنا الأشعة المنعكسة على امتدادها نجد أنها سوف تتلاقى جميعها في نقطة خلف المرآة وعلى مسافة مقدارها (i) عمودية أيضاً على سطح المرآة، ويبدو لك الضوء وكأنه صادر من النقطة (I) والتي هي تماماً صورة النقطة (O) في المرآة، والصورة هنا هي صورة خيالية *virtual image*.



الشكل (14-8)

ويبين صورة الجسم (O) في المرآة المستوية، وهي ما يمثلها الموقع المشار إليه بالحرف (I)

انظر الآن إلى الشكل الآخر (14-9)



الشكل (14-9)

في الشكل (14-8) اخترنا شعاعين ساقطين على وجه المرآة الأمامي، الأول عمودي عليها والآخر يقع على موقع آخر حيث يمثل الحالة الأخرى العامة والتي نقول عنها اختيار عشوائي *arbitrary*، النقطتان (a, b) تمثلان نقطتي التلاقي لهذين الشعاعين على وجه المرآة، حيث نحصل على المثلث القائم (O, b, a) ، ولاحظ من الشكل أن زاوية السقوط *angle of incidence* هي (θ) ، كما نحصل في الجهة المقابلة، وهي الجهة الخيالية على المثلث القائم الآخر (I, b, a) ، ونرى أن المثلثين لهما الضلع المشترك \overline{ab} وثلاث زوايا معروفة ومتساوية، وهذا ما يؤدي إلى:

$$Ib = Ob \quad (14-9)$$

وهما الضلعان الأفقيان.

ومن الواضح أن المعادلة (14-9) تشير إلى تساوي المسافتين بين كل من المرآة والجسم والمرآة والصورة، وبما أن الصورة هي خيالية، فقد جرت العادة على إعطائها الإشارة السالبة، أي أن:

$$i = -p \quad (14-10)$$

وهي معادلة المرآة المستوية *plane mirror*.

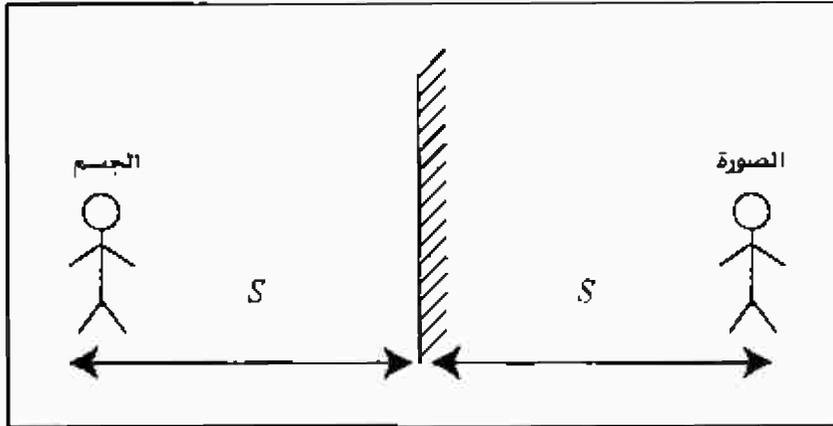
مثال (14-4): Example

إذا كنت تتحرك بشكل مباشر باتجاه مرآة مستوية بسرعة (v) فبأي سرعة سوف تتحرك صورتك في الحالات الآتية؟

1- سرعة الصورة بالنسبة لك.

2- سرعة الصورة بالنسبة للمرآة، انظر الشكل (14-10).

الحل Solution:



الشكل (14-10)، المثال (14-4)

الإزاحة الفاصلة بين الجسم والمرآة هي (S)، والإزاحة الفاصلة بين الجسم والصورة سوف تكون

(2S) وعليه:

-1

$$= v_i = \frac{d}{dt}(2S) = 2v$$

سرعة الصورة بالنسبة للجسم.

-2

$$= v = \frac{d}{dt}(S) = v$$

سرعة الصورة بالنسبة للمرآة.

إذن تتحرك الصورة بالنسبة للجسم بسرعة تساوي ضعف سرعة الصورة بالنسبة للمرآة.

14-6 المرايا الكروية Spherical Mirrors:

سميت بالمرايا الكروية لأنها في حقيقة الأمر هي جزء من كرة كاملة، وهي إما أن تكون

مقعرة convex، أو تكون محدبة concave، انظر الشكل (14-11 أ، ب، ج).

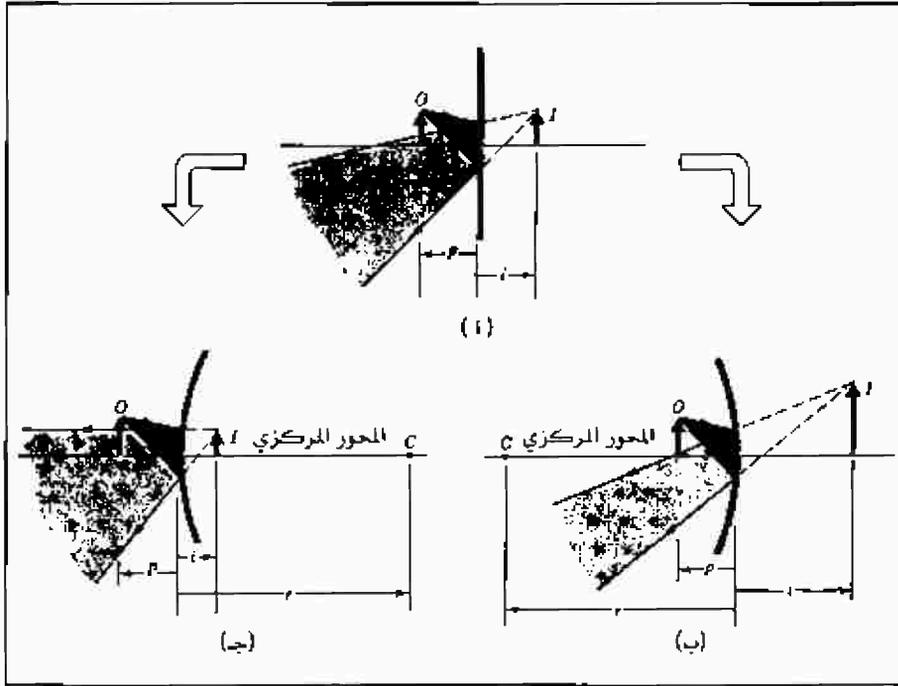
في الشكل (14-11 أ) يشكل الجسم (O) صورة خيالية (I) وهي كما تلاحظ عبارة عن الحالة

التي ناقشناها في الفقرة (14-5)، ولقد تعمدنا ذكرها وذلك بهدف المقارنة.

أما الشكل (14-11 ب) فهو عبارة عن مرآة محدبة concave mirror ونلاحظ فيها أن الصورة قد

ازداد طولها وكذلك بعدها عن المرآة، وأخيراً الشكل (14-11 ج) عبارة عن مرآة مقعرة

convex mirror، ونستطيع أن نميز ببساطة هنا بأن الصورة قد قلَّ طولها وازداد قربها من المرآة.



الشكل (14-11) أ، ب، ج

يبين الفروق الأساسية بين المرايا المستوية والمرايا الكروية

كما نلاحظ في الشكل (14-11) مواقع كل من الصورة *image* والجسم *object* والمحور المركزي *central axis* وكذلك موقع نصف قطر التقعر وكذلك التقعر، حيث:

p	الموقع الهندسي للجسم
i	الموقع الهندسي للصورة
r	نصف قطر التقعر أو التقعر
c	مركز الكرة، حيث إن المرآة هي جزء من كرة مركزها

دعنا الآن نحرك الجسم (O) في الشكل (14-11) ب) نحو اليسار وعلى طول المحور المركزي الذي يمر من مركز التقعر *center of curvature*، وكذلك من مركز المرآة (c)، وهكذا تصل الأشعة إلى المرآة بشكل متوازٍ مع المحور المركزي، كما نلاحظ أن مجمل الأشعة المنعكسة من المرآة سوف تلتقي مارة من النقطة المشتركة (F) قبل أن تشكل الصورة النقطية للجسم (O) *point image*، وحقيقة الأمر فإن المرآة سوف تُحدث صورة نقطية لأي جسم آخر عند النقطة (F) والتي تسمى البؤرة *focus* أو نقطة البؤرة *focal point* للمرآة، كما أن المسافة الفاصلة بينهما وبين مرآة تسمى البعد البؤري *focal length* والذي نرسم له عادة بالرمز (f) وهو كما يلاحظ من الشكل (14-12) يقع في الجزء الحقيقي *real side*. أما بالنسبة للمرآة المحدبة فإن كلاً من البؤرة والبعد البؤري يقعان في الجزء الخيالي *virtual side*.

وفي كلا النوعين من المرايا الكروية، فإن نصف قطر التكور والبعد البؤري يرتبطان بالعلاقة الآتية:

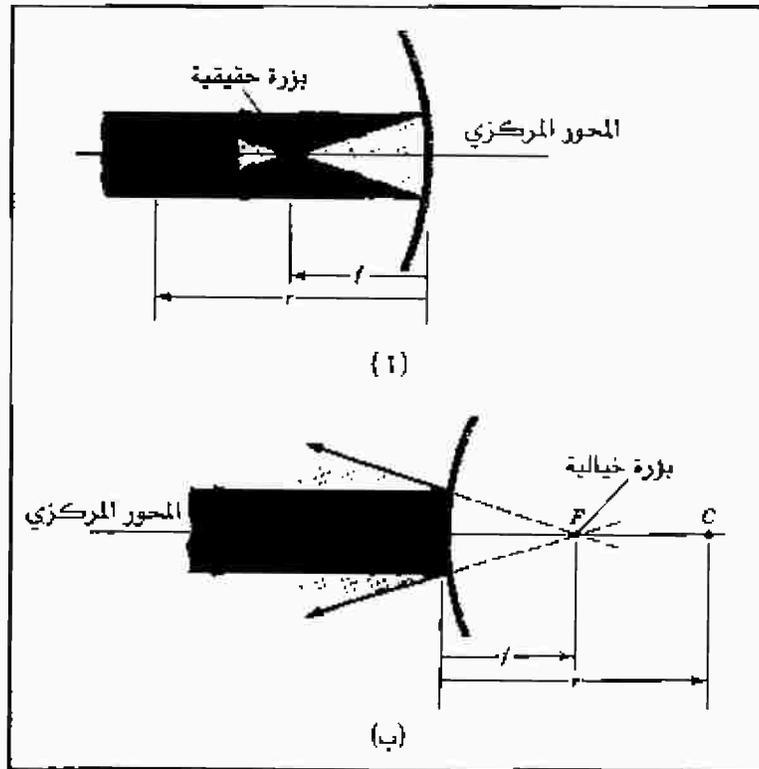
$$f = \frac{1}{2}r \quad (14-11)$$

كما أن كلاً من بعد الجسم (P) وبعد الصورة (i) والبعد البؤري (f) عموماً ترتبط بالعلاقة المعروفة:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f} \quad (14-12)$$

والجمع بين (14-11) و(14-12) يؤدي إلى العلاقة:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{i} = \frac{2}{r} \quad (14-13)$$

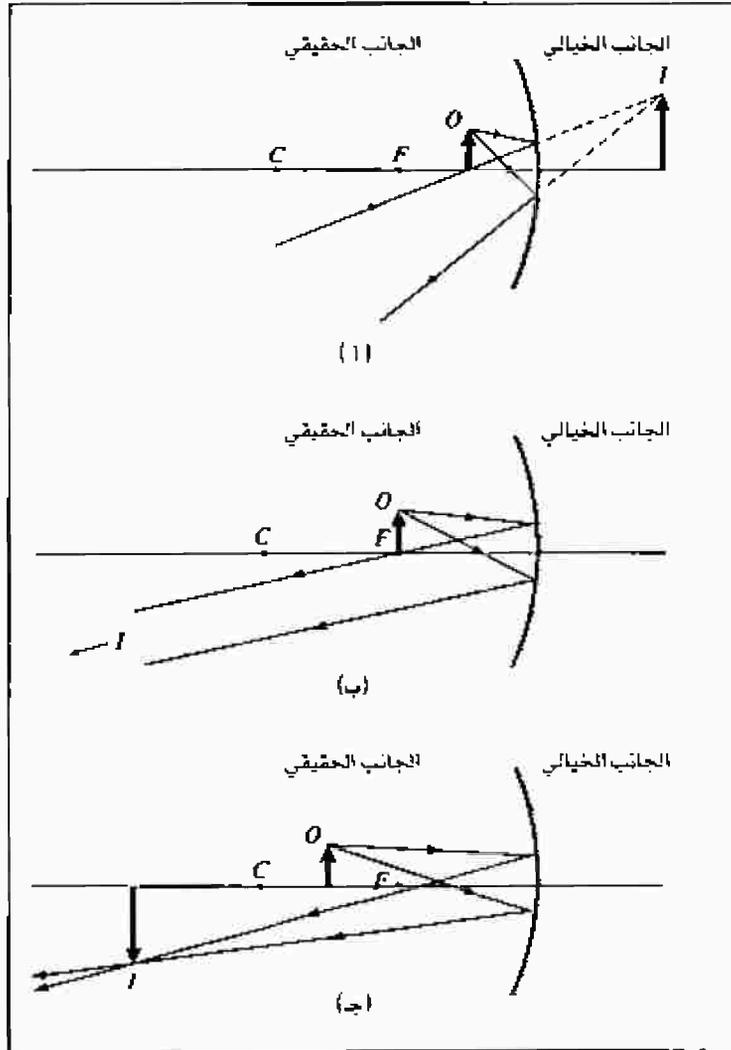


الشكل (14-12)

بقي أن نُميز بين الحالات المتوقعة لوضع الجسم بالنسبة للبؤرة $focus$ لمراة مقعرة، لتسهيل هذه المسألة انظر الشكل (14-13 أ، ب، ج)

في الشكل (14-13 ج) نجد أن الجسم يقع داخل البؤرة (F) وفي هذه الحالة تكون الصورة في الجانب الخيالي وهي بوضع صحيح، أما الشكل (14-13 ب) فيبين أن الجسم واقع تماماً على نقطة

البؤرة (F) وفيه نجد أن الصورة يمكن أن تكون في الـ (ما لا نهاية). أما الشكل (13-14 ج) ففيه يقع الجسم بين البؤرة (F) ومركز التكور (C) ونجد أن الصورة حقيقية مقنوبة ومكبرة.



الشكل (13-14، ب، ج)

يبين أثر تغيير موقع الجسم على صورته بالنسبة للبؤرة (F)

إننا نستطيع معرفة التكبير الجانبي في كل الأحوال عند معرفة طول أو ارتفاع الجسم والصورة العموديين على المحور المركزي *perpendicular height* حيث نعبر عن ذلك رياضياً بالعلاقة الآتية:

$$|m| = \frac{h'}{h} \tag{14-14}$$

(h'): يعبر عن الارتفاع العمودي للصورة.

(h): يعبر عن الارتفاع العمودي للجسم.

(m) تعبر عن مقدار التكبير الجانبي *lateral magnification*، وأخذت القيمة المطلقة له ذلك أن (h) و (h') لا بد من التمييز بين موقعيهما، حيث يعطى الموقع الحقيقي إشارة (+)، والموقع الخيالي إشارة (-). ومن الممكن التعبير رياضياً عن التكبير الجانبي (m) بالعلاقة:

$$m = -\frac{i}{p} \quad (14-15)$$

وأما بالنسبة للمرآة المستوية *plane mirror* فإن مقدار التكبير الجانبي ($m = +1$)، ذلك أن ($i = -p$). ومن الجدير بالذكر أن العلاقات الرياضية من (14-15) - (14-11) صحيحة لكل أنواع المرايا، لكن لا بد من الانتباه إلى إشارة كل من المقادير (r, f, i, p) حيث:

- 1- تكون إشارتها موجبة إذا كانت في الجزء الحقيقي وغير مقلوبة.
- 2- تكون إشارتها سالبة إذا كانت في الجزء الخيالي ومقلوبة.

مثال (14-5): Example

- مرآة مقعرة *convex mirror* مقدار نصف قطر تقعرها يساوي (22 cm).
- 1- أين تقع الصورة لجسم موجود على مسافة (140 cm) أمام المرآة.
 - 2- وجد حسابياً مقدار التكبير الجانبي (m).

الحل Solution:

1- نظر الشكل (14-11 ج) يقع مركز التقعر لهذه المرآة في الجانب الخيالي *v-side*. وعليه فإن قيمة (r) تكون سالبة.

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{i} = -\frac{1}{r}$$

$$\frac{1}{+14} + \frac{1}{i} = \frac{2}{-22\text{ cm}}$$

$$i = -6.2\text{ cm}$$

أي أن الصورة تقع خلف المرآة.

-2

$$m = -\frac{i}{p} = -\frac{-6.2\text{ cm}}{+14\text{ cm}} = 0.44$$

$$|m| < 1$$

هذا يعني أن حجم الصورة أصغر من حجم الجسم.

14-7 العدسات الرقيقة *Thin Lenses* :

العدسات الرقيقة هي عبارة عن جسم شفاف ذو سطحين يقوم كل منهما بكسر الأشعة الضوئية *refracting surfaces*، ولهما المحور المركزي نفسه، أي أنه مشترك لكلا العدستين نقطة عندما تسقط الأشعة الضوئية على الوجه الأمامي للعدسة الرقيقة، فإنها تنتقل من الوسط الأول (الهواء) إلى الوسط الثاني (الزجاج، أو الجسم الشفاف) ثم تنكسر مرة أخرى من الوسط الثاني إلى الوسط الأول، وهنا لا بد من التأكيد على ضرورة التمييز بين حالتين مختلفتين، وهما:

الحالة الأولى: عندما يكون الشعاع الضوئي ساقطاً على العدسة بشكل يوازي المحور الرئيسي لها، فإن العدسة تعمل على جمع الأشعة أو لمّها وتسمى في هذه الحالة "العدسة اللامة" *converging lens*، أما إذا لم تكن الأشعة موازية للمحور الرئيسي فإن العدسة تعمل على تفريق الأشعة أو تشتيتها وتسمى في هذه الحالة "العدسة المفرقة" *diverging lens*.

وتعد العدسة الكروية أفضل طريقة وأبسط حالة للتعبير عن العدسة الشفافة، ذلك أن العدسة الرقيقة هي عبارة عن جزئين مقتطعين من شكلين كرويين أحدهما مقعر والآخر محدب بحيث يكون سمك العدسة صغيراً إذا ما قورن بثوابت العدسة المعروفة، وهي بعد الجسم (P) وبعد الصورة (i) وأنصاف أقطار التكور (r_1) للوجه المقابل للأشعة الساقطة (*incident ray* و r_2) للوجه الآخر.

وإذا انطبق هذا الوصف على العدسة الرقيقة، فإن المعادلة التي تحدد طبيعة العلاقة بين ثوابتها هي معادلة المرايا الكروية نفسها (14-12) *spherical mirrors*، أي:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f} \quad (14-16)$$

والتي نعبر عن بعدها البؤري بالمعادلة:

$$\frac{1}{f} = (\pi - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad \text{عدسة رقيقة} \quad (14-17)$$

حيث إن:

(f): البعد البؤري *focal length*.

(n): معامل انكسار الوسط الشفاف *refraction index*.

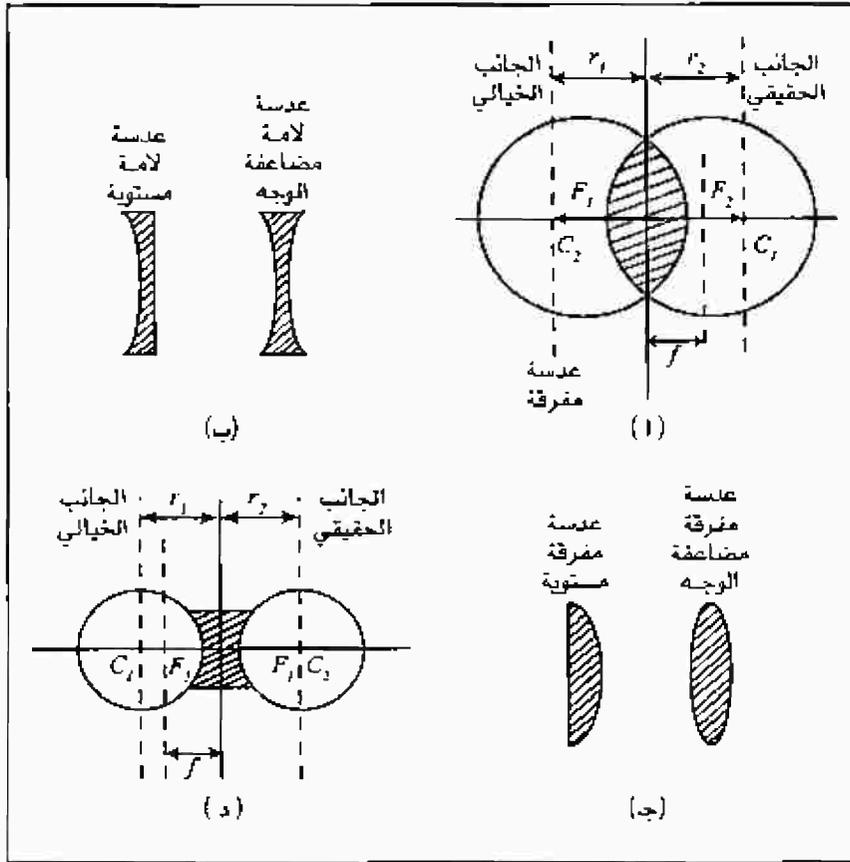
(r_1): نصف قطر تكور الوجه المتلقي للأشعة *radius of curvature one*.

(r_2): نصف قطر تكور الوجه الآخر *radius of curvature two*.

وتسمى المعادلة (14-17) بمعادلة صانعي العدسات *lens maker's equation*، وإذا كانت العدسة في وسط آخر غير الفراغ حيث يكون معامل الانكسار لا يساوي الواحد فإن المعادلة (14-17) تأخذ الصيغة التالية:

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_{\text{glass}}}{n_{\text{medium}}} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (14-18)$$

ولمزيد من الإيضاح حول أنواع العدسات تأمل الشكل (14-14).

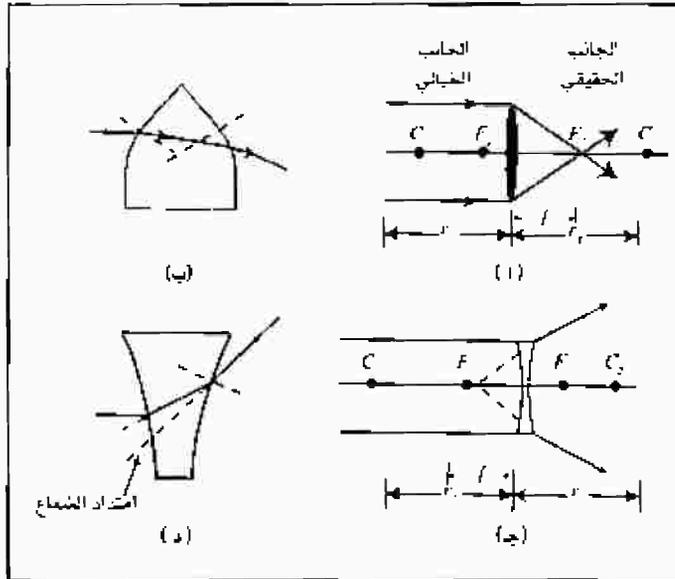


الشكل (14-14) أ، ب، ج، د

يبين أنواع العدسات المختلفة

الشكل (14-14) ب) يوضح ما الذي يحصل داخل العدسة اللامة، الموضحة في الشكل (14-14) أ)، بينما الشكل في جزئه (14-14) د) يوضح ما الذي يحصل داخل العدسة المفرقة، الموضحة في الشكل (14-14) ج).

ولتوضيح عمليتي الانكسار في كلا النوعين من العدسات، العدسة اللامة والعدسة المفرقة، انظر الشكل (14-15) أ، ب، ج، د).

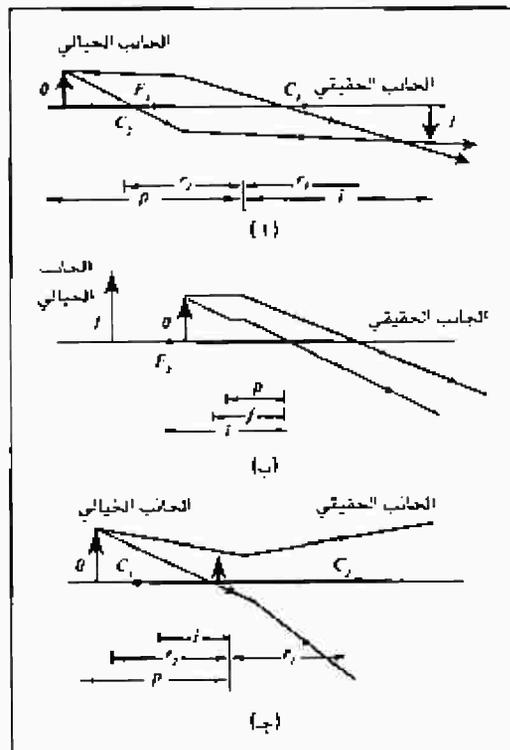


الشكل (14-15) أ، ب، ج، د

يبين العدسة اللامة (المجمعة) والعدسة المفرقة

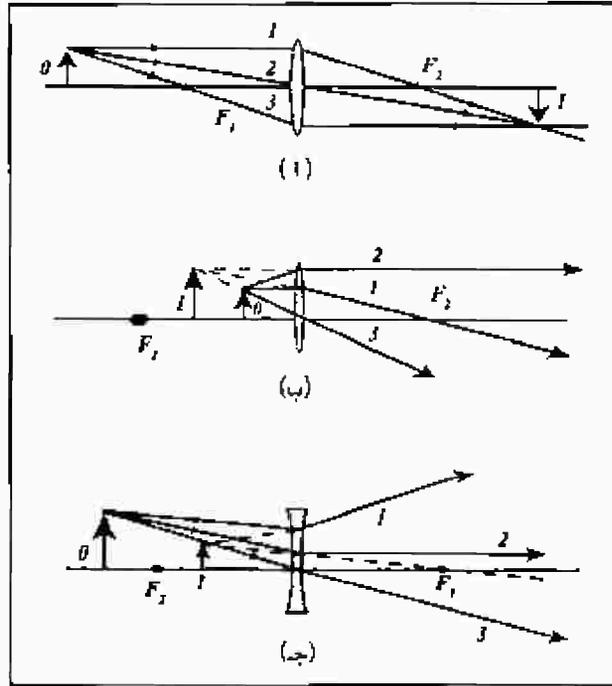
أما الآن فلا بد لنا من إثارة سؤال هام، وهو ما الذي يحصل للأجسام إذا ما وضعت أمام هذين النوعين من العدسات، العدسة اللامة، والعدسة المفرقة؟

وللإجابة عن هذا السؤال، تأمل الشكل (14-16) أ، ب، ج



الشكل (14-16) أ، ب، ج

في الشكل (14-16 أ) نجد أن الجسم يقع خارج النقطة البؤرية (F_1) للعدسة اللامة، أما الصورة فتراها قد تكونت في الجزء الحقيقي وهي في وضع مقلوب *inverted image*، أما الشكل (14-16 ب) فيوضح أن الجسم داخل النقطة البؤرية (F_1) والصورة في هذه الحالة تكونت في الجزء الخيالي بوضع صحيح *up right virtual image*، أما الشكل (14-16 ج) فيوضح أن الجسم واقع أمام العدسة المفرقة والصورة واقعة في الجزء الخيالي *up right virtual image*، والوضع لا يختلف سواء كان الجسم داخل النقطة البؤرية أو خارجها، ذلك أن العدسة المفرقة تعطي دائماً صورة خيالية، والشكل (14-17 أ، ب، ج) يوضح مواقع الأشعة الضوئية، قبل وبعد مرورها بالعدسات.



الشكل (14-17 أ، ب، ج)

ثلاث حالات خاصة، لتحديد موقع الصورة المتكونة بواسطة العدسة الرقيقة

مثال (14-6): Example

في الشكل (14-16 أ) أنصاف أقطار التحدب للعدسة تساوي إلى (42cm)، أي أنهما متساويان، وهي مصنوعة من الزجاج، حيث يساوي معامل الانكسار ($n=1.65$).

أوجد حسابياً مقدار البعد البؤري للعدسة (f).

الحل Solution:

تمن في الشكل المذكور جيداً نجد أن (C_1) تقع في الجزء الحقيقي *r-side* والذي يؤدي إلى أن:

$$r_1 = + 42 \text{ cm}$$

أما (C) فتقع في الجزء الخيالي *v-side* والذي يؤدي إلى أن:

$$\begin{aligned} r_2 &= -42 \text{ cm} \\ \therefore \frac{1}{f} &= (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \\ &= (1.65-1) \left(\frac{1}{+42 \text{ cm}} - \frac{1}{-42 \text{ cm}} \right) \\ \Rightarrow f &= +32 \text{ cm} \end{aligned}$$

مثال (14-7): Example

في الشكل (14-16 ج) أوجد البعد البؤري للعدسة المفرقة، مستخدماً المعلومات الواردة في المثال

(14-6) نفسها.

الحل Solution:

$$\begin{aligned} r_1 &= -42.5 \text{ cm} \\ r_2 &= +42.5 \text{ cm} \\ \therefore \frac{1}{f} &= (1.65-1) \left(\frac{1}{-42.5 \text{ cm}} - \frac{1}{42.5 \text{ cm}} \right) \\ f &= -\frac{i}{p} \end{aligned}$$

والتكبير الذي تحدته العدسات يخضع للقانون السابق نفسه، ذلك الذي تحدته المرايا والذي

سبق ذكره بالمعادلة (14-14) من هذا الفصل، أي أن:

$$m = -\frac{i}{p} \quad (14-19)$$

وهو كذلك تكبير يعتمد في مفهومه على البعد الهندسي الذي تطلق عليه تسمية الطول، حيث (i)

هو المقدار الذي يمثل طول الصورة، والمقدار الآخر (P) يمثل طول الجسم، ويطلق البعض عليه ارتفاعاً

بدلاً من تسميته بالطول، ومن الممكن التعبير عن المعادلة (14-19) دون أن نعطي أهمية للإشارة، ذلك أن

المقدار (m) هو بطبيعته مقدار عددي، وتعرف قوة أي عدسة بالمقدار (f')، أي مقلوب البعد البؤري لها

مقاساً بالأمتار، ووحدة قياسه هي الدايوپتر *dioptr*، والمعادلة الآتية توضح ذلك:

$$p = -\frac{1}{f(\text{meter})} \quad (14-20)$$

حيث إن:

(p) تمثل قوة العدسة.

(f): البعد البؤري لها.

مثال (14-8): Example

أوجد قوة عدسة مفرقة *diverging lens*، إذا علمت أن بعدها البؤري ($f=20\text{ cm}$).

الحل Solution:

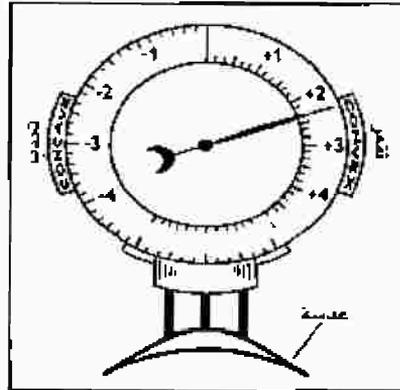
$$p = -\frac{1}{f(\text{meter})} = \frac{1}{-20 \times 10^{-2}} = -5D$$

وتلاحظ أن البعد البؤري للعدسة المفرقة سالب، وذلك لأنه يقع في الجانب الخيالي، أما الحرف (D) فهو ما يرمز إلى *dioptr* وحدة قياس قوة العدسة. ولإيجاد القوة الكلية لمجموعة من العدسات الرقيقة القريبة من بعضها البعض وذلك لتقييم أثرها المشترك، نقوم بعملية جمع لقواها المفردة، فمثلاً لو كان لدينا عدستان قوة الأولى (p_1) وقوة الثانية (p_2) فإن القوة الكلية:

$$p = p_1 + p_2 \quad (14-21)$$

ويجري من الناحية العملية قياس قوة العدسة بجهاز يسمى مقياس قوة العدسة *lens power meter*، انظر الشكل (14-18).

تعمل في الشكل (14-18)، هذا الجهاز يتكون من ثلاثة أرجل حيث الرجل الوسطية تتصل بلولب متصل بمؤشر يتحرك على تدريج معين لقياس التحدب السطحي للعدسة، وبذلك يمكن حساب قوتها، وتجد أيضاً الجزء الأيمن مخصصاً للعدسات المقعرة، أما الجزء الأيسر فهو مخصص للعدسات المحدبة.



الشكل (14-18)

يبين مقياس قوة العدسات سواء المقعرة أو المحدبة

مثال (14-9): Example

عدسة لامة بعدها البؤري ($f=15\text{ cm}$)، تم وضع جسم على بعد (25 cm) منها.

أوجد حسابياً موقع الصورة. وكذلك قوة تكبير العدسة.

الحل Solution:

$$p = 25 \text{ cm}$$

وذلك لأن العدسة لامة $f = +15 \text{ cm}$

$$\begin{aligned} \therefore \frac{1}{f} &= \frac{1}{p} + \frac{1}{i} \\ \frac{1}{i} &= \frac{1}{f} - \frac{1}{p} = \frac{1}{15} - \frac{1}{25} \\ \frac{1}{i} &= \frac{25 - 15}{375} = \frac{10}{375} \end{aligned}$$

موقع الصورة

$$\therefore i = \frac{375}{10} = 37.5 \text{ cm}$$

تكبير العدسة

$$m = \frac{i}{p} = \frac{37.5}{25} = 1.5$$

مثال (14-10) Example:

أعد حل المثال (14-10) باستخدام عدسة مفرقة.

الحل Solution:

$$p = 25 \text{ cm}$$

وذلك لأن العدسة مفرقة $f = -15 \text{ cm}$

$$\begin{aligned} \therefore \frac{1}{f} &= \frac{1}{p} + \frac{1}{i} \\ \frac{1}{i} &= \frac{1}{f} - \frac{1}{p} = \frac{1}{-15} - \frac{1}{25} \\ &= \frac{25 - (-15)}{-375} = \frac{40}{-375} \end{aligned}$$

موقع الصورة:

$$\therefore i = \frac{-375}{40} = -9.375 \text{ cm}$$

تكبير العدسة:

$$m = \frac{9.375}{25} = 0.375$$

14-7-1 البعد البؤري لعديتين رقيقتين متلامستين : Focal Length of two thin Contact Lenses

انظر الشكل (14-19).

من خلال تأملك لهذا الشكل تجد أن هناك عدستين رقيقتين متلامستين (A)، (B)، البعد البؤري للأولى (f_1)، وللثانية (f_2).

إن الأشعة الصادرة من الجسم عند النقطة (O) والواقعة على المحور المركزي تنكسر بسبب مرورها بالعدسة (A) مكونة الصورة (I') في حالة عدم وجود العدسة الثانية (B)، وهكذا نجد أن:

$$i = +y \quad , \quad P = +x$$

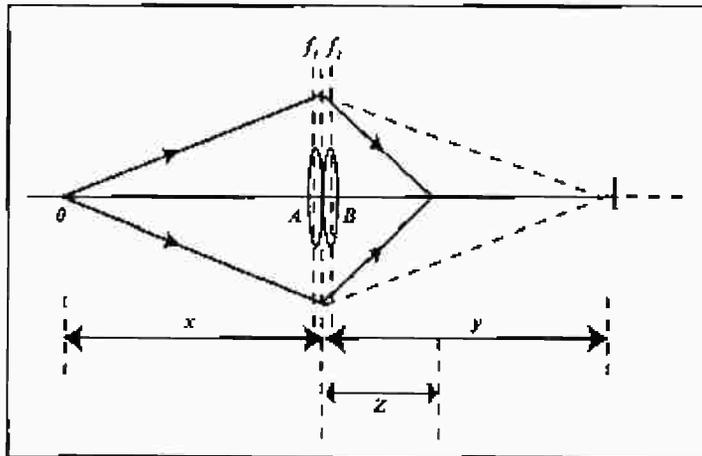
وباستخدام القانون العام للعدسات:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{P} + \frac{1}{i}$$

نجد أن:

$$\frac{1}{f_1} = \frac{1}{y} + \frac{1}{x}$$

(14-22)



الشكل (14-19)

والآن الصورة (I') المتكونة بواسطة العدسة (A) ستكون جسماً خيالياً بالنسبة للعدسة (B) والتي بدورها ستكون صورة حقيقية للجسم الموجود في (O) عند النقطة (i) بحيث:

$$i = z \quad , \quad P = -y$$

ومن جديد:

$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{z} + \frac{1}{-y}$$

(14-23)

ويجمع المعادلتين (14-22) و(14-23) نجد أن:

$$\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{y} + \frac{1}{x} + \frac{1}{z} + \frac{1}{-y}$$

$$\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{x} + \frac{1}{z} \quad (14-24)$$

وهكذا فإن (i) هي صورة حقيقية للجسم الموجود عند (O) بعدها عن مركز العدستين ($i = z$) أما بعد الجسم ($p = x$).

إذا يتضح بعد ذلك أن البعد البؤري للمجموعة:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{x} + \frac{1}{z} \quad (14-25)$$

قارن الآن بين المعادلتين (14-24) و(14-25) ، نجد أن:

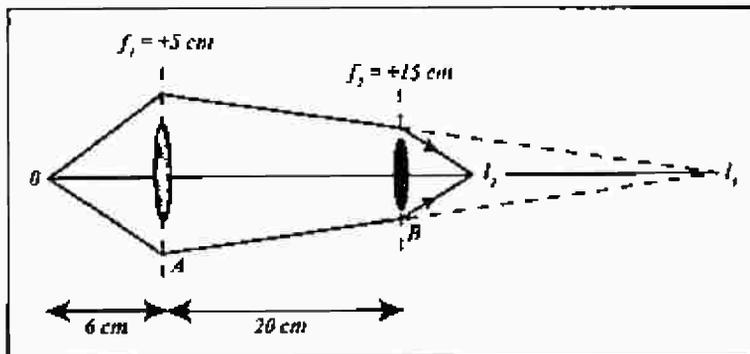
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \quad (14-26)$$

أي أن مقلوب البعد البؤري لمجموعة عدسات رقيقة متلامسة (f) يساوي مجموع مقلوب الأبعاد البؤرية للعدسات المكونة للمجموعة (f_1 ، f_2).

مثال (14-11) Example:

عدستان لامتان، البعد البؤري للأولى ($f_1 = 5 \text{ cm}$) ، والبعد البؤري للثانية ($f_2 = 15 \text{ cm}$) تفصلهما عن بعضهما البعض مسافة مقدارها (20 cm) تقمان على المحور المركزي، وُضع جسم على بعد ($p = 6 \text{ cm}$) عن العدسة الأولى بحيث يكون الجسم أمامها مباشرة، انظر الشكل (14-20).

أوجد موقع الصورة النهائية، وكذلك صفاتها وقوة تكبير المجموعة.



الشكل (14-20)

الحل *Solution*:

$$P_1 = +6 \text{ cm} \quad , \quad f_1 = +5 \text{ cm}$$

$$\frac{1}{f_1} = \frac{1}{P_1} + \frac{1}{i_1}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{i_1} &= \frac{1}{f_1} - \frac{1}{P_1} = \frac{1}{5} - \frac{1}{6} \\ &= \frac{6-5}{30} = \frac{1}{30} \end{aligned}$$

صورة حقيقية:

$$\therefore i_1 = 30 \text{ cm}$$

وبما أن (i_1) هي صورة حقيقية، فإن الأشعة المتجمعة فيها تسقط على العدسة الثانية (B) وهي

جسم للعدسة الثانية:

$$\therefore P_2 = -(30 - 20) = -10 \text{ cm}$$

$$f_2 = 15 \text{ cm}$$

ومن جديد:

$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{P_2} + \frac{1}{i_2}$$

$$\frac{1}{i_2} = \frac{1}{f_2} - \frac{1}{P_2} = \frac{1}{15} - \frac{1}{-10}$$

$$\frac{1}{i_2} = \frac{10+15}{150} = \frac{25}{150} = \frac{5}{30}$$

$$\therefore i_2 = \frac{30}{5} = +6 \text{ cm}$$

قوة تكبير العدسة الأولى (m_1) تساوي:

$$m_1 = \frac{i_1}{P_1} = \frac{30}{6} = 5$$

قوة تكبير العدسة الثانية (m_2) تساوي:

$$m_2 = \frac{i_2}{P_2} = \frac{6}{10} = 0.6$$

أما القوة التكبيرية للمجموعة:

$$M = m_1 \times m_2$$

أي أن الصورة ثلاثة أضعاف كبر الجسم:

$$= 5 \times 0.6 = 3$$

ومن خلال ما تقدم نجد أن القوة التكبيرية الجانبية *latral magnification* لعدستين هي حاصل

ضرب القوة التكبيرية المفردة لكل منهما، أي أن:

$$M = m_1 \times m_2$$

(14-27)

حيث (M) هي القوة التكبيرية للمجموعة.

مسائل عامة محلولة

solved problems

14-1 عدسة مفرقة *diverging lens* يبلغ بعدها البؤري *focal length* ($f=30\text{ cm}$)، وضع جسم على يسارها وعلى مسافة تساوي (20 cm).

أوجد بعد الصورة، ثم حدّد موقع الصورة ومواصفاتها مستخدماً طريقة الرسم.

الحل:

البعد البؤري للعدسة المفرقة (مقعرة) يساوي ($f=-30\text{ cm}$) بعد الجسم عن العدسة يساوي ($p=20\text{ cm}$).

من المعادلة العامة للعدسات:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{i}$$

$$\frac{1}{i} = \frac{1}{f} - \frac{1}{p}$$

$$= \frac{p-f}{pf}$$

$$\therefore i = \frac{pf}{p-f}$$

$$= \frac{(20\text{ cm})(-30\text{ cm})}{(20\text{ cm}) - (-30\text{ cm})}$$

$$= \frac{-600\text{ cm}^2}{50\text{ cm}} = -12.5\text{ cm}$$

ملاحظة: يمكننا الآن رسم العدسة على المحور البصري المركزي، وتحديد موقع كل من الصورة والجسم يسر وسهولة.

14-2 كاميرا سينمائية بعدسة واحدة، يبلغ بعدها البؤري ($f=75\text{ mm}$)، استخدمت لتصوير رجل يبلغ طوله (180 cm)، ويقف على مسافة (27 cm) بعيداً عن الكاميرا.

أوجد حسابياً مقدار طول صورة هذا الرجل على فيلم الكاميرا.

الحل:

البعد البؤري: ($f = 75\text{ mm}$)

طول الرجل يساوي: $(h_p = 180 \text{ cm})$

بعد الرجل عن العدسة: $(p = 27 \times 10^2 \text{ m})$

طول هذا الرجل: s

من المعلوم لدينا أن معامل التكبير الطولي للعدسة:

$$m = \frac{h_i}{h_p} = \frac{\text{طول الصورة}}{\text{الطول الحقيقي}}$$

ولكن معامل التكبير من جهة أخرى يساوي:

$$m = \frac{i}{p}$$

ومن المعادلة العامة للعدسات:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{i}$$

$$i = \frac{pf}{p-f}$$

$$h' = mh$$

$$= \left(\frac{i}{p} \right) h$$

$$= \frac{(7.5 \text{ cm})(180 \text{ cm})}{(27 \times 10^2 \text{ cm} - 7.5 \text{ cm})}$$

أي أن طول الرجل على فيلم الكاميرا سوف يكون (0.5 cm) .

14-3 إن الصيغة الرياضية لمعادلة العدسات الرقيقة والتي يطلق عليها *Gaussian form* هي:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{i}$$

إلا أن هناك صيغة أخرى للعدسة نفسها تسمى *Newtonian form* والتي تعتبر المسافة بين الجسم

والبعد البؤري الأول للعدسة (x) ، والمسافة بين الصورة والبعد البؤري الثاني للعدسة (x') .

أثبت أن:

$$x x' = f^2$$

ملاحظة: خذ:

$$i = f + x' \quad , \quad p = f + x$$

الحل:

من المعادلة العامة للعدسات الرقيقة، والتي ألفنا استخدامها، نستطيع وكما لاحظنا في

المسائل السابقة أن نحدد موقع الصورة على النحو الآتي:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{i}$$

$$i = \frac{pf}{p-f}$$

وكما هو واضح من نص المسألة فإن:

$$P = f + x$$

حيث إن: (x) هي المسافة بين الجسم والبعد البؤري للعدسة، وهي موجبة إذا كان الجسم يقع بعد البعد البؤري (f) وسالبة إذا كان يقع قبل البعد البؤري على المحور البصري للعدسة.

$$i = \frac{f(f+x)}{f+x-f} = \frac{f(f+x)}{x}$$

كما هو واضح أيضاً من نص المسألة فإن:

$$i = f + x'$$

وهو أيضاً سالب أو موجب حسب موقعه من البعد البؤري للعدسة.

$$x' = i - f$$

$$= \frac{f(f+x)}{x} - f = \frac{f^2}{x}$$

أو بشكل آخر:

$$x'x = f^2$$

14-4 جسم ارتفاعه (4 cm) ، استخدمت عدسة مفرقة يبلغ بعدها البؤري $(f=25 \text{ cm})$ لتكوين صورة

لهذا الجسم الموجود على مسافة (50 cm) عنها. حدد موقع وحجم الصورة.

الحل:

ارتفاع الجسم يساوي: $(h_p=4 \text{ cm})$

نوع العدسة هو عدسة مقعرة بعدها البؤري: $(f=-25 \text{ cm})$

بعد الجسم عن العدسة يساوي: $(p=50 \text{ cm})$

أيضاً نعلم بداية إلى تحديد موقع الصورة، وكما تعودنا من المعادلة العامة للعدسات:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{i}$$

$$\therefore i = \frac{pf}{p-f}$$

وكما نؤكد دائماً بأن البعد البؤري للعدسة الفرقة يكون سالباً، إذن:

$$i = \frac{(50 \text{ cm})(-25 \text{ cm})}{(50 \text{ cm}) - (-25 \text{ cm})} = \frac{-1250 \text{ cm}^2}{75 \text{ cm}} = -16.66 \text{ cm}$$

هذا هو موقع الجسم، أما حجم الصورة، فتعني نعلم أن معامل التكبير:

$$m = \frac{-i}{p} = \frac{+16.66 \text{ cm}}{50 \text{ cm}} = +0.333 = 0.333$$

كما نعلم أن معامل التكبير يساوي من ناحية أخرى:

$$m = \frac{h'}{h} \Rightarrow 0.333 = \frac{h'}{4 \text{ cm}}$$

هذا هو حجم الصورة:

$$h' = 1.3 \text{ cm}$$

5-14 عدسة مفرقة يبلغ بعدها البؤري ($f=30 \text{ cm}$)، استخدمت لرصد صورة لجسم يبعد عنها مسافة (15 cm) .

أوجد حسابياً مقدار كلٍ من:

أ) بعد الصورة المتكونة.

ب) ارتفاع الصورة، ثم قارنه مع ارتفاع الجسم.

الحل:

البعد البؤري للعدسة المفرقة: ($f=30 \text{ cm}$)

بعد الجسم عن العدسة يساوي: ($p=15 \text{ cm}$)

بعد الصورة المتكونة يساوي: ($i=?$)

-1

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{i}$$

$$i = \frac{pf}{p-f}$$

ولكن البعد البؤري هو مقدار سالب وذلك لأن العدسة مفرقة.

$$i = \frac{(30 \text{ cm})(-15 \text{ cm})}{(15 \text{ cm}) - (-30 \text{ cm})} = \frac{-450 \text{ cm}^2}{45 \text{ cm}} = -10 \text{ cm}$$

2- أما معامل التكبير فهو كما تعودنا على حسابه:

$$m = \frac{-i}{p} = \frac{+10 \text{ cm}}{30 \text{ cm}} = 0.333$$

وهي ذات النسبة التي يكبر بها أو يصغر طول الجسم ذلك أننا نعلم بأن:

$$m = \frac{-i}{p} = \frac{h'}{h}$$

6-14 ثلاث عدسات أبعادها البؤرية على التوالي:

$$f_1 = 25 \text{ cm}$$

$$f_2 = 30 \text{ cm}$$

$$f_3 = 50 \text{ cm}$$

وضعت بجانب بعضها البعض دون أي فراغ فيما بينها.

أوجد القوة المؤثرة لمجموعة العدسات الثلاثة.

الحل:

البعد البؤري للعدسة الأولى يساوي: ($f_1 = 25 \text{ cm}$)

البعد البؤري للعدسة الثانية يساوي: ($f_2 = 30 \text{ cm}$)

البعد البؤري للعدسة الثالثة يساوي: ($f_3 = 50 \text{ cm}$)

القوة المؤثرة لمجموع العدسات الثلاثة تساوي:

إن القوة الكلية المؤثرة لهذه المجموعة هي عبارة عن مجموع القوى المؤثرة للعدسات الثلاث أي أن:

$$p = p_1 + p_2 + p_3$$

مقاسة بوحدة (m^{-1}) أو ما نسميه دايوبتر.

ومن الواضح أن العدسات الثلاثة هي من النوع المحدب، ذلك أن أبعادها البؤرية موجبة. ونحن

نعلم أن القوة المؤثرة للعدسة تعرف رياضياً بالشكل:

$$p = \frac{-1}{f}$$

$$p = -\left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3}\right)$$

ولكن:

$$\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3} = \frac{1}{25 \times 10^{-2}} + \frac{1}{30 \times 10^{-2}} + \frac{1}{50 \times 10^{-2}}$$

دايوبتر:

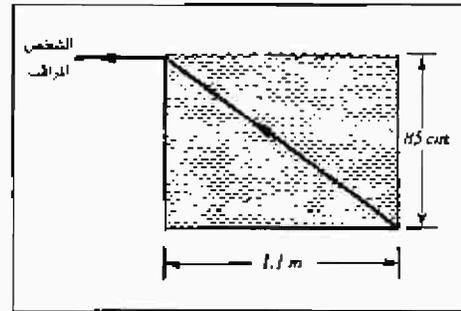
$$p = -(4 + 3.33 + 2) m^{-1} = -9.33 m^{-1}$$

مسائل وتمارين الفصل الرابع عشر

Chapter Fourteen Exercises & Problems

14-1 سقط شعاع ضوئي من الفراغ على لوح من الزجاج بزاوية مقدارها $(\theta_1 = 32^\circ)$ مع العمود المقام على سطح اللوح الزجاجي عند نقطة التقاء الشعاع مع اللوح، ثم انكسر إلى داخل الزجاج وبزاوية مع العمود مقدارها $(\theta_2 = 21^\circ)$ $(\theta_2 = 21^\circ)$. أوجد حسابياً معامل انكسار الزجاج، اعتبر معامل انكسار الفراغ يساوي الواحد.

14-2 انظر الشكل (14-21).

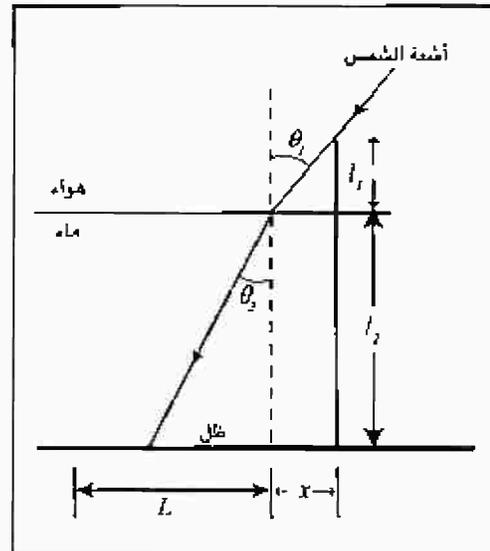


الشكل (14-21)، المسألة (14-2)

تأمل هذا الشكل حيث تجد أن أبعاده هي أبعاد مستطيل يوضحها الشكل في الطول والعرض، وهو عبارة عن خزان تم ملؤه بسائل غير معروف، وكما تلاحظ فقد قام شخص ما بإلقاء نظرة من على الزاوية العليا اليسرى بحيث يتقاطع الخط البصري له مع نقطة الزاوية السفلى اليمنى عند النقطة (E).

أوجد حسابياً معامل انكسار هذا السائل. وهل تستطيع معرفة اسم السائل؟

14-3 انظر الشكل (14-22).



الشكل (14-22)، المسألة (14-3)

عمود دائري المقطع يبلغ طوله المقمور في الماء $(l_2 = 2m)$ ، وطوله الممتد في الهواء $(l_1 = 50cm)$ ، ويقف عمودياً تماماً على قاع المسبح بينما تسقط أشعة الشمس بزاوية مقدارها (55°) مع الأفق (سطح الماء).

أوجد طول ظل العمود على سطح المسبح السفلي.

ملاحظة: اعتبر معامل انكسار الهواء (1) ، ومعامل انكسار الماء (1.33) .

14-4 يسقط شعاع ضوئي على السطح الفاصل بين الماء والزجاج بزاوية $(\theta_i = 30^\circ)$.

ما هي الزاوية التي يتخذ منها الضوء إلى الزجاج؟ أوجد مقدارها حسابياً.

ملاحظة: (n) للماء تساوي (1.33) ، (n_r) للزجاج تساوي (1.5) .

14-5 إذا علمت أن مقدار معامل انكسار الماء للون الأحمر يساوي (1.33) وللون البنفسجي يساوي (1.342) .

أوجد زاوية الانكسار لكل من اللونين، وذلك إذا سقطت أشعة كلا اللونين على سطح الماء بزاوية مقدارها $(\theta_i = 70^\circ)$.

14-6 مرآة مقعرة *convex mirror* يبلغ نصف قطر تكورها $(r=40\text{cm})$ استُخدمت لعكس شعاع ضوئي صادر من شمعة موجودة على المحور المركزي للمرآة وعلى مسافة (35cm) أمامها. حدد موقع الصورة وحجمها.

14-7 مرآة محدبة *concave mirror* يبلغ نصف قطر تكورها $(r=50\text{cm})$ ، استُخدمت لعكس شعاع ضوئي صادر من جسم موجود على المحور المركزي وعلى مسافة (35cm) أمام المرآة. حدد موقع الصورة وحجمها.

14-8 جسم موضوع على مسافة (30cm) من مرآة مقعرة، نصف قطر تكورها $(r=40\text{cm})$.

(أ) حدد موقع الصورة، ثم أوجد مقدار تكبيرها الجانبي *lateral magnification*.

(ب) أعد حل هذه المسألة وذلك إذا استبدلنا العدسة المقعرة بعدسة محدبة لها نصف قطر التكور نفسه.

14-9 استخدمت مرآة يدوية أمام وجهك وعلى بعد (25cm) ، فرأيت صورتك في المرآة مكبرة بمقدار (2) مرة.

أوجد حسابياً مقدار نصف قطر تكور المرآة، ثم حدد فيما إذا كانت المرآة محدبة أم مقعرة.

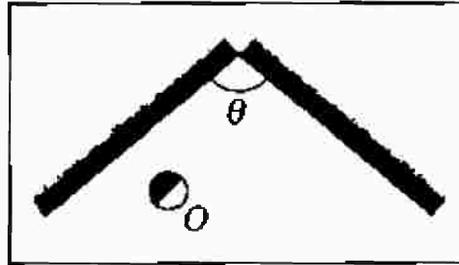
14-10 مرآتان مقعرتان نصف قطر تكور الأولى $(r_1=15\text{cm})$ ، ونصف قطر تكور الثانية $(r_2=12\text{cm})$ ، تفصلهما عن بعضهما مسافة مقدارها (40cm) ، وضع مصدر ضوئي بين المرآتين وعلى مسافة (10cm) من المرآة الأولى بحيث تقع المجموعة كلها على المحور المركزي.

(أ) أوجد موقع الصورة المتكونة في المرآة الأولى.

(ب) أوجد موقع الصورة المتكونة في المرآة الثانية.

14-11 انظر الشكل (14-23)، ترى أنه عبارة عن مسقط علوي لمرآتين مستويتين عموديتين على بعضهما البعض، تم وضع جسم عند النقطة (O) بينهما بزاوية مقدارها $(\theta = 90^\circ)$. إذا نظرت في المرآتين في آن معاً، فكم صورة سوف ترى للجسم $\phi(O)$ وأين تكون هذه الصور؟

ملاحظة: حاول أن تجري هذه التجربة البسيطة بنفسك.



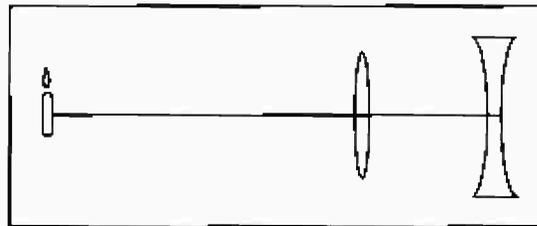
الشكل (14-23)، المسألة (14-11)

14-12 مرآة مقعرة مقدار نصف قطر تكورها $(r=35\text{cm})$ ، تم تثبيتها بحيث تبدو صورة الوجه صحيحة ومكبرة بمقدار (2.5) مرة. كم تبعد المرآة عن الوجه؟ أوجد ذلك حسابياً.

14-13 تم استخدام عدسة لامة *converging lens* لتكبير صورة بمقدار ثلاث مرات. حدد موقع العدسة إذا كان بعدها البؤري *focal length* يساوي (30cm) .

14-14 انظر الشكل (14-24).

ترى في الشكل عدستين إحداهما لامة *converging lens*، والأخرى مفرقة *diverging lens*، البعد البؤري للأولى $(f_1=40\text{cm})$ وللثانية $(f_2=40\text{cm})$ ، تفصلهما مسافة (20cm) ، وضع مصدر ضوئي على بعد (30cm) من العدسة الأولى، والمجموعة كلها واقعة على المحور المركزي.



الشكل (14-24)، المسألة (14-14)

- 1- أوجد موقع صورة المصدر الضوئي المتكونة بوساطة العدسة الأولى.
- 2- أوجد موقع الصورة بالنسبة للعدسة الثانية، علماً بأن صورة العدسة الأولى ستكون جسماً للعدسة الثانية.

الخلاصة

Summary

• إن الضوء يمكن وصفه بدقة عالية على أساس اعتباره موجة كهرومغناطيسية حيث أن سرعته وباقي خصائصه الأخرى يمكن تعريفها بواسطة معادلات العالم ماكسويل.

• إن المقصود بالبصريات الهندسية هو المعالجة التقريبية لموجات الضوء التي يمكن تمثيلها بتنعاع على شكل خط مستقيم ما لم يعترض طريق سيره جسم تساوي أبعاده الطول الموجي لهذا الشعاع.

• عندما ينتقل الشعاع الضوئي من وسط لآخر فإنه يخضع للانعكاس والانكسار في آن معاً، بحيث إن زاوية الانعكاس تساوي زاوية السقوط، أما زاوية الانكسار فتربط بزاوية السقوط بالعلاقة:

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

• إذا انتقل الشعاع الضوئي من وسط ذي معامل انكسار أعلى من الوسط الثاني فإنه يخضع لانعكاس كلي داخلي عندها يسمى بالزاوية الحرجة، حيث نعبّر عن هذه الزاوية بالعلاقة:

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1}$$

• يحدث استقطاب الشعاع الضوئي عند زاوية برونستر والتي نعبّر عنها بالعلاقة:

$$\theta^2 = \tan^{-1} \frac{n_2}{n_1}$$

• إن العلاقة الرياضية بين الجسم المضيء والصورة المشكلة بعد مروره بأي من الأجسام الآتية، وإعادة تشكيله من جديد حسب الآتي:

$$1- \text{ المرايا الكروية: } \frac{1}{p} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f} = \frac{2}{r}$$

$$2- \text{ المرآة المستوية: } p = -i$$

$$3- \text{ سطح عاكس كروي: (سطح واحد) } \frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{i} = \frac{n_2 - n_1}{r}$$

$$4- \text{ عدسة رقيقة: } \frac{1}{p} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

• إن التكبير الطولي بواسطة المرايا المستوية والعدسات الرقيقة نعبّر عنه بالعلاقة:

$$m = -\frac{i}{p} \quad (\text{قوة العدسة})$$

كما نعبّر عن التكبير بواسطة مجموعة من المرايا أو العدسات بالعلاقة:

$$M = m_1 m_2 \quad (\text{قوة عدة عدسات})$$