جامعة الانبار

كلية التربية الاساسية /حديثة

قسم العلوم العامة /فرع الفيزياء

المرحلة الثانية

محاضرات

البصريات الفيزيائية

اعداد

م.م. سعد العنزي

20120-2019

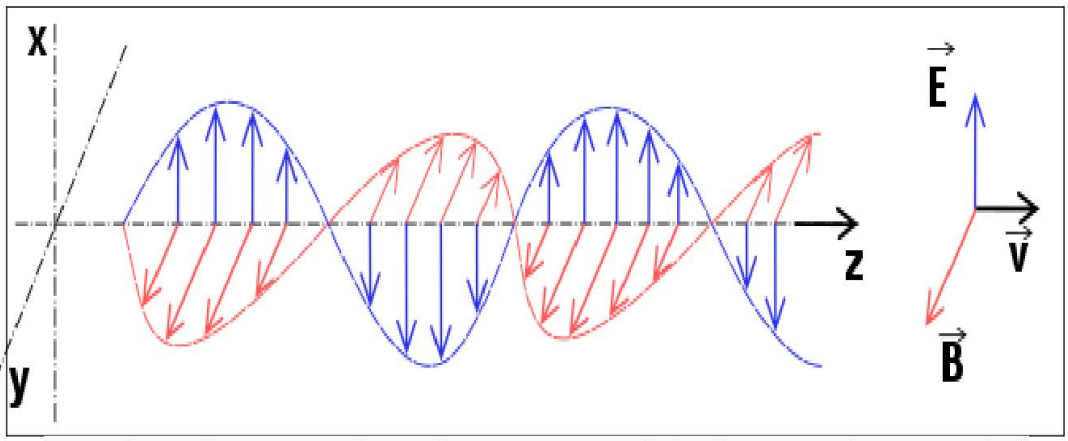
1. المقدمة (Introduction)

قديماً، قبل القرن التاسع عشر، كان التفكير في الضوء على أنه سيل من الجسيمات التي إما تصدر من العين، أو من الجسم الذي ننظر إليه. قاد فكرة أن الضوء عبارة عن جسيمات تنطلق من الأجسام التي نراها العالم إسحاق نيوتن(Isak Newton)، واستخدم هذه الفكرة لتفسير ظاهرتي الانعكاس والانكسار. بقي القبول لدى العلماء لفرض نيوتن سيد الموقف حتى عام 1678م. حيث اقترح الفيزيائي والفلكي الهولندي هوغنز (Huygens) أن الضوء عبارة عن نوع من الأمواج، وتمكنت النظرية الموجية لهوغنز من تفسير ظاهرتي الانعكاس والانكسار للضوء. وفي عام 1801م تمكن العالم ثوماس يونغ (Thomas Young) من إثبات أن الضوء موجة، عن طريق جعل الضوء يتداخل، الأمر الذي سوف يؤدي إلى انخفاض شدة الضوء (أو اختفائه بالكامل)، أو زيادة شدة الضوء (أو تضاعف شدته) هاتين الظاهرتين يعرفان بالتداخل الهدام والتداخل البناء على الترتيب. ثم لحق ذلك نشر ماكسويل (Maxwell) لعمله في الكهربائية والمغناطيسية في عام 1873 م الذي دعم أيضاً النظرية الموجية للضوء. تمكنت النظرية الموجية للضوء من تفسير معظم الظواهر الضوئية، إلا أنها فشلت في تفسير بعض الظواهر، مثل الظاهرة الكهروضوئية (Photoelectric Effect)، الظاهرة التي نرى من خلالها انطلاق إلكترون من سطح المعدن عند تسليط ضوء عليه، وكان فشل النظرية الموجية للضوء يكمن في أن الطاقة الحركية لكل إلكترون لا تعتمد على شدة الضوء الساقط، وإنما على تردده، بينما يعتمد عدد الإلكترونات المنبعثة من سطح المعدن على شدة الضوء الساقط على هذا المعدن. تمكن العالم ألبرت آينشتاين ((Albert Einstein) من تفسير هذه الظاهرة عام 1905م مستعيناً بمفهوم تكميم الطاقة الذي وضعه العالم ماكس بلانك، وكنتيجة لتفسيره لهذه الظاهرة حاز على جائزة نوبل في الفيزياء عام 1921م. للإجابة عن ماهية الضوء، يمكن القول إنّ الضوء يُظهر سلوكاً موجياً في بعض الأحيان، وفي أحيان أخرى يُظهر سلوكاً خاصاً بالأجسام.

عادةً ما تُستخدَم كلمة ضوء للتعبير عن الإشعاع الكهرومغناطيسي الذي يمثل جزءاً ضيقاً من كامل الطيف الكهرومغناطيسي؛ هذا الجزء من الطيف الكهرومغناطيسي هو الجزء الذي يمكن للعين البشرية أن تدركه، وهو يتراوح بين الطول الموجي (700 nm) للضوء الأحمر والطول الموجي (400 nm) للضوء البنفسجيّ، وكل ما ينطبق على الطيف الكهرومغناطيسي من قوانين ينطبق أيضاً على هذا الجزء، وعلى الأرض تُعدّ الشمس أكبر مصدر للطيف الكهرومغناطيسي كاملاً، وبهذا يمكن استغلال ضوء الشمس في العديد من نشاطات الحياة اليومية.

2. طبيعة الضوء (Nature of Light)

يبدأ النموذج البسيط لموجة الضوء بشعاع (خط مستقيم) يوضح اتجاه انتقال الضوء. وتمثل الأسهم القصيرة التي على طول الشعاع، والمتعامدة (زاوية قائمة) عليه، المجال الكهربائي. وتشير بعض الأسهم إلى الأعلى من الشعاع والأسهم الأخرى تشير إلى الأسفل منه. وهي تختلف في الطول، لذلك فإن النمط الكلي لرؤوس الأسهم يُشْبه الموجة والأسهم التي تمثل المجال المغناطيسي هي أيضًا تشبه الموجة ولكن هذه الأسهم تصنع زاوية قائمة مع الأسهم التي تمثل المجال الكهربائي (الشكل (1)). وهذا النمط يتحرك خلال الشعاع وهو الضوء. أثبتت التجارب في بداية القرن العشرين أن العلماء في النهاية تركوا فكرة الأثير القديمة. وأدركوا أن موجة الضوء، بوصفها نمطًا منتظمًا من المجالات الكهربائية والمغنطيسية، يمكن أن تنتقل عبر الفضاء.

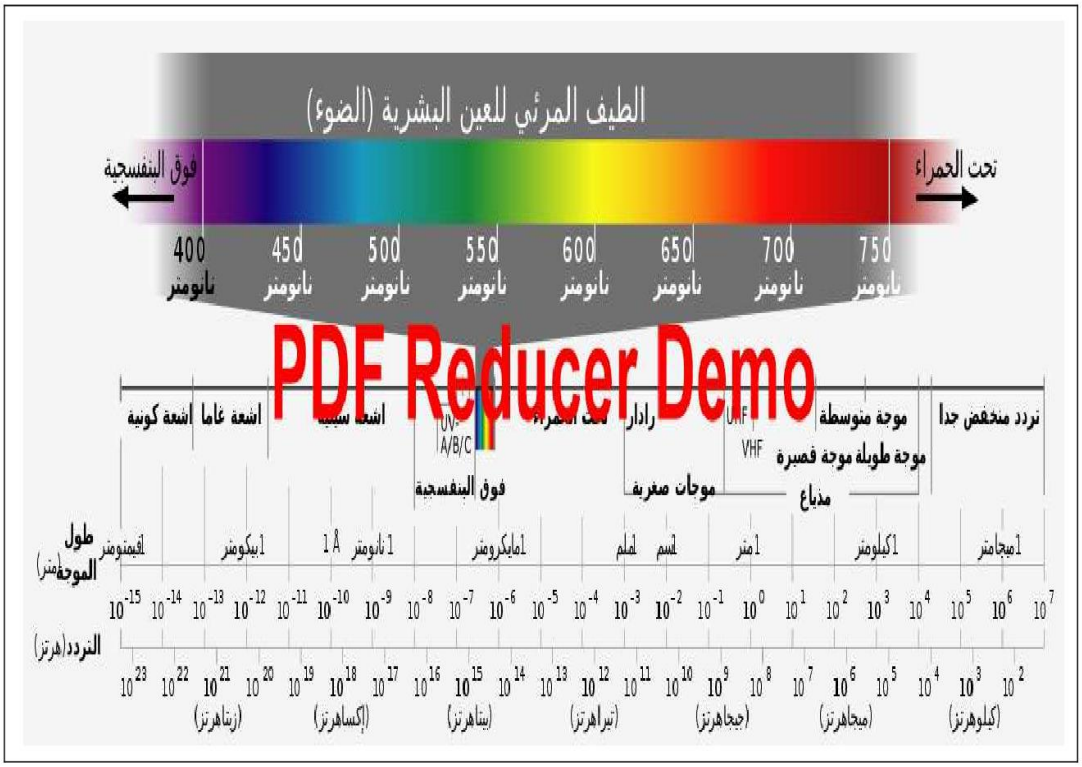


الشكل (1) : موجة يتغير فيها المجال الكهربي E متعامدا على موجة يتغير فيها مجال مغناطيسي B وتنتشر الموجة في الاتجاه Z العمودي على المستوي الذي يتغير فيه المجالان

3. الطيف الكهرومغناطيسي (Electromagnetic Spectrum)

يعتبر الضوء المرئي إشعاع كهرومغناطيسي ينتج من أي مصدر تنتقل فيه الالكترونات بين المدارات الذرية المختلفة فينتج فرق طاقة يولد الطاقة الضوئية ، وهو جزء من طيف واسع من الاشعاع الكهرومغناطيسي الذي يبدأ من الموجات الراديوية (ذات الطول الموجي الطويل والطاقة والتردد الواطئ) ، انتهاءا بالاشعة الكونية (ذات الطول الموجي القصير والطاقة والتردد العالي) . بينما يتكون الضوء المرئي من طيف جزئي خاص به يبدأ من الضوء الاحمر (ذو الطول الموجي الطويل والطاقة والتردد الواطئ) ، وينتهي بالضوء البنفسجي (ذو الطول الموجي القصير والطاقة والتردد العالي) كما في الشكل (2).

ان العين البشرية قادرة على تحسس الضوء المرئي فقط وتمييز الالوان المختلفة عن طريق مستقبلات خاصة في شبكية العين (العصيات والمخاريط) لتتحلل الالوان في الدماغ عن طريق العصب البصري. بينما لا يمكن للعين البشرية تحسس باقي الطيف الكهرومغناطيسي بسبب محدودية مدى تحسس الاطوال الموجية لها ، لكن هناك بعض الحيوانات يمكنها ان تتحسس بعض الطيف الكهرومغناطيسي فضلا عن الضوء المرئي.



الشكل (2) :الطيف الكهرومغناطيسي

4. سرعة الضوء (Speed of Light)

تعتبر سرعة الضوء في الفراغ أسرع شيء في الكون حسب احدث النظريات العلمية (النظرية النسبية لاينشتاين) وهي نفسها لكل الطيف الكهرومغناطيسي، وتختلف سرعة الضوء في الاوساط المختلفة نتيجة اختلاف الخواص البصرية لكل وسط ، وتحسب سرعة الضوء من خلال القانون التالي:

$$c = f\lambda \quad \ldots\ldots \quad (1)$$

حيث (c) هي سرعة الضوء في الفراغ وهي قيمة ثابتة ($3x10^8$ m/sec) ، (f) هو تردد الضوء (عدد ذبذبات الموجة الضوئية في وحدة الزمن ويقاس بالهيرتز (Hertz)) ، (λ) هو الطول الموجي (المسافة التي تقطعها الموجة الضوئية حتى تعيد نفسها بنفس النمط ويقاس بالمتر او أجزاء المتر) . تعتبر سرعة الضوء من الثوابت الفيزيائية المهمة التي تدخل في

كثير من العلاقات المهمة المتعلقة بالبصريات والطاقة وعلاقتها بالكتلة ولعل أهم هذه العلاقات هي معادلة تكافؤ الطاقة والكتلة لاينشتاين ($E = Mc^2$).

5. الفوتون (The Photon)

اقترح العالم الفيزيائي الألماني ألبرت أينشتاين في سنة 1905 نموذجًا للضوء، وهو مفيد تمامًا مثل النموذج الموجي. يتصرف الضوء في بعض التجارب كما لو أنه جسيمات، وتسمّي هذا النوع من الجسيمات الآن الفوتونات .وفي نموذج أينشتاين فإن شعاع الضوء هو المسار الذي يسلكه الفوتون. فمثلاً عندما يرسل المصباح شعاعًا من الضوء خلال غرفة مظلمة فإن شعاع الضوء يتألف من عدد كبير من الفوتونات، وكل واحد منها يسير في خط مستقيم. فهل الضوء موجات أو جسيمات؟ فيما يبدو، لا يمكن أن يكون النموذجان معًا، لأن النموذجين مختلفان تمامًا. وأفضل إجابة أن الضوء لا هذا ولا ذاك. ويتصرف الضوء في بعض التجارب كما لو أنه موجة، وفي بعضها الآخر كما لو أنه جسيمات. وللضوء في الفراغ سرعة واحدة، بعكس الأنواع الأخرى من الموجات، وهي أقصى سرعة ممكنة لأي شيء. ولا يفهم العلماء كنه هذه الحقيقة. والحقيقة التي تنص على أن الضوء في الفراغ يملك سرعة واحدة وهي واحدة من أسس النظرية النسبية لأينشتاين.

ان الفوتون هو جسيم متناهي في الصغر (كتلته السكونية تساوي صفر) له طاقة وزخم وترافقه موجة كهرومغناطيسية (حسب المفاهيم الحديثة) ، ويعتبر كم الطاقة الكهرومغناطيسية أي هو العنصر المكون لكل الطيف الكهرومغناطيسي فضلا على الضوء المرئي ، وتحسب طاقة الفوتون عن طريق العلاقة :

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \qquad \dots\dots (2)$$

6. معامل الانكسار (Refraction Index)

هي نسبة سرعة الضوء في الفراغ إلى سرعته في هذا الوسط. وهو معامل يبين مدى تأثر المادة بالامواج الكهرومغناطيسية. ليس لمعامل الانكسار وحدة تميزه. كلما ازدادت الكثافة البصرية زاد معامل الانكسار للمادة. معامل الانكسار يعتمد على طول الموجة ويمكن مشاهدة ذلك في المنشور الزجاجي . ان زيادة معامل الانكسار يؤدي إلى نقصان سرعة الضوء c في الوسط.

على العموم، فإنّ معامل الانكسار غير ثابت ويعتمد على طول الموجة الكهرومغناطيسيّة. بالإضافة، فلبعض المواد يختلف معامل الانكسار وفق اتجاه تقدّم الموجة الكهرومغناطيسية في المادة.

معظم المواد ذات الشفافية للضوء المرئي لديها معاملات انكسار مابين (2-1)، والغازات عند الضغط الجوي القياسي لديها معامل انكسار مقارب للواحد بسبب كثافتها المنخفضة، تقريباً جميع الجوامد والسوائل لديها معامل انكسار أكبر من (1.3) ويستثنى من ذلك الهلام الهوائي. ان الماس من أعلى المواد في قيمة معامل الانكسار(2.42) . أعظم المواد البلاستيكية لديها معاملات انكسار

مابين (1.7 – 1.3)، ولكن بعض البوليمرات ذات معامل الانكسار الكبير تصل قيمة معامل انكسارها إلى (1.76) للأشعة تحت الحمراء . ان مفهوم معامل الانكسار هو مفهوم نسبي متعلق بالطول الموجي ، فتكون المادة شفافة (اي تسمح بمرور الاشعاع خلالها) لاطوال موجية معينه ، فنحن حين نتحدث عن الزجاج او البلاستك باعتبارها مواد شفافة نقصد للاطوال الموجية لضوء المرئي، بينما الجرمانيوم يعتبر غير شفاف في مدى الضوء المرئي ولدية معامل انكسار حوالي (4) ، في المقابل يكون الجرمانيوم شفاف لمدى الاشعة تحت الحمراء مما يجعله مادة مهمة لصناعة الخلايا الشمسية. يحسب معامل الانكسار من خلال العلاقة التالية :

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

حيث (v) هي سرعة الضوء في الوسط.

7. جبهة الموجة ومبدأ هوغنز (Wave Front &Huygens Principle)

ان مفهوم جبهة الموجة يشير الى المحل الهندسي للنقاط التي لها نفس الطور (اي نفس نسق الحركة للموجة الكهرومغناطيسية). مثال على ذلك موجات الماء المتكونة عند سقوط حجر في بركة الماء الراكدة ، فتكون جبهة الموجة على شكل دوائر متحدة المركز يكون مركزها نقطة سقوط الحجر. لكن في الموجة الضوئية تكون الصورة اعقد من ذلك ، لكن لا بأس بهذا التشبيه اذا كان المصدر نقطي قريب فتنبعث موجات ذات شكل كروي (جبهة الموجة كروية)، اما اذا ابتعدنا عن المصدر فيقل تكور جبهة الموجة الى ان تكون مستوية (تقريبا) في المصادر البعيدة جدا (مثل الشمس).

يعتبر مبدأ هوغنز طريقة هندسية لايجاد شكل جبهة الموجة في لحظة زمنية ما اذا كان شكلها معلوم في لحظة اخرى . حيث افترض ان **كل نقطة في جبهة الموجة تعتبر مصدر لتوليد موجات ثانوية تنتشر خارج مراكزها وبنفس اتجاه الموجة الاصلية** . ان هذا المبدأ يسمح بتفسير عدة ظواهر فيزاوية مهمة مثل الانعكاس والانكسار .

8. مسائل الفصل الاول (Problems)

1) ما هي سرعة الضوء في الزجاج (معامل انكسار الزجاج 1.5) لطول موجي مقداره في الفراغ (500 nm) ، احسب ايضا الطول الموجي للضوء المستخدم في الزجاج .

a) Velocity of light in vacuum : $c = 3x10^8\ m/s$

Velocity of light in glass

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3x10^8}{1.5} = 2x10^8\ m/s$$

b) $$n = \frac{c}{v} = \frac{f\lambda_0}{f\lambda_g} = \frac{\lambda_0}{\lambda_g}$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{n} = \frac{500x10^{-9}m}{1.5} = 333.3x10^{-9}\ m$$

2) قطعة زجاجية سمكها (3 mm) ومعامل انكسارها (1.5) . وضعت بين شاشة ومصدر ضوئي ذي طول موجي (600 nm) (في الفراغ) . المسافة بين المصدر والشاشة هي (3 cm) . كم عدد الموجات الضوئية بين المصدر والشاشة ؟

Number of waves:

$$N = \frac{d}{\lambda} = \frac{d_0}{\lambda_0} + \frac{d_g}{\lambda_g} \quad , \quad \lambda_g = \frac{\lambda_0}{n}$$

$$N = \frac{(30-3)x10^{-3}m}{600x10^{-9}m} + \frac{3x10^{-3}m}{\frac{600x10^{-9}m}{1.5}}$$

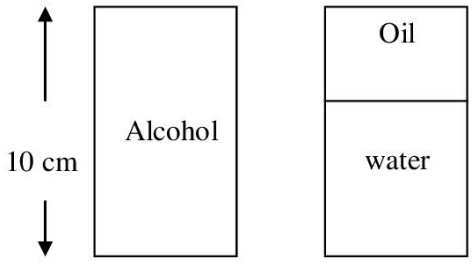
$$N = \frac{27x10^{-3}}{600x10^{-9}} + \frac{4.5x10^{-3}}{600x10^{-9}} = 52.5\ waves$$

3) اناء زجاجي عمقه (10 cm) مملوء بالكحول (n_{ch}=1.361) ، واناء اخر مماثل له يحتوي على طبقة من الماء (n_w=1.333) وطبقة اخرى طافية من الزيت (n_{oil}=1.473) ، بحث اصبح الاناء الثاني ممتلئ . عدد الموجات الضوئية النابعة من مصدر عمودي والمارة خلال الانائين هو نفس العدد . ما هو سمك طبقة الزيت؟

$$m = \frac{d_{ch}}{\lambda_{ch}} = \frac{d_w}{\lambda_w} + \frac{d_{oil}}{\lambda_{oil}}$$

$$\frac{d_{ch}}{\frac{\lambda_0}{n_{ch}}} = \frac{d_w}{\frac{\lambda_0}{n_w}} + \frac{d_{oil}}{\frac{\lambda_0}{n_{oil}}}$$

$$\frac{10}{\frac{\lambda_0}{1.361}} = \frac{10 - d_{oil}}{\frac{\lambda_0}{1.333}} + \frac{d_{oil}}{\frac{\lambda_0}{1.473}}$$



$$13.61 = 13.33 - 1.333\, d_{oil} + 1.473\, d_{oil}$$

$$0.28 = 0.14\, d_{oil} \implies d_{oil} = \frac{0.28}{0.14} = 2\ cm$$

4) جد النسبة بين سمك طبقة الماء (n_w=1.333) الى سمك طبقة الزيت (n_{oil}=1.473) اذا كان الزمن المستغرق لعبور الضوء خلال الطبقتين متساوي .

$$\frac{d_w}{d_{oil}} = ?$$

$$t_w = t_{oil} \implies \frac{d_w}{v_w} = \frac{d_{oil}}{v_{oil}}$$

$$\frac{d_w}{\frac{c}{n_w}} = \frac{d_{oil}}{\frac{c}{n_{oil}}} \implies \frac{d_w}{d_{oil}} = \frac{n_{oil}}{n_w} = \frac{1.473}{1.333} = 1.1$$

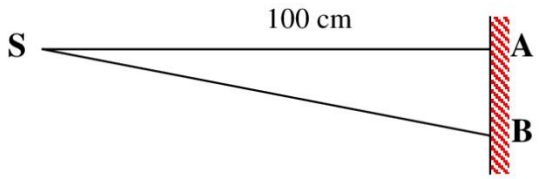
5) قطعة زجاجية طولها (3 m) ومعامل انكسارها (n= 1.5) . نبضتان ضوئيتان متزامنتين انطلقتا معا في نفس الاتجاه ، واحدة خلال الزجاج والثانية خلال الفراغ وقطعتا نفس المسافة . ما هو الفرق الزمني بين النبضتين لتصل الى المراقب ؟

$$t_{air} = \frac{d_{air}}{v_{air}} = \frac{d_{air}}{c} = \frac{3\ m}{3x10^8} = 1x10^{-8}\ sec$$

$$t_g = \frac{d_g}{v_g} = \frac{d_g}{\frac{c}{n_g}} = \frac{3\ m}{\frac{3x10^8}{1.5}} = 1.5x10^{-8}\ sec$$

$$t = t_g - t_{air} = (1.5 - 1)x10^{-8} = 0.5x10^{-8}$$

6) مصدر نقطي (S) يبعث ضوء ذو طول موجي (500 nm) في الهواء . (A , B) نقطتان على شاشة بينهما مسافة (1 cm) ، والمسافة بين الشاشة والمصدر (100 cm) . (a) ما هو الفرق بين عدد الموجات الضوئية بين المسار (SA) والمسار (SB) ؟ (b) وضعت شريحة زجاجية (n=1.5) في المسار (SA) ، ما هو سمك الشريحة اللازم لجعل عدد الموجات في المسارين متساوي ؟



a) $SB = \sqrt{(SA)^2 + (AB)^2} = \sqrt{100^2 + 1^2} = 100.005\ cm$

$$m_{SB} = \frac{d}{\lambda} = \frac{100.005x10^{-2}}{500x10^{-9}} = 0.20001x10^{7} = 20001x10^{2}$$

$$m_{SA} = \frac{100x10^{-2}}{500x10^{-9}} = 20000x10^{2}$$

$$m_{SB} - m_{SA} = 20001x10^{2} - 20000x10^{2} = 1x10^{2} = 100$$

b) $m_{SB} = m_{SA}$

$$\frac{d_{SB}}{\lambda_{SB}} = \frac{d_{SA}}{\lambda_{SA}} \rightarrow \frac{d_{SB}}{\lambda_{SB}} = \frac{d_{SA} - d_g}{\lambda_{SA}} + \frac{d_g}{\frac{\lambda_o}{n_g}}$$

$$\frac{100.005x10^{-2}}{500x10^{-9}} = \frac{100x10^{-2} - d_g}{500x10^{-9}} + \frac{d_g n_g}{500x10^{-9}}$$

$$100.005 = 100 - d_g + 1.5\ d_g$$

$$0.005 = 0.5\ d_g$$

$$d_g = \frac{0.005}{0.5} = 10^{-2} cm$$

1. المقدمة (Introduction)

عند سقوط الضوء على الحد الفاصل بين وسطين مختلفين بالكثافة البصرية فان جزء من هذا الضوء ينعكس والجزء الأخر ينكسر والجزء الأخير يمتص ، معتمدا على نوع الوسطين وطبيعة السطح الفاصل بينهما . في هذا الفصل سوف نتحدث على الانعكاس والانكسار لكونه يحدث للجزء الاكبر من الضوء بالنسبة للمواد العازلة الشفافة ، ويهمل الامتصاص لكونه قليل النسبة في هذه المواد ، بينما تزيد نسبة الضوء الممتص في المعادن التي ليست محل دراستنا في هذا الفصل.

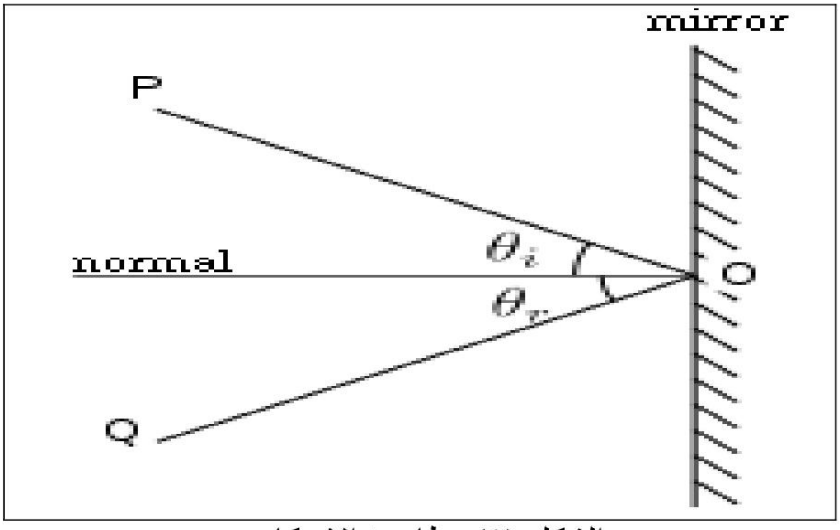
2. مبدأ فيرمات (Fermat's Principle)

ينص مبدأ فيرمات على انه **عند انتقال الضوء من نقطة الى نقطة اخرى في وسط معين فانه يسلك المسار الذي يحتاج الى اقل زمن ممكن ، والمسار الذي يحتاج الى اقل زمن هو المسار الاقصر مسافة والذي هو الخط المستقيم .**

3. الانعكاس (Reflection)

الانعكاس هو تغير اتجاه موجة ضوئية ساقطة على سطح عاكس (الشكل (1)). ينص قانون الانعكاس على أن زاوية سقوط الشعاع على السطح العاكس تكون مساوية لزاوية الانعكاس. ويوضح الشكل تعريف تلك الزاويتين ، حيث تقاس كل زاوية منهما بالنسبة إلى العمود المقام على السطح. الشعاع الساقط على المرآة هو PO والشعاع المرتد (المنعكس) من المرآة هو OQ فتكون **زاوية السقوط (θ_i) تساوي زاوية الانعكاس (θ_r)** . كذلك هنالك قانون ثاني للانعكاس ينص على **ان الشعاع الساقط والشعاع المنعكس والعمود المقام يقعون جميعا في مستوي واحد**. في حال سُقوط الشّعاع الضَّوئيّ على سطحٍ أملس كان الانعكاس منتظمًا، أمّا إن سقط الشُّعاع على سطحٍ غير مصقولٍ؛ فإنّ الشُّعاع المنعكس ينتشر، أي أنّ زاوية السُّقوط لا تساوي زاوية الانعكاس، وفي هذه الحالة لا يُسمى انعكاسًا وإنّما انتشارًا للضّوء.

يتكون الضوء من موجات كهرومغناطيسية .كذلك ينطبق قانون الانعكاس أيضا على جميع أنواع الموجات الكهرومغناطيسية مثل الأشعة تحت الحمراء والأشعة فوق البنفسجية والأشعة السينية وأشعة كاما .



الشكل (1): ظاهرة الانعكاس

4. الانكسار (**refraction**)

انكسار الضوء هي ظاهرة فيزيائية عبرت عنها الفيزياء الكلاسيكية بأنها ظاهرة انحراف الشعاع الضوئي عن مساره عند عبوره السطح الفاصل بين وسطين شفافين مختلفين (الشكل (2)).كما أنها تغير في موجات الضوء ونظام الحركة التي تحدثها الموجات في الوسط المادي وجزيئات هذا الوسط فتحدث حركة ذات نظام معين تنتقل عبرها الطاقة وعندما تنتقل إلى وسط آخر مختلف في الكثافة فتغير الاتجاه بسبب تغير سرعتها وتتغير سرعة موجتها بسبب تقيد حركة الموجات في الوسط الأكبر كثافة فتبطأ سرعتها وزيادة الحرية في الانتقال عبر الوسط الأقل. وهو يحصل عند انتقال الموجة من وسط ذي معامل انكسار ما إلى وسط ذي معامل انكسار مختلف. ويحصل الانكسار عند الحد بين الوسطين. وعند الانكسار يتغير الطول الموجي ولكن التردد يبقى ثابتا. ومن الامثلة على الانكسار الموجي تغيّر اتجاه الضوء عند مروره عبر قطعة زجاجية. .

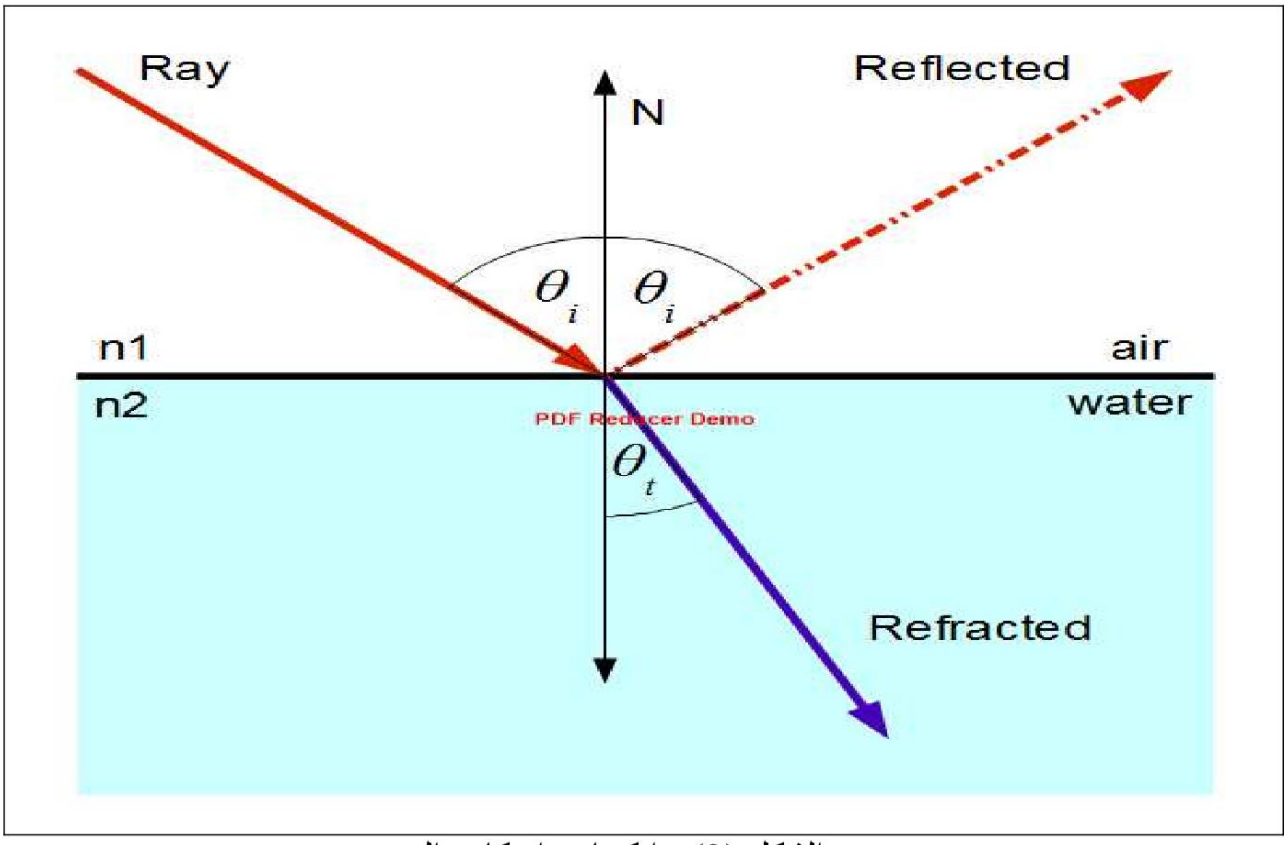
انكسار الضوء هي أحد الظواهر التي يتعرض لها الضوء. و توجد لهذه الظاهرة أهمية كبيرة لفهمنا الطبيعة التي تصادفنا كما أن لها استخدامات تقنية بأجهزة علمية عديدة. ان العلاقة التي تربط بين الضوء الساقط والضوء المنكسر وضعها العالم **سنيل (Snell)**. والذي اشار الى ان **النسبة بين جيب زاوية السقوط الى جيب زاوية الانكسار تساوي كمية ثابتة والتي تمثل النسبة بين معامل انكسار الوسط الثاني الى معامل انكسار الوسط الاول** ، ويسمى هذا النص بقانون الانكسار الاول (او قانون سنيل) وصيغته الرياضية هي :

$$\frac{sin\theta_i}{sin\theta_t} = \frac{n_2}{n_1} = constant \quad \dots\dots (1)$$

حيث (θ_i) تمثل زاوية السقوط وهي الزاوية المحصورة بين الشعاع الساقط والعمود المقام(N) ، (θ_t) تمثل زاوية الانكسار وهي الزاوية المحصورة بين الشعاع المنكسر والعمود المقام ، (n_2 , n_1) تمثل معاملات انكسار الوسطين الاول والثاني تواليا. ويمكن كتابة قانون سنيل بالصورة التالية:

$$n_1 sin\theta_i = n_2 sin\theta_t$$

يوجد قانون ثاني للانكسار يشير الى ان **الشعاع الساقط والشعاع المنكسر والعمود المقام يقعون جميعا في مستوي واحد.**



الشكل (2) : انكسار وانعكاس الضوء

5. الانعكاس الكلي والزاوية الحرجة (**Total reflection and critical angle**)

عند سقوط الضوء من وسط معامل انكساره كبير(n_1) الى وسط معامل انكساره صغير(n_2)، فستكون زاوية الانكسار اكبر من زاوية السقوط (والعكس صحيح) كما في الشكل (3) ، وبزيادة زاوية السقوط تزداد زاوية الانكسار الى ان تصل الى مقدار (90^o) اي يصبح الشعاع المنكسر بتماس مع الحد الفاصل بين الوسطين .حينها تسمى زاوي السقوط **بالزاوية الحرجة** (θ_{crt}) والتي تعرف بانها **زاوية السقوط التي تصنع زاوية انكسار مقدارها (90^o).** وبزيادة زاوية السقوط بمقدار

اكبر من الزاوية الحرجة فنحصل على ضوء منعكس كليا (اي لا يحدث انكسار في الوسط الثاني) وهذه الظاهرة تسمى **بالانعكاس الكلي** .

لحساب العلاقة الخاصة بالزاوية الحرجة ، تكون :

$$\theta_i = \theta_{crt} \quad \rightarrow \quad \theta_t = 90^o$$

$$\sin 90 = 1$$

بتطبيق قانون سنيل على المعطيات أعلاه يكون :

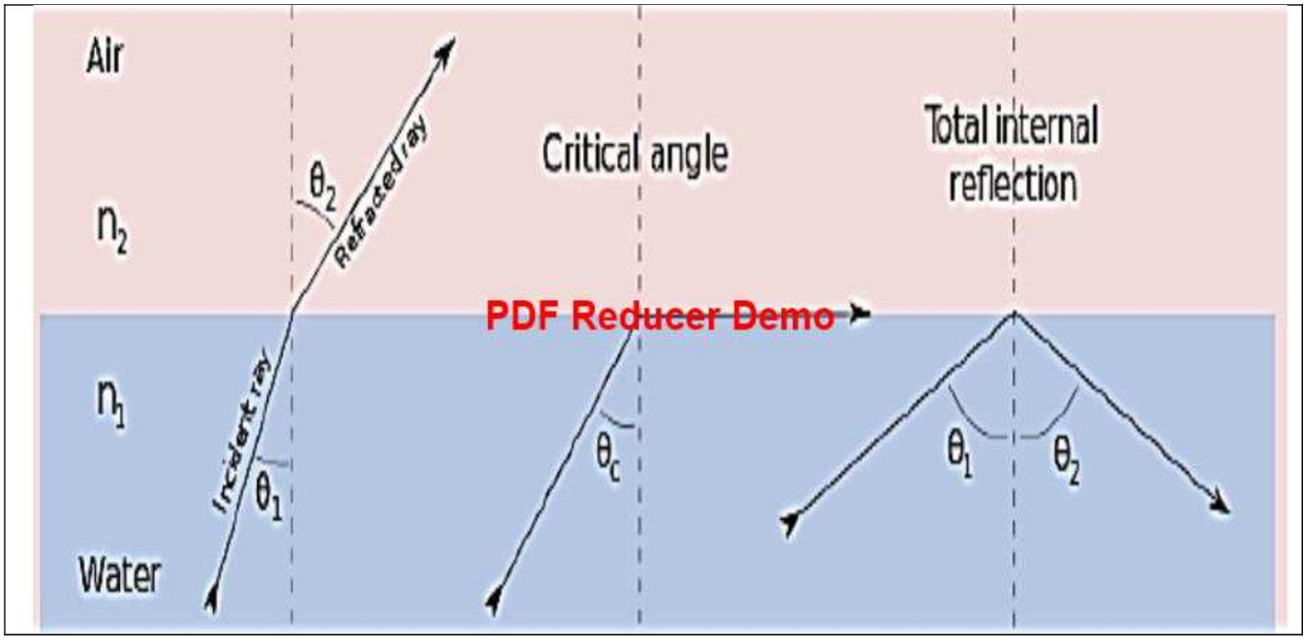
$$n_1 sin\theta_i = n_2 sin\theta_t \rightarrow \qquad n_1 sin\theta_{crt} = n_2 sin90$$

$$n_1 sin\theta_{crt} = n_2$$

$$sin\theta_{crt} = \frac{n_2}{n_1} \qquad \rightarrow \quad \theta_{crt} = sin^{-1}\frac{n_2}{n_1} \qquad \dots\dots(2)$$

مثال : اذا سقط شعاع من وسط زجاجي ذي معامل انكسار يبلغ (1.5) إلى وسط الهواء ذي معامل انكسار يساوي (1) فإن الزاوية الحرجة تساوي :

$$\theta_{crt} = sin^{-1}\frac{n_2}{n_1} = sin^{-1}\frac{1}{1.5} = 41.8^o$$



الشكل (3) : الزاوية الحرجة والانعكاس الكلي

6. الانكسار في الموشور (Refraction in Prism)

الموشور أو المنشور هو وسط شفاف مثل الزجاج، محدود بوجهين مستويين يتقاطعان حسب مستقيم يسمى حرف الموشور، قاعدة الموشور هي الوجه المقابل للحرف . زاوية الموشور (A) هي الزاوية المقابلة للقاعدة. ويرجع السبب في تحلل الضوء الأبيض إلى ألوانه المختلفة أثناء مروره داخل الموشور إلى اختلاف سرعة الضوء في مادة الموشور عن سرعته في الهواء. وهذا يؤدي إلى انكسار شعاع الضوء عند دخوله الوسط (الزجاج) بزوايا انكسار مختلفة، فيكون انكسار الضوء الأحمر أصغر من انكسار اللون الأزرق فينفصلا عن بعضهما (الشكل (4))، ويخرج الشعاعان الأحمر والأزرق من الموشور منفصلين. وحيث أن الضوء الأبيض مثل ضوء الشمس يحتوي على مجموعة من الألوان تشمل الاحمر والأصفر والبرتقالي والأخضر والأزرق والنيلي والبنفسجي ، فأن جميع تلك الألوان الضوئية تنفصل عن بعضها البعض بفعل الموشور، لاختلاف معامل انكسار كل لون في الموشور، ونحصل على ما يسمى الطيف الضوئي.

بفرض الموشور متماثل (على الأقل مثلث متساوي الساقين أو مثلث متساوي الأضلاع) وأن الشعاع الذي يحقق زاوية أقل انحراف يمر داخل الموشور موازياً لقاعدته ورأسه الزاوية ، يمكن اشتقاق العلاقة بدلالة معامل انكسار كل من الموشور (n_{prism}) والوسط خارج الموشور (n_o) (عادة الهواء).

لإثبات ذلك سنفرض الموشور الموجود في الشكل (4) . من الرسم نجد أن الشعاع الضوئي يسقط من D إلى A بزاوية (α) ومن ثم ينكسر داخل الموشور مكوناً زاوية الانكسار (β) وعليه يتحقق قانون الانكسار :

$$\frac{n_{prism}}{n_o} = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} \quad \dots\dots (3)$$

يمكن أيضا إثبات أن زاوية الانكسار(β) تشكل نصف زاوية رأس الموشور(σ) في المثلث متساو الساقين أي ($\beta = \frac{\sigma}{2}$) . أحد الطرق لإثبات الأمر تكمن في تماثل زوايا المثلث وبإسقاط عمود من رأسه والذي بدوره ينصف زاوية الرأس نكون قد صنعنا مثلثا قائم الزاوية، يقطع امتداد زاوية الانكسار (β) ، الطريقة الأخرى تكمن في أن امتداد الزاويتين المنكسرتين سيشكل مع زاوية الرأس شكل رباعي دائري (لاحتوائه زاويتين متقابلتين قامتين هما العمودان المظللان في الشكل). بالتالي يمكن كتابة العلاقة السابقة بالصورة :

$$\frac{n_{prism}}{n_o} = \frac{\sin\alpha}{\sin\frac{\sigma}{2}} \quad \dots\dots (4)$$

مرة أخرى يكمل الشعاع المنكسر طريقه داخل الموشور موازيا للقاعدة ويخرج من الجانب الآخر عند النقطة B وينكسر مرة أخرى ماراً بالنقطة C. نظراً لتماثل الموشور، يمكننا تخيل العلاقة بشكل عكسي وإثبات زاوية انكساره عند الخروج هي أيضاً بينما كانت قبل الخروج شريطة أن معامل

انكسار الوسط على الجانب الآخر هو نفسه معامل الانكسار على الطرف السابق قبل الدخول (أي أن الوسط خارج الموشور ثابت). نلاحظ أيضاً أن:

$$\theta = \alpha - \beta = \alpha - \frac{\sigma}{2}$$

وأن زاوية الانحراف الصغرى للموشور هي :

$$\delta = \theta + (\alpha - \beta) = \alpha - \frac{\sigma}{2} + \alpha - \frac{\sigma}{2}$$

أي أن:

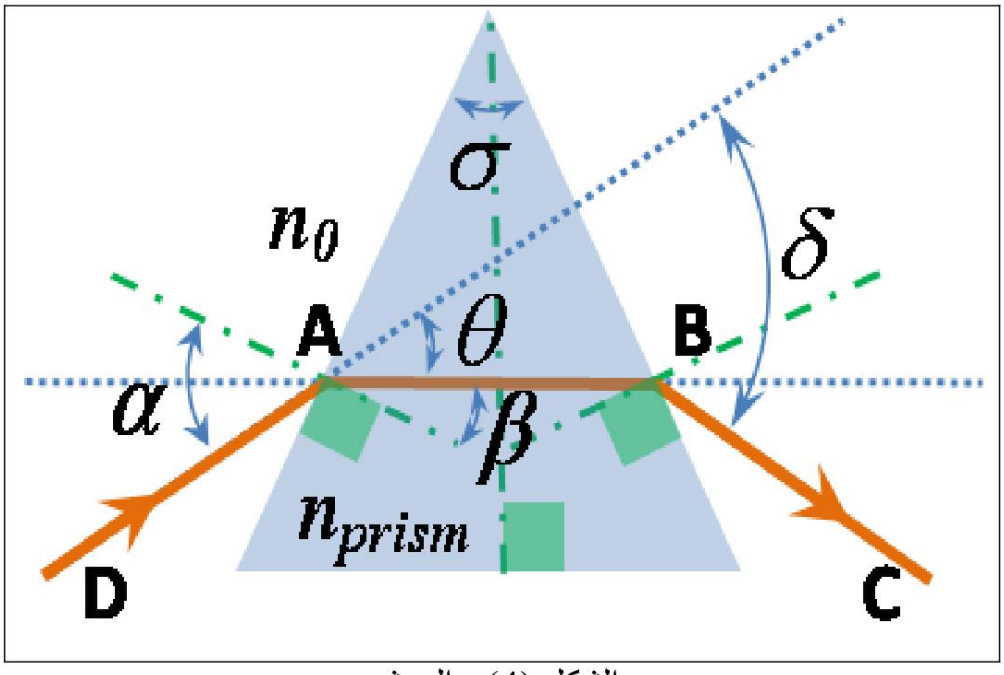
$$\delta = 2\alpha - \sigma$$

أو بعبارة أخرى :

$$\alpha = \frac{\delta + \sigma}{2}$$

بتعويض هذه القيمة في قانون الانكسار مرة أخرى نجد أن :

$$\frac{n_{prism}}{n_o} = \frac{\sin\frac{\delta + \sigma}{2}}{\sin\frac{\sigma}{2}} \quad \dots\dots (5)$$



الشكل (4) : الموشور

7. تحلل الضوء الأبيض (**Dispersion of White Light**)

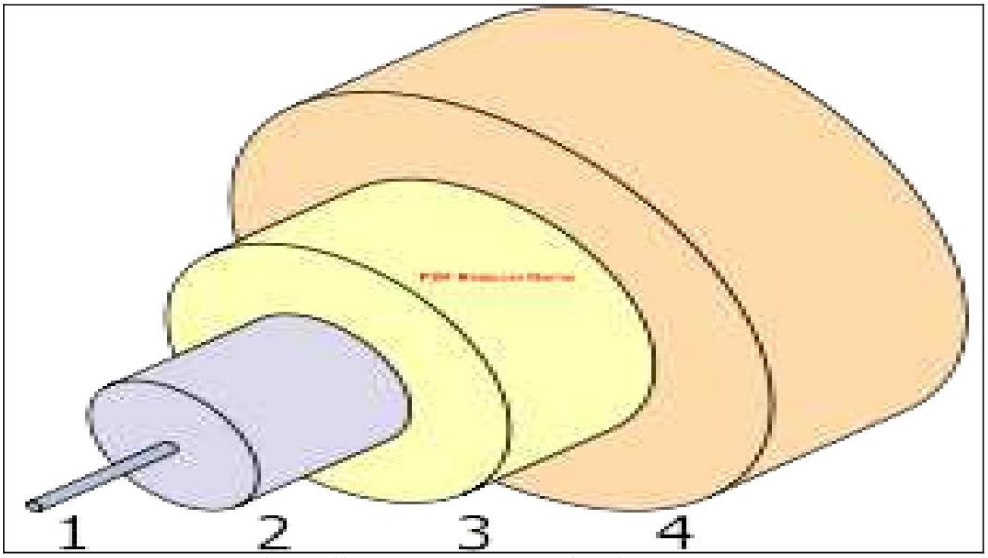
ينتقل الضّوء على تردُّدات وأطوال موجيّة مُختلفة، ولكلّ طولٍ موجيٍّ سُرعة معيّنة، تختلف عند انتقال الضّوء من وسط إلى آخر، فعلى سبيل المثال: تختلف سُرعة الضّوء في الفراغ عنها في الهواء، أو الماء، أو الزّجاج، وعند مرور الضّوء في وسط مُختلف، فإنَّ الأطوال الموجيّة المُختلفة ستنكسر بزوايا مُختلفة، وكلّما زاد الطول الموجي زادت زاوية انكسارها، والعكس صحيح، فالانكسار يعتمد على الطول الموجيّ للموجة، كما يعتمد على المادّة المُكوِّنة للوسط، وتكون هذه الانكسارات بزوايا مُختلفة لاطوال موجية مُختلفة، وهذا ما يُظهِر ألوان الطّيف المُختلفة مُرَتّبةً حسبَ الطّول الموجيّ: أحمر (أكبر طول موجيّ)، وبرتقاليّ، وأصفر، وأخضر، وأزرق، ونيلي، وبنفسجي، ويُمكن الحصول على هذه الألوان عن طريق جعل الضّوء ينكسر في موشور زجاجيّ عند مروره فيه.

إنَّ تشكُّل قوس قزح في أيّام العواصف المطريّة عندما يخترق ضوء الشّمس الغيوم المُمطِرة هو أحد الأمثلة على تحلُّل الضّوء الأبيض إلى الألوان المُكوِّنة له، ويحدُث ذلك بسبب انكسار ضوء الشّمس في قطرات المطر، وهذا شبيه بانكسار الضّوء في الموشور.

8. الألياف البصرية (**Fiber Optics**)

تصنع الألياف البصرية من زجاج خاصّ نقيّ للغاية، تكون طويلة ورفيعة ولا يتعدى سمكها سمك الشعرة. يجمع العديد من هذه الألياف في حزم داخل الكابلات البصرية، وتستخدم في نقل الإشارات الضوئية لمسافات بعيدة جداً. يقوم مبدأها على ظاهرة الانعكاس الكلي ، تتعدد استعمالات الألياف البصرية في كثير من المجالات اهما المجال الطبي والهندسي والعسكري والتدريسي. الألياف البصرية تتكون من اجزاء رئيسية هي (الشكل (5)) :

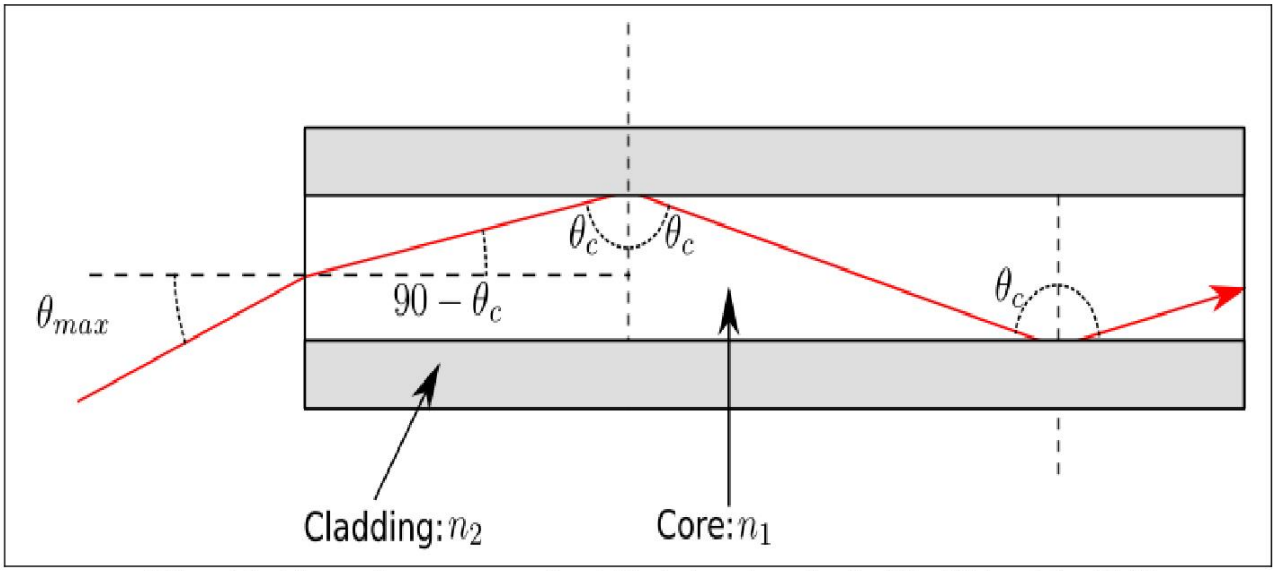
1. القلب (Core) هو عبارة عن زجاج رفيع (أسطواني) ينتقل فيه الضوء ويصنع عادة من السليكا المطعمة بالجرمانيوم.(Ge-Silica)
2. الغلاف (Cladding) مادة تحيط باللب الزجاجي (أسطوانة أخرى محيطة) وتعمل على حفظ الضوء في مركز الليف الضوئي وهي مصنوعة من السليكا، وذلك لكي يكون معامل انكسار القلب أكبر من معامل انكسار الغلاف، وهو الشرط المطلوب لحصول ظاهرة الانعكاس الكلي الذي هو أساس توجيه الضوء في الألياف الضوئية، إذ ينعكس الضوء كليا وبتكرار الانعكاس ينتشر الضوء داخل قلب الليف الضوئي ويصل إلى النهاية الأخرى لليف.
3. الغطاء الواقي (Buffer Coating) غلاف بلاستيكي يحمي الليف الضوئي من الرطوبة ويحميه من الضرر والكسر.
4. الغلاف الخارجي (jacket) هو غلاف خارجي يجمع مئات من هذه الألياف البصرية تصطف معا في حزمة لتكون الحبل البصري .



الشكل (5) : مكونات الليف البصري

عندما يدخل شعاع ضوئي بزاوية (θ) على الجدار بين القلب و الغلاف فإن جزء منه ينعكس بنفس الزاوية، اذا ما حسبنا الزاويتين انطلاقا من المستقيم العمودي على الجدار في نقطة الدخول، والجزء الآخر ينكسر بزاوية (ϕ) بالانتقال إلى الغلاف ذي معامل الانكسار(n_2) قادما من القلب ذي معامل الانكسار (n_1) حسب قانون سنيل ، تظهر هذه العلاقة أنه إذا كان للقلب معامل انكسار أكبر من معامل الغلاف فإننا قد نجد مجالا من قيم (θ) حيث لا يحدث انكسار (انعكاس كلي) وبالتالي عدم ضياع الشعاع وهي ما تعرف بالزاوية الحرجة.

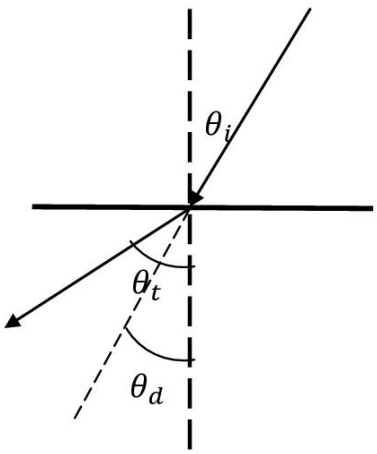
عندما ينتقل الضوء في وسط كثيف ضوئيا يسقط عند زاوية حادة اكبر من الزاوية الحرجة ، فينعكس الضوء كليا . هذا التأثير يستخدم في الالياف الضوئية للحد من انتشار الضوء في النواة .الضوء ينتقل من خلال نواة الالياف، من خلال الانعكاس ذهابا وايابا بين حدود النواة والغلاف. بشرط ان تكون زاوية السقوط أكبر من الزاوية الحرجة فتسمى في هذه الحالة زاوية القبول (acceptance angle)، والمجال المسموح للزوايا يسمى مخروط القبول. الضوء الذي يدخل الالياف ضمن مجال الزاوية الحرجة يستطيع التنقل اسفل الالياف دون ان يتشتت. جيب هذه الزاوية القصوى يسمى الفتحة العددية (numerical aperture NA) . الشكل (6) يوضح طريقة انتقال الشعاع الضوئي داخل الليف البصري عن طريق الانعكاس الكلي.



الشكل (6) : انتقال الشعاع الضوئي داخل الليف البصري عن طريق الانعكاس الكلي

مسائل الفصل الثاني (**problems**)

1) شعاع ضوئي يسقط على سطح مستوي يفصل بين وسطين شفافين معامل الانكسار لهما (n_1=1.6 , n_2=1.4) ، وكانت زاوية السقوط للشعاع هي (30^o) . احسب (a): زاوية الانكسار ، (b): زاوية الانحراف .



$$a)\ n_1 sin\theta_i = n_2 sin\theta_t$$

$$\sin\theta_t = \frac{n_1}{n_2}\sin\theta_i \ \rightarrow\ \sin\theta_t = \frac{1.6}{1.4}\sin 30 = 0.57$$

$$\theta_t = sin^{-1}(0.57) = 35^o$$

$$b)\ \theta_d = \theta_t - \theta_i = 35 - 30 = 5^o$$

2) مصدر نقطي يبعث شعاع ضوئي يسقط على الحد الفاصل بين وسط ماء ووسط هواء. احسب زاوية الانكسار للشعاع الذي يسقط بزاوية مقدارها (20^o) وزاوية (40^o) .

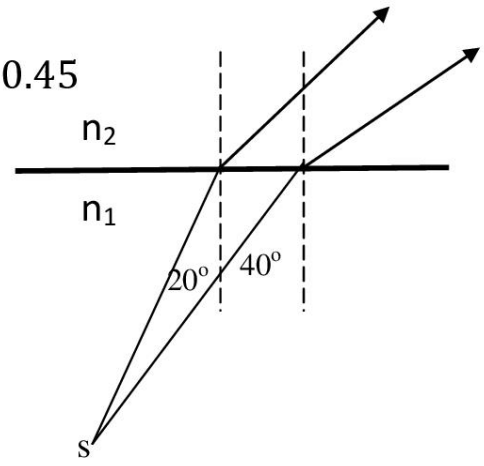
$$n_1 sin\theta_i = n_2 sin\theta_t$$

$$\sin\theta_t = \frac{n_1}{n_2}\sin\theta_i \rightarrow \sin\theta_t = \frac{1.33}{1}\sin 20 = 0.45$$

$$\theta_t = sin^{-1}(0.45) = 27^o$$

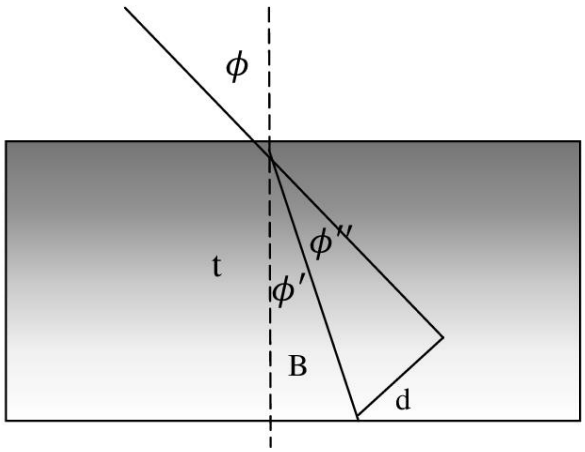
$$\sin\theta_t = \frac{1.33}{1}\sin 40 = 0.85$$

$$\theta_t = sin^{-1}(0.85) = 59^o$$



3) شعاع ضوئي يسقط بزاوية (ϕ) على سطح قطعة زجاجية ذات سمك مقداره (t) ، فاذا كانت زاوية النفاذ (الانكسار) هي (ϕ'). برهن أن الإزاحة الجانبية (d) بين الشعاع الساقط والشعاع النافذ تعطى بالعلاقة

$$d = t\,\frac{\sin(\phi-\phi')}{\cos\phi'}$$



$$\sin\phi'' = \frac{d}{B} \quad \ldots(1)$$

$$\phi'' = \phi-\phi'$$

$$cos\phi' = \frac{t}{B}$$

$$B = \frac{t}{cos\phi'} \quad \ldots(2)$$

sub. eq. (2) in eq. (1) :

$$d = t\,\frac{\sin(\phi-\phi')}{\cos\phi'}$$

4) في الشكل اعلاه ، شعاع ضوئي يسقط بزاوية مقدارها (60^o) من الهواء على السطح الزجاجي ذو السمك (2 cm) ومعامل انكسار (1.5) . جد الازاحة الجانبية بين الشعاع الساقط والشعاع النافذ .

$$n \sin\phi = n' \sin\phi'$$

$$\sin\phi' = \frac{n}{n'}\sin\phi \;\rightarrow\; \sin\phi' = \frac{1}{1.5}\sin 60 = 0.577$$

$$\phi' = sin^{-1}(0.577) = 35^o$$

$$d = t\,\frac{\sin(\phi - \phi')}{\cos\phi'} = 2 * \frac{\sin(60-35)}{\cos(35)}$$

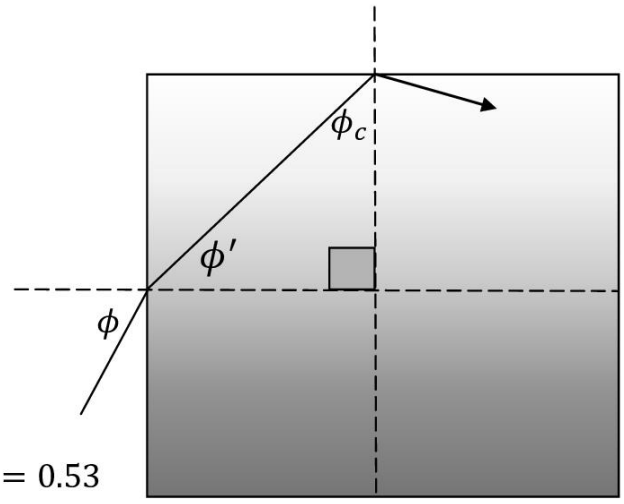
$$d = 1.03\ cm$$

5) شعاع ضوئي يسقط على الوجه العمودي الايسر لمكعب زجاجي (n_g=1.5) كما مبين في الشكل ادناه . المكعب مغمور بالماء الذي معامل انكساره (n_w=1.33) . ما هي اقصى زاوية سقوط يجب ان يسقط بها الضوء على المكعب ليحقق انعكاس داخلي كلي على السطح العلوي له ؟

$$\sin\phi_c = \frac{n'}{n} = \frac{1.33}{1.5} = 0.88$$

$$\phi_c = sin^{-1}(0.88) = 62^o$$

$$\phi' = 90 - \phi_c = 28^o$$



$$n \sin\phi = n' \sin\phi'$$

$$\sin\phi = \frac{n'}{n} sin\phi' = \frac{1.5}{1.33} sin28 = 0.53$$

$$\phi = sin^{-1}(0.53) = 32^o$$

6) موشور زاوية رأسه (60^o) ، وزاوية انحرافه الصغرى للون الازرق (43^o). جد زاوية الانكسار للوجه الاول ، وزاوية السقوط ، ومعامل انكسار الموشور
نفرض ان معامل انكسار الوسط المحيط بالموشور هو هواء ($n_o=1$)

$$\beta = \frac{\sigma}{2} = \frac{60}{2} = 30^o$$

$$\alpha = \frac{\delta + \sigma}{2} = \frac{43 + 60}{2} = 51.1\ ^o$$

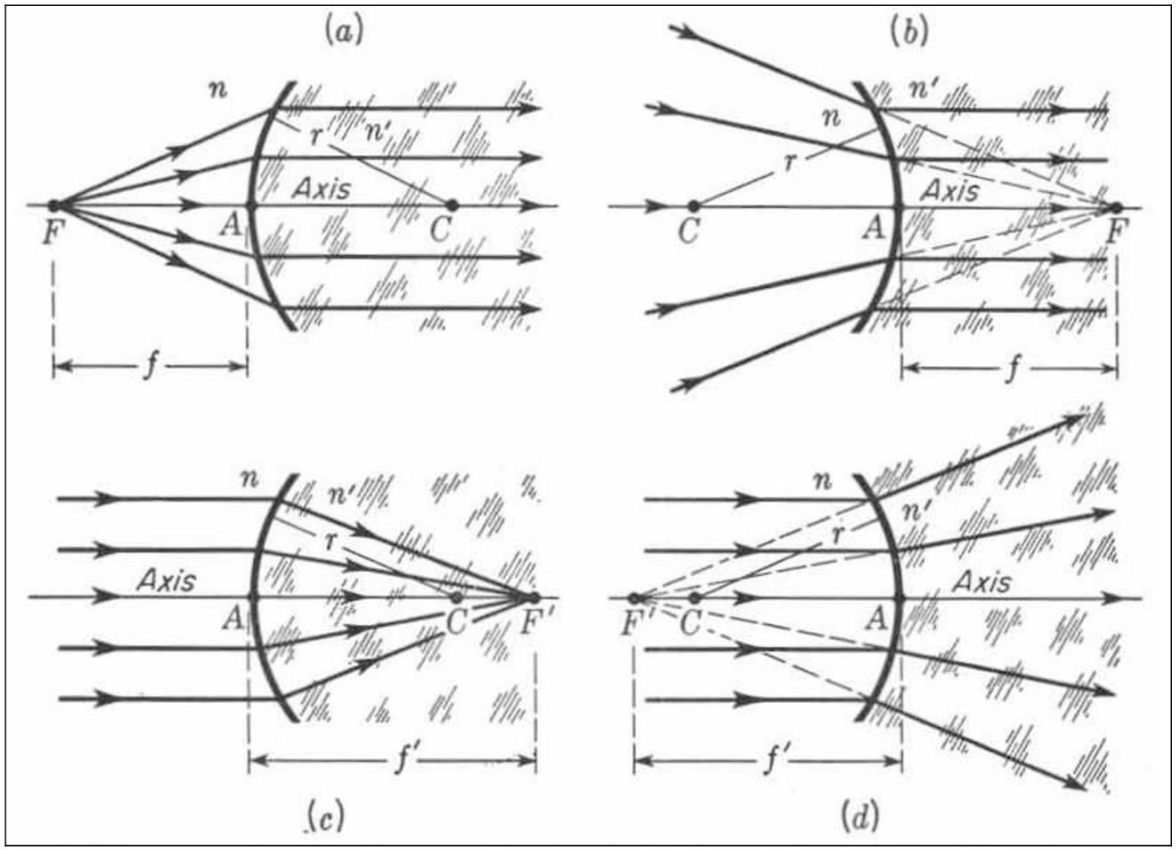
$$n_{prism} = \frac{\sin\frac{\delta + \sigma}{2}}{\sin\frac{\sigma}{2}} = \frac{\sin\frac{43 + 60}{2}}{\sin\frac{60}{2}} = \frac{\sin 51.5}{\sin 30} = \frac{0.78}{0.5} = 1.56$$

1) السطح الكروي (**Spherical Surface**)

السطح الكروي هو سطح منحني جزء من كرة . يسمى السطح الكروي محدب (convex surface) اذا كان مركز التكور له على اليمين ، ويسمى السطح الكروي مقعر(concave surface) اذا كان مركز التكور له على اليسار كما في الشكل (1) .

السطح الكروي الذي يفصل وسطين شفافين له خاصية تجميع او تفريق الاشعة الضوئية المنكسره عليه نتيجة قوانين الانكسار ، وتطبيق قانون سنيل على السطح الكروي باستخدام العمود المقام على مماس النقطة التي يحدث فيها الانكسار وبهذه الطريقة ممكن معرفة اتجاه الشعاع بعد الانكسار .

ان استخدامات السطوح الكروية في البصريات يتضمن تكوين الصور (Image formation) ، وتركيز الاشعة (ray concentration) ، وتسديد الاشعة (ray collimation) ، وتنظيم الاستضاءة (illumination) . وسيقتصر الحديث في هذا الفصل على تكوين الصور الذي يعتبر من اهم وظائف السطوح الكروية .



الشكل (1) السطوح الكروية (a , c). المحدبة ، (b , d). المقعرة .

2) هندسة السطح الكروي (Geometrical of Spherical Surface)

لمعرفة طبيعة السطح الكروي وكيفية عمله في انكسار الضوء خلاله ، يجب معرفة مجموعة من النقاط والمستقيمات ذات العلاقة بهندسة السطح وتطبيق قانون الانكسار وعلاقته بموقع الجسم والصورة .

ان اهم خط مستقيم للسطح الكروي الذي ينصف السطح ويكون عمودي عليه هو **المحور البصري (axis)** ، وتسمى نقطة تقاطع المحور البصري مع السطح الكروي بنقطة **السمت (vertex)** ويرمز لها بالحرف (A) كما في الشكل (1) . بينما يشار الى نقطة مركز تكور السطح الكروي بالرمز (C) التي تقع على يمين السطح المحدب وعلى يسار السطح المقعر.

هناك نقطتان مهمتان تعرفان بنقطة البؤرة الاولية والثانوية (primary and secondary focal points) . نقطة البؤرة الاولية (F) هي نقطة محورية (تقع على المحور البصري) تمتاز بخاصية ان اي شعاع ضوئي صادر منها (السطح المحدب) او متجه اليها (سطح مقعر) يسير بعد الانكسار موازي للمحور البصري. اما نقطة البؤرة الثانوية (F') هي نقطة محورية (تقع على المحور البصري) تمتاز بخاصية ان اي شعاع ضوئي يسقط موازي للمحور البصري يسير بعد الانكسار نحوها (السطح المحدب) او كأنه صادر منها (سطح مقعر) . ان المسافة بين موقع البؤرة الأولية والسمت يسمى **البعد البؤري الاولي (primary focal length)** ويرمز له بالرمز (f) ، والمسافة بين موقع البؤرة الثانوية والسمت يسمى **البعد البؤري الثانوي (secondary focal length)** ويرمز له بالرمز (f') ، بينما يسمى المستوى العمودي على المحور البصري في نقطتي البؤرة الاولية والثانوية بالمستوى البؤري الأولي والثانوي (primary and secondary focal plane)على الترتيب.

3) تكوين الصور (Image Formation)

ان اهم الوظائف المستخدمة لها السطوح الكروية هي تكوين الصور ، ان تكوين الصور يتم عن طريق تجميع الاشعة الصادرة من الجسم (عن طريق الانعكاس او الانكسار) من خلال مرورها في السطح الكروي في نقاط معينة تمثل صورة للنقاط الاصلية للجسم تسمى **النقاط المترافقة (conjugate points) وهي زوج النقاط المتولدة من الجسم والصورة** . لتكوين نقاط مترافقة يجب على الاقل ايجاد **شعاعين متقاطعين** .

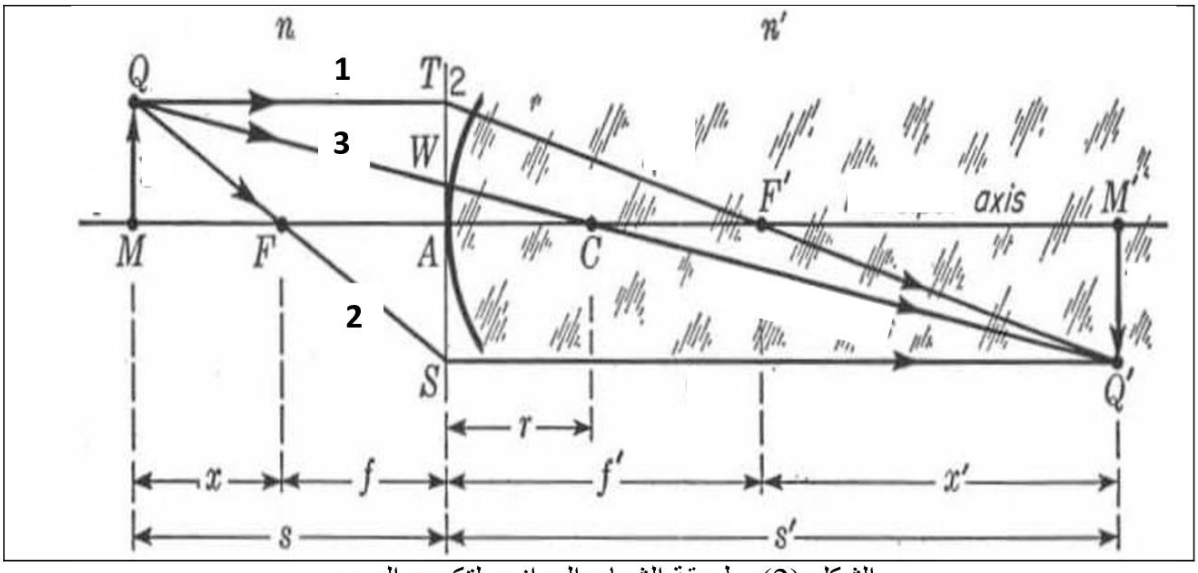
ان هناك طريقتين لايجاد صورة الجسم المتكونة في السطح الكروي هي طريقة الرسم (graphical method) والطريقة الرياضية (mathematical method) .

4) طريقة الرسم (Graphical Method)

هناك طريقتان للرسم يمكن من خلالها تكوين ثلاث اشعة متقاطعة بعد الانكسار من السطح الكروي لتكوين نقاط مترافقة ، هي **طريقة الشعاع الموازي (parallel ray method)** لتكوين الصور للاجسام الشاخصة (اجسام لها ابعاد) ، **وطريقة الشعاع المائل (oblique ray method)** لتكوين صور للاجسام النقطية (اجسام لا بعد لها) .

A. طريقة الشعاع الموازي (Parallel Ray Method)

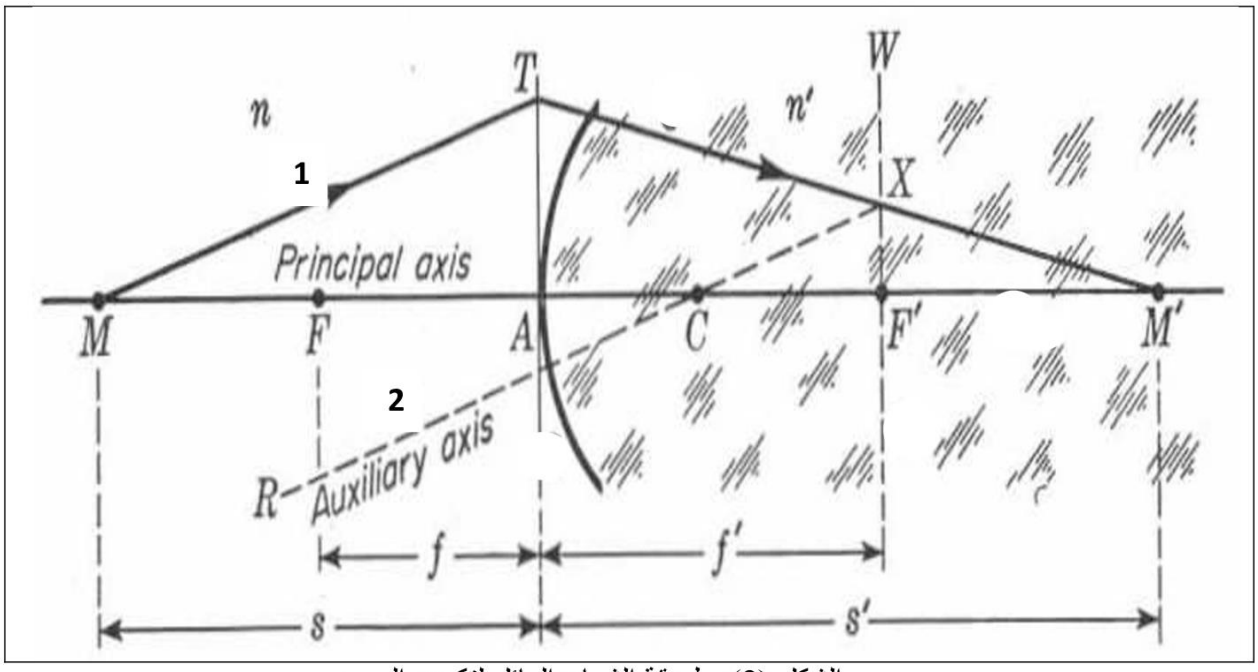
تستخدم هذه الطريقة لتكوين الصور للاجسام الشاخصة وكما موضح في الشكل (2) . نفرض ان الجسم (MQ) جسم محوري (واقع على المحور البصري) على يسار السطح الكروي المحدب يبعث ثلاثة أشعة (1,2,3) من النقطة (Q) . الشعاع (1) موازي للمحور البصري فيسير بعد الانكسار باتجاه البؤرة الثانوية (حسب تعريف البؤرة الثانوية) ، والشعاع (2) يمر بالبؤرة الاولية فيسير بعد الانكسار موازيا للمحور البصري (حسب تعريف البؤرة الاولية) ، والشعاع (3) يمر بصورة عمودية على السطح الكروي فيمر **بدون انكسار** نحو مركز تكور السطح ، يسمى الشعاع (3) **الشعاع الأساسي (principal ray) وهو الشعاع الذي يمر في مركز تكور السطح الكروي ولا يعاني أي انكسار أو يسير باستقامة (un deviated ray)** تتلاقى الاشعة الثلاثة في نقطة واحدة بعد الانكسار هي نقطة (Q') ، تسمى زوج النقاط (QQ') بالنقاط المترافقة . النقطة (Q') تمثل صورة لنقطة الجسم (Q) ، الجدير بالذكر ان تكوين النقاط المترافقة يتطلب وجود شعاعين متقاطعين أو اكثر. وبنفس الطريقة يمكن تكوين مجموعة من ازواج النقاط المترافقة للجسم والصورة فتتكون صورة مقلوبة (M'Q') للجسم (MQ) .



الشكل (2): طريقة الشعاع الموازي لتكوين الصور

B. طريقة الشعاع المائل (Oblique Ray Method)

تستخدم هذه الطريقة لتكوين الصور للاجسام النقطية وكما موضح في الشكل (3) . نفرض ان الجسم النقطي (M) هو جسم محوري يبعث شعاع مائل (1) ويقطع السطح الكروي في نقطة (T) . لمعرفة مسار الشعاع (1) بعد الانكسار على السطح الكروي نرسم شعاع اساسي (2) موازي له يمر في مركز تكور السطح الكروي بحيث يمر بدون انكسار ويتقاطع مع المستوى البؤري (W) في نقطة (X) ، نصل النقطتين (T,X) فيكون مسار الشعاع (1) بعد الانكسار ، ويمتد المستقيم (TX) الى ان يتقاطع مع المحور البصري في (M') التي تمثل صورة الجسم النقطي (M) .



الشكل (3): طريقة الشعاع المائل لتكوين الصور

5) الطريقة الرياضية (mathematical method)

يمكن إيجاد صفات الصورة المتكونة في السطوح الكروية رياضيا من خلال صيغة رياضية تسمى **صيغة كاوس (Gauss Formula)** وهي معادلة مشتقة من قانون سنيل وتطبيقه على السطح الكروي ومعالجته هندسيا من خلال حساب زاوية السقوط والانكسار ومعاملات الانكسار للوسطين ، تتمثل صيغة كاوس بالمعادلة التالية:

$$\frac{n}{s}+\frac{n'}{s'}=\frac{n'-n}{r} \quad \dots\dots(1)$$

حيث (s' ,s) يمثلان بعد الجسم والصورة على الترتيب ، (r) هو نصف قطر التكور للسطح الكروي ، (n', n) معامل انكسار الوسط الاول والثاني على الترتيب .

نستنتج من المعادلة (1) ان العلاقة بين بعد الجسم والصورة هي علاقة عكسية ، اي كلما اقترب الجسم من السطح الكروي كلما ابتعدت الصورة منه . الى ان يصل الجسم في نقطة البؤرة الاولية (s = f) فعندها تصبح الصورة في المالانهاية ($s' = \infty$) فتصبح المعادلة (1) :

$$\frac{n}{f} + \frac{n'}{\infty} = \frac{n' - n}{r}$$

$$\frac{n}{f} = \frac{n' - n}{r} \quad \ldots\ldots (2)$$

كذلك نستنتج انه كلما أبتعد الجسم عن السطح الكروي كلما اقتربت الصورة منه . الى ان يصل الجسم الى المالانهاية ($s = \infty$) فعندها تصبح الصورة في البؤرة الثانوية (s'= f ') فتصبح المعادلة (1) :

$$\frac{n}{\infty} + \frac{n'}{f'} = \frac{n' - n}{r}$$

$$\frac{n'}{f'} = \frac{n' - n}{r} \quad \ldots\ldots (3)$$

بتعويض المعادلتين (2,3) في المعادلة (1) تصبح الصيغة كالتالي :

$$\frac{n}{s} + \frac{n'}{s'} = \frac{n' - n}{r} = \frac{n}{f} = \frac{n'}{f'} \quad \ldots\ldots (4)$$

تسمى المعادلة (4) **بالصيغة العامة للسطوح الكروية أو صيغة كاوس العامة** .

6) التكبير الجانبي (**Lateral Magnification**)

يعرف التكبير الجانبي للسطح الكروي (m) بانه النسبة بين البعد المستعرض للصورة (y') الى البعد المستعرض للجسم (y) حسب المعادلة :

$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{\mathrm{ns}'}{\mathrm{n}'\mathrm{s}} = -\frac{s' - r}{s + r} \quad \ldots\ldots (5)$$

نستنتج من المعادلة (5) ان التكبير الجانبي يعتمد على بعد الجسم والصورة ومعامل انكسار الوسطين . من خلال الحد الاول للمعادلة (5) تكون الصورة مكبرة اذا كانت قيمة (m>1) ومصغرة اذا كانت قيمة (m<1) وبنفس حجم الجسم اذا كانت قيمة (m=1). كذلك تكون الصورة معتدلة (erect) اذا كانت اشارة التكبير موجبة (m=+)، والصورة مقلوبة (inversed) اذا كانت اشارة التكبير سالبة (m = -) .

7) قدرة السطح الكروي (**Power of Spherical Surface**)

تتمثل قدرة السطح الكروي (P) في قابلية السطح على تجميع (converging) او تفريق (diverging) الاشعة الضوئية الساقطة عليه ، وتحسب القدرة من خلال صيغة كاوس ايضا مع مراعاة استخدام الابعاد بالامتار (meter) لتظهر قيمة القدرة بوحدات خاصة تسمى **الديوبيتر(Diopeter)** ، وكما موضح في المعادلة :

$$P = \frac{n}{s} + \frac{n'}{s'} = \frac{n' - n}{r} = \frac{n}{f} = \frac{n'}{f'} \quad \ldots\ldots (5)$$

8) اصطلاح الإشارات (**convention of signs**)

ان الطريقة الهندسية المتبعة لمعرفة صفات الصورة في السطوح الكروية يجب فيها مراعاة اتجاه انتشار الاشعة الضوئية وموقع الجسم والصورة ونوع السطح (محدب او مقعر) ، لكي تتحقق النتائج الحسابية الصحيحة من خلال تطبيقها في صيغة كاوس ، فلذلك يجب الاتفاق على مجموعة فقرات تخص الاشارات الخاصة بالصيغة وكما يلي :

1) يرسم مسار الاشعة الضوئية من اليسار الى اليمين دائما .
2) اذا كان الجسم يقع على يسار السطح الكروي يعتبر الجسم حقيقي وبعده موجب (+ s) ، واذا كان الجسم على يمين السطح الكروي يعتبر الجسم خيالي وبعده سالب (- s) .
3) اذا كانت الصورة تقع على يمين السطح الكروي تعتبر الصورة حقيقية وبعدها موجب (+ s') ، واذا كانت الصورة على يسار السطح الكروي تعتبر الصورة خيالية وبعدها سالب (- s') .
4) اذا كان السطح الكروي محدب يكون نصف قطر تكوره موجب (+ r) ، واذا كان السطح الكروي مقعر يكون نصف قطر تكوره سالب (- r) .
5) يعتبر البعد البؤري الاولي والثانوي كمية موجبة ($+f, f'$) للسطح المحدب (سطح جامع للاشعة converging surface)، ويعتبر البعد البؤري الاولي والثانوي كمية سالبة ($-f, f'$) للسطح المقعر (سطح مفرق للاشعة diverging surface) اذا كان (n' > n) ، والعكس صحيح .

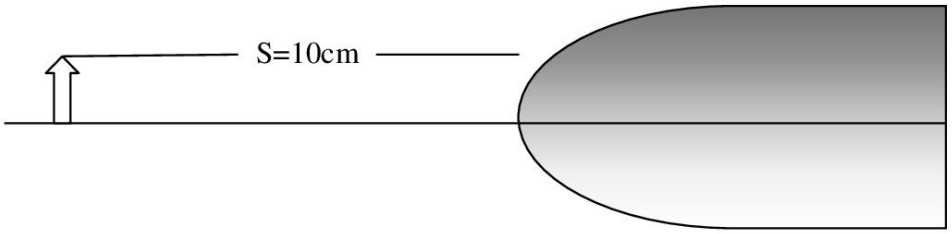
جدير بالذكر ان الصورة الحقيقية تنتج من تقاطع الاشعة الضوئية بعد الانكسار ويمكن إسقاطها على حاجز كما أسلفنا ، والصورة الخيالية تنتج من تقاطع امتدادات الاشعة الضوئية بعد الانكسار ولا يمكن إسقاطها على حاجز .

يعتبر في صفات الصورة المتكونة أربعة أمور هي:

- موقع الصورة (image position)، ويحسب من خلال قيمة (s')
- هل الصورة حقيقية ام خيالية (real or virtual) ، ويحسب من خلال إشارة (s')
- هل الصورة مكبرة ام مصغرة (magnified or minified) ، ويحسب من خلال قيمة (m)
- هل الصورة معتدلة ام مقلوبة (erect or inversed) ، ويحسب من خلال إشارة (m)

9) مسائل الفصل الثالث (**Problems**)

1) صقلت النهاية اليسرى لساق زجاجي معامل انكساره (n'=1.6) لتصبح سطح كروي محدب نصف قطر تكوره (3 cm) . جسم ارتفاعه (2 cm) موضوع في الهواء على يسار السطح المحدب بمسافة (10 cm) ، جد : (a) البعد البؤري الاولي والثانوي ، (b) قدرة السطح ، (c) صفات الصورة ، (d) ارتفاع الصورة .



$$\frac{n}{s}+\frac{n'}{s'}=\frac{n}{f}=\frac{n'}{f'}=\frac{n'-n}{r}$$

$$a)\ \frac{n}{f}=\frac{n'-n}{r}\ \rightarrow\ \frac{1}{f}=\frac{1.6-1}{3}\ \rightarrow\ f=\frac{3}{0.6}=5\ cm$$

$$\frac{n'}{f'}=\frac{n'-n}{r}\ \rightarrow\ \frac{1.6}{f'}=\frac{1.6-1}{3}\ \rightarrow\ f'=\frac{3*1.6}{0.6}=8\ cm$$

$$b)\ P=\frac{n'-n}{r}=\frac{1.6-1}{3*10^{-2}}=20\ D$$

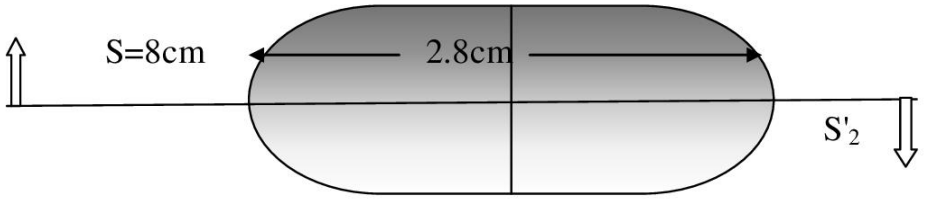
$$c)\ \frac{n}{s}+\frac{n'}{s'}=\frac{n}{f}\ \rightarrow\ \frac{1}{10}+\frac{1.6}{s'}=\frac{1}{5}\ \rightarrow\ \frac{1.6}{s'}=\frac{1}{5}-\frac{1}{10}\ \rightarrow\ s'=16cm$$

$$m=-\frac{s'-r}{s+r}=-\frac{16-3}{10+3}=-\frac{13}{13}=-1$$

صفات الصورة حقيقية (s' =+) تقع على يمين السمت بمسافة (16 cm) ، كذلك الصورة مقلوبة (m=-) وبنفس حجم الجسم (m=1) . لإيجاد ارتفاع الصورة (y') :

$$d)\ m=\frac{y'}{y}\ \Rightarrow\ -1=\frac{y'}{2}\ \Rightarrow\ y'=|-2|=2$$

2) ساق زجاجي طوله (2.8 cm) ومعامل انكساره (n'=1.6) له نهايتين على شكل سطحين كرويين بانصاف اقطار تكور (r_1=+2.4 cm)، (r_2=-2.4 cm) . وضع جسم على يسار السطح الاول بمسافة (8 cm) . جد: (a) البعد البؤري الاولي والثانوي لكل سطح ، (b) صفات الصورة النهائية .



$$\frac{n}{s}+\frac{n'}{s'}=\frac{n}{f}=\frac{n'}{f'}=\frac{n'-n}{r}$$

$$a)\ \frac{n_1}{f_1}=\frac{n_1{}'-n_1}{r_1}\ \rightarrow\ \frac{1}{f_1}=\frac{1.6-1}{2.4}\ \rightarrow\ f_1=\frac{2.4}{0.6}=4\ cm$$

$$\frac{n_1'}{f_1'}=\frac{n_1}{f_1}\ \rightarrow\ \frac{1.6}{f_1'}=\frac{1}{4}\ \rightarrow\ f_1{}'=6.4\ cm$$

$$\frac{n_2}{f_2}=\frac{n_2{}'-n_2}{r_2}\ \rightarrow\ \frac{1.6}{f_2}=\frac{1-1.6}{-2.4}=\frac{-0.6}{-2.4}\ \rightarrow\ f_2=6.4\ cm$$

$$\frac{n_2'}{f_2'}=\frac{n_2}{f_2}\ \rightarrow\ \frac{1}{f_2'}=\frac{1.6}{6.4}\ \rightarrow\ f_2{}'=4\ cm$$

$$b)\ \frac{n_1}{s_1}+\frac{n_1{}'}{s_1{}'}=\frac{n_1}{f_1}\ \rightarrow\ \frac{1}{8}+\frac{1.6}{s_1{}'}=\frac{1}{4}\ \rightarrow\ s_1'=12.8\ cm$$

نفرض ان الصورة المتكونة في السطح الاول هي جسم بالنسبة للسطح الثاني موقعه يحدد بالعلاقة :

$$s_2=d-s_1'=2.8-12.8=-10$$

$$\frac{n_2}{s_2}+\frac{n_2{}'}{s_2{}'}=\frac{n'_2}{f'_2}\ \rightarrow\ \frac{1.6}{-10}+\frac{1}{s_2{}'}=\frac{1}{4}\ \rightarrow\ s_2'=2.44\ cm$$

$$m=m_1*m_2=-\left(\frac{s_1'-r_1}{s_1+r_1}\right)*-\left(\frac{s_2'-r_2}{s_2+r_2}\right)=-\left(\frac{12.8-2.4}{8+2.4}\right)*-\left(\frac{2.44+2.4}{-10-2.4}\right)$$

$$m=0.39$$

الصورة النهائية حقيقية تبعد بمسافة (2.44 cm) عن سمت السطح الثاني ، والصورة النهائية مقلوبة مصغرة .

3) ساق زجاجي له معامل انكسار (n'=1.65) يمتلك سطح كروي محدب نصف قطر تكوره (2.5cm) . جد قدرة هذا السطح عند غمر الساق الزجاجي في : (a) الهواء (n_{air}=1) ، (b) الماء (n_w=1.33) ، (c) زيت (n_{oil}=1.65) ، (d) سائل عضوي (n_L=1.82) .

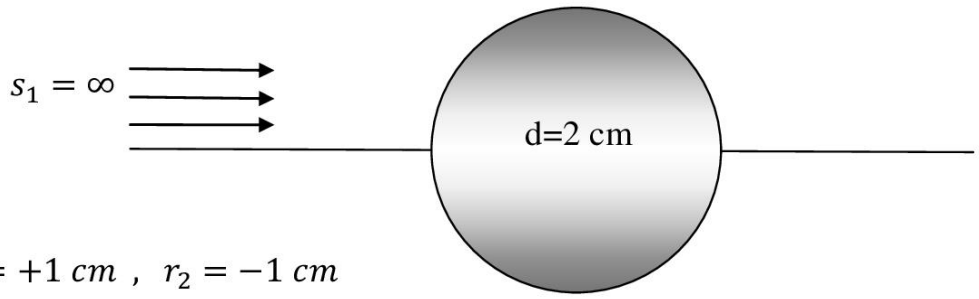
$$P_{air} = \frac{n' - n}{r} = \frac{1.65 - 1}{2.5 * 10^{-2}} = 26D$$

$$b)\ P_w = \frac{n' - n}{r} = \frac{1.65 - 1.33}{2.5 * 10^{-2}} = 12.6D$$

$$c)\ P_{oil} = \frac{n' - n}{r} = \frac{1.65 - 1.65}{2.5 * 10^{-2}} = 0\ D$$

$$d)\ P_L = \frac{n' - n}{r} = \frac{1.65 - 1.82}{2.5 * 10^{-2}} = -6.8D$$

4) أشعة ضوئية متوازية وموازية للمحور البصري لكرة بلاستيكية قطرها (2 cm) ومعامل انكسارها (n'=1.4). في اي نقطة تتجمع هذه الأشعة بعد انكسارها خلال الكرة ؟



$$r_1 = +1\ cm\ ,\ \ r_2 = -1\ cm$$

$$\frac{n_1}{s_1} + \frac{n_1'}{s_1'} = \frac{n'_1 - n_1}{r_1} \ \rightarrow\ \frac{1}{\infty} + \frac{1.4}{s_1'} = \frac{1.4 - 1}{1}$$

$$0 + \frac{1.4}{s_1'} = 0.4 \ \rightarrow\ s_1' = 3.5\ cm$$

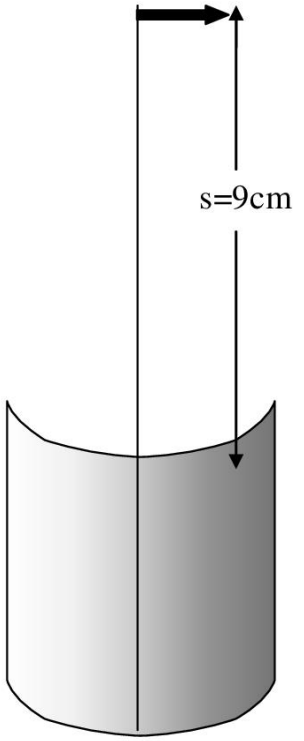
نفرض ان الصورة المتكونة في السطح الاول هي جسم بالنسبة للسطح الثاني موقعه يحدد بالعلاقة :

$$s_2 = d - s_1' = 2 - 3.5 = -1.5\ cm$$

$$\frac{n_2}{s_2} + \frac{n_2'}{s_2'} = \frac{n'_2 - n_2}{r_2} \ \rightarrow\ \frac{1.4}{-1.5} + \frac{1}{s_2'} = \frac{1 - 1.4}{-1} \ \rightarrow\ s_2' = 1.87\ cm$$

5) سطح ماء (n'=1.33) كروي الشكل (مقعر) يمتلك نصف قطر تكور (1.5 cm) . جسم صغير ارتفاعه (3 cm) موضوع فوق الماء بمسافة (9 cm) عن السمت . جد : (a) البعد البؤري الاولي والثانوي ، (b) قدرة السطح ، (c) صفات الصورة ، (d) ارتفاع الصورة .

$$P = \frac{n}{s} + \frac{n'}{s'} = \frac{n}{f} = \frac{n'}{f'} = \frac{n'-n}{r}$$



$$a)\ \frac{n}{f} = \frac{n'-n}{r} \rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1.33-1}{-1.5} \rightarrow f = -5\ cm$$

$$\frac{n\prime}{f\prime} = \frac{n}{f} \rightarrow \frac{1.33}{f\prime} = \frac{1}{-5} \rightarrow f' = -6.65\ cm$$

$$b)\ P = \frac{n}{f} = \frac{1}{-5 * 10^{-2}} = -20\ D$$

$$c)\ \frac{n}{s} + \frac{n'}{s'} = \frac{n}{f} \rightarrow \frac{1}{9} + \frac{1.33}{s'} = \frac{1}{-5} \rightarrow s' = -3.8\ cm$$

$$m = -\frac{s'-r}{s+r} = -\frac{-3.8+1.5}{9-1.5} = -\frac{-2.3}{7.5} = 0.3$$

الصورة خيالية تبعد بمسافة (3.8) فوق السمت ، كذلك الصورة معتدلة ومصغرة .

$$d)\ m = \frac{y'}{y} \Rightarrow 0.3 = \frac{y'}{3} \Rightarrow y' = 3 * 0.3 = 0.9\ cm$$

1. العدسة (The Lens)

العدسة جهاز بصري لها سطحي انكسار احدهما او كلاهما كروي الشكل ولسطحيهما نفس المحور الذي يسمى **محور العدسة (axis)**. يكون محور العدسة الخط المستقيم الذي يصل بين مركزي السطحين الكرويين وعمودياً على كلاهما. وطبقا لكيفية انكسار ومرور الضوء في العدسة ونوعية الصور الناتجة عنها، فهي توصف بأنها عدسة محدبة (لامة) أو مقعرة (مفرقة) .

ان الوظيفة الاساسية للعدسة هي تكوين الصور(image formation) من خلال تغيير مسار الاشعة النافذة اليها عن طريق الانكسار في وجهي العدسة ، اما الاستخدامات الاخرى فتتضمن تركيز الاشعة الضوئية (ray concentration) ، وتسديد الاشعة (collimation) وتنظيم الاستضاءة للمصادر الضوئية (illumination) . هناك أنواع أخرى من العدسات غير كروية لها استخدامات خاصة مثل العدسات الاسطوانية التي تركز الاشعة على محور معين أو عدسة القطع المكافئ .

تقسم العدسات حسب شكلها الى نوعين رئيسيين : **العدسات الرقيقة (thin lenses)** التي تمتلك سمك صغير نسبيا بالمقارنة مع الابعاد البصرية الاخرى (مثل البعد البؤري ونصف قطر التكور) ، **والعدسات السميكة (thick lenses)** التي تمتلك سمك كبير نسبيا بالمقارنة مع الابعاد البصرية الاخرى .

2. العدسات الرقيقة (Thin Lenses)

هي العدسات ذات السمك الصغير بالمقارنة مع الابعاد البصرية الاخرى ، وهي العدسات الاكثر استخداما في كثير من المجالات الطبية والعلمية والصناعية والعسكرية ، حيث تستخدم في صناعة النظارات الطبية والمجهر الضوئي والتلسكوب . هناك مجموعتين من العدسات الرقيقة تصنف حسب شكلها ووظيفتها هي :

A. مجموعة العدسات اللامة (Converging Lenses Group)

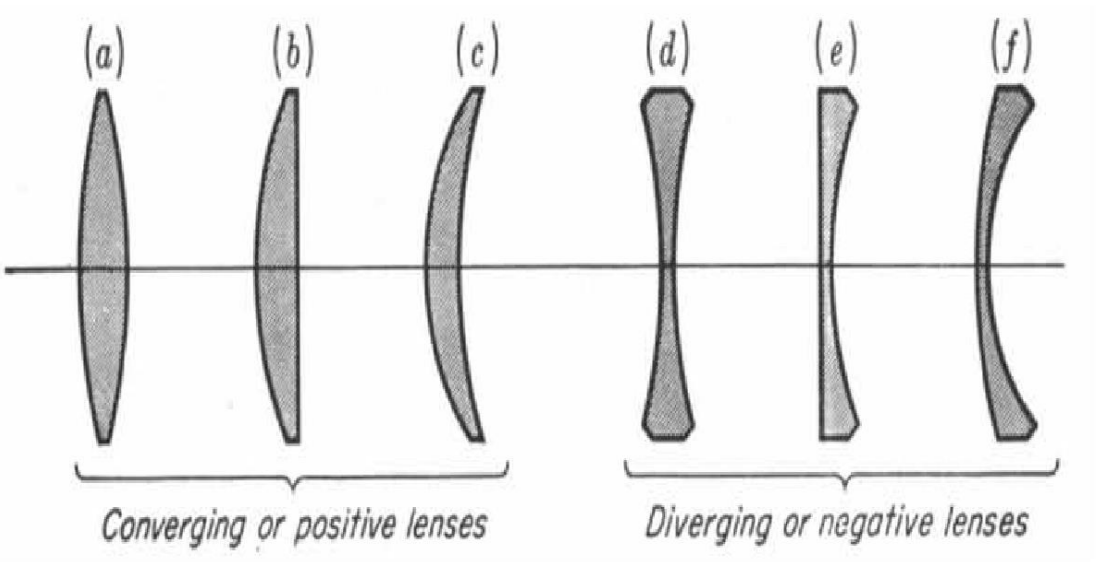
هي مجموعة العدسات التي تجمع الضوء الساقط عليها في نقطة معينة بسبب احتوائها على سطح أو سطحين محدبين (الشكل (1)) تتميز بان وسطها اكثر سمكا من اطرافها ، وهي ثلاثة انواع

a) عدسة محدبة الوجهين (equi- convex lens) لها سطحين محدبين .
b) عدسة محدبة مستوية (plano-convex lens) لها سطح محدب واخر مستوي
c) عدسة هلالية موجبة (positive meniscus) لها سطح محدب واخر مقعر

B. مجموعة العدسات المفرقة (Diverging Lenses Group)

هي مجموعة العدسات التي تفرق الضوء الساقط عليها بسبب احتوائها على سطح أو سطحين مقعرين (الشكل (1)) تتميز بان وسطها اقل سمكا من اطرافها ، وهي ثلاثة انواع :

d) عدسة مقعرة الوجهين (equi- concave lens) لها سطحين مقعرين .
e) عدسة مقعرة مستوية (plano-concave lens) لها سطح مقعر واخر مستوي
f) عدسة هلالية سالبة (negative meniscus) لها سطح مقعر واخر محدب

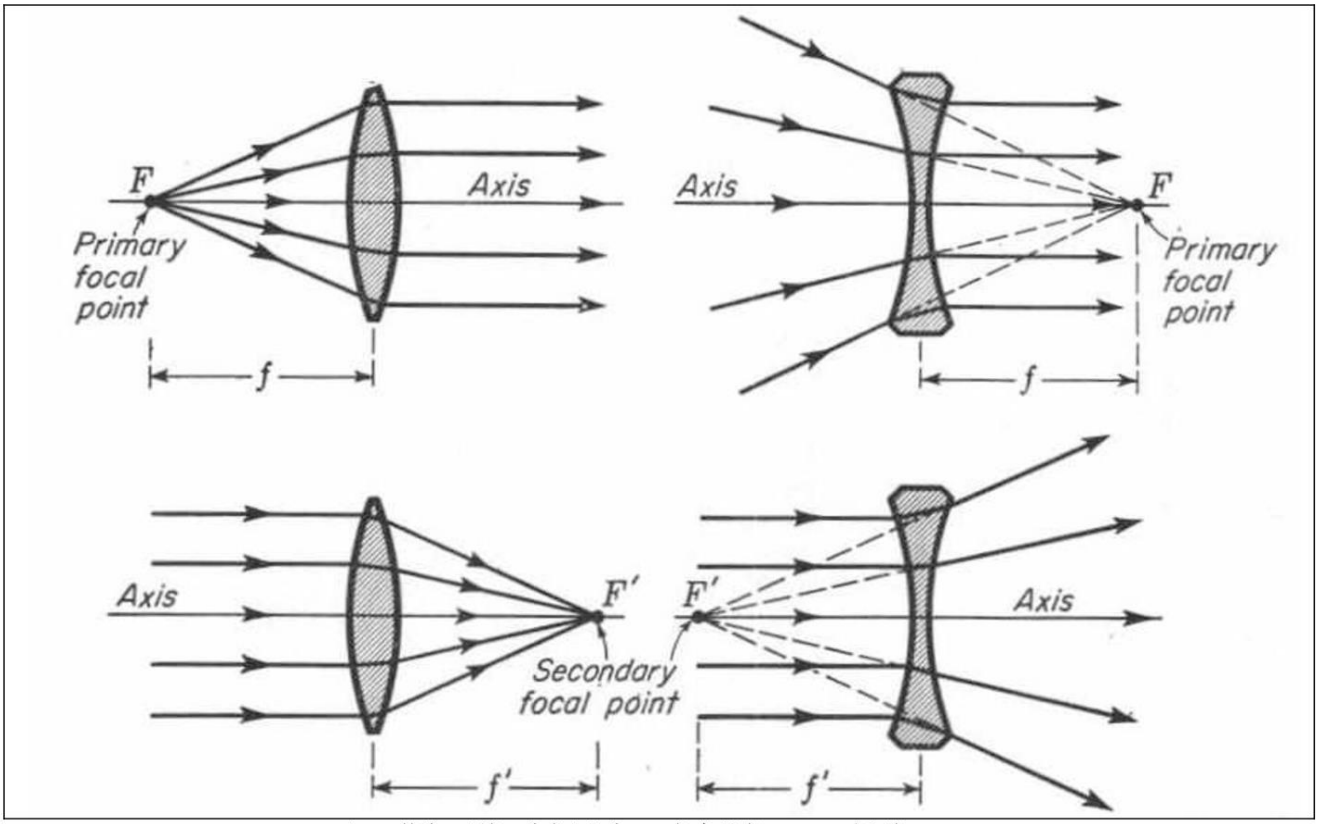


الشكل (1) مجموعة العدسات اللامة والمفرقة

3. هندسة العدسات (Geometry of Lenses)

تتكون العدسة من سطحين كاسرين للضوء يمر من خلالها الضوء تباعا حتى يخرج الشعاع الى الطرف الاخر، جدير بالذكر ان العدسة تصنع من مادة شفافة (غالبا الزجاج أو البلاستيك) فيمر الضوء من الوسط الذي فيه الجسم مرورا الى وسط العدسة وانتهاءاً في الوسط الذي فيه الصورة ، لذا هناك ثلاثة اوساط فعالة في عملية انتقال الضوء خلال العدسة وبالتالي تكوين الصورة.

يسمى المستقيم العمودي على وجهي العدسة والذي يمر في مركزي تكور وجهي العدسة **المحور البصري أو محور العدسة (axis)** كما في الشكل (2) ، اذا كانت العدسة محاطة بنفس الوسط من الجانبين فيتساوى البعد البؤري الاولي لها مع البعد البؤري الثانوي ($f=f'$) ، العدسة لها بؤرتين اولية وثانوية (نفس تعريف البؤرة في الفصل الثالث) احدهما على اليمين والاخرى على اليسار ، النقطة المرجعية الخاصة بحساب الأبعاد البصرية للعدسة هي نقطة مركز العدسة (A).



الشكل (2) : النقاط البؤرية الاولية والثانوية للعدسات

4. تكوين الصور (**Image Formation**)

كما نوهنا سابقا في الفصل السابق على اهمية وظيفة تكوين الصور في السطح الكروي ، وهذا الكلام ممهدا لدور العدسة في هذا الامر لكونها تتالف من سطح كروي واحد او سطحين ، فمن خلال انتقال الضوء الصادر من الجسم ومروره خلال العدسة وانكساره (اي تغيير اتجاهه الاصلي) الى الوسط في الطرف الثاني يحدث تقاطع للاشعة المنكسرة وبالتالي تتكون صورة للجسم لها صفات معينة تحدد من خلال طريقتين : طريقة الرسم (graphical method) التي اشرنا اليها في الفصل السابق ولا داعي لتكرارها هنا ، والطريقة الرياضية (mathematical method) التي من خلالها اشتقت العلاقة الرياضية الخاصة بتكوين الصور في العدسات التي تسمى **صيغة كاوس للعدسات**.

5. صيغة كاوس للعدسات (Gauss Lenses Formula)

يمكن إيجاد صفات الصورة المتكونة في العدسات رياضيا من خلال صيغة رياضية تسمى **صيغة كاوس للعدسات (Gauss lenses Formula)** وهي معادلة مشتقة من قانون سنيل وتطبيقه على السطح الكروي ومعالجته هندسيا من خلال حساب زاوية السقوط والانكسار ومعاملات الانكسار للوسطين ، تتمثل صيغة كاوس بالمعادلة التالية:

$$\frac{1}{s}+\frac{1}{s'}=\frac{1}{f} \quad \dots\dots(1)$$

حيث يمثل (s) بعد الجسم عن مركز العدسة ، (s') بعد الصورة عن مركز العدسة . نلاحظ هنا ان معاملات الانكسار للوسطين المحيطين بالعدسة غير موجودة في المعادلة (1) على اعتبار انهما فراغ (أو هواء) في أغلب الأحيان فلذا استعاض عن معاملات الانكسار لهما بالعدد واحد .

ممكن استخدام صورة اخرى للمعادلة (1) لتعيين بعد الصورة لكونه المطلوب غالبا وكما يلي:

$$s'=\frac{s*f}{s-f} \quad \dots\dots(2)$$

6. التكبير الجانبي (Lateral Magnification)

يعرف التكبير الجانبي للعدسة (m) بانه النسبة بين البعد المستعرض للصورة (y') الى البعد المستعرض للجسم (y) ، حسب المعادلة :

$$m=\frac{y'}{y}=-\frac{s'}{s} \quad \dots\dots(3)$$

7. قدرة العدسة (Power of Lens)

تتمثل قدرة العدسة (P) في قابلية العدسة على تجميع (converging) او تفريق (diverging) الاشعة الضوئية الساقطة عليها ، وتحسب القدرة من خلال صيغة كاوس ايضا مع مراعاة استخدام الابعاد بالامتار (meter) لتظهر قيمة القدرة بوحدات خاصة تسمى **الديوبيتر(Diopeter)** ، وكما موضح في المعادلة :

$$P=\frac{1}{s}+\frac{1}{s'}=\frac{1}{f} \quad \dots\dots(4)$$

8. صيغة صانعي العدسات (Lens Makers Formula)

هناك صيغة خاصة للعدسات تربط معامل انكسار العدسة مع انصاف اقطار التكور لسطحيها مع البعد البؤري تعرف بصيغة صانعي العدسات ، وهي صيغة مهمة جدا لعملية التصميم البصري لكونها تتعلق بنوع مادة العدسة من خلال معامل انكسارها ، وشكل العدسة من خلال انصاف اقطار تكور سطحيها ، وبالتاي معرفة هوية العدسة من خلال البعد البؤري . الشكل الرياضي لصيغة صانعي العدسات هو :

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \quad \dots\dots (5)$$

حيث تمثل (r_2 , r_1) انصاف اقطار تكور وجهي العدسة الاول والثاني على الترتيب .

9. اصطلاح الإشارات (**convention of signs**)

ان الطريقة الهندسية المتبعة لمعرفة صفات الصورة في العدسة يجب فيها مراعاة اتجاه انتشار الاشعة الضوئية وموقع الجسم والصورة ونوع العدسة (لامة او مفرقة) ، لكي تتحقق النتائج الحسابية الصحيحة من خلال تطبيقها في صيغة كاوس ، فلذلك يجب الاتفاق على مجموعة فقرات تخص الاشارات الخاصة بالصيغة وكما يلي :

1) يرسم مسار الأشعة الضوئية من اليسار الى اليمين دائما .
2) اذا كان الجسم يقع على يسار العدسة يعتبر الجسم حقيقي وبعده موجب (+ s) ، واذا كان الجسم على يمين العدسة يعتبر الجسم خيالي وبعده سالب (- s) .
3) اذا كانت الصورة تقع على يمين العدسة تعتبر الصورة حقيقية وبعدها موجب (+ s') ، واذا كانت الصورة على يسار العدسة تعتبر الصورة خيالية وبعدها سالب (- s') .
4) يعتبر البعد البؤري كمية موجبة (+ *f*) للعدسة اللامة (converging lens)، ويعتبر البعد البؤري كمية سالبة (- *f*) للعدسة المفرقة (diverging lens) .
5) إشارة أنصاف أقطار التكور لوجهي العدسة (r_2 , r_1) توضع حسب شكلها عند مواجهة الأشعة الساقطة عليها (من اليسار الى اليمين) .

تختلف صفات الصورة المتكونة في العدسة حسب نوع العدسة ونوع الوسط المحيط بها ، وكذلك حسب بعد الجسم عن العدسة . وكما ذكرنا في الفصل السابق يعتبر في صفات الصورة المتكونة أربعة أمور هي:

- موقع الصورة (image position)، ويحسب من خلال قيمة (s')
- هل الصورة حقيقية ام خيالية (real or virtual) ، ويحسب من خلال إشارة (s')
- هل الصورة مكبرة ام مصغرة (magnified or minified) ، ويحسب من خلال قيمة (m)
- هل الصورة معتدلة ام مقلوبة (erect or inversed) ، ويحسب من خلال إشارة (m)

لكن هناك بعض النقاط المهمة تتعلق بنوع الصورة المتكونة يجب مراعاتها هي:

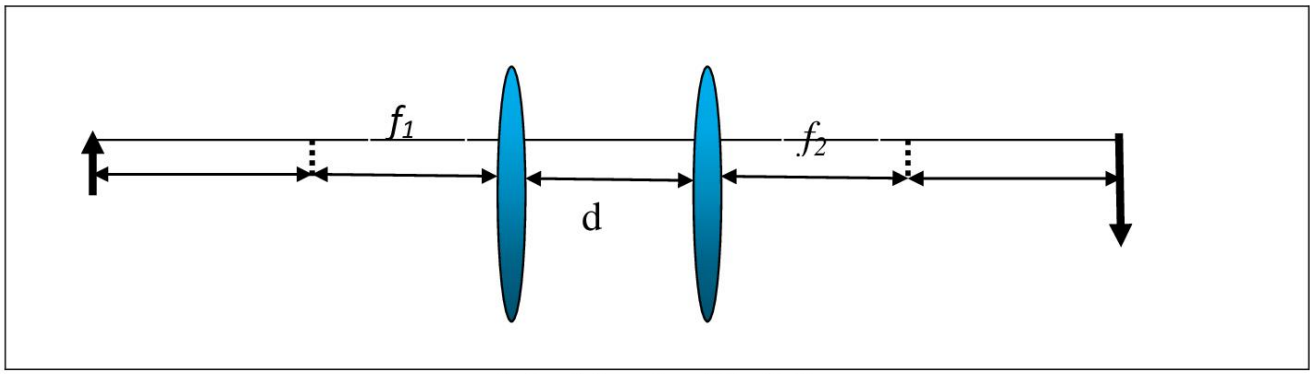
- ❖ الصورة الحقيقية دائما مقلوبة والصورة الخيالية دائما معتدلة .
- ❖ العدسة المفرقة دائما تكون صورة خيالية بغض النظر عن موقع الجسم .
- ❖ العدسة اللامة تعطي صورة خيالية اذا كان الجسم واقع بين البؤرة والعدسة اي $(s < f)$ ، وتعطي صورة حقيقية اذا كان الجسم ابعد من البؤرة $(s > f)$ ، ولا تتكون صورة اذا كان الجسم واقع في البؤرة اي $(s = f)$ ويمكن التعبير عن الحالة الثالثة بان الصورة واقعة في المالانهاية .

10. العدسة المركبة (Compound Lens)

ان اكثر الاجهزة البصرية تستخدم اكثر من عدسة للحصول على وظيفة مثلى للجهاز مثل المقراب (التلسكوب) والمجهر ، فلذلك تكوين الصور عند استخدام عدستين او اكثر لها نفس المحور في الجهاز البصري يتطلب تطبيق رياضي خاص يتمثل بصيغة كاوس للعدسة المركبة (في حالة استخدام عدستين فقط) كما في الشكل (3) :

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2} \quad \dots\dots (6)$$

حيث $(f_2 \ , \ f_1)$ يمثل البعد البؤري للعدسة الاولى والثانية على الترتيب ، (f) يمثل البعد البؤري المكافئ للعدسة المركبة ،(d) تمثل المسافة بين العدستين . بينما تجري نفس إجراءات تكوين الصورة بطريقة الرسم على العدسة المركبة مع مراعاة الانكسار في اكثر من عدسة .



الشكل (3) : العدسة المركبة

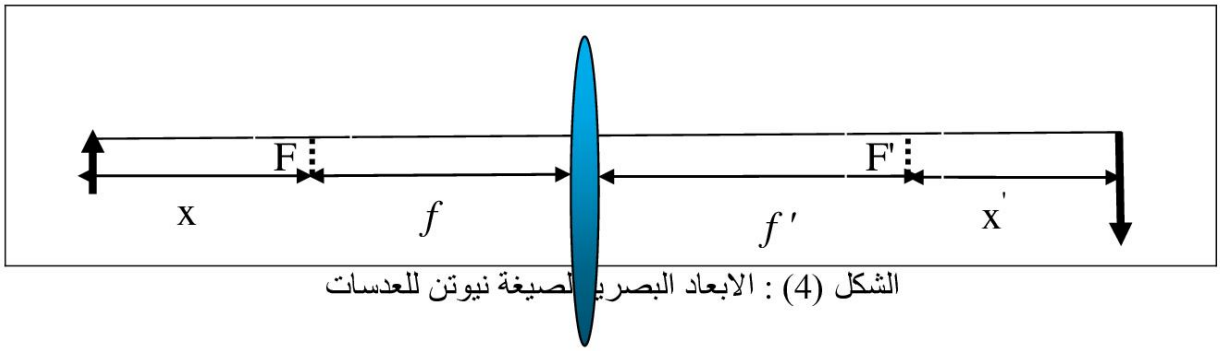
11. صيغة نيوتن للعدسات (Newton's Formula for Lenses)

هناك صيغة خاصة تربط البعد البؤري للعدسة مع ابعادها البصرية التي تحسب من نقطتي البؤرة الاولية والثانوية ، بينما صيغة كاوس تحسب الابعاد البصرية من مركز العدسة . على اعتبار تساوي البعد البؤري في جانبي العدسة فيكون التمثيل الرياضي لصيغة نيوتن هو :

$$f = \sqrt{x * x'} \qquad \ldots\ldots (7)$$

$$m = -\frac{f}{x} = -\frac{x'}{f} \qquad \ldots\ldots (8)$$

حيث يمثل (x) المسافة من الجسم الى البؤرة الاولية ، (x') المسافة من الصورة الى البؤرة الثانوية كما في الشكل (4) .



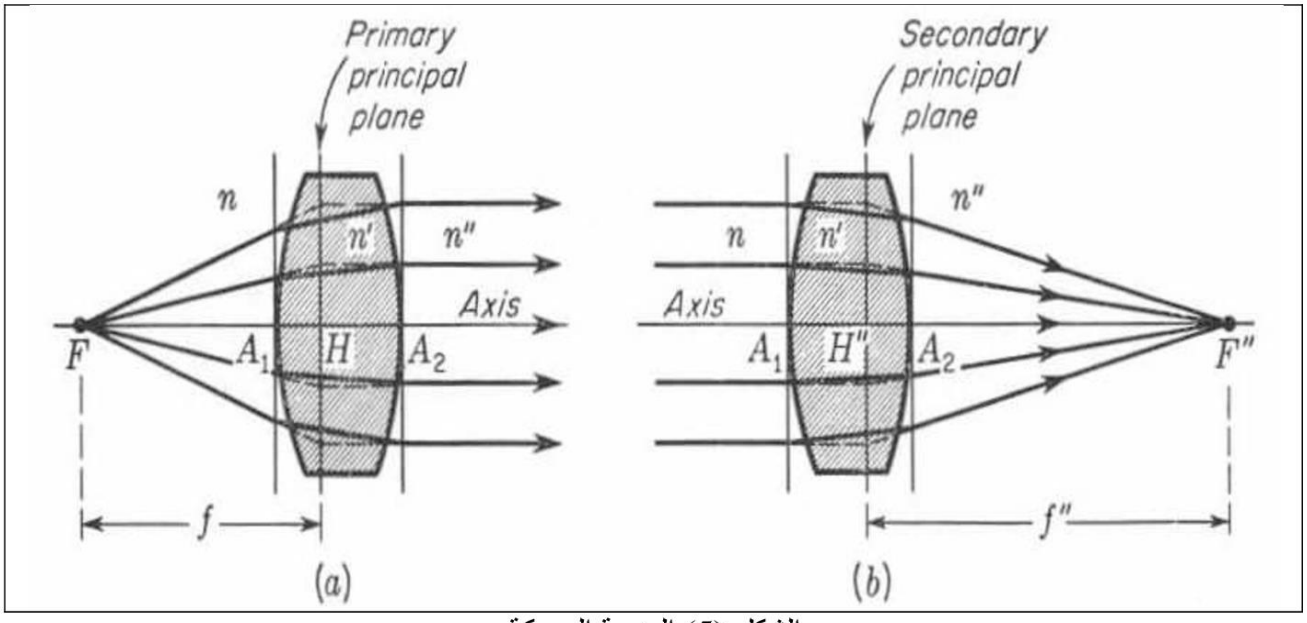
الشكل (4) : الابعاد البصرية لصيغة نيوتن للعدسات

12. العدسات السميكة (Thick Lenses)

عندما يكون سمك العدسة (d) كبير نسبيا بالقياس الى بعدها البؤري تسمى حينئذ بالعدسة السميكة ، ويجب عندها الاخذ بنظر الاعتبار سمكها في كل العلاقات الرياضية الخاصة بالعدسة . ممكن معاملة العدسة المركبة كعدسة سميكة يكون سمكها المسافة بين العدسات المكونة لها. نعتبر

معامل انكسار الوسط على يسار العدسة السميكة (n) ومعامل انكسار وسط العدسة (n') ومعامل انكسار الوسط على يمين العدسة (n") ، فيكون كل الرموز الاخرى تحمل دلالات تشير الى موقعها في هذه الاوساط الثلاثة وكما يلي.

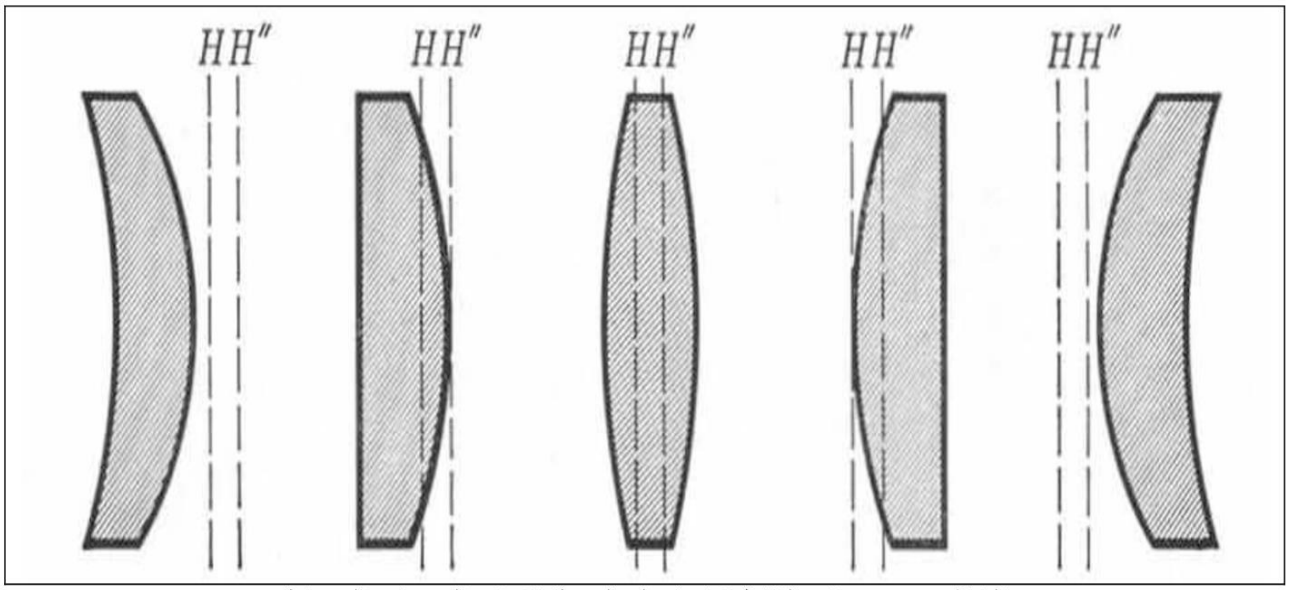
هناك نقطتان مرجعيتان في العدسة السميكة تسمى **النقطة الاساسية الاولية (H) والثانوية (H") (primary and secondary principal points)** ، تحسب من خلالها ابعاد الجسم والصورة والبعد البؤري كما في الشكل (5) . لايجاد موقع النقطة الاساسية نستخدم تعريف نقطة البؤرة ، فاذا سقطت اشعة موازية للمحور (جسم في المالانهاية) على العدسة فستتجمع في نقطة البؤرة الثانوية (F") (الشكل (5-b)) فيكون نقطة تلاقي الشعاع الساقط مع الشعاع المنكسر في المستوي الاساسي الثانوي (secondary principal plane) ، ونقطة تقاطع هذا المستوي مع المحور البصري تمثل النقطة الاساسية الثانوية (H") ، وبنفس الطريقة يمكن ايجاد موقع النقطة الاساسية الاولية (H) عن طريق استخدام اشعة صادرة من البؤرة الاولية فتسير بعد الانكسار موازية للمحور البصري (الشكل (5-a)) ، فيكون نقطة تلاقي الشعاع الساقط مع الشعاع المنكسر في المستوي الاساسي الاولي (primary principal plane) ، ونقطة تقاطع هذا المستوي مع المحور البصري تمثل النقطة الاساسية الاولية (H) .



الشكل (5) العدسة السميكة

يحسب البعد البؤري الاولي للعدسة السميكة (*f*) من نقطة البؤرة الاولية (F) الى النقطة الاساسية الاولية (H) ، وكذلك يحسب بعد الجسم عن طريق موقعه من النقطة الاساسية الاولية (H) . ويحسب البعد البؤري الثانوي للعدسة السميكة (" *f*) من نقطة البؤرة الثانوية (F") الى النقطة الاساسية الثانوية (H") ، وكذلك يحسب بعد الصورة عن طريق موقعه من النقطة الاساسية الثانوية (H") .

تمتلك العدسة السميكة نقطتان أساسيتان وبالتالي مستويان أساسيان يختلف موقعهما حسب نوع العدسة ، فيمكن ان تكون النقطتان داخل العدسة (العدسة محدبة الوجهين) ، أو احاهما على حافة العدسة (العدسة نوع مستوية - محدبة) ، أو كلا النقطتين خارج العدسة (العدسة الهلالية) كما موضح في الشكل (6).



الشكل (6) : موقع النقاط الاساسية بالنسبة لانواع العدسات السميكة

13. صيغة كاوس للعدسات السميكة (Gauss Formula for Thick Lenses)

هناك مجموعة من العلاقات الرياضية خاصة بالعدسات السميكة وضعها العالم كاوس ، تربط الابعاد البصرية المتعلقة بالعدسة مع بعضها ، مع الاخذ بنظر الاعتبار استخدام ثلاثة اوساط مختلفة (يسار وداخل ويمين العدسة) ، وهذه العلاقات هي :

$$\frac{n}{f} = \frac{n'}{f_1'} + \frac{n''}{f_2''} - \frac{dn''}{f_1' f_2''} = \frac{n''}{f''} \quad \dots\dots (9)$$

$$A_1F = -f\left(1 - \frac{d}{f_2'}\right) \quad \dots\dots (10)$$

$$A_2F'' = +f''\left(1 - \frac{d}{f_1'}\right) \quad \dots\dots (11)$$

$$A_1H = +f\frac{d}{f_2'} \quad \dots\dots (12)$$

$$A_2H'' = -f''\frac{d}{f_1'} \quad \dots\dots (13)$$

حيث يشير الرقم السفلي للرموز في المعادلات اعلاه (كمثال f_1 ,f_2) الى السطح الاول والثاني للعدسة على الترتيب ، بينما الرمز العلوي (" ' dash) الى موقعه بالنسبة للأوساط الثلاثة . فيمثل (f_1') البعد البؤري الثانوي للسطح الاول للعدسة ، (f_2'') يمثل البعد البؤري الثانوي للسطح الثاني للعدسة ، (f'' , f) البعد البؤري الاولي والثانوي للعدسة على الترتيب .

تمثل المعادلة (9) معادلة البعد البؤري للعدسة السميكة ، والمعادلتين (11, 10) تحسب موقع البؤرة الاولية والثانوية على الترتيب ، والمعادلتين (13,12) تحسب موقع النقطة الاساسية الاولية والثانوية على الترتيب .

14. مسائل الفصل الرابع (**Problems**)

1) جسم ارتفاعه (5 cm) موضوع على بعد (20 cm) امام عدسة مفرقة لها بعد بؤري (5 cm) . احسب : (a). قدرة العدسة ، (b). صفات الصورة المتكونة ، (c) ارتفاع الصورة.

$$a)\ P = \frac{1}{f} = \frac{1}{-5 * 10^{-2}} = -20\ D$$

$$b)\ s' = \frac{sf}{s-f} = \frac{20 * (-5)}{20 + 5} = -4\ cm$$

$$m = -\frac{s'}{s} = -\frac{-4}{20} = 0.2$$

الصورة خيالية واقعة على يسار العدسة بمسافة (4 cm) ، والصورة مصغرة معتدلة.

$$c)\ m = \frac{y'}{y} \quad \Rightarrow \quad y' = my = 0.2 * 5 = 1\ cm$$

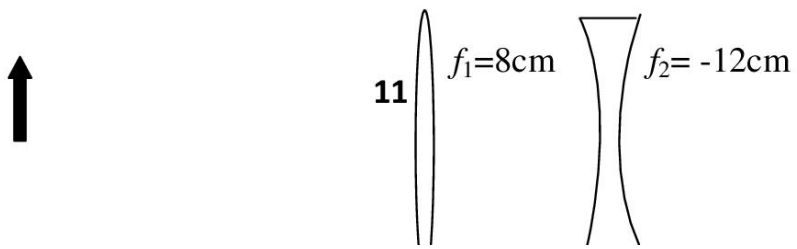
2) عدسة (محدبة مستوية) مصنوعة من زجاج معامل انكساره (1.7) . احسب انصاف اقطار التكور للعدسة التي تعطي قدرة للعدسة مقدارها (+5 D) .

بما ان العدسة (محدبة مسوية) فيكون نصف قطر تكور احد سطحيها ($r_1=\infty$)

$$P = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$$

$$5 = (1.7-1)\left(\frac{1}{\infty} - \frac{1}{r_2}\right) \quad \Rightarrow \quad r_2 = 14.2\ cm$$

3) عدستان البعد البؤري لهما (f_1=+8 cm) ، (f_2=-12 cm) وضعتا على محور واحد بمسافة (6 cm) . جسم ارتفاعه (3 cm) موضوع على مسافة (24 cm) امام العدسة الاولى . جد : (a). صفات الصورة النهائية ، (b). ارتفاع الصورة النهائية.



S=24cm

$$a)\ \ \frac{1}{s_1}+\frac{1}{s_1'}=\frac{1}{f_1}$$

$$s_1'=\frac{s_1 f_1}{s_1-f_1}=\frac{24*8}{24-8}=\frac{192}{16}=12\ cm$$

نفرض ان الصورة المتكونة في العدسة الاولى هي جسم بالنسبة للعدسة الثانية موقعها يحسب من العلاقة :

$$s_2=d-s_1'=6-12=-6\ cm$$

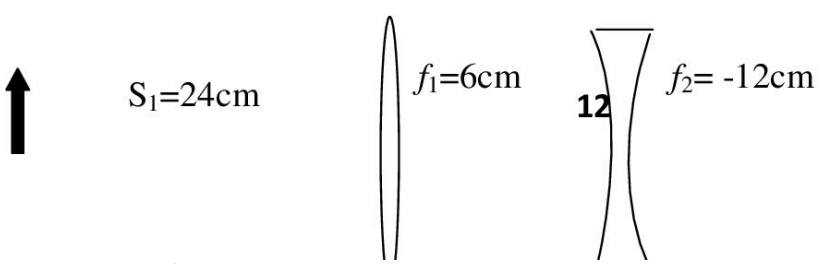
$$s_2'=\frac{s_2 f_2}{s_2-f_2}=\frac{(-6)*(-12)}{-6+12}=\frac{72}{6}=12\ cm$$

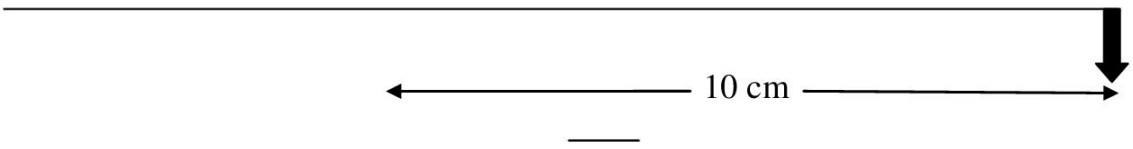
$$m=m_1*m_2=\left(-\frac{s'_1}{s_1}\right)*\left(-\frac{s'_2}{s_2}\right)=\left(-\frac{12}{24}\right)*\left(-\frac{12}{-6}\right)=-1$$

اذن الصورة النهائية حقيقية تقع على يمين العدسة الثانية بمسافة (12 cm) ، والصورة مقلوبة وبنفس حجم الجسم .

$$b)\ \ m=\frac{y'}{y}\ \ \Rightarrow\ \ -1=\frac{y'}{3}\ \ \Rightarrow\ \ y'=|-3|=3cm$$

4) وضعت عدسة لامة بعدها البؤري (6 cm) بحيث كانت على بعد (10 cm) من الصورة النهائية اين يجب وضع عدسة مفرقة مقدار بعدها البؤري (12 cm) من العدسة اللامة عندما يكون الجسم على بعد (24 cm) على يسار العدسة اللامة ؟





$$\frac{1}{s_1}+\frac{1}{s_1'}=\frac{1}{f_1} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{24}+\frac{1}{s_1'}=\frac{1}{6} \quad \Rightarrow \quad s_1'=8\,cm$$

$$s_2=d-s_1'=d-8$$

$$s_2'=10-d$$

$$\frac{1}{s_2}+\frac{1}{s_2'}=\frac{1}{f_2} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{d-8}+\frac{1}{10-d}=\frac{1}{-12}$$

$$\frac{(10-d)+(d-8)}{(d-8)(10-d)}=\frac{1}{-12}$$

$$\frac{2}{(d-8)(10-d)}=\frac{1}{-12}$$

$$\frac{1}{d^2-18d+80}=\frac{1}{24}$$

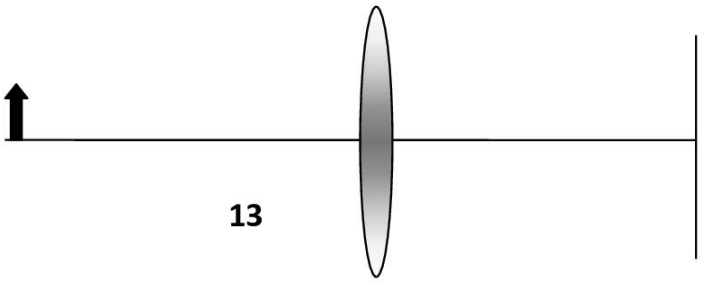
$$d^2-18d+80=24$$

$$d^2-18d+56=0$$

$$(d-14)(10-4)=0$$

$$\therefore d=14\,cm \quad or \quad d=4\,cm$$

5) جسم موضوع على مسافة (1.4 m) من شاشة . ما هو البعد البؤري المناسب لعدسة يجب وضعها بين الجسم والشاشة لتكوين صورة حقيقية له مقلوبة ومكبرة بمقدار ست مرات ؟



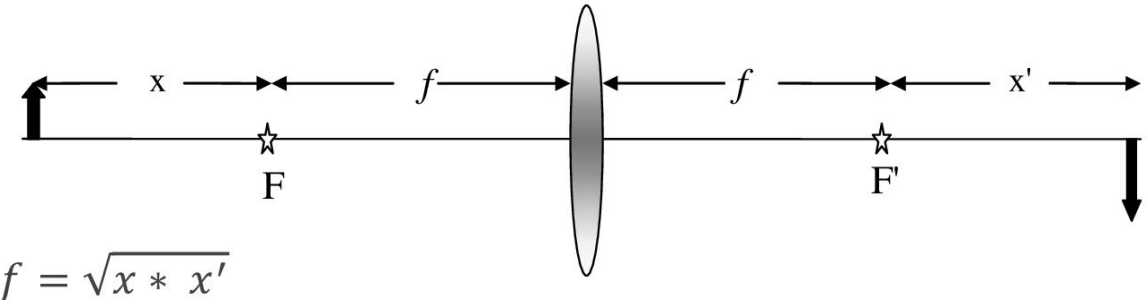
$$m = -\frac{s'}{s}$$

$$-6 = -\frac{1.4 - s}{s} \quad \Rightarrow \quad -6s = -1.4 + s \quad \Rightarrow \quad s = \frac{1.4}{7} = 0.2\ m$$

$$s' = 1.4 - s = 1.4 - 0.2 = 1.2\ m$$

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{0.2} + \frac{1}{1.2} = \frac{1}{f} \quad \Rightarrow \quad f = 0.17\ m$$

6) وضع جسم على يسار عدسة لامة بمسافة (30 cm) ، فإذا كان البعد البؤري للعدسة (20 cm) . اوجد صفات الصورة المتكونة لهذا الجسم باستخدام صيغة نيوتن .



$$f = \sqrt{x * x'}$$

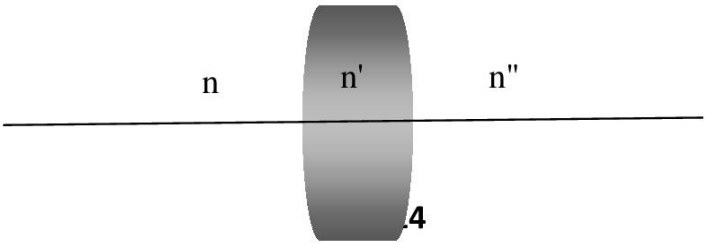
$$20 = \sqrt{10 * x'} \quad \Rightarrow \quad x' = 40\ cm$$

$$\therefore image\ distance\ from\ lens = f + x' = 20 + 40 = 60\ cm$$

$$m = -\frac{f}{x} = -\frac{20}{10} = -2$$

اذن الصورة حقيقية تقع على يمين العدسة بمسافة (60 cm) ، كذلك الصورة مقلوبة ومكبرة مرتين .

7) عدسة محدبة الوجهين ومتساوية التحدب (4 cm) ، معامل انكسار الزجاج لها (1.8) وسمكها (3.6 cm) . احسب: (a). البعد البؤري الاولي والثانوي للعدسة ، (b). موقع نقاط البؤرة الاولية والثانوية ، (c). موقع النقاط الاساسية الاولية والثانوية.



$$a)\ \frac{n'}{f_1'}=\frac{n}{f_1}=\frac{n'-n}{r_1}=\frac{1.8-1}{4}=0.2$$

$$f_1=\frac{1}{0.2}=5\ cm\ ,\quad f_1^{'}=\frac{1.8}{0.2}=9\ cm$$

$$\frac{n''}{f_2''}=\frac{n'}{f_2'}=\frac{n''-n'}{r_2}=\frac{1-1.8}{-4}=0.2$$

$$f_2'=\frac{1.8}{0.2}=9\ cm\ ,\quad f_2''=\frac{1}{0.2}=5\ cm$$

$$\frac{n''}{f''}=\frac{n}{f}=\frac{n'}{f_1'}+\frac{n''}{f_2''}-\frac{dn''}{f_1'f_2''}=\frac{1.8}{9}+\frac{1}{5}-\frac{3.6}{9*5}=0.2+0.2-\frac{2}{25}=\frac{8}{25}$$

$$f=f_2''=\frac{25}{8}=3.125\ cm$$

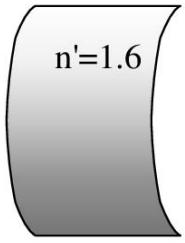
$$b)\ A_1F=-f\left(1-\frac{d}{f_2'}\right)=-3.125\left(1-\frac{3.6}{9}\right)=-1.875\ cm$$

$$A_2F''=f''\left(1-\frac{d}{f_1'}\right)=3.125\left(1-\frac{3.6}{9}\right)=1.875\ cm$$

$$c)\ A_1H=\ f\left(\frac{d}{f_2'}\right)=3.125\left(\frac{3.6}{9}\right)=1.25\ cm$$

$$A_2H''=-\ f''\left(\frac{d}{f_1'}\right)=-3.125\left(\frac{3.6}{9}\right)=-1.25\ cm$$

8) عدسة هلالية سالبة سمكها (4.8 cm) ومعامل انكسارها (1.6) لها انصاف اقطار تكور (r_1=+6 cm) ، (r_2= +5 cm) . اذا كان هناك سائل معامل انكساره (1.2) بتماس مع السطح الاول للعدسة ، وسائل اخر معامل انكساره (2) بتماس مع السطح الثاني للعدسة . احسب: (a). البعد البؤري الاولي والثانوي للعدسة ، (b). موقع نقاط البؤرة الاولية والثانوية ، (c). موقع النقاط الاساسية الاولية والثانوية.



n=1.2

$$a)\ \frac{n'}{f_1'}=\frac{n}{f_1}=\frac{n'-n}{r_1}=\frac{1.6-1.2}{6}=0.067$$

$$f_1=\frac{1.2}{0.067}=18\ cm\ ,\quad f_1'=\frac{1.6}{0.067}=24\ cm$$

$$\frac{n''}{f_2''}=\frac{n'}{f_2'}=\frac{n''-n'}{r_2}=\frac{2-1.6}{5}=0.08$$

$$f_2'=\frac{1.6}{0.08}=20\ cm\ ,\quad f_2''=\frac{2}{0.08}=25\ cm$$

$$\frac{n''}{f''}=\frac{n}{f}=\frac{n'}{f_1'}+\frac{n''}{f_2''}-\frac{dn''}{f_1'f_2''}=\frac{1.6}{24}+\frac{2}{25}-\frac{4.8*2}{24*25}=0.131$$

$$f=\frac{1.2}{0.131}=9.16\ cm\quad ,\quad f''=\frac{2}{0.131}=15.27\ cm$$

$$b)\ A_1F=-f\left(1-\frac{d}{f_2'}\right)=-9.16\left(1-\frac{4.8}{20}\right)=-6.96\ cm$$

$$A_2F''=f''\left(1-\frac{d}{f_1'}\right)=15.3\left(1-\frac{4.8}{24}\right)=12.24\ cm$$

$$c)\ \ A_1H=\ f\left(\frac{d}{f_2'}\right)=9.16\left(\frac{4.8}{20}\right)=2.2\ cm$$

$$A_2H''=-f''\left(\frac{d}{f_1'}\right)=-15.3\left(\frac{4.8}{24}\right)=-$$

1. المرايا (Mirrors)

المِرْآة هي أداة لها القابلية على عكس الضوء بطريقة تحافظ على الكثير من صفاتهما الأصلية. تخضع الصورة المتكونة في المرايا الى قوانين الانعكاس . تمتاز الصور المتكونة في المرايا بخلوها من التأثيرات اللونية (الزيغ اللوني) الذي سوف نتطرق له في الفصل اللاحق . تستخدم المرايا في كثير من الاجهزة البصرية والأدوات المنزلية والصناعية والطبية لما لها من مميزات في تكوين صور بأشكال وأحجام مختلفة .

ان الوظيفة الأساسية للمرايا هي تكوين الصور (image formation) باستخدام خواص انعكاس الضوء ، بالاضافة الى تركيز(concentration) وتشتيت (dispersion) وتسديد (collimation) الضوء . تمتاز المرآة بوجود وسط فعال واحد هو الوسط الذي يسقط منه وينعكس اليه الضوء بخلاف العدسة التي تحتوي ثلاثة اوساط فعالة . يصنع السطح العاكس للمراة من معدن الالمنيوم غالبا وبعض المعادن التي لها انعكاسية عالية مثل الفضة والزئبق والنيكل .

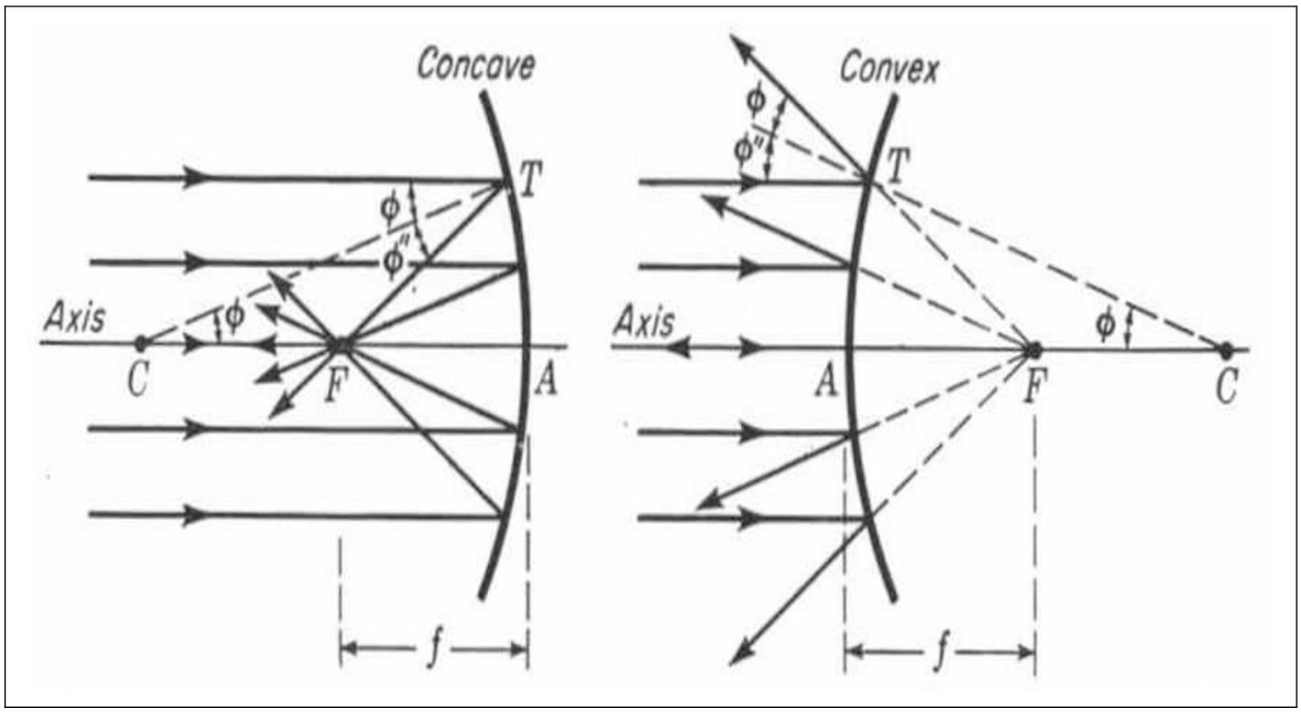
2. أنواع المرايا (Types of Mirrors)

هناك ثلاثة أنواع من المرايا تختلف حسب شكلها وطريقة تكوين الصورفيها هي : المرايا المستوية (plane mirrors) (سطحها غير منحني) التي تستخدم في مجالات صناعية وطبية ومنزلية، والمرايا الكروية (spherical mirrors) التي يكون سطحها جزء من كرة ولها مركز تكور بنوعيها المحدبة (convex) التي لها خاصية تفريق الضوء المنعكس (مرآة مفرقة) ، والمقعرة (concave) التي لها خاصية تجميع الضوء المنعكس (مرآة لامة) التي تستخدم في مجالات صناعية وعلمية وطبية متعددة، بالإضافة الى المرايا غير الكروية (سطحها قطع مكافئ) التي تستخدم في صناعة الأطباق اللاقطة .

3. هندسة المرايا (Geometry of Mirrors)

تتكون المرآة الكروية من سطح عاكس للضوء يرتد من خلاله الضوء الى الوسط الاول، لذلك تمتلك المرآة بؤرة واحدة فقط ومركز تكور كلا النقطتان تقعان على يمين المرآة المحدبة وعلى يسار المرآة المقعرة ، بينما المرآة المستوية لا تمتلك مركز تكور ولا بؤرة .

يسمى المستقيم العمودي على سطح المرآة والذي يمر في مركز تكورها **المحور البصري أو محور المرآة (axis)** كما في الشكل (1) ، نقطة تقاطع المحور البصري مع المرآة تسمى **السمت (vertex)** التي تعتبر النقطة المرجعية التي تحسب منها كل الابعاد البصرية الخاصة بالمرآة ، بما ان المرآة تمتلك بؤرة واحدة لذا يكون لها بعد بؤري واحد يمتد من البؤرة الى سمت المرآة (f) . البؤرة لها خاصية ان اي شعاع صادر منها (المرآة المقعرة) او متجة اليها (المرآة المحدبة) يسير بعد الانعكاس موازي للمحور البصري ، أو ان اي شعاع موازي للمحور البصري يسير بعد الانعكاس متجه اليها (المرآة المقعرة) او كأنه صادر منها (المرآة المحدبة) .



الشكل (1) : المرايا الكروية . المحدبة (يمين) والمقعرة (يسار)

4. تكوين الصور (Image Formation)

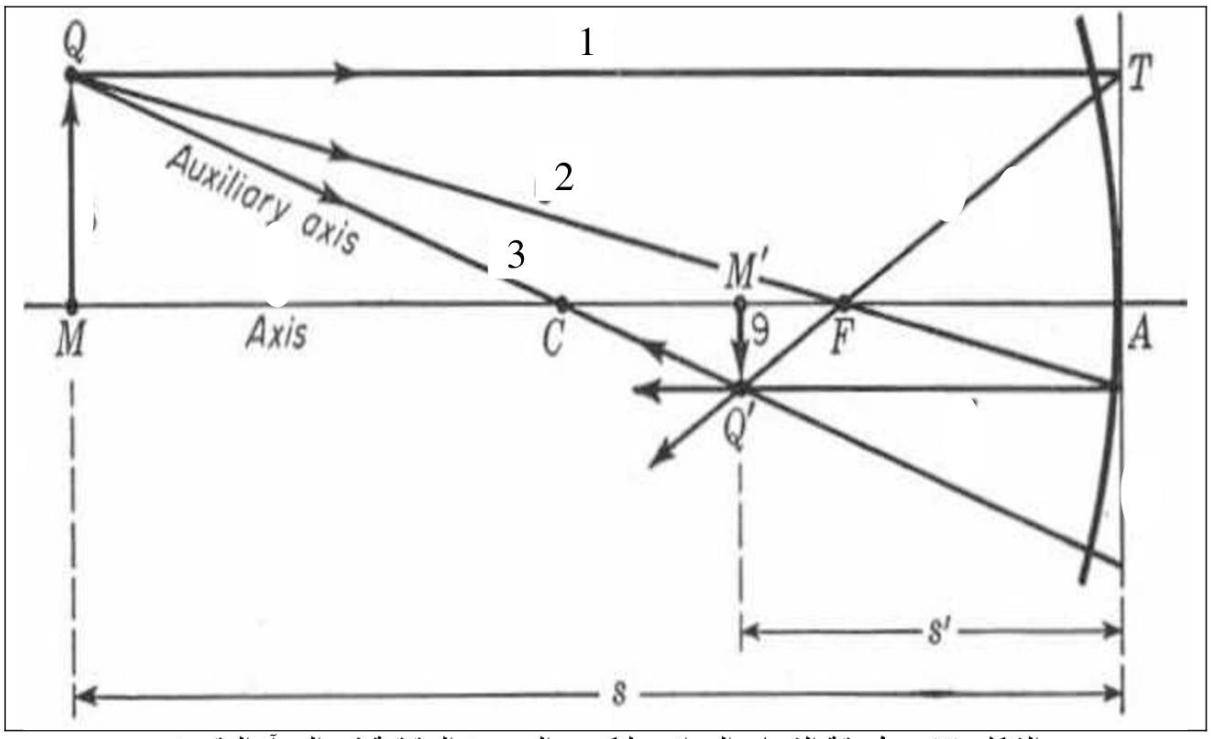
عند انتقال الضوء الصادر من الجسم وانعكاسه من المرآة الى الوسط الاول يحدث تقاطع للأشعة المنعكسة وبالتالي تتكون صورة للجسم لها صفات معينة تحدد من خلال طريقتين : طريقة الرسم (graphical method) التي تتالف من طريقتين الاولى طريقة الشعاع الموازي (parallel ray method) والثانية طريقة الشعاع المائل (oblique ray method) ، والطريقة الرياضية (mathematical method) التي من خلالها اشتقت العلاقة الرياضية الخاصة بتكوين الصور في المرايا التي تسمى **صيغة كاوس للمرايا**.

1) طريقة الرسم (Graphical Method)

هناك طريقتان للرسم يمكن من خلالها تكوين ثلاث اشعة متقاطعة بعد الانعكاس من المرآة لتكوين نقاط مترافقة ، هي **طريقة الشعاع الموازي (parallel ray method)** لتكوين الصور للاجسام الشاخصة (اجسام لها ابعاد) ، **وطريقة الشعاع المائل (oblique ray method)** لتكوين صور للاجسام النقطية (اجسام لا بعد لها) .

A. طريقة الشعاع الموازي (Parallel Ray Method)

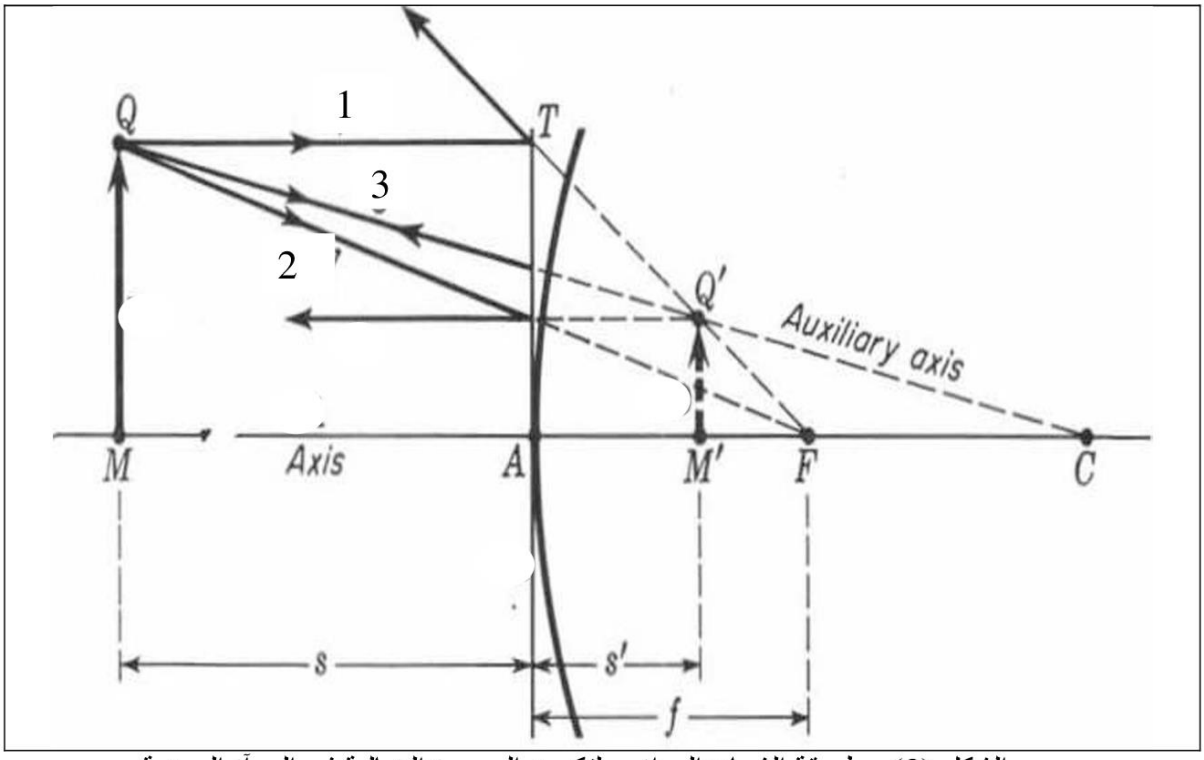
تستخدم هذه الطريقة لتكوين الصور للاجسام الشاخصة وكما موضح في الشكل (2) . نفرض ان الجسم (MQ) جسم محوري (واقع على المحور البصري) على يسار المرآة المقعرة يبعث ثلاثة أشعة (1,2,3) من النقطة (Q) . الشعاع (1) موازي للمحور البصري فيسير بعد الانعكاس باتجاه البؤرة (حسب تعريف البؤرة) ، والشعاع (2) يمر بالبؤرة فيسير بعد الانعكاس موازيا للمحور البصري (حسب تعريف البؤرة) ، والشعاع (3) يمر بصورة عمودية على المرآة بحيث يمر نحو مركز تكورها ويرتد منعكسا في نفس الاتجاة ، يسمى الشعاع (3) **الشعاع الأساسي (principal ray)** ، تتلاقى الاشعة الثلاثة في نقطة واحدة بعد الانعكاس لتكون صورة حقيقية في نقطة (Q') ، تسمى زوج النقاط (QQ') بالنقاط المترافقة . النقطة (Q') تمثل صورة لنقطة الجسم (Q) ، الجدير بالذكر ان تكوين النقاط المترافقة يتطلب وجود شعاعين متقاطعين أو اكثر. وبنفس الطريقة يمكن تكوين مجموعة من ازواج النقاط المترافقة للجسم والصورة فتتكون صورة مقلوبة (M'Q') للجسم (MQ) .



الشكل (2) : طريقة الشعاع الموازي لتكوين الصورة الحقيقية في المرآة المقعرة

ممكن استخدام نفس الطريقة للمرآة المحدبة وباستخدام ثلاثة أشعة وتقاطعها بعد الانعكاس باستخدام تعريف البؤرة للمرآة المحدبة وكما موضح في الشكل (3) فتتكون صورة للنقطة (Q) هي

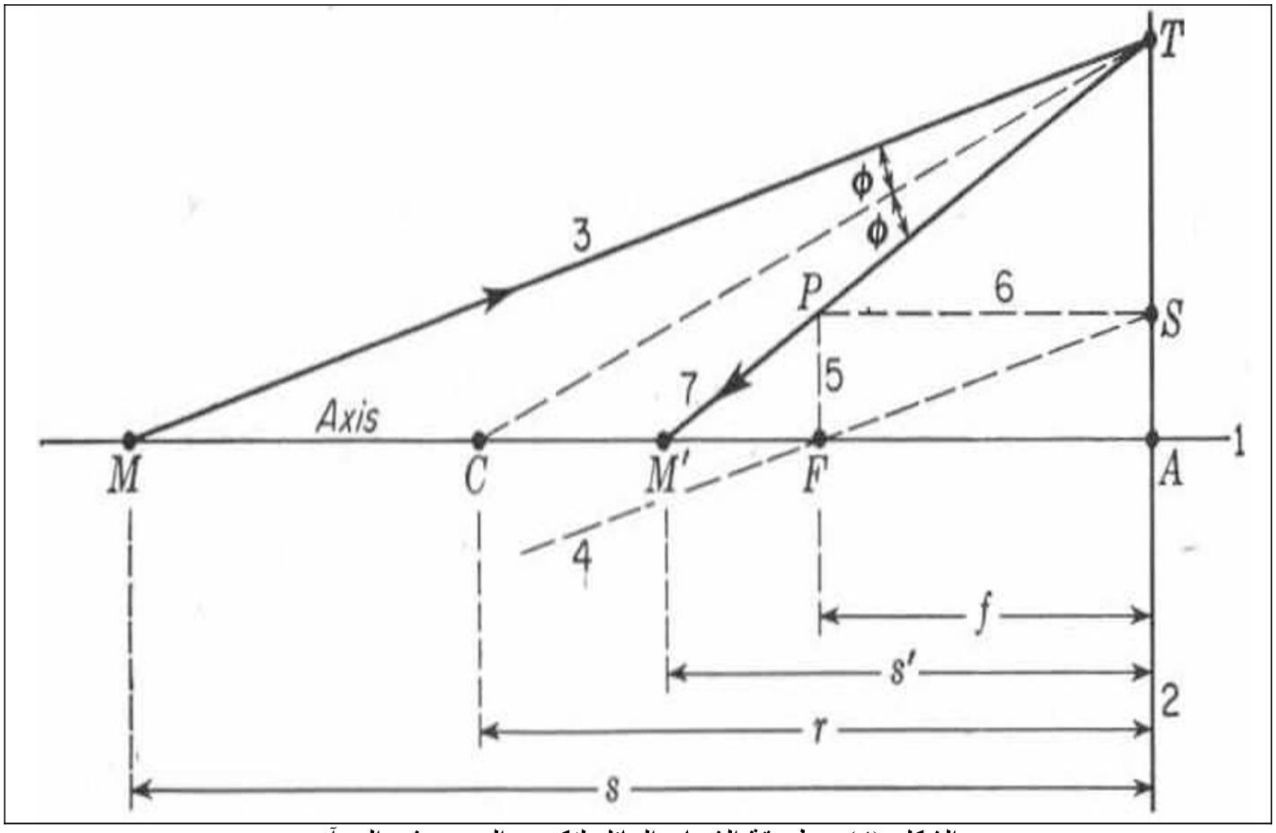
نقطة (Q') تنتج من تقاطع امتدادات الاشعة المنعكسة وبالتالي تكون الصورة خيالية (حسب تعريف الصورة الخيالية) .



الشكل (3) : طريقة الشعاع الموازي لتكوين الصورة الخيالية في المرآة المحدبة

B. طريقة الشعاع المائل (**Oblique Ray Method**)

تستخدم هذه الطريقة لتكوين الصور للاجسام النقطية وكما موضح في الشكل (4) . نفرض ان الجسم النقطي (M) هو جسم محوري يبعث شعاع مائل (3) ويقطع المرآة في نقطة (T) . لمعرفة مسار الشعاع (3) بعد الانعكاس على المرآة نرسم شعاع أساسي (4) موازي له يمر في بؤرة المرآة ويرتد منعكسا موازيا للمحور البصري ويتقاطع مع المستوى البؤري في نقطة (P) ، نصل النقطتين (T,P) فيكون مسار الشعاع (3) بعد الانعكاس ، ويمتد المستقيم (TP) الى ان يتقاطع مع المحور البصري في (M') التي تمثل صورة الجسم النقطي (M) .



الشكل (4) : طريقة الشعاع المائل لتكوين الصور في المرآة

2) الطريقة الرياضية (**mathematical method**)

يمكن إيجاد صفات الصورة المتكونة في المرايا رياضيا من خلال صيغة رياضية تسمى **صيغة كاوس (Gauss Formula)** وهي معادلة مشتقة من قانون الانعكاس وتطبيقه على السطح الكروي للمرآة (**على اعتبار ان الوسط الفعال هو فراغ**) ومعالجته هندسيا من خلال حساب زاوية السقوط والانعكاس ، تتمثل صيغة كاوس بالمعادلة التالية:

$$\frac{1}{s}+\frac{1}{s'}=-\frac{2}{r} \quad \dots\dots(1)$$

حيث يمثل (s' , s) بعد الجسم وبعد الصورة عن المرآة على الترتيب ، (r) نصف قطر تكور سطح المرآة . حسب المعادلة (1) تكون العلاقة بين بعد الجسم والصورة علاقة عكسية اي كلما اقترب الجسم من المرآة كلما ابتعدت الصورة منه . الى ان يصل الجسم في نقطة البؤرة الاولية $(s = f)$ فعندها تصبح الصورة في المالانهاية $(s' = \infty)$ (والعكس صحيح) فتصبح المعادلة (1) :

$$\frac{1}{f}+\frac{1}{\infty}=-\frac{2}{r}$$

$$\frac{1}{f}=-\frac{2}{r} \quad or \quad f=-\frac{r}{2} \quad \dots\dots(2)$$

هناك حالة خاصة بالمرايا المستوية كون سطحها لا يمتلك تكور (اي ان نصف قطر تكور سطحها $r=\infty$) فتكون صيغة كاوس :

$$\frac{1}{s}+\frac{1}{s'}=-\frac{2}{\infty}=0$$

$$s=-s' \quad \dots\dots(3)$$

$$\frac{1}{f}=-\frac{2}{\infty} \quad \Rightarrow \quad f=\infty$$

تسمى المعادلة (3) صيغة كاوس للمرايا المستوية . توضح المعادلة (3) تساوي بعد الجسم مع بعد الصورة في المرايا المستوية دائما وكذلك الصورة دائما خيالية مهما كان موقع الجسم .

5. التكبير الجانبي (Lateral Magnification)

يعرف التكبير الجانبي للمرآة (m) بانه النسبة بين البعد المستعرض للصورة (y') الى البعد المستعرض للجسم (y) ، او النسبة بين بعد الصورة الى بعد الجسم .حسب المعادلة :

$$m=\frac{y'}{y}=-\frac{s'}{s} \quad \dots\dots(4)$$

6. قدرة المرآة (Power of Mirror)

تتمثل قدرة المرآة (P) في قابلية المرآة على تجميع (converging) او تفريق (diverging) الاشعة الضوئية الساقطة عليها ، وتحسب القدرة من خلال صيغة كاوس ايضا مع مراعاة استخدام الابعاد بالامتار (meter) لتظهر قيمة القدرة بوحدات خاصة تسمى **الديوبيتر(Diopeter)** ، وكما موضح في المعادلة :

$$P=\frac{1}{s}+\frac{1}{s'}=\frac{1}{f}=-\frac{2}{r} \quad \dots\dots(5)$$

7. اصطلاح الإشارات (convention of signs)

ان الطريقة الهندسية المتبعة لمعرفة صفات الصورة في المرآة يجب فيها مراعاة اتجاه انتشار الاشعة الضوئية وموقع الجسم والصورة ونوع المرآة (لامة او مفرقة) ، لكي تتحقق النتائج الحسابية الصحيحة من خلال تطبيقها في صيغة كاوس ، فلذلك يجب الاتفاق على مجموعة فقرات تخص الإشارات الخاصة بالصيغة وكما يلي :

1) يرسم مسار الأشعة الضوئية متجها الى الوجه العاكس للمرآة بغض النظر للاتجاه .
2) اذا كان الجسم والصورة يقعان امام السطح العاكس للمرآة يعتبران حقيقيان وبعدهما موجب (+ s, s') ، واذا كان الجسم والصورة يقعان خلف السطح العاكس للمرآة يعتبران خياليان وبعدهما سالب (- s, s')
3) يعتبر البعد البؤري كمية موجبة (+ f) للمرآة المقعرة (concave mirror)، ويعتبر البعد البؤري كمية سالبة (- f) للمرآة المحدبة (convex mirror)
4) نصف قطر التكور للمرآة المقعرة كمية سالبة (- r) ، ونصف قطر التكور للمرآة المحدبة كمية موجبة (+ r)

تختلف صفات الصورة المتكونة في المرآة حسب نوعها ونوع الوسط المحيط بها ، وكذلك حسب بعد الجسم عنها . وكما ذكرنا في الفصل السابق يعتبر في صفات الصورة المتكونة أربعة أمور هي:

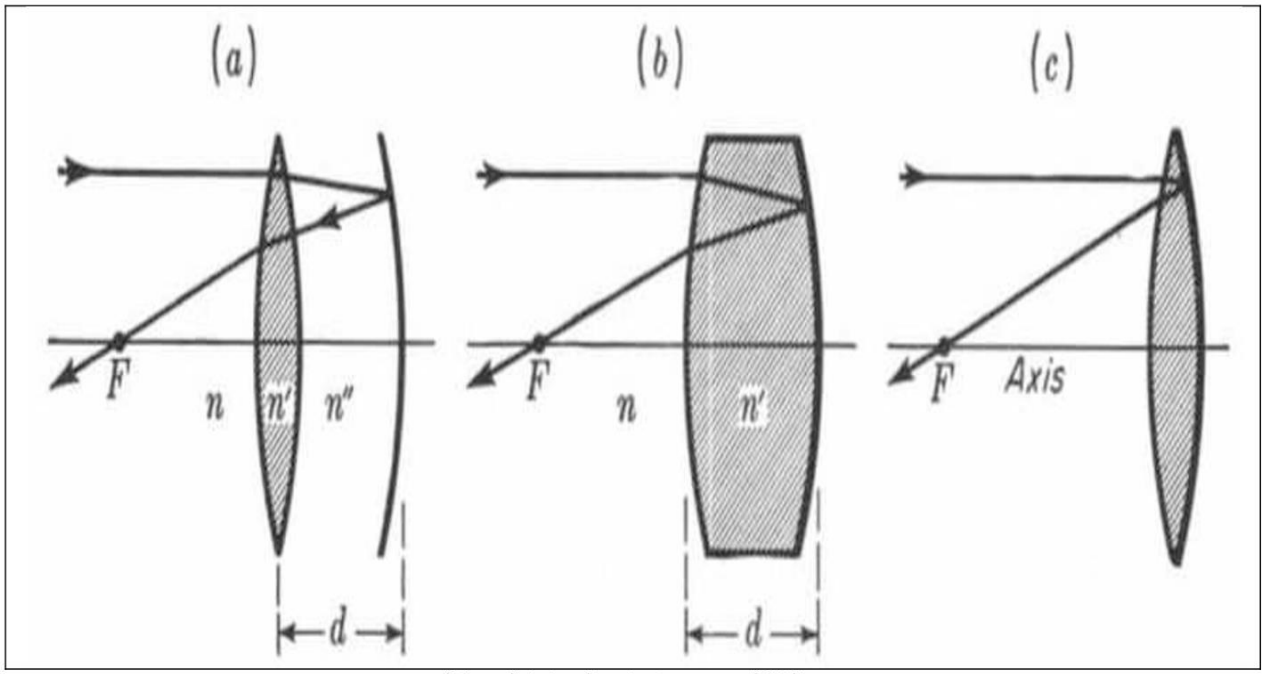
- موقع الصورة (image position)، ويحسب من خلال قيمة (s')
- هل الصورة حقيقية ام خيالية (real or virtual) ، ويحسب من خلال إشارة (s')
- هل الصورة مكبرة ام مصغرة (magnified or minified) ، ويحسب من خلال قيمة (m)
- هل الصورة معتدلة ام مقلوبة (erect or inversed) ، ويحسب من خلال إشارة (m)

لكن هناك بعض النقاط المهمة تتعلق بنوع الصورة المتكونة في المرايا يجب مراعاتها هي:

- ❖ الصورة الحقيقية دائما مقلوبة والصورة الخيالية دائما معتدلة .
- ❖ المرآة المحدبة دائما تكون صورة خيالية مصغرة بغض النظر عن موقع الجسم .
- ❖ المرآة المستوية دائما تكون صورة خيالية بنفس حجم الجسم بغض النظر عن موقع الجسم .
- ❖ المرآة المقعرة تعطي صورة خيالية اذا كان الجسم واقع بين البؤرة والمرآة اي ($s < f$) ، وتعطي صورة حقيقية اذا كان الجسم ابعد من البؤرة ($s > f$) ، ولا تتكون صورة اذا كان الجسم واقع في البؤرة اي ($s = f$) ويمكن التعبير عن الحالة الثالثة بان الصورة واقعة في المالانهاية .

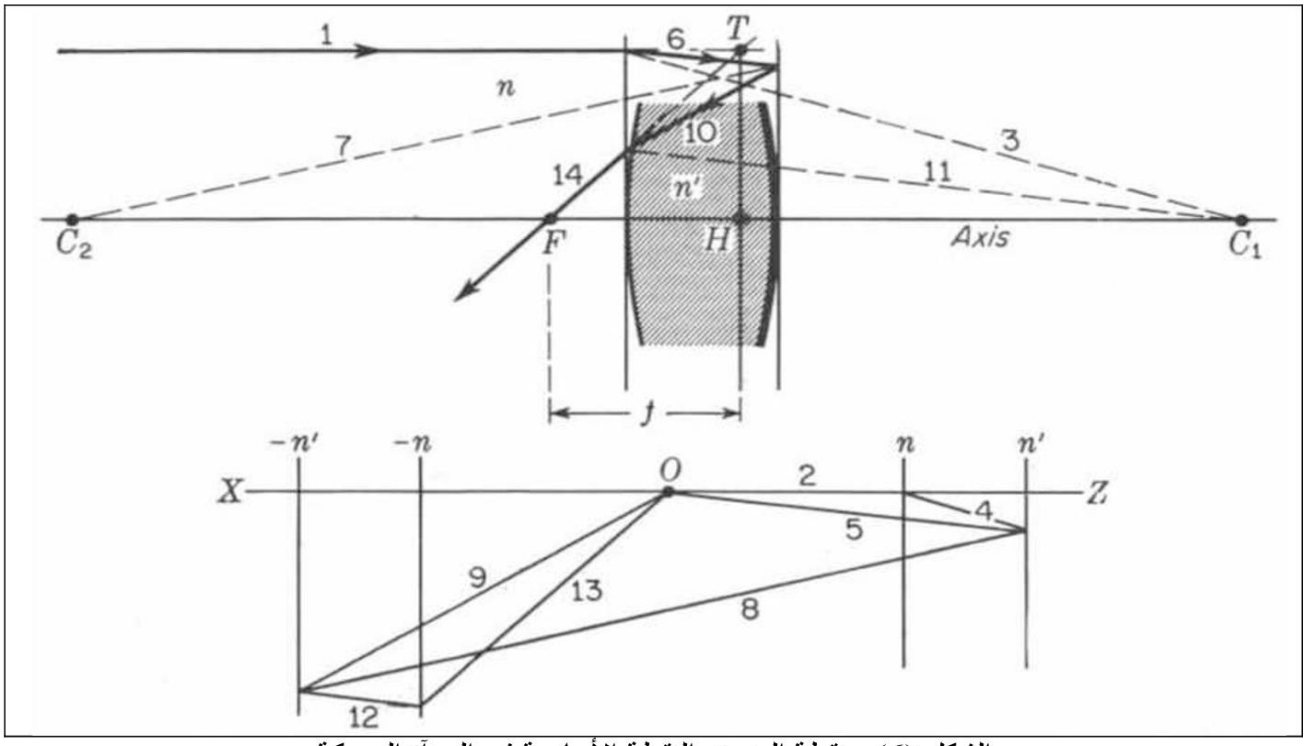
8. المرايا السميكة (Thick Mirrors)

يشير مصطلح المرآة السميكة الى العدسة التي تحتوي على سطح عاكس واحد ، حيث ينفذ الضوء خلال العدسة (ينكسر) ويرتد عن طريق السطح العاكس الى الوسط الأول . هناك ثلاثة أنواع من المرايا السميكة موضحة بالشكل (5) . النوع الأول (الشكل (5-a)) يتألف من عدسة رقيقة لامة (محدبة الوجهين) ومرآة مقعرة سطحها العاكس يواجه العدسة اللامة تفصلهما مسافة (d) ويشتركان بمحور بصري واحد . اما النوع الثاني (الشكل (5-b)) فيتألف من عدسة سميكة لامة (محدبة الوجهين) سمكها (d) احد سطحيها مرآة مقعرة ، بينما النوع الثالث (الشكل (5-c)) يتألف من عدسة رقيقة لامة (محدبة الوجهين) احد سطحيها مرآة مقعرة .



الشكل (5) : انواع المرايا السميكة

يحتوي النوع الأول والثاني من المرايا السميكة على نقطة أساسية (principal point H) واقعة أمام السطح العاكس ، نقطة تقاطع امتداد الشعاع الساقط مع امتداد الشعاع المنكسر والمنعكس تكون في المستوي الأساسي (principal plane)، يتقاطع المستوي الأساسي مع المحور البصري في النقطة الأساسية (H) . تحتوي المرآة السميكة (بكل أنواعها) على بؤرة واحدة (F) واقعة أمام السطح العاكس ، تتعين من سقوط شعاع موازي للمحور البصري على السطح الأول فينفذ منكسرا الى السطح الثاني ، ومن ثم ينعكس مرتدا الى السطح الاول منكسرا مرة اخرى فينفذ الى الوسط الاول متقاطعا مع المحور البصري في نقطة البؤرة (F) كما موضح في الشكل (6) . يكون البعد البؤري (f) موجبا في كل أنواع المرايا السميكة ويحسب من خلال البعد (FH) .



الشكل (6) : نقطة البؤرة والنقطة الأساسية في المرآة السميكة

9. صيغة المرآة السميكة (Thick Mirror Formula)

تستخدم صيغة المرآة السميكة بدلالة القدرة البصرية ، تحتوي المعادلة العامة للقدرة الكلية للمرآة السميكة على القدرة البصرية لكل جزء ، وأنصاف أقطار التكور للسطوح الكروية مع الاخذ بنظر الاعتبار الاوساط التي يمر بها الضوء خلال مسيره داخل المرآة السميكة .

A. صيغة النوع الاول (Type 1 formula)

ان الصيغة العامة للمرآة السميكة للنوع الاول هي :

$$P = \frac{1}{f} = (1 - cP_1)(2P_1 + P_2 - cP_1P_2) \quad \dots\dots(6)$$

باعتبار (n=n") فتكون (P_1) تمثل قدرة العدسة الرقيقة ، (P_2) قدرة المرآة المقعرة وكما يلي

$$P_1 = \frac{1}{f_1} = (n' - n)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \quad \dots\dots(7)$$

$$P_2 = -\frac{2n}{r_3} \quad \dots\dots(8)$$

$$c = \frac{d}{n} \quad \dots\dots (9)$$

حيث تمثل (r_1 ,r_2) انصاف اقطار تكور سطحي العدسة الرقيقة اللامة ، (r_3) نصف قطر تكور المرآة المقعرة ، (d) المسافة من العدسة اللامة الى المرآة المقعرة ، (n) معامل انكسار الوسط بين العدسة الرقيقة والمرآة ، (n') معامل انكسار العدسة الرقيقة .

لايجاد موقع النقطة الاساسية للمرآة السميكة نستخدم العلاقة :

$$H_1H = \frac{c}{1 - cP_1} \quad \dots\dots (10)$$

ولايجاد موقع البؤرة للمرآة السميكة نستخدم العلاقة :

$$FH = f - H_1H \quad \dots\dots (11)$$

B. صيغة النوع الثاني (Type 2 formula)

ان الصيغة العامة للمرآة السميكة للنوع الثاني هي :

$$P = \frac{1}{f} = (1 - cP_1)(2P_1 + P_2 - cP_1P_2)$$

تمثل (P_1) تمثل قدرة السطح الاول للعدسة السميكة ، (P_2) قدرة المرآة المقعرة وكما يلي:

$$P_1 = \frac{1}{f_1} = (n' - n)\left(\frac{1}{r_1}\right) \quad \dots\dots (12)$$

$$P_2 = -\frac{2n'}{r_2} \quad \dots\dots (13)$$

$$c = \frac{d}{n'} \quad \dots\dots (14)$$

حيث تمثل (r_1) نصف قطر تكور السطح الاول للعدسة السميكة ، (r_2) نصف قطر تكور المرآة المقعرة ، (d) سمك العدسة السميكة ، (n) معامل انكسار الوسط المحيط بالمرآة السميكة (غالبا هواء) ، (n') معامل انكسار المرآة السميكة . اما موقع النقطة الاساسية والبؤرة للمرآة السميكة نستخدم العلاقتين (10 , 11).

C. صيغة النوع الثالث (Type 3 formula)

ان استخدام عدسة رقيقة في النوع الثالث من المرايا السميكة يجعل قيمة سمكها صفر (d=0) ، وبالتالي قيمة (c=0) ، لذلك تختزل الصيغة العامة للمرآة السميكة للنوع الثالث كالاتي :

$$P = 2P_1 + P_2 \quad \ldots\ldots (15)$$

تمثل (P_2 , P_1) قدرة السطح الاول والثاني للعدسة الرقيقة على الترتيب، وكما يلي:

$$P_1 = \frac{1}{f_1} = (n' - n)\left(\frac{1}{r_1}\right)$$

$$P_2 = -\frac{2n'}{r_2}$$

حيث تمثل (r_2 , r_1) انصاف اقطار تكور سطحي العدسة الرقيقة الاول والثاني على الترتيب ، (n) معامل انكسار الوسط المحيط بالعدسة الرقيقة (غالبا هواء) ، (n') معامل انكسار العدسة الرقيقة جدير بالذكر انه لا توجد نقطة اساسية في النوع الثالث من المرايا السميكة بسبب اهمال السمك (d=0) ، بينما البؤرة تحسب بطريقة الرسم .

10. مسائل الفصل الخامس (Problems)

1) مراة مقعرة نصف قطر تكورها (30 cm) . وضع جسم ارتفاعه (4 cm) على مسافة (60 cm) أمام المرآة . جد (a) .صفات الصورة المتكونة ، (b) . ارتفاع الصورة .

$$a)\ \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = -\frac{2}{r}$$

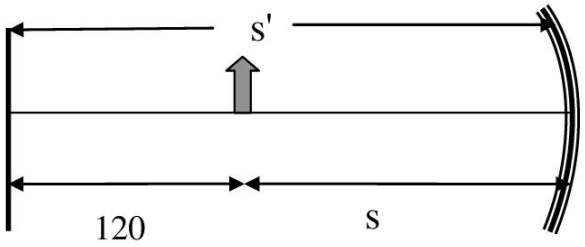
$$\frac{1}{60} + \frac{1}{s'} = -\frac{2}{-30} \quad \Rightarrow \quad s' = 20\ cm$$

$$m = -\frac{s'}{s} = -\frac{20}{60} = -0.33$$

اذن الصورة حقيقية تقع امام المرآة بمسافة (20 cm) ، كذلك الصورة مصغرة ومقلوبة

$$b)\ m = \frac{y'}{y} \quad \Rightarrow \quad -0.33 = \frac{y'}{4} \quad \Rightarrow\ y' = |-1.33| = 1.33$$

2) مراة مقعرة استخدمت لتكوين صورة لجسم يبعد عن شاشة بمقدار (120 cm) . فاذا كان المطلوب تكوين صورة حقيقية مقلوبة ومكبرة بمقدار (16) مرة على الشاشة . ما هو نصف قطر التكور المناسب لهذه المرآة ؟



$$s' = 120 + s$$

$$m = -\frac{s'}{s}$$

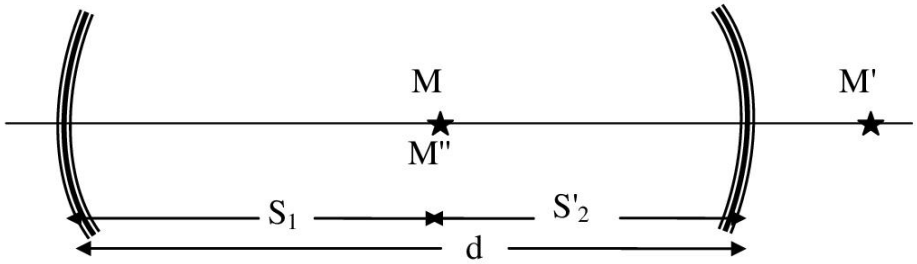
$$-16 = -\frac{120 + s}{s}$$

$$16s = 120 + s \;\Rightarrow\; s = \frac{120}{15} = 8cm$$

$$s' = 120 + 8 = 128\,cm$$

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = -\frac{2}{r} \;\Rightarrow\; \frac{1}{8} + \frac{1}{128} = -\frac{2}{r} \;\Rightarrow\; r = -15\,cm$$

3) مرآتين مقعرتين أنصاف أقطارهما (24 cm) ، (28 cm) ، وضعا بحيث كان سطحيهما العاكسين متقابلين ، ثم وضع جسم على بعد (15 cm) عن المرآة الأولى بحيث انطبق موقع الصورة النهائية على موقع الجسم . جد مقدار المسافة بين المرآتين .



$$d = s_1 + s_2' = 15 + s_2' \;\Rightarrow\; s_2' = d - 15$$

$$(mirror\ 1)\ \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_1'} = -\frac{2}{r_1} \;\Rightarrow\; \frac{1}{15} + \frac{1}{s_1'} = -\frac{2}{-24} \;\Rightarrow\; s_1' = 60\,cm$$

نفرض ان الصورة المتكونة في المرآة الاولى هي بمثابة جسم بالنسبة للمرآة الثانية :

$$s_2 = d - s_1' = d - 60$$

$$(mirror\ 1)\ \frac{1}{s_2} + \frac{1}{s_2'} = -\frac{2}{r_2} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{(d-60)} + \frac{1}{(d-15)} = -\frac{2}{-28}$$

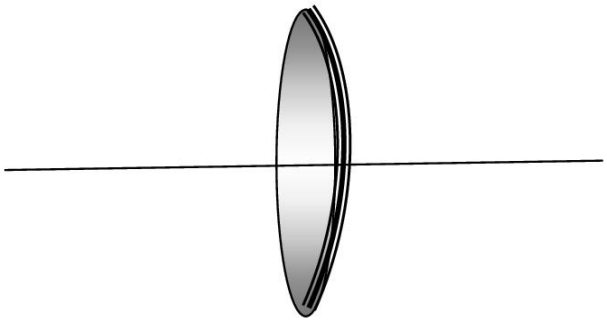
$$\frac{(d-15)+(d-60)}{(d-60)(d-15)} = \frac{1}{14}$$

$$d^2 - 103d + 1950 = 0$$

$$(d-78)(d-25) = 0$$

$$\therefore \quad d = 78\ cm \quad or \quad d = 25\ cm$$

4) عدسة رقيقة لامة (متساوية التكور) معامل انكسارها (1.6) وانصاف اقطار تكور سطحيها (12 cm) . فضض احد سطحيها بحيث اصبح مرآة مقعرة . جد قدرة هذا النظام

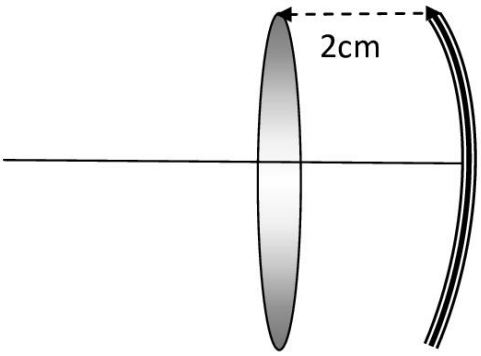


$$P_1 = \frac{n' - n}{r_1} = \frac{1.6 - 1}{12 * 10^{-2}} = 5\ D$$

$$P_2 = -\frac{2n'}{r_2} = -\frac{2 * 1.6}{-12 * 10^{-2}} = 26.6\ D$$

$$P = 2P_1 + P_2 = 2 * 5 + 26.6 = 36.6\ D$$

5) عدسة رقيقة لامة بعدها البؤري (12 cm) موضوع امامها بمسافة (2cm) مراة مقعرة نصف قطر تكورها (20 cm) . جد : (a) . قدرة المراة السميكة ، (b) . البعد البؤري للمراة السميكة ، (c) . موقع النقطة الاساسية وموقع البؤرة .



$$a)\ P_1 = \frac{1}{f_1} = \frac{1}{12 * 10^{-2}} = 8.33\ D$$

$$P_2 = -\frac{2n}{r} = -\frac{2 * 1}{-20 * 10^{-2}} = 10\ D$$

$$c = \frac{d}{n} = \frac{2}{1} = 2\ * 10^{-2} = 0.02\ m$$

$$P = (1 - cP_1)(2P_1 + P_2 - cP_1P_2)$$

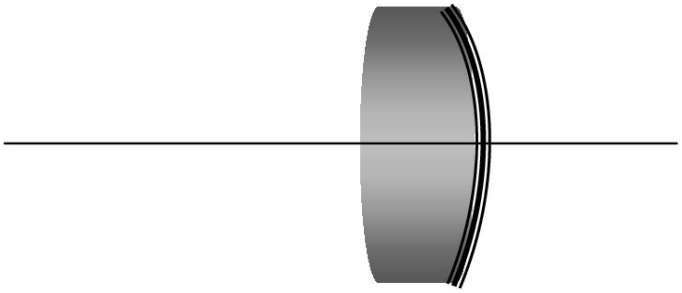
$$P = (1 - 0.02 * 8.33)(2 * 8.33 + 10 - 0.02 * 8.33 * 10) = 20.8\ D$$

$$b)\ f = \frac{1}{P} = \frac{1}{20.8} = 0.048\ m$$

$$c)\ H_1H = \frac{c}{1 - cP_1} = \frac{0.02}{1 - 0.02 * 8.33} = 0.024\ m$$

$$FH_1 = f - H_1H = 0.048 - 0.024 = 0.024\ m$$

6) عدسة لامة محدبة الوجهين سمكها (3 cm) ومعامل انكسار زجاجها (1.6) وانصاف اقطار تكور سطحيها (r_1=12 cm) ، (r_2=32 cm) ، فضض احد سطحيها بحيث اصبح مرآة مفعرة . جد : (a) . قدرة المرآة السميكة ، (b) . البعد البؤري للمرآة السميكة ، (c) . موقع النقطة الاساسية وموقع البؤرة .



$$a)\ P_1 = \frac{n' - n}{r_1} = \frac{1.6 - 1}{12 * 10^{-2}} = 5\ D$$

$$P_2 = -\frac{2n'}{r_2} = -\frac{2 * 1.6}{-32 * 10^{-2}} = 10\ D$$

$$c = \frac{d}{n'} = \frac{3}{1.6} = 1.8\ * 10^{-2} = 0.018\ m$$

$$P = (1 - cP_1)(2P_1 + P_2 - cP_1P_2)$$

$$P = (1 - 0.018 * 5)(2 * 5 + 10 - 0.018 * 5 * 10) = 17\ D$$

$$b)\ f = \frac{1}{P} = \frac{1}{17} = 0.06\ m$$

$$c)\ H_1H = \frac{c}{1 - cP_1} = \frac{0.018}{1 - 0.018 * 5} = 0.02\ m$$

$$FH_1 = f - H_1H = 0.06 - 0.02 = 0.04\ m$$

1. مقدمة (Introduction)

جميع العلاقات السابقة التي تربط بين بعد الجسم وبعد الصورة وانصاف اقطار التكور والبعد البؤري ...الخ مشتقة على اساس ان جميع الاشعة الصادرة من الاجسام هي اشعة شبه محورية (paraxial rays) (تصنع زاوية صغيرة مع المحور) ، لذلك استخدم التقريب الذي يجعل جيب زاوية السقوط يساوي الزاوية نفسها ($sin\theta \approx \theta$) . على هذا الاساس افترض ان جميع الاشعة تتقاطع بعد الانعكاس والانكسار في نفس النقطة ، وبذلك نحصل على صورة مثالية نظريا.

اما بشكل عام فان الاشعة الصادرة من الجسم لا تكون جميعها اشعة شبه محورية ، بل تصدر من نفس النقطة من الجسم بجميع الاتجاهات فتكون اشعة شبه محوري (قريبة من المحور) وأشعة غير محورية (marginal rays) (بعيدة عن المحور) تصنع زوايا كبيرة مع المحور ، فلا يمكن استخدام تقريب جيب الزاوية لكونه لا يصلح رياضيا في تعيين موقع تقاطع الاشعة . لذلك يستخدم مفكوك دالة الجيب للتعبير عن قيمة هذه الدالة بصورة دقيقة كما في المعادلة ادناه

$$sin\theta = \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} - \frac{\theta^7}{7!} + \cdots \qquad \ldots\ldots(1)$$

ان الاشعة الصادرة من نقطة واحدة لا تتقاطع بعد الانعكاس او الانكسار في نقطة واحدة عمليا بل في اكثر من نقطة . نتيجة لذلك تظهر الصورة مشوشة وغير واضحة المعالم وهذه الظاهرة تدعى **بالزيغ (aberration)** .

ان سبب حدوث الزيغ ليس نتيجة عيب صناعي في العدسات والمرايا ، بل نتيجة تطبيق قوانين الانكسار والانعكاس على السطوح الكروية بالنسبة لجميع الاشعة الساقطة (شبه المحورية وغير المحورية) .

2. أنواع الزيغ (Types of Aberration)

يتالف الزيغ من نوعين اساسيين حسب نوع الضوء الساقط . فاذا كان الضوء الساقط هو احادي الطول الموجي (monochromatic light) يسمى الزيغ الناتج **بالزيغ اللالوني** (monochromatic aberration) ينتج من عدم تقاطع الاشعة شبه المحورية و غير المحورية في نقطة واحدة ويحدث في العدسات والمرايا. اما اذا كان الضوء الساقط هو متعدد الطول الموجي (chromatic light) مثل الضوء الابيض فيسمى الزيغ الناتج **بالزيغ اللوني** (chromatic aberration) الذي ينتج من ظاهرة التفريق (dispersion) التي تنتج اشعة غير متقاطعة في نقطة واحدة حتى لو كانت الاشعة شبه محورية ويحدث في العدسات فقط.

3. الزيغ اللالوني (Monochromatic Aberration)

عند استخدام ضوء احادي الطول الموجي وسقوط الاشعة شبه المحورية وغير المحورية على السطح الكروي ينتج عدم تقاطع الاشعة في نقطة واحدة بعد الانعكاس او الانكسار ، تسمى هذه الظاهرة بالزيغ اللالوني . يتالف الزيغ اللالوني من ستة انواع رئيسية تعتمد على شكل الزيغ الناتج وموقع الجسم بالنسبة للمحور البصري ، هذه الانواع هي :

- الغبش البصري (defocus aberration)
- الزيغ الكروي (spherical aberration)
- زيغ المذنب (coma aberration)
- الزيغ اللابؤري (Astigmatism)
- زيغ تكور المجال (field curvature)
- زيغ التشوه (distortion)

A. الغَبَش البصري (Defocus Aberration)

هو نوع من أنواع الزيغ الذي يحدث عندما لا تلتقي كل الاشعة القادمة من نقطة واحدة في جسم ما عند نفس النقطة على مستوى الصورة . فتتكون نتيجة لذلك صورة ضبابية متداخلة مع بعضها، ان سبب هذا الزيغ هو عدم وضع حاجز استلام الصورة في المكان المناسب حيث تتكون ، فتتبعثر الاشعة القادمة من الجسم على الحاجز مما يؤدي الى نقصان قيمة التباين والحدة للصورة أي تقل جودة الصورة .

ان هذا الزيغ يحدث في الاجهزة البصرية كالمجهر والمقراب والعين البشرية ، حيث يعزى سبب حدوثه في العين البشرية لتشوه كروية العين (تفلطح) ، ففي حالة تفلطحها افقيا لا تتكون الصورة على شبكية العين (retina) بل امامها مسببة قصر البصر (myopia) . اما في حالة تفلطحها عموديا فتتكون الصورة خلف الشبكية مسببة بعد البصر (hypermetropia) .

ممكن ازالة الغبش البصري بالانظمة البصرية عن طريق تغيير موقع حاجز الصورة لتتكون في المكان المناسب . بينما في العين لا يمكن ذلك الا عن طريق تصحيح مسار الاشعة القادمة الى العدسة بوضع عدسة لامة (لبعد البصر) أو عدسة مفرقة (لقصر البصر) لجعل الصورة تتكون في المكان المناسب (في الشبكية) .

B. الزيغ الكروي (Spherical Aberration)

ينتج الزيغ الكروي من عدم تقاطع الاشعة الصادرة من جسم محوري (واقع على المحور البصري) في نقطة واحدة بعد الانعكاس او الانكسار ، فتتقاطع الاشعة غير المحورية (marginal

$$c = \frac{d}{n} \quad \dots\dots (9)$$

حيث تمثل (r_1 ,r_2) انصاف اقطار تكور سطحي العدسة الرقيقة اللامة ، (r_3) نصف قطر تكور المرآة المقعرة ، (d) المسافة من العدسة اللامة الى المرآة المقعرة ، (n) معامل انكسار الوسط بين العدسة الرقيقة والمرآة ، (n') معامل انكسار العدسة الرقيقة .

لايجاد موقع النقطة الاساسية للمرآة السميكة نستخدم العلاقة :

$$H_1H = \frac{c}{1 - cP_1} \quad \dots\dots (10)$$

ولايجاد موقع البؤرة للمرآة السميكة نستخدم العلاقة :

$$FH = f - H_1H \quad \dots\dots (11)$$

B. صيغة النوع الثاني (Type 2 formula)

ان الصيغة العامة للمرآة السميكة للنوع الثاني هي :

$$P = \frac{1}{f} = (1 - cP_1)(2P_1 + P_2 - cP_1P_2)$$

تمثل (P_1) تمثل قدرة السطح الاول للعدسة السميكة ، (P_2) قدرة المرآة المقعرة وكما يلي:

$$P_1 = \frac{1}{f_1} = (n' - n)\left(\frac{1}{r_1}\right) \quad \dots\dots (12)$$

$$P_2 = -\frac{2n'}{r_2} \quad \dots\dots (13)$$

$$c = \frac{d}{n'} \quad \dots\dots (14)$$

حيث تمثل (r_1) نصف قطر تكور السطح الاول للعدسة السميكة ، (r_2) نصف قطر تكور المرآة المقعرة ، (d) سمك العدسة السميكة ، (n) معامل انكسار الوسط المحيط بالمرآة السميكة (غالبا هواء) ، (n') معامل انكسار المرآة السميكة . اما موقع النقطة الاساسية والبؤرة للمرآة السميكة نستخدم العلاقتين (10 , 11).

C. صيغة النوع الثالث (Type 3 formula)

ان استخدام عدسة رقيقة في النوع الثالث من المرايا السميكة يجعل قيمة سمكها صفر (d=0) ، وبالتالي قيمة (c=0) ، لذلك تختزل الصيغة العامة للمرآة السميكة للنوع الثالث كالاتي :

$$P = 2P_1 + P_2 \quad \ldots\ldots (15)$$

تمثل (P_2 , P_1) قدرة السطح الاول والثاني للعدسة الرقيقة على الترتيب، وكما يلي:

$$P_1 = \frac{1}{f_1} = (n' - n)\left(\frac{1}{r_1}\right)$$

$$P_2 = -\frac{2n'}{r_2}$$

حيث تمثل (r_2 , r_1) انصاف اقطار تكور سطحي العدسة الرقيقة الاول والثاني على الترتيب ، (n) معامل انكسار الوسط المحيط بالعدسة الرقيقة (غالبا هواء) ، (n') معامل انكسار العدسة الرقيقة جدير بالذكر انه لا توجد نقطة اساسية في النوع الثالث من المرايا السميكة بسبب اهمال السمك (d=0) ، بينما البؤرة تحسب بطريقة الرسم .

10. مسائل الفصل الخامس (Problems)

1) مراة مقعرة نصف قطر تكورها (30 cm) . وضع جسم ارتفاعه (4 cm) على مسافة (60 cm) أمام المرآة . جد (a) .صفات الصورة المتكونة ، (b) . ارتفاع الصورة .

$$a)\ \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = -\frac{2}{r}$$

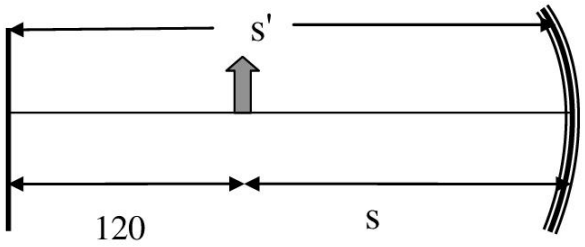
$$\frac{1}{60} + \frac{1}{s'} = -\frac{2}{-30} \quad \Rightarrow \quad s' = 20\ cm$$

$$m = -\frac{s'}{s} = -\frac{20}{60} = -0.33$$

اذن الصورة حقيقية تقع امام المرآة بمسافة (20 cm) ، كذلك الصورة مصغرة ومقلوبة

$$b)\ m = \frac{y'}{y} \quad \Rightarrow \quad -0.33 = \frac{y'}{4} \quad \Rightarrow\ y' = |-1.33| = 1.33$$

2) مراة مقعرة استخدمت لتكوين صورة لجسم يبعد عن شاشة بمقدار (120 cm) . فاذا كان المطلوب تكوين صورة حقيقية مقلوبة ومكبرة بمقدار (16) مرة على الشاشة . ما هو نصف قطر التكور المناسب لهذه المرآة ؟



$$s' = 120 + s$$

$$m = -\frac{s'}{s}$$

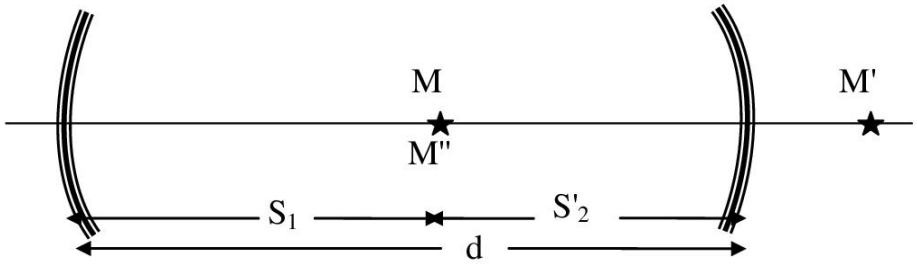
$$-16 = -\frac{120 + s}{s}$$

$$16s = 120 + s \;\Rightarrow\; s = \frac{120}{15} = 8cm$$

$$s' = 120 + 8 = 128\,cm$$

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = -\frac{2}{r} \;\Rightarrow\; \frac{1}{8} + \frac{1}{128} = -\frac{2}{r} \;\Rightarrow\; r = -15\,cm$$

3) مرآتين مقعرتين أنصاف أقطارهما (24 cm) ، (28 cm) ، وضعا بحيث كان سطحيهما العاكسين متقابلين ، ثم وضع جسم على بعد (15 cm) عن المرآة الأولى بحيث انطبق موقع الصورة النهائية على موقع الجسم . جد مقدار المسافة بين المرآتين .



$$d = s_1 + s_2' = 15 + s_2' \;\Rightarrow\; s_2' = d - 15$$

$$(mirror\ 1)\ \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_1'} = -\frac{2}{r_1} \;\Rightarrow\; \frac{1}{15} + \frac{1}{s_1'} = -\frac{2}{-24} \;\Rightarrow\; s_1' = 60\,cm$$

نفرض ان الصورة المتكونة في المرآة الاولى هي بمثابة جسم بالنسبة للمرآة الثانية :

$$s_2 = d - s_1' = d - 60$$

$$(mirror\ 1)\ \frac{1}{s_2} + \frac{1}{s_2'} = -\frac{2}{r_2} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{(d-60)} + \frac{1}{(d-15)} = -\frac{2}{-28}$$

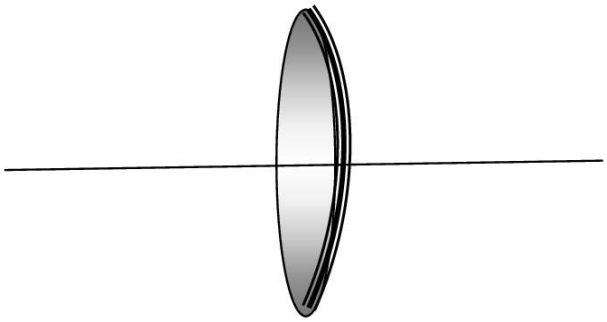
$$\frac{(d-15)+(d-60)}{(d-60)(d-15)} = \frac{1}{14}$$

$$d^2 - 103d + 1950 = 0$$

$$(d-78)(d-25) = 0$$

$$\therefore \quad d = 78\ cm \quad or \quad d = 25\ cm$$

4) عدسة رقيقة لامة (متساوية التكور) معامل انكسارها (1.6) وانصاف اقطار تكور سطحيها (12 cm) . فضض احد سطحيها بحيث اصبح مرآة مقعرة . جد قدرة هذا النظام

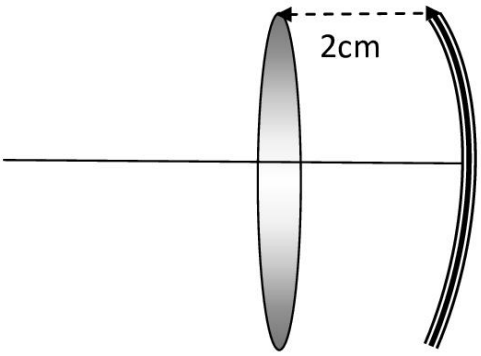


$$P_1 = \frac{n' - n}{r_1} = \frac{1.6 - 1}{12 * 10^{-2}} = 5\ D$$

$$P_2 = -\frac{2n'}{r_2} = -\frac{2 * 1.6}{-12 * 10^{-2}} = 26.6\ D$$

$$P = 2P_1 + P_2 = 2 * 5 + 26.6 = 36.6\ D$$

5) عدسة رقيقة لامة بعدها البؤري (12 cm) موضوع امامها بمسافة (2cm) مراة مقعرة نصف قطر تكورها (20 cm) . جد : (a) . قدرة المراة السميكة ، (b) . البعد البؤري للمراة السميكة ، (c) . موقع النقطة الاساسية وموقع البؤرة .



$$a)\ P_1 = \frac{1}{f_1} = \frac{1}{12 * 10^{-2}} = 8.33\ D$$

$$P_2 = -\frac{2n}{r} = -\frac{2 * 1}{-20 * 10^{-2}} = 10\ D$$

$$c = \frac{d}{n} = \frac{2}{1} = 2\ * 10^{-2} = 0.02\ m$$

$$P = (1 - cP_1)(2P_1 + P_2 - cP_1P_2)$$

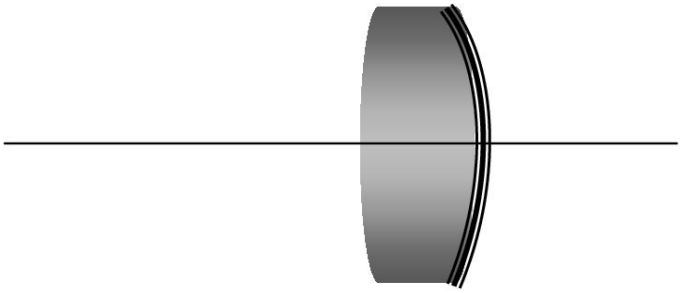
$$P = (1 - 0.02 * 8.33)(2 * 8.33 + 10 - 0.02 * 8.33 * 10) = 20.8\ D$$

$$b)\ f = \frac{1}{P} = \frac{1}{20.8} = 0.048\ m$$

$$c)\ H_1H = \frac{c}{1 - cP_1} = \frac{0.02}{1 - 0.02 * 8.33} = 0.024\ m$$

$$FH_1 = f - H_1H = 0.048 - 0.024 = 0.024\ m$$

6) عدسة لامة محدبة الوجهين سمكها (3 cm) ومعامل انكسار زجاجها (1.6) وانصاف اقطار تكور سطحيها (r_1=12 cm) ، (r_2=32 cm) ، فضض احد سطحيها بحيث اصبح مرآة مفعرة . جد : (a) . قدرة المرآة السميكة ، (b) . البعد البؤري للمرآة السميكة ، (c) . موقع النقطة الاساسية وموقع البؤرة .



$$a)\ P_1 = \frac{n' - n}{r_1} = \frac{1.6 - 1}{12 * 10^{-2}} = 5\ D$$

$$P_2 = -\frac{2n'}{r_2} = -\frac{2 * 1.6}{-32 * 10^{-2}} = 10\ D$$

$$c = \frac{d}{n'} = \frac{3}{1.6} = 1.8\ * 10^{-2} = 0.018\ m$$

$$P = (1 - cP_1)(2P_1 + P_2 - cP_1P_2)$$

$$P = (1 - 0.018 * 5)(2 * 5 + 10 - 0.018 * 5 * 10) = 17\ D$$

$$b)\ f = \frac{1}{P} = \frac{1}{17} = 0.06\ m$$

$$c)\ H_1H = \frac{c}{1 - cP_1} = \frac{0.018}{1 - 0.018 * 5} = 0.02\ m$$

$$FH_1 = f - H_1H = 0.06 - 0.02 = 0.04\ m$$

1. مقدمة (Introduction)

جميع العلاقات السابقة التي تربط بين بعد الجسم وبعد الصورة وانصاف اقطار التكور والبعد البؤري ...الخ مشتقة على اساس ان جميع الاشعة الصادرة من الاجسام هي اشعة شبه محورية (paraxial rays) (تصنع زاوية صغيرة مع المحور) ، لذلك استخدم التقريب الذي يجعل جيب زاوية السقوط يساوي الزاوية نفسها ($sin\theta \approx \theta$) . على هذا الاساس افترض ان جميع الاشعة تتقاطع بعد الانعكاس والانكسار في نفس النقطة ، وبذلك نحصل على صورة مثالية نظريا.

اما بشكل عام فان الاشعة الصادرة من الجسم لا تكون جميعها اشعة شبه محورية ، بل تصدر من نفس النقطة من الجسم بجميع الاتجاهات فتكون اشعة شبه محوري (قريبة من المحور) وأشعة غير محورية (marginal rays) (بعيدة عن المحور) تصنع زوايا كبيرة مع المحور ، فلا يمكن استخدام تقريب جيب الزاوية لكونه لا يصلح رياضيا في تعيين موقع تقاطع الاشعة . لذلك يستخدم مفكوك دالة الجيب للتعبير عن قيمة هذه الدالة بصورة دقيقة كما في المعادلة ادناه

$$sin\theta = \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} - \frac{\theta^7}{7!} + \cdots \qquad \ldots\ldots(1)$$

ان الاشعة الصادرة من نقطة واحدة لا تتقاطع بعد الانعكاس او الانكسار في نقطة واحدة عمليا بل في اكثر من نقطة . نتيجة لذلك تظهر الصورة مشوشة وغير واضحة المعالم وهذه الظاهرة تدعى **بالزيغ (aberration)** .

ان سبب حدوث الزيغ ليس نتيجة عيب صناعي في العدسات والمرايا ، بل نتيجة تطبيق قوانين الانكسار والانعكاس على السطوح الكروية بالنسبة لجميع الاشعة الساقطة (شبه المحورية وغير المحورية) .

2. أنواع الزيغ (Types of Aberration)

يتالف الزيغ من نوعين اساسيين حسب نوع الضوء الساقط . فاذا كان الضوء الساقط هو احادي الطول الموجي (monochromatic light) يسمى الزيغ الناتج **بالزيغ اللالوني** (monochromatic aberration) ينتج من عدم تقاطع الاشعة شبه المحورية و غير المحورية في نقطة واحدة ويحدث في العدسات والمرايا. اما اذا كان الضوء الساقط هو متعدد الطول الموجي (chromatic light) مثل الضوء الابيض فيسمى الزيغ الناتج **بالزيغ اللوني** (chromatic aberration) الذي ينتج من ظاهرة التفريق (dispersion) التي تنتج اشعة غير متقاطعة في نقطة واحدة حتى لو كانت الاشعة شبه محورية ويحدث في العدسات فقط.

3. الزيغ اللالوني (Monochromatic Aberration)

عند استخدام ضوء احادي الطول الموجي وسقوط الاشعة شبه المحورية وغير المحورية على السطح الكروي ينتج عدم تقاطع الاشعة في نقطة واحدة بعد الانعكاس او الانكسار ، تسمى هذه الظاهرة بالزيغ اللالوني . يتالف الزيغ اللالوني من ستة انواع رئيسية تعتمد على شكل الزيغ الناتج وموقع الجسم بالنسبة للمحور البصري ، هذه الانواع هي :

- الغبش البصري (defocus aberration)
- الزيغ الكروي (spherical aberration)
- زيغ المذنب (coma aberration)
- الزيغ اللابؤري (Astigmatism)
- زيغ تكور المجال (field curvature)
- زيغ التشوه (distortion)

A. الغَبَش البصري (Defocus Aberration)

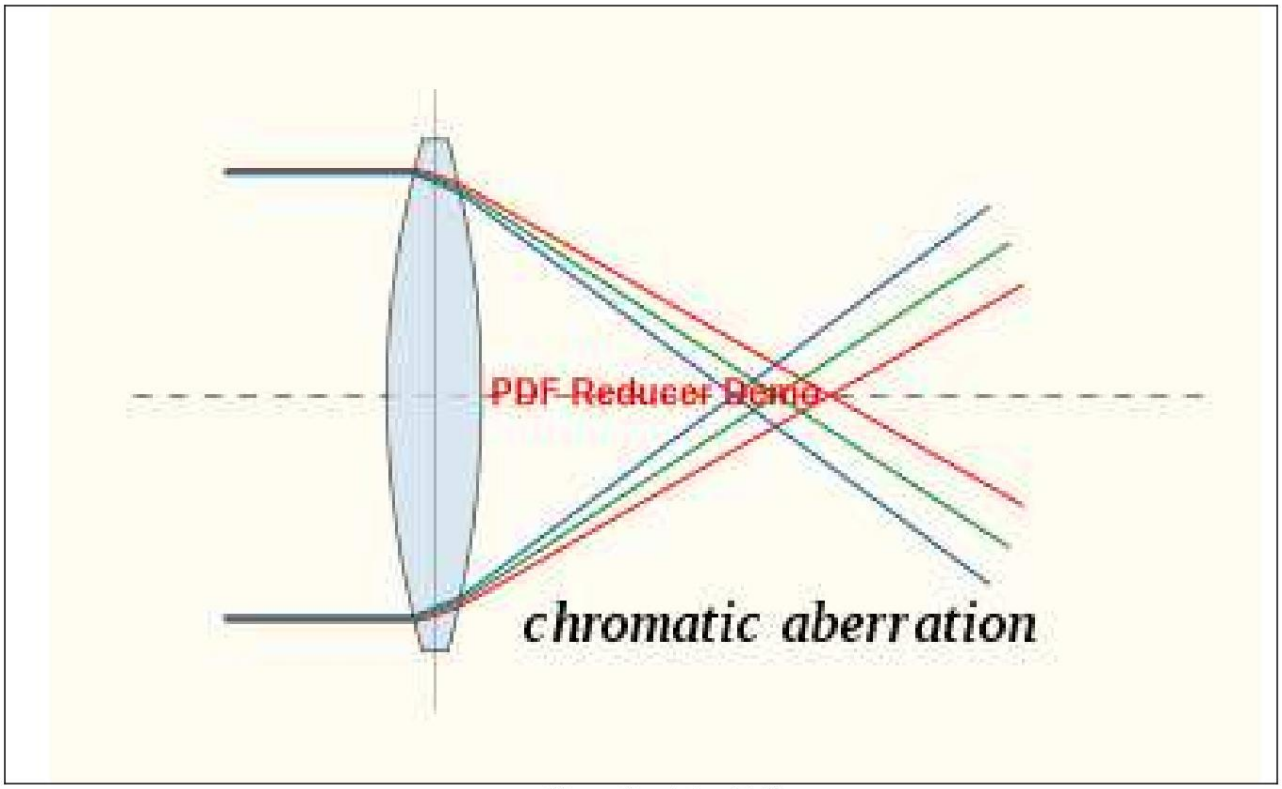
هو نوع من أنواع الزيغ الذي يحدث عندما لا تلتقي كل الاشعة القادمة من نقطة واحدة في جسم ما عند نفس النقطة على مستوى الصورة . فتتكون نتيجة لذلك صورة ضبابية متداخلة مع بعضها، ان سبب هذا الزيغ هو عدم وضع حاجز استلام الصورة في المكان المناسب حيث تتكون ، فتتبعثر الاشعة القادمة من الجسم على الحاجز مما يؤدي الى نقصان قيمة التباين والحدة للصورة أي تقل جودة الصورة .

ان هذا الزيغ يحدث في الاجهزة البصرية كالمجهر والمقراب والعين البشرية ، حيث يعزى سبب حدوثه في العين البشرية لتشوه كروية العين (تفلطح) ، ففي حالة تفلطحها افقيا لا تتكون الصورة على شبكية العين (retina) بل امامها مسببة قصر البصر (myopia) . اما في حالة تفلطحها عموديا فتتكون الصورة خلف الشبكية مسببة بعد البصر (hypermetropia) .

ممكن ازالة الغبش البصري بالانظمة البصرية عن طريق تغيير موقع حاجز الصورة لتتكون في المكان المناسب . بينما في العين لا يمكن ذلك الا عن طريق تصحيح مسار الاشعة القادمة الى العدسة بوضع عدسة لامة (لبعد البصر) أو عدسة مفرقة (لقصر البصر) لجعل الصورة تتكون في المكان المناسب (في الشبكية) .

B. الزيغ الكروي (Spherical Aberration)

ينتج الزيغ الكروي من عدم تقاطع الاشعة الصادرة من جسم محوري (واقع على المحور البصري) في نقطة واحدة بعد الانعكاس او الانكسار ، فتتقاطع الاشعة غير المحورية (marginal



الشكل (8) : الزيغ اللوني

- طرائق تقليل الزيغ اللوني

هناك عدة طرائق لتقليل الزيغ اللوني يمكن من خلالها اختيار مجموعة مواصفات للعدسة المستخدمة يكون لها دور في تقليل الزيغ . ان اهم هذه الطرائق يمكن تلخيصها بالاتي :

1) عدسة لالونية مكونة من عدستين متلاصقتين (Contact Achromatic Lens)

يمكن تقليل الزيغ اللوني باستخدام عدسة خاصة تسمى عدسة لالونية (achromatic lens) تتكون غالبا من عدستين مختلفتين في معامل الانكسار تلصقان معا ، اشهر هذه الانواع هي العدسة المركبة التي تتكون من الزجاج التاجي (crown glass) والزجاج الصواني (flint glass) . ان شرط العدسة اللالونية يحسب من خلال المعادلة :

$$\frac{w_1}{f_1} + \frac{w_2}{f_2} = 0 \qquad \dots\dots(2)$$

حيث (f_1 ,f_2) تمثل البعد البؤري للعدسة الاولى والثانية على الترتيب، وتحسب قيمتهما من العلاقتين الآتيتين :

$$f_1 = f\frac{(w_2 - w_1)}{w_2} \quad \ldots\ldots(3)$$

$$f_2 = f\frac{(w_1 - w_2)}{w_1} \quad \ldots\ldots(4)$$

حيث (f) يمثل البعد البؤري المكافئ للعدسة المركبة اللالونية ، (w_2 ,w_1) تمثل قدرة التفريق للعدسة الاولى والثانية على الترتيب . ان قدرة التفريق للعدسة تمثل قابلية العدسة على تفريق الاطوال الموجية المختلفة بعد الانكسار ، وتحسب من خلال معرفة معاملات الانكسار الخاصة لكل طول موجي لمادة العدسة كما يلي :

$$w = \frac{n_B - n_R}{(n-1)} \quad \ldots\ldots(5)$$

حيث (n_B , n_R) تمثل معاملات انكسار العدسة للونين الاحمر والازرق على الترتيب ، بينما (n) يمثل معامل الانكسار الوسطي للعدسة (او للون الاصفر) .

2) عدسة لالونية مكونة من عدستين منفصلتين (Separated Achromatic Lens)

يمكن استخدام عدستين مصنوعتين من نفس المادة لكن مفصولتين بمسافة للتغلب على الزيغ اللوني ، فتسمى العدسة المركبة المتكونة عدسة لالونية . تخضع هذه العدسة لنفس شرط العدسة اللالونية ، مع الاخذ بنظر الاعتبار المسافة بين العدستين يجب ان تخضع للشرط الاتي :

$$d = \frac{f_1 + f_2}{2} \quad \ldots\ldots(6)$$

3) عدد آبي (Abbe Number)

ان اهم المعاملات الخاصة بقياس نسبة التفريق اللوني في المواد الشفافة هو عدد آبي (Abbe Number V) ، فكلما زاد عدد آبي قل التفريق اللوني في العدسة . ان قيمة عدد آبي ثابتة لكل مادة ، ويعتمد على معاملات الانكسار الخاصة بنوع المادة للطول الموجي للون الاحمر والازرق والاصفر . فمثلا للزجاج الصواني قليل التفريق يكون عدد آبي ($V > 55$) ، وللزجاج التاجي ($V > 25$) ، وللبلاستك ($V > 35$) . لذلك فان الاختيار المناسب لنوع مادة العدسة من خلال قيمة عدد آبي توفر لنا عدسة ذات زيغ لوني قليل نسبيا .

هناك طرائق اخرى لتقليل الزيغ اللوني منها استخدام عدسات هجينة (مزيج من مادتين او اكثر) ، لكنها مكلفة وتتطلب دقة صناعية عالية . اشهر هذه العدسات هي العدسة المتكونة من الزجاج والفلور .

5. مسائل الفصل السادس

1) المطلوب صناعة عدسة لالونية لها بعد بؤري (20 cm) تتكون من عدستين متلاصقتين احدهما متساوية التكور من الزجاج التاجي والثانية من الزجاج الصواني ، معاملات الانكسار لهما تحسب من الجدول ادناه ما مقدار انصاف اقطار التكور المناسبة لكل عدسة

	n_B	n	n_R
Crown glass	1.515	1.509	1.507
Flint glass	1.638	1.625	1.620

$$crown\ glass \quad w_1 = \frac{n_B - n_R}{(n-1)} = \frac{1.515 - 1.507}{1.509 - 1} = 0.015$$

$$flint\ glass \quad w_2 = \frac{n_B - n_R}{(n-1)} = \frac{1.638 - 1.620}{1.625 - 1} = 0.027$$

$$f_1 = f\frac{(w_2 - w_1)}{w_2} = 20 * \frac{(0.027 - 0.015)}{0.027} = 8.91\ cm$$

$$f_2 = f\frac{(w_1 - w_2)}{w_1} = 20 * \frac{(0.015 - 0.027)}{0.015} = -16.1\ cm$$

$$\frac{1}{f_1} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \quad (note:\ r_1 = -r_2)$$

$$\frac{1}{8.91} = (1.509 - 1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{-r_1}\right)$$

$$r_1 = 9.08\ cm \quad , \quad r_2 = -9.08\ cm$$

$$\frac{1}{f_2} = (n-1)\left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right) \quad (note:\ r_2 = r_3)$$

$$\frac{1}{-16.1} = (1.625 - 1)\left(\frac{1}{-9.08} - \frac{1}{r_4}\right)$$

$$r_3 = -9.08\ cm \quad , \quad r_4 = -93.45\ cm$$

2) عدستان رقيقتان مصنوعتان من نفس المادة ، البعد البؤري للعدسة الاولى (f_1=100 cm) وضعتا على محور واحد بمسافة معينة بحيث كونتا عدسة لالونية بعدها البؤري (f=50 cm) . جد البعد البؤري للعدسة الثانية والمسافة بين العدستين .

$$d = \frac{f_1 + f_2}{2}$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2}$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{f_1 + f_2}{2 f_1 f_2}$$

$$\frac{1}{50} = \frac{1}{100} + \frac{1}{f_2} - \frac{100 + f_2}{2 * 100 f_2}$$

$$f_2 = 33\ cm$$

$$d = \frac{f_1 + f_2}{2} = \frac{100 + 33}{2} = 66.5\ cm$$

3) عدسة لالونية بعدها البؤري (50 cm) مكونة من عدستين متلاصقتين . نصف قطر تكور سطحها المشترك (r =-30 cm) ، فاذا كانت قدرة التفريق للعدستين (w_1=0.22) ، (w_2=0.46) ، ومعامل الانكسار الوسطي لهما (n_1=1.52) ، (n_2=1.63) . ما مقدار انصاف اقطار التكور لكل عدسة ؟

$$\frac{w_1}{f_1}+\frac{w_2}{f_2}=0$$

$$\frac{0.22}{f_1}+\frac{0.46}{f_2}=0 \quad \Longrightarrow \quad \frac{1}{f_1}=-\left(\frac{0.46}{0.22}\right)\frac{1}{f_2}$$

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{f_1}+\frac{1}{f_2} \qquad (d=0)$$

$$\frac{1}{50}=-\left(\frac{0.46}{0.22}\right)\frac{1}{f_2}+\frac{1}{f_2}$$

$$f_2=-54.5\,cm \quad , \quad f_1=26.1\,cm$$

$$\frac{1}{f_1}=(n_1-1)\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2}\right)$$

$$\frac{1}{26.1}=(1.52-1)\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{-30}\right)$$

$$r_1=24.8\,cm$$

$$\frac{1}{f_2}=(n_2-1)\left(\frac{1}{r_3}-\frac{1}{r_4}\right)$$

$$\frac{1}{-54.5}=(1.63-1)\left(\frac{1}{-30}-\frac{1}{r_4}\right)$$

$$r_4=-23.9\,cm$$