

مادة البصريات / المرحلة الثانية / قسم الفيزياء

تدريسيو المادة :

ت	الاسم	اللقب العلمي	الاختصاص الدقيق
1	د. علاء بدر حسن	استاذ مساعد	بصريات
2	د. ابتسام محمد تقي	مدرس	ليزر اشباه موصلات
3	د. حنان كاظم حسون	مدرس	اغشية رقيقة

مفردات منهج مادة البصريات (2018-2019):

1. طبيعة الضوء

1.1 الطيف الكهرومغناطيسي

1.2 سرعة الضوء

1.3 معامل الانكسار

1.4 الفوتون

1.5 جبهة الموجة

2. الانكسار والانعكاس

2.1 مبدأ فيرمات

2.2 قانون الانعكاس

2.3 قانون الانكسار

2.4 الانعكاس الكلي والزاوية الحرجة

2.5 الانكسار في المواشير

3. الانكسار في السطوح الكروية

3.1 السطح الكروي

3.2 هندسة السطح الكروي

3.3 تكوين الصور

3.4 طريقة الرسم

3.5 الطريقة الحسابية

3.6 التكبير الجانبي

3.7 قدرة السطح الكروي

3.8 اصطلاح الاشارات

4. العدسات

- 4.1 العدسة
- 4.2 العدسات الرقيقة
- 4.3 مجموعة العدسات اللامة
- 4.4 مجموعة العدسات المفرفة
- 4.5 هندسة العدسة
- 4.6 تكوين الصور
- 4.7 صيغة كاوس للعدسات
- 4.8 صيغة نيوتن للعدسات
- 4.9 التكبير الجانبي
- 4.10 صيغة صانعي العدسات
- 4.11 فدره العدسة
- 4.12 العدسة المركبة
- 4.13 العدسة السميكة

5. المرايا

- 5.1 انواع المرايا
- 5.2 هندسة المرايا
- 5.3 تكوين الصور
- 5.4 طريقة الرسم
- 5.5 صيغة كاوس للمرايا
- 5.6 التكبير الجانبي
- 5.7 قدرة المرآة
- 5.8 المرايا السميكة
- 5.9 اصطلاح الاشارات

6. الزيغ

- 6.1 انواع الزيغ
- 6.2 الزيغ اللالوني
- 6.3 الزيغ الكروي
- 6.4 الزيغ المذنب
- 6.5 الزيغ اللابوري
- 6.6 زيغ تكور المجال
- 6.7 زيغ التشوة

6.8 طرائق ازالة الزيغ

6.9 الزيغ اللوني

7. التداخل

7.1 الموجة الكهرومغناطيسية

7.2 تداخل موجتان

7.3 تجربة الشق المزدوج ليونك

7.4 التداخل في الاغشية الرقيقة

7.5 فقاعة الصابون

7.6 التداخل في طبقة الزيت

7.7 الاغشية غير العاكسة

8. الحيود

8.1 مفهوم الحيود

8.2 الحيود في الشقوق الضيقة

8.3 تجربة يونك للشق المنفرد

8.4 محرز الحيود

9. الاستقطاب

9.1 فكرة الاستقطاب

9.2 اشكال الاستقطاب

9.3 انواع الاستقطاب

9.4 طرق انتاج الاستقطاب

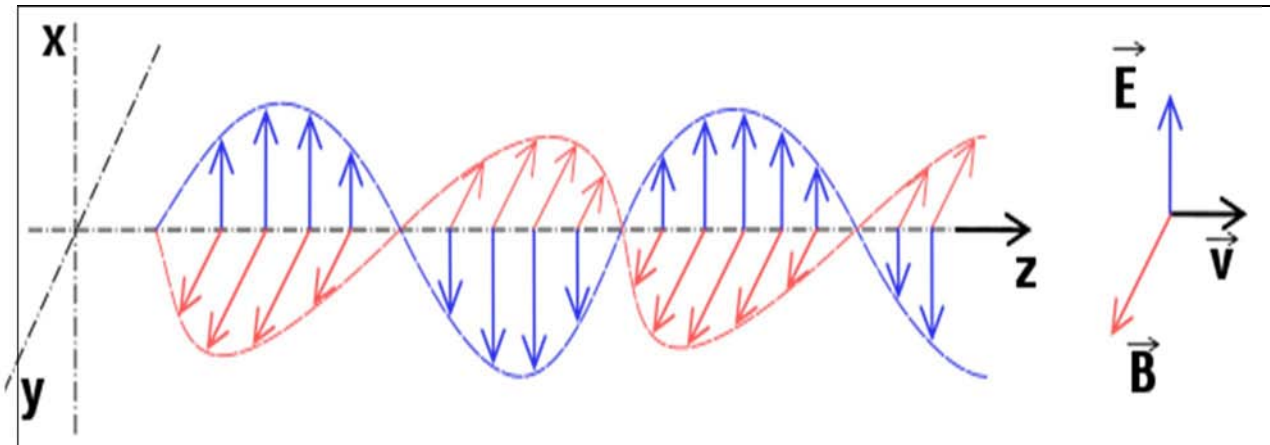
1. المقدمة (Introduction)

قديمًا، 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 توماس 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 الكهرباء والمغناطيسية في عام 1873م 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 إلكترونات 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 تُستخدم 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 البنفسجي، 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 يُشبه 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 نمطاً منتظماً من المجالات الكهربائية والمغناطيسية، يمكن أن تنتقل عبر الفضاء.

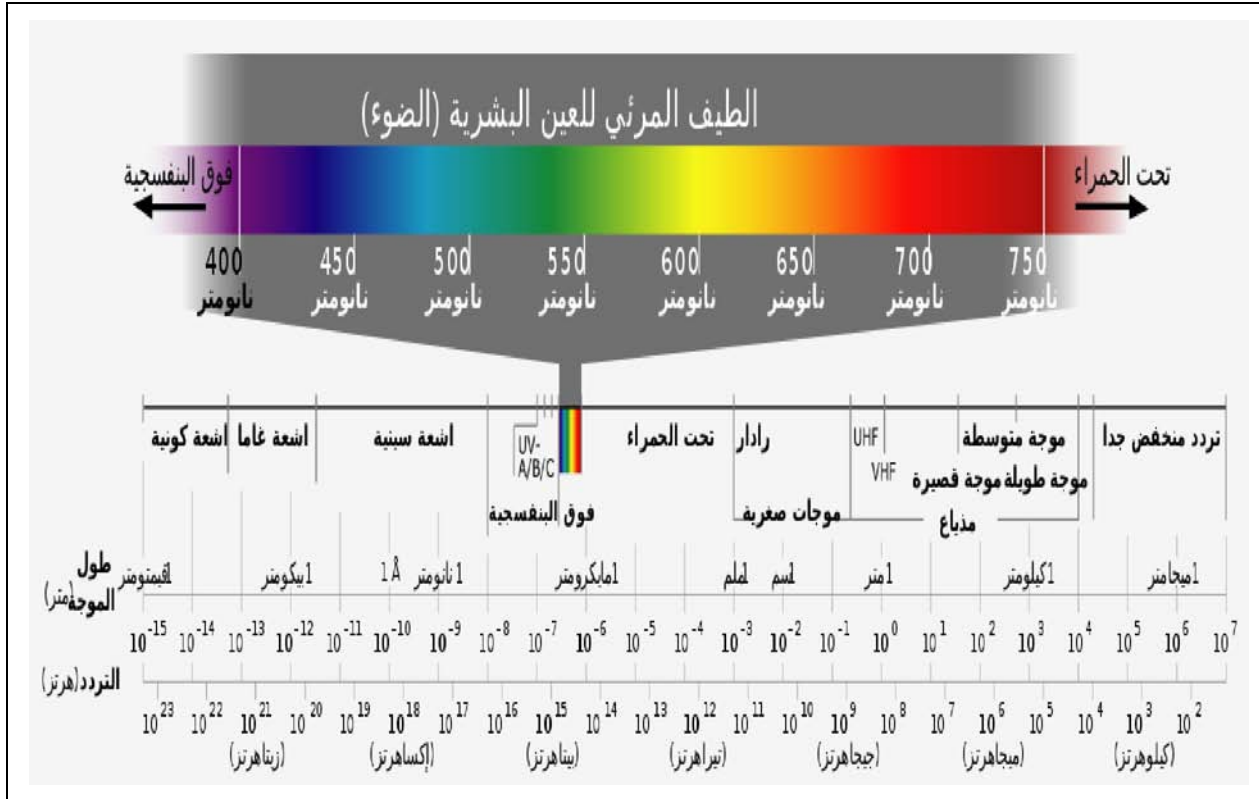


الشكل (1) : موجة يتغير فيها المجال الكهربائي E متعامداً على موجة يتغير فيها مجال مغناطيسي B وتنتشر الموجة في الاتجاه Z العمودي على المستوي الذي يتغير فيه المجالان

3. الطيف الكهرومغناطيسي (Electromagnetic Spectrum)

يعتبر الضوء المرئي إشعاع كهرومغناطيسي ينتج من أي مصدر تنتقل فيه الإلكترونات بين المدارات الذرية المختلفة فينتج فرق طاقة يولد الطاقة الضوئية ، وهو جزء من طيف واسع من الإشعاع الكهرومغناطيسي الذي يبدأ من الموجات الراديوية (ذات الطول الموجي الطويل والطاقة والتردد الواطئ) ، انتهاءً بالأشعة الكونية (ذات الطول الموجي القصير والطاقة والتردد العالي) . بينما يتكون الضوء المرئي من طيف جزئي خاص به يبدأ من الضوء الأحمر (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 تحسس 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 أحدث النظريات العلمية (النظرية النسبية لآينشتاين) وهي نفسها لكل الطيف الكهرومغناطيسي، وتختلف سرعة الضوء في الاوساط المختلفة نتيجة اختلاف الخواص البصرية لكل وسط ، وتحسب سرعة الضوء من خلال القانون التالي:

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

حيث (c) هي سرعة الضوء في الفراغ وهي قيمة ثابتة (3×10^8 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 أو أجزاء المتر) . تعتبر سرعة الضوء من الثوابت الفيزيائية المهمة التي تدخل في

كثير من العلاقات المهمة المتعلقة بالبصريّات 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، وتسمّى هذا النوع من الجسيمات الآن الفوتونات. وفي نموذج أينشتاين فإن شعاع الضوء هو المسار الذي يسلكه الفوتون. فمثلاً عندما يرسل المصباح شعاعاً 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 معاً، 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 متناهية الصغر (كتلته السكونية تساوي صفر) له طاقة وزخم وتترافقه موجة كهرومغناطيسية (حسب المفاهيم الحديثة) ، ويعتبر كم الطاقة الكهرومغناطيسية أي هو العنصر المكون لكل الطيف الكهرومغناطيسي فضلاً على الضوء المرئي ، وتحسب طاقة الفوتون عن طريق العلاقة :

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

6. معامل الانكسار (Refraction Index)

هي نسبة سرعة الضوء في الفراغ إلى سرعته في هذا الوسط. وهو معامل يبين مدى تأثر المادة بالأمواج 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 الكهرومغناطيسية. بالإضافة، فلبعض المواد يختلف معامل الانكسار وفق اتجاه تقدّم الموجة الكهرومغناطيسية في المادة.

معظم المواد ذات الشفافية للضوء المرئي لديها معاملات انكسار ما بين (1-2)، 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

ما بين (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 معينة ، فنحن حين نتحدث عن الزجاج او البلاستيك 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 :

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

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 وب نفس 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 : $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

Velocity of light in glass

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3 \times 10^8}{1.5} = 2 \times 10^8 \text{ m/s}$$

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

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{n} = \frac{500 \times 10^{-9} \text{ m}}{1.5} = 333.3 \times 10^{-9} \text{ m}$$

(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:

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

$$N = \frac{(30 - 3) \times 10^{-3} \text{ m}}{600 \times 10^{-9} \text{ m}} + \frac{3 \times 10^{-3} \text{ m}}{\frac{600 \times 10^{-9} \text{ m}}{1.5}}$$

$$N = \frac{27 \times 10^{-3}}{600 \times 10^{-9}} + \frac{4.5 \times 10^{-3}}{600 \times 10^{-9}} = 52.5 \text{ waves}$$

(3) اناء زجاجي عمقه (10 cm) مملوء بالكحول ($n_{ch}=1.861$) ، واناة 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 ؟

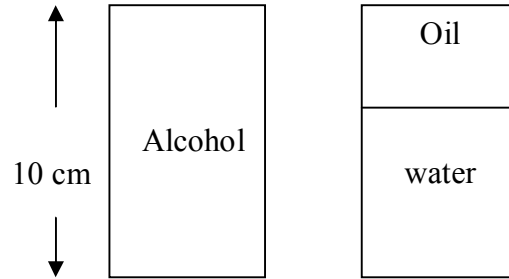
$$m = \frac{d_{ch}}{\lambda_{ch}} = \frac{d_w}{\lambda_w} + \frac{d_{oil}}{\lambda_{oil}}$$

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

$$\frac{10}{\frac{\lambda_0}{1.861}} = \frac{10 - d_{oil}}{\frac{\lambda_0}{1.333}} + \frac{d_{oil}}{\frac{\lambda_0}{1.473}}$$

$$18.61 = 13.33 - 1.333 d_{oil} + 1.473 d_{oil}$$

$$0.28 = 0.14 d_{oil} \Rightarrow d_{oil} = \frac{0.28}{0.14} = 2 \text{ cm}$$



(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 .

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

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

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

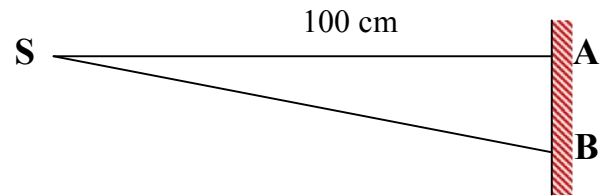
(5) قطعة زجاجية طولها (3 m) ومعامل انكسارها ($n=1.5$) . نبضتان ضوئيتان متزامنتين انطلقتا معا في نفس الاتجاه ، واحدة خلال الزجاج والثانية خلال الفراغ وقطعتا نفس المسافة . ما هو الفرق الزمني بين النبضتين لتصل الى المراقب ؟

$$t_{air} = \frac{d_{air}}{v_{air}} = \frac{d_{air}}{c} = \frac{3 \text{ m}}{3 \times 10^8} = 1 \times 10^{-8} \text{ sec}$$

$$t_g = \frac{d_g}{v_g} = \frac{d_g}{\frac{c}{n_g}} = \frac{3 \text{ m}}{\frac{3 \times 10^8}{1.5}} = 1.5 \times 10^{-8} \text{ sec}$$

$$t = t_g - t_{air} = (1.5 - 1) \times 10^{-8} = 0.5 \times 10^{-8}$$

(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 ؟



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

$$m_{SB} = \frac{d}{\lambda} = \frac{100.005 \times 10^{-2}}{500 \times 10^{-9}} = 0.20001 \times 10^7 = 20001 \times 10^2$$

$$m_{SA} = \frac{100 \times 10^{-2}}{500 \times 10^{-9}} = 20000 \times 10^2$$

$$m_{SB} - m_{SA} = 20001 \times 10^2 - 20000 \times 10^2 = 1 \times 10^2 = 100$$

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

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

$$\frac{100.005 \times 10^{-2}}{500 \times 10^{-9}} = \frac{100 \times 10^{-2} - d_g}{500 \times 10^{-9}} + \frac{d_g n_g}{500 \times 10^{-9}}$$

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

$$0.005 = 0.5 d_g$$

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

1. المقدمة (Introduction)

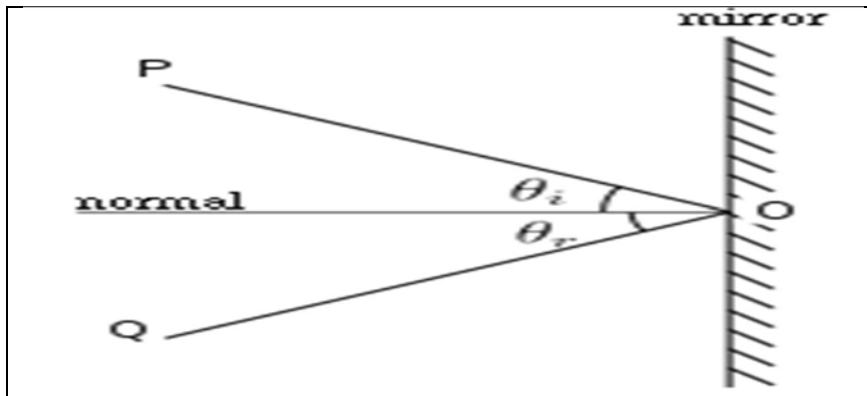
عند سقوط الضوء على الحد الفاصل بين وسطين مختلفين بالكثافة البصرية فان جزء من هذا الضوء ينعكس والجزء الآخر ينكسر والجزء الأخير يمتص ، معتمدا على نوع الوسيط وطبيعة السطح الفاصل بينهما . في هذا الفصل سوف نتحدث على الانعكاس والانكسار لكونه يحدث للجزء الاكبر من الضوء بالنسبة للمواد العازلة الشفافة ، ويهمل 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.



الشكل (1): ظاهرة الانعكاس

ويتكون 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.

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 وجزئيات 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 تغير 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 الأمثلة على الانكسار الموجي تغير اتجاه الضوء عند مروره عبر قطعة زجاجية.

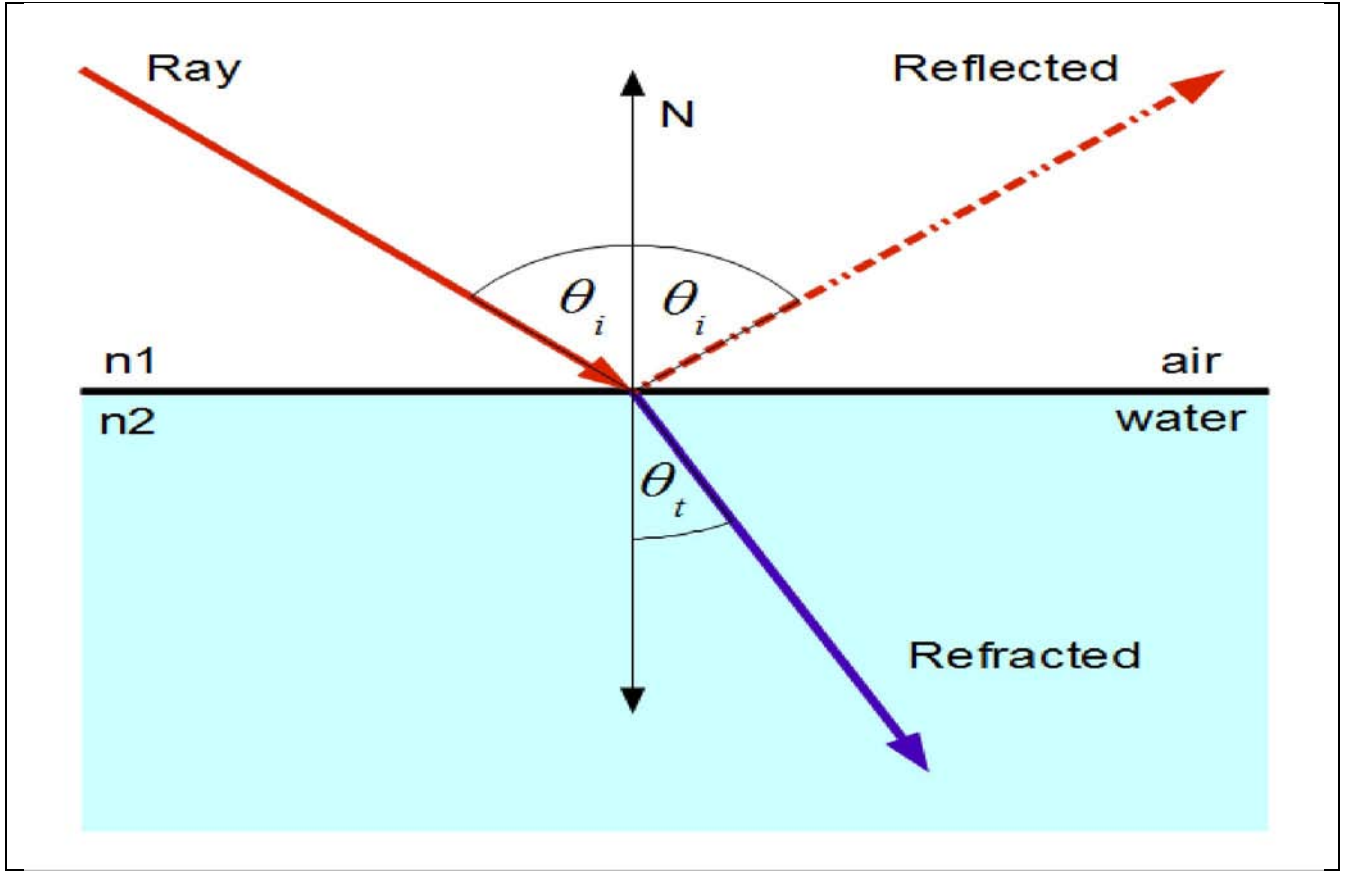
انكسار الضوء هي أحد الظواهر التي يتعرض لها الضوء. و توجد لهذه الظاهرة أهمية كبيرة لفهمنا الطبيعة التي تصادفنا كما أن لها استخدامات تقنية بأجهزة علمية عديدة. ان العلاقة التي تربط بين الضوء الساقط والانعكاس وضعها العالم سنيل (Snell). والذي اشار الى ان النسبة بين جيب زاوية السقوط الى جيب زاوية الانكسار 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 :

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

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°) 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°). وبزيادة زاوية السقوط بمقدار اكبر من الزاوية الحرجة فنحصل على ضوء منعكس كلياً (اي لا يحدث انكسار في الوسط الثاني) وهذه الظاهرة تسمى بالانعكاس الكلي .

لحساب العلاقة الخاصة بالزاوية الحرجة ، تكون :

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

$$\sin 90 = 1$$

بتطبيق قانون سنيل على المعطيات أعلاه يكون :

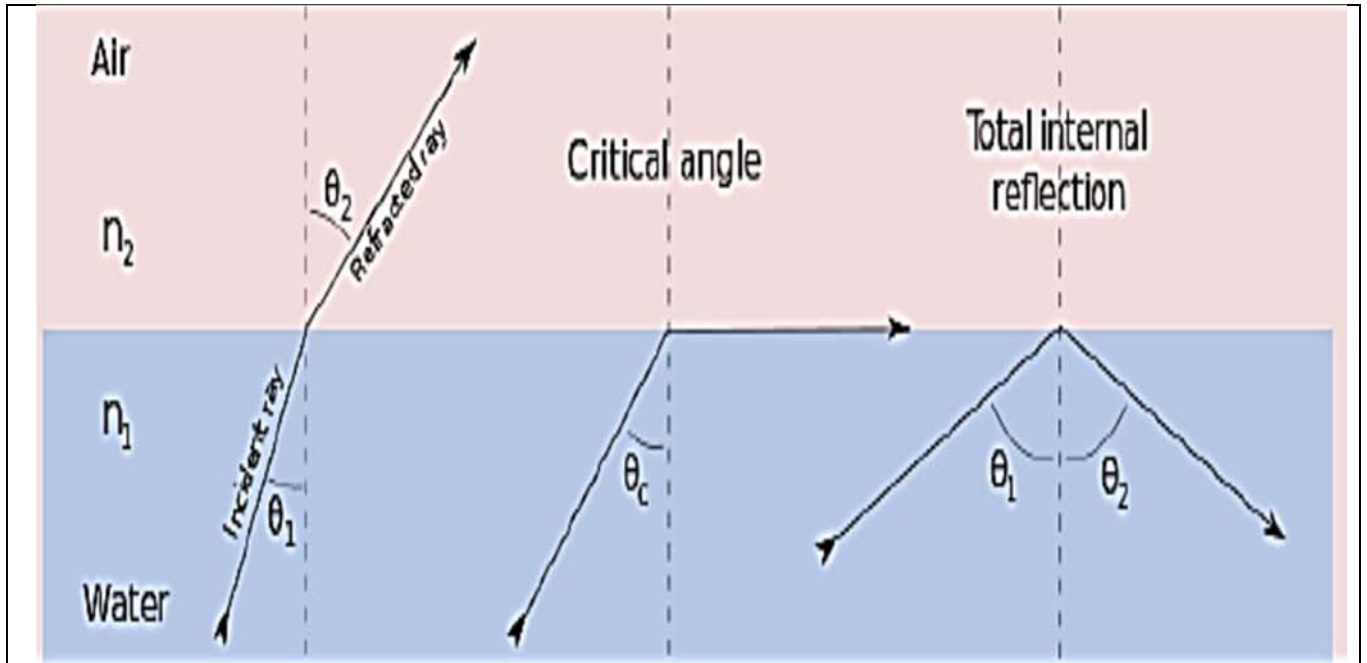
$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \rightarrow n_1 \sin \theta_{crt} = n_2 \sin 90$$

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

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

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 :

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



الشكل (3) : الزاوية الحرجة والانعكاس الكلي

الانكسار في

.6

(Refraction in Prism) الموشور

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 الأحمر والأصفر والبرتقالي والأخضر والأزرق والبنفسجي الغامق (البنيلي) والبنفسجي، فإن 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 متمائل (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 أيضاً 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 مثلثاً 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 قائمتين 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 موازياً 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:

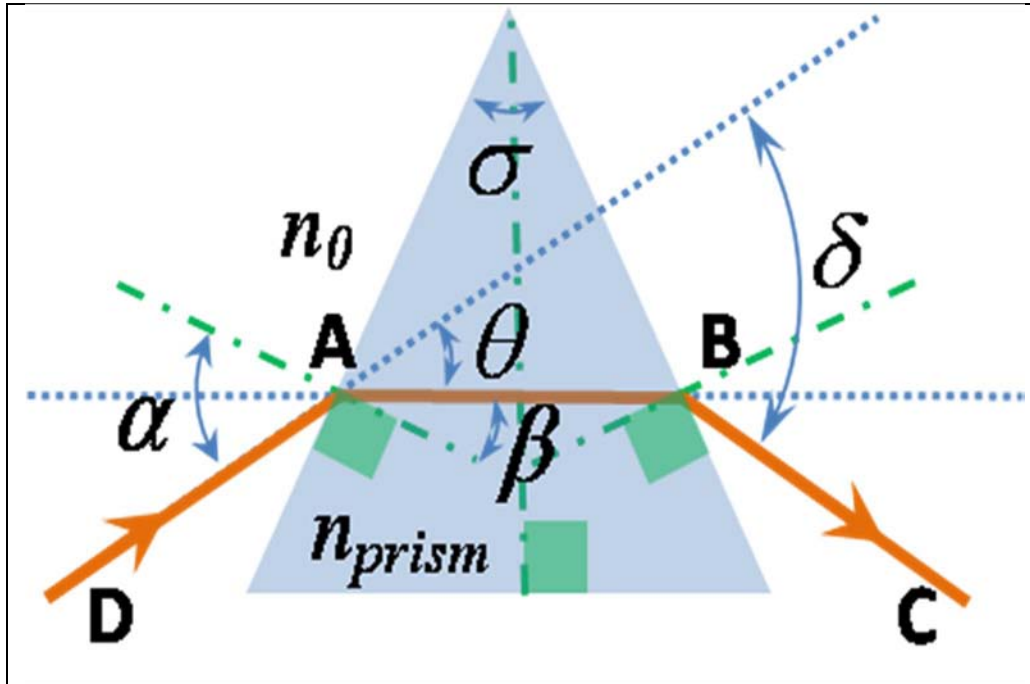
$$\delta = 2\alpha - \sigma$$

أو بعبارة أخرى :

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

بتعويض هذه القيمة في قانون الانكسار مرة أخرى نجد أن :

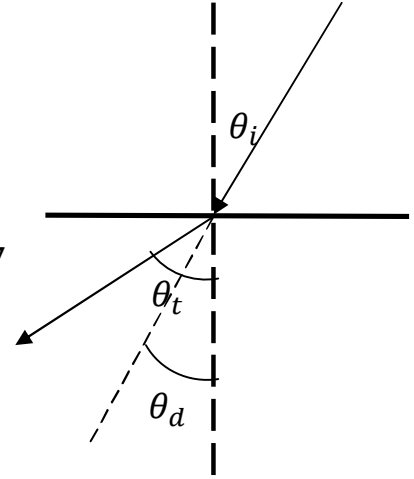
$$\frac{n_{prism}}{n_o} = \frac{\sin \frac{\delta + \sigma}{2}}{\sin \frac{\sigma}{2}} \dots \dots (5)$$



الشكل (4) : الموشور

7. 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°) . احسب (a): زاوية الانكسار ، (b): زاوية الانحراف .



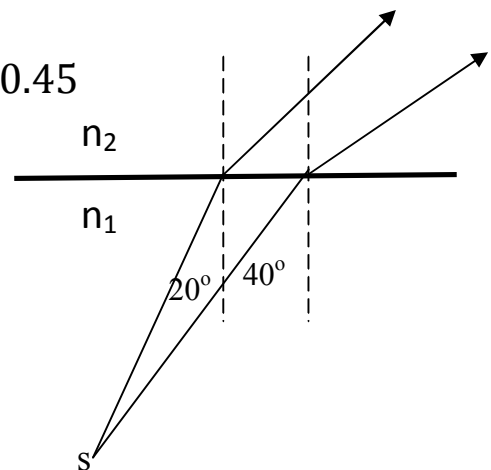
$$a) n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$$

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

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

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

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



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

$$\sin \theta_t = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \rightarrow \sin \theta_t = \frac{1.3}{1} \sin 20 = 0.45$$

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

$$\sin \theta_t = \frac{1.3}{1} \sin 40 = 0.85$$

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

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

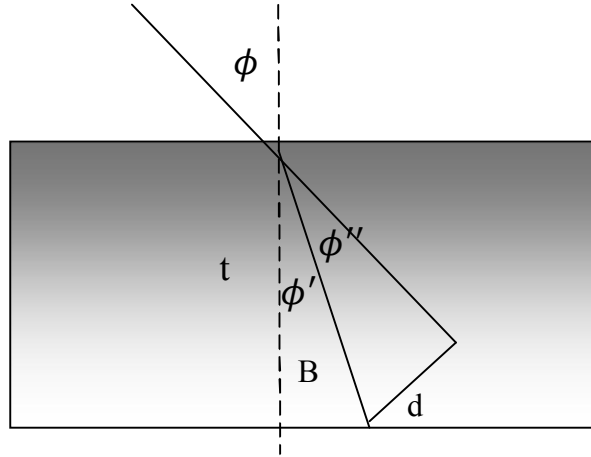
$$d = t \frac{\sin(\phi - \phi')}{\cos \phi'}$$

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

$$d = 1.03 \text{ cm}$$

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 ؟

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

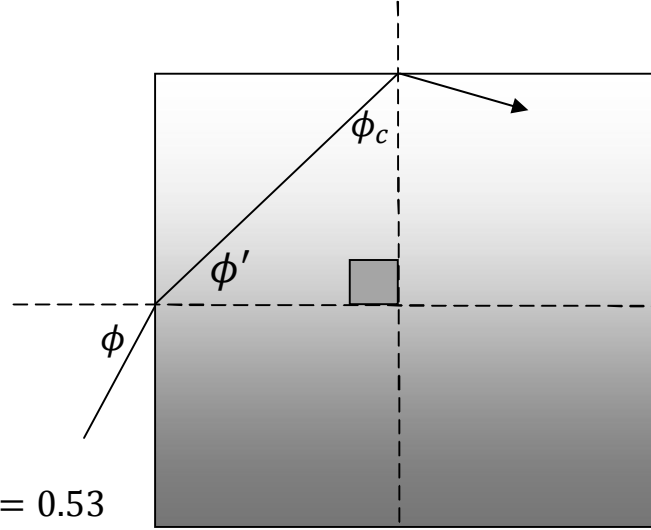
$$\phi_c = \sin^{-1}(0.88) = 62^\circ$$

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

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

$$\sin \phi = \frac{n'}{n} \sin \phi' = \frac{1.5}{1.33} \sin 28 = 0.53$$

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



6) موشور زاوية رأسه (60°) ، وزاوية انحرافه الصغرى للون الازرق (43°) . جد زاوية الانكسار للوجه الاول ، وزاوية السقوط ، ومعامل انكسار الموشور . نفرض ان معامل انكسار الوسط المحيط بالموشور هو هواء ($n_0=1$)

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

$$\alpha = \frac{\delta + \sigma}{2} = \frac{43 + 60}{2} = 51.5^\circ$$

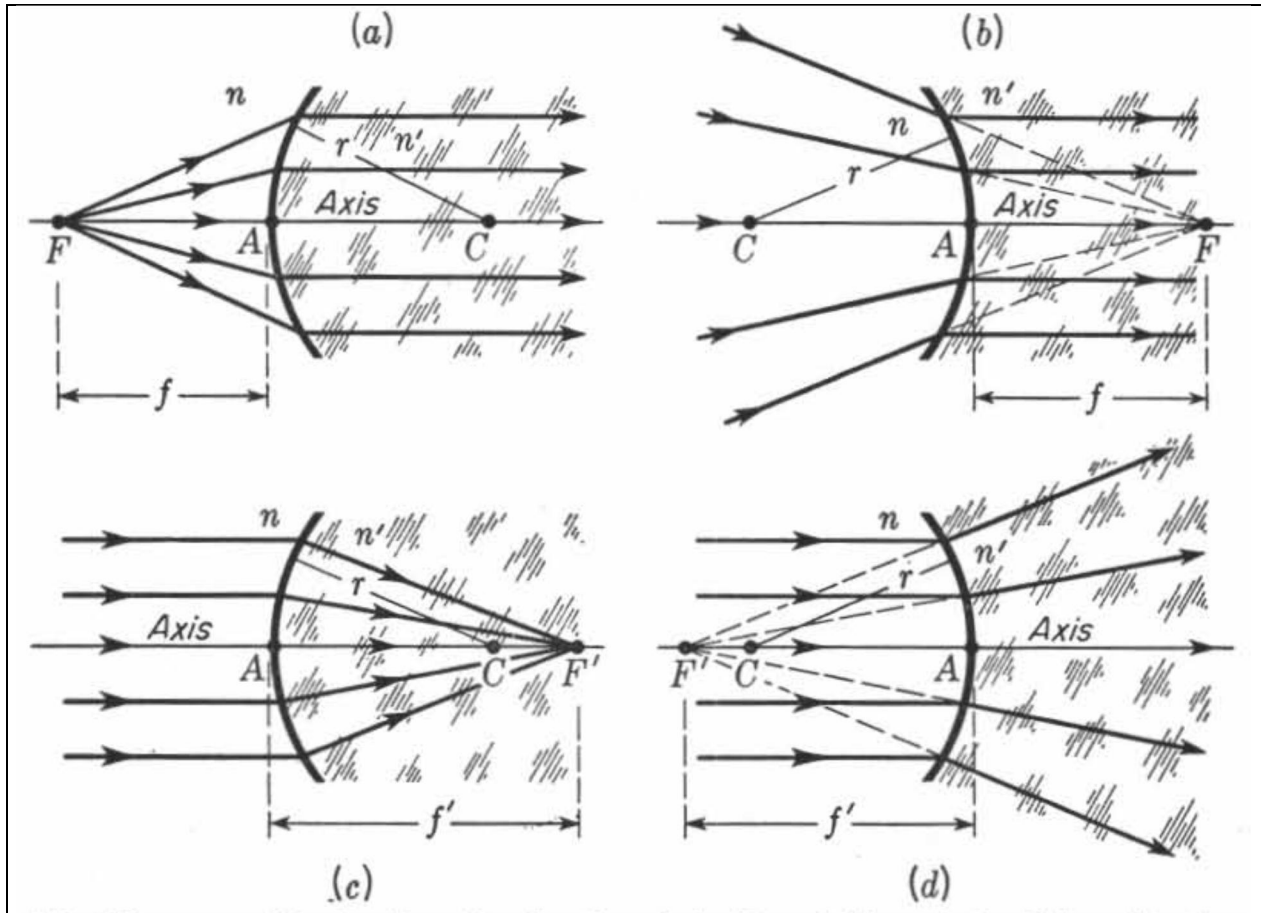
$$n_{prism} = \frac{\sin \frac{\delta + \sigma}{2}}{\sin \frac{\sigma}{2}} = \frac{\sin \frac{43 + 60}{2}}{\sin \frac{60}{2}} = \frac{\sin 51.5}{\sin 30} = \frac{0.78}{0.5} = 1.56$$

(1) السطح الكروي (Spherical Surface)

السطح الكروي هو سطح منحنى 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 المنكسرة 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 .

هندسة السطح الكروي (Geometrical of)

(2)

(Spherical Surface)

لمعرفة طبيعة السطح الكروي وكيفية عمله في انكسار الضوء خلاله ، بجب 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 الاولى والثانوية (primary and secondary focal points) . نقطة البؤرة الاولى (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 الاولى والسمت يسمى **البعد البؤري الاول (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 الاولى والثانوية بالمستوى البؤري الأولي والثانوي (primary and secondary focal plane) على الترتيب.

تكوين الصور (Image Formation)

(3)

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) .

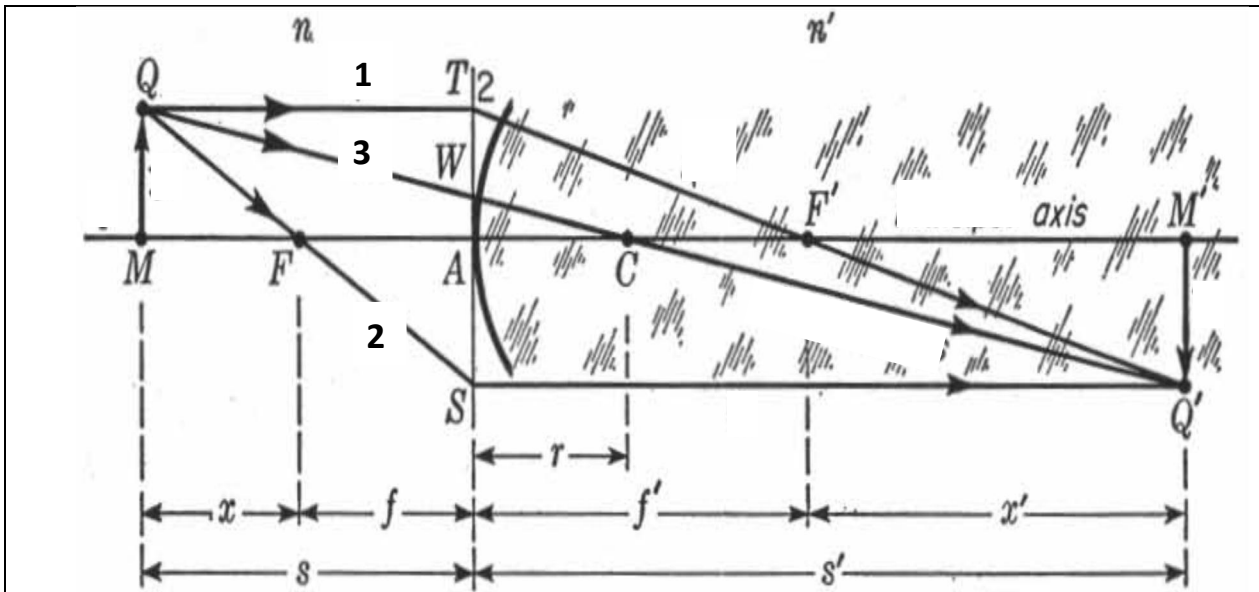
طريقة الرسم (Graphical Method)

(4)

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 للأجسام الشاخصة (اجسام لها ابعاد) ، وطريقة الشعاع المائل (oblique ray method) لتكوين صور للأجسام النقطية (اجسام لا بعد لها) .

A. طريقة الشعاع الموازي (Parallel Ray Method)

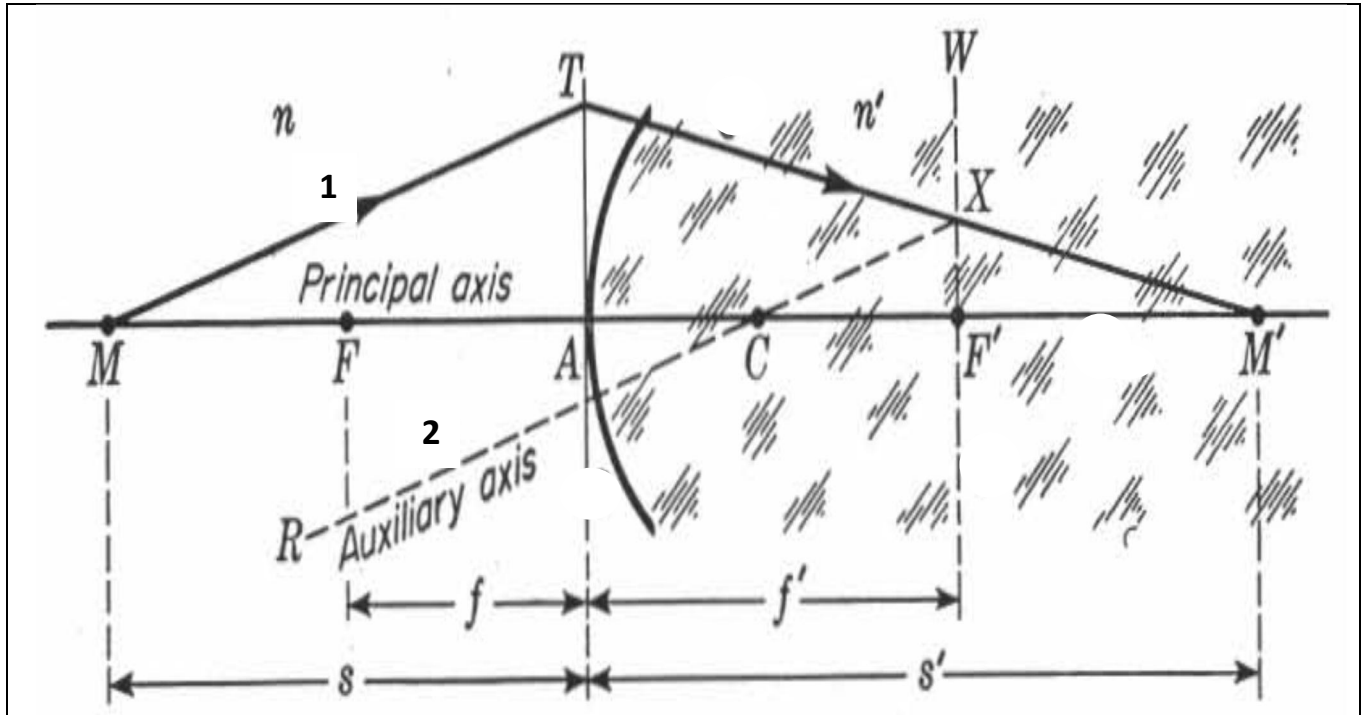
تستخدم هذه الطريقة لتكوين الصور للأجسام الشاخصة وكما موضح في الشكل (2) . نفرض ان الجسم (MQ) جسم محوري (واقع على المحور البصري) على يسار السطح الكروي المحدب يبعث ثلاثة أشعة (1,2,3) من النقطة (Q) . الشعاع (1) موازي للمحور البصري فيسير بعد الانكسار باتجاه البؤرة الثانوية (حسب تعريف البؤرة الثانوية) ، والشعاع (2) يمر بالبؤرة الاولى فيسير بعد الانكسار موازيا للمحور البصري (حسب تعريف البؤرة الاولى) ، 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. وبفس الطريقة يمكن تكوين مجموعة من ازواج النقاط المترافقة للجسم والصورة فتكون 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 للأجسام 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 رياضياً من خلال صيغة رياضية تسمى **صيغة كاوس (Gauss Formula)** وهي معادلة مشتقة من قانون سنيل وتطبيقه على السطح الكروي ومعالجته هندسياً 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 الاولى $(s = f)$ فعندها تصبح الصورة في المالانهاية $(s' = \infty)$ فتصبح المعادلة (1) :

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

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

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 الثانية $(s' = f')$ فتصبح المعادلة (1) :

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

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

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

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

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

(6) التكبير الجانبي (Lateral Magnification)

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

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

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 = -) .

قدرة

(7)

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 الديوبيتتر (Diopeter) ، وكما موضح في المعادلة :

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

(8)

اصطلا

ح 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 قطره موجب ($r +$) ، واذا كان السطح الكروي مقعر يكون نصف قطره 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 .

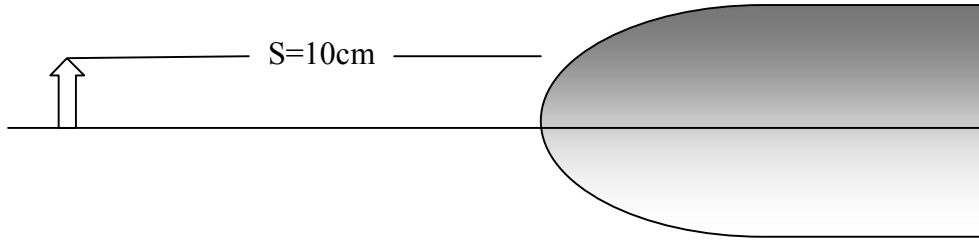
يعتبر في صفات الصورة المتكونة أربعة أمور هي:

- 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)

مسائل الفصل الثالث (Problems)

(9)

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 .



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

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

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

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

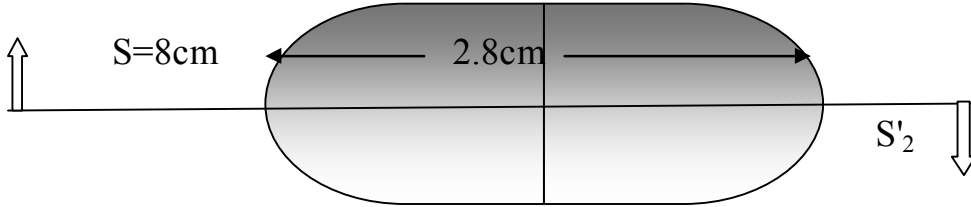
$$c) \frac{n}{s} + \frac{n'}{s'} = \frac{n}{f} \rightarrow \frac{1}{10} + \frac{1.6}{s'} = \frac{1}{5} \rightarrow \frac{1.6}{s'} = \frac{1}{5} - \frac{1}{10} \rightarrow s' = 16 \text{ cm}$$

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

صفات الصورة حقيقية ($s' = +$) تقع على يمين السميت 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 الاول والثانوي لكل سطح ، (b) صفات الصورة النهائية .



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

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

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

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

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

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

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

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

$$\frac{n_2}{s_2} + \frac{n_2'}{s_2'} = \frac{n_2'}{f_2'} \rightarrow \frac{1.6}{-10} + \frac{1}{s_2'} = \frac{1}{4} \rightarrow s_2' = 2.44 \text{ cm}$$

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

$$m = 0.39$$

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 قطره (2.5cm) .
جد قدرة هذا السطح عند غمر الساق الزجاجي في : (a) الهواء ($n_{\text{air}}=1$) ، (b) الماء ($n_w=1.33$) ، (c) زيت ($n_{\text{oil}}=1.65$) ، (d) سائل عضوي ($n_L=1.82$) .

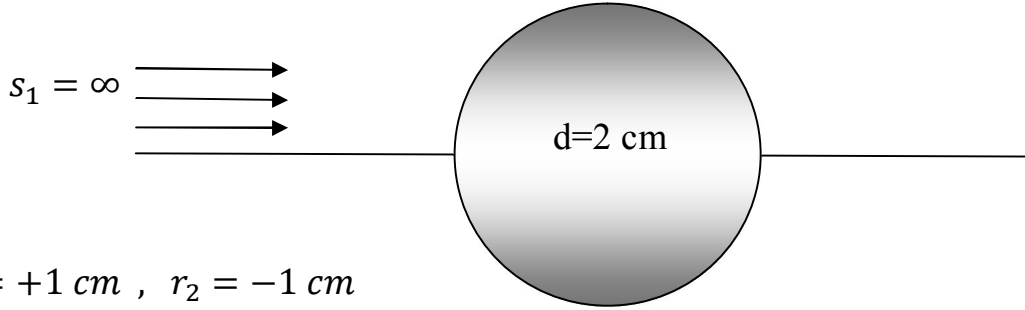
$$P_{\text{air}} = \frac{n' - n}{r} = \frac{1.65 - 1}{2.5 * 10^{-2}} = 26D$$

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

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

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

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



$$r_1 = +1\text{ cm} , r_2 = -1\text{ cm}$$

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

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

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

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

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

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 الاول والثانوي ، (b) قدرة السطح ، (c) صفات الصورة ، (d) ارتفاع الصورة .

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

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

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

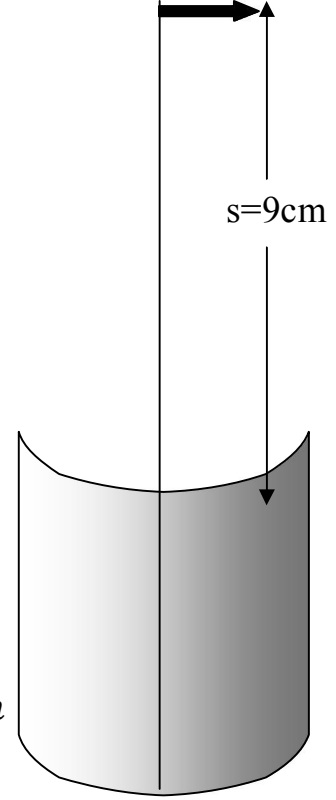
$$b) P = \frac{n}{f} = \frac{1}{-5 * 10^{-2}} = -20 \text{ D}$$

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

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

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

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



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. وطبقاً 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 فتنتمى 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 نسبياً بالمقارنة مع الابعاد البصرية الاخرى (مثل البعد البؤري ونصف قطر التكور) ، **والعدسات السميكة (thick lenses)** التي تمتلك سمك كبير نسبياً بالمقارنة مع الابعاد البصرية الاخرى .

2. العدسات الرقيقة (Thin Lenses)

هي العدسات ذات السمك الصغير بالمقارنة مع الابعاد البصرية الاخرى ، وهي العدسات الأكثر استخداماً 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)

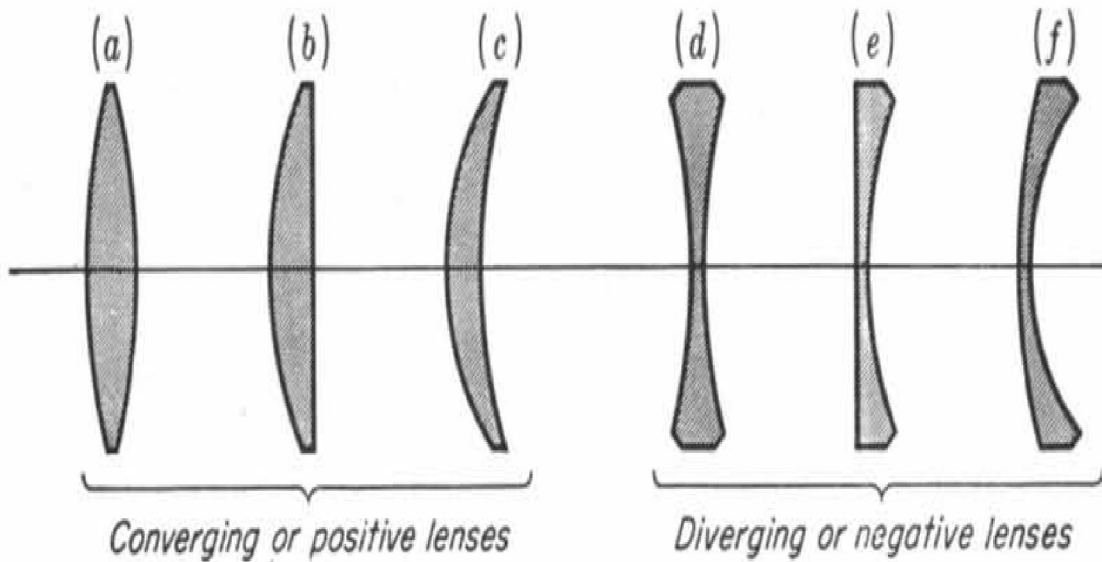
هي مجموعة العدسات التي تجمع الضوء الساقط عليها في نقطة معينة بسبب احتوائها على سطح أو سطحين محدبين (الشكل (1)) تتميز بان وسطها اكثر سمكا من اطرافها ، وهي ثلاثة انواع

- (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

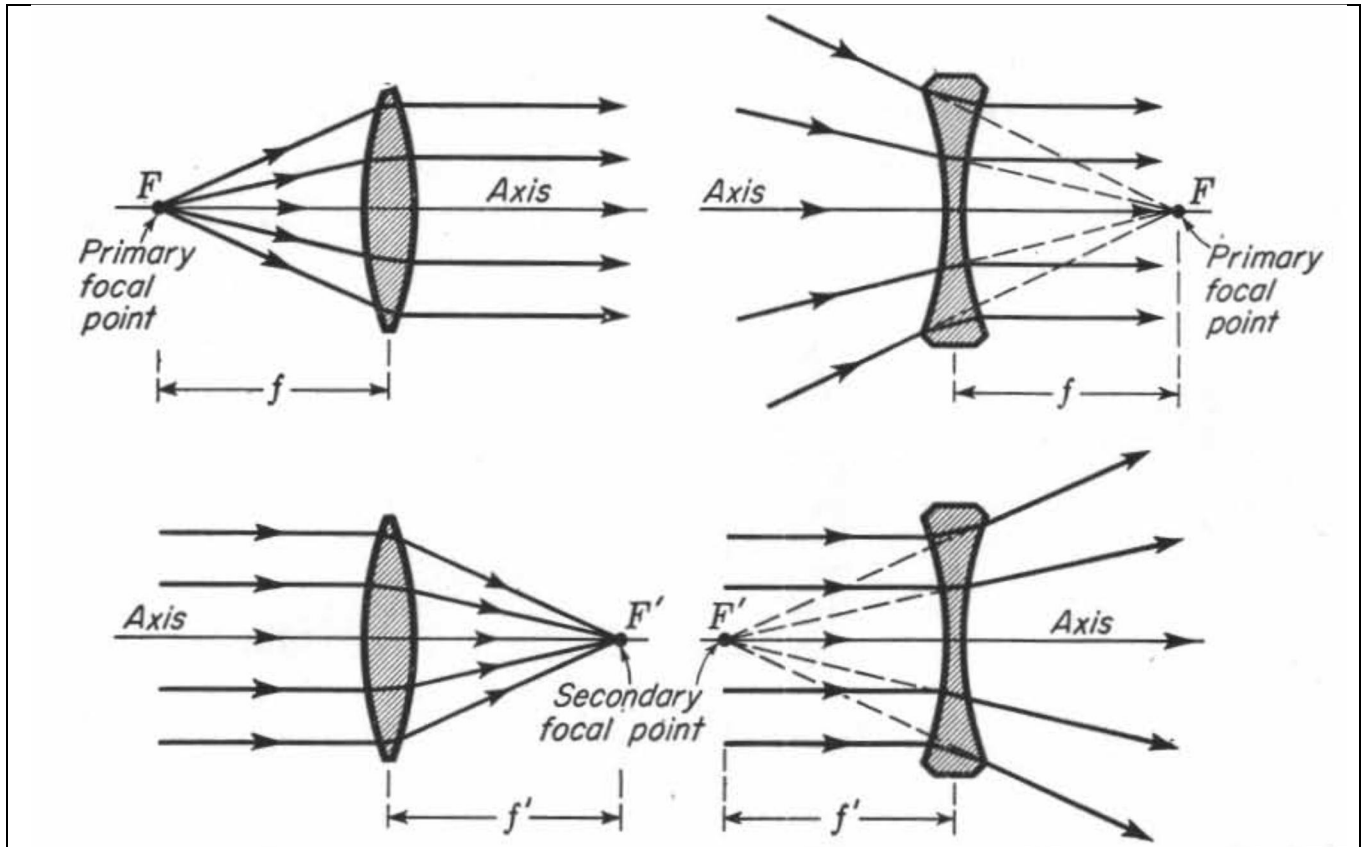


الشكل (1) مجموعة العدسات اللامة والمفرقة

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 وانتهاءً 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 الاول 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 الأولية 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 تتألف 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 .

يمكن 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) بأنه 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 بالامتر (meter) لتظهر قيمة القدرة بوحدات خاصة تسمى **الديوبيتير (Diopeter)** ، وكما موضح في المعادلة :

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

صيغة

.8

ة صانعي العدسات (Lens Makers Formula)

هناك صيغة خاصة للعدسات تربط معامل انكسار العدسة مع انصاف اقطار التكور لسطحها 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 سطحها ، وبالتالي 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 .

اصطلا

.9

ح 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:

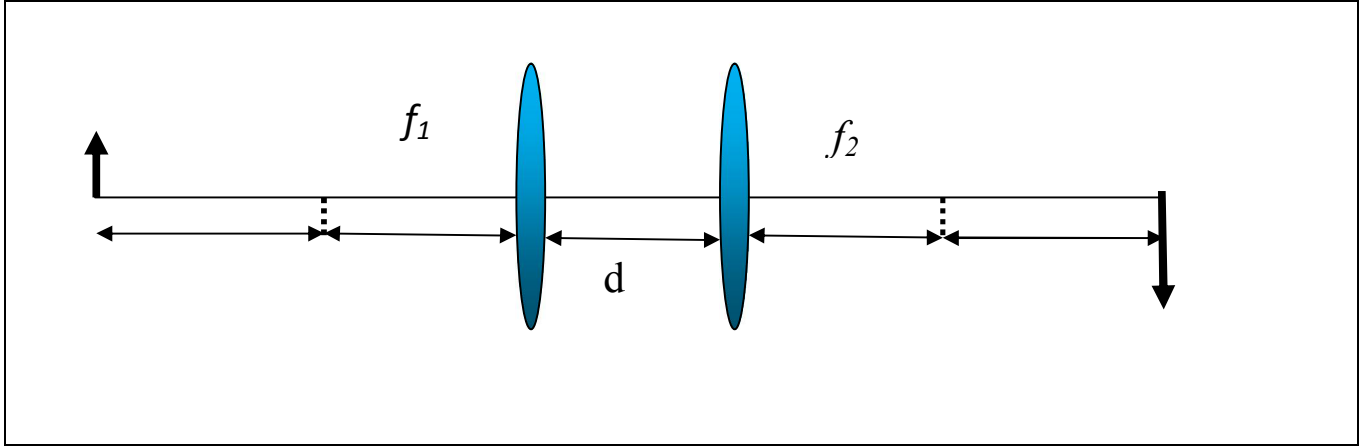
- ❖ الصورة الحقيقية دائما مقلوبة والصورة الخيالية دائما معتدلة .
- ❖ العدسة المفرقة دائما تكون صورة خيالية بغض النظر عن موقع الجسم .
- ❖ العدسة اللامة تعطي صورة خيالية اذا كان الجسم واقع بين البؤرة والعدسة اي $(s < f)$ ، وتعطي صورة حقيقية اذا كان الجسم ابعد من البؤرة $(s > f)$ ، ولا تتكون صورة اذا كان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

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_1, f_2) 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

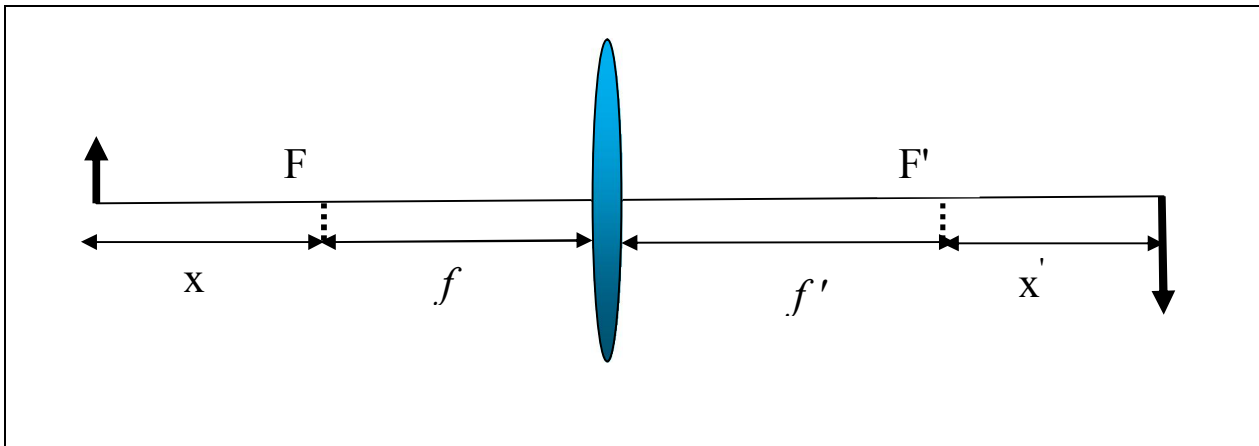
(Lenses)

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

$$f = \sqrt{x * x'} \quad \dots \dots (7)$$

$$m = -\frac{f}{x} = -\frac{x'}{f} \quad \dots \dots (8)$$

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

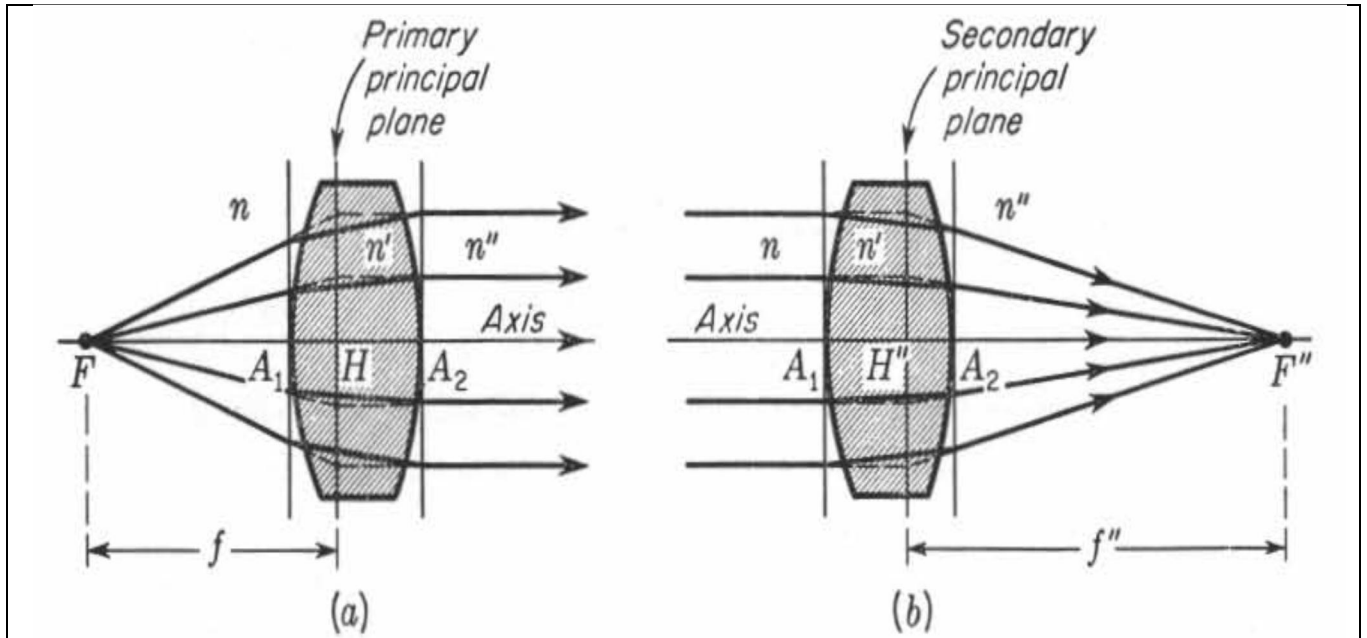


الشكل (4) : الابعاد البصرية لصيغة نيوتن للعدسات

12. العدسات السميكة (Thick Lenses)

عندما يكون سمك العدسة (d) كبير نسبياً 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.

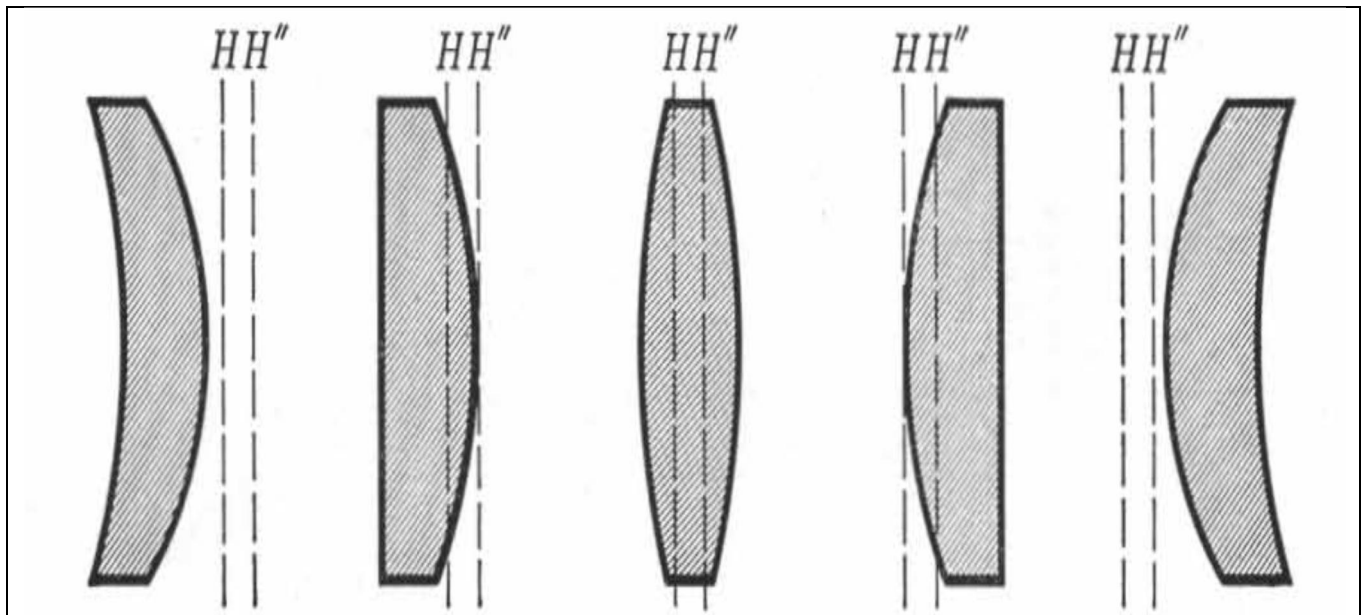
هناك نقطتان مرجعيتان في العدسة السميكة تسمى **النقطة الاساسية الاولى (H) والثانوية (H'') (primary and secondary principal points)** ، تحسب من خلالها ابعاد الجسم والصورة والبعـد البؤري كما في الشكل (5) . لايجاد موقع النقطة الاساسية نستخدم تعريف نقطة البؤرة ، فاذا سقطت اشعة موازية للمحور (جسم في المالا نهاية) 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 الاولى (H) عن طريق استخدام اشعة صادرة من البؤرة الاولى فتسير بعد الانكسار موازية للمحور البصري (الشكل (5-a)) ، فيكون نقطة تلاقي الشعاع الساقط مع الشعاع المنكسر في المستوي الاساسي الاول (primary principal plane) ، ونقطة تقاطع هذا المستوي مع المحور البصري تمثل النقطة الاساسية الاولى (H) .



الشكل (5) العدسة السميكة

يحسب البعد البؤري الأولي للعدسة السميكة (f) من نقطة البؤرة الأولية (F) الى النقطة الاساسية الأولية (H) ، وكذلك يحسب بعد الجسم عن طريق موقعه من النقطة الاساسية الأولية (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 احدهما على حافة العدسة (العدسة نوع مستوية - محدبة) ، أو كلا النقطتين خارج العدسة (العدسة الهلالية) كما موضح في الشكل (6).



الشكل (6) : موقع النقاط الأساسية بالنسبة لأنواع العدسات السميكة

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

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

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

$$A_1 F = -f \left(1 - \frac{d}{f_2'} \right) \quad \dots \dots (10)$$

$$A_2 F'' = +f'' \left(1 - \frac{d}{f_1'} \right) \quad \dots \dots (11)$$

$$A_1 H = +f \frac{d}{f_2'} \quad \dots \dots (12)$$

$$A_2 H'' = -f'' \frac{d}{f_1'} \quad \dots \dots (13)$$

حيث يشير الرقم السفلي للرموز في المعادلات أعلاه (كمثال f_1, f_2) إلى السطح الأول والثاني للعدسة على الترتيب ، بينما الرمز العلوي (dash ' ') إلى 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 الاول والثانوي للعدسة على الترتيب .

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

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

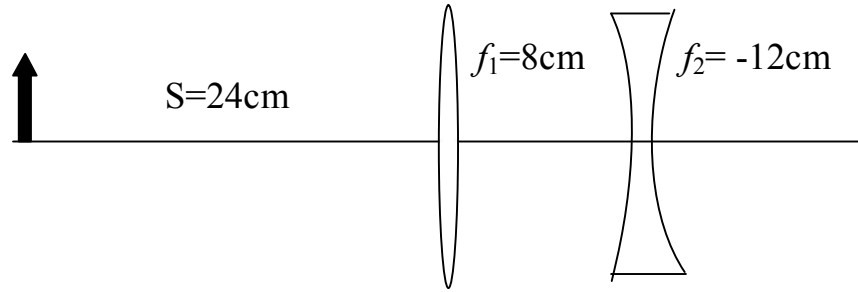
(2) عدسة (محدبة مستوية) مصنوعة من زجاج معامل انكساره (1.7) . احسب انصاف اقطار التكور للعدسة التي تعطي قدرة للعدسة مقدارها (+5 D) .

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

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

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

(3) عدستان البعد البؤري لهما ($f_1 = +8 \text{ cm}$) ، ($f_2 = -12 \text{ cm}$) 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.



$$a) \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s'_1} = \frac{1}{f_1}$$

$$s'_1 = \frac{s_1 f_1}{s_1 - f_1} = \frac{24 * 8}{24 - 8} = \frac{192}{16} = 12 \text{ cm}$$

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

$$s_2 = d - s'_1 = 6 - 12 = -6 \text{ cm}$$

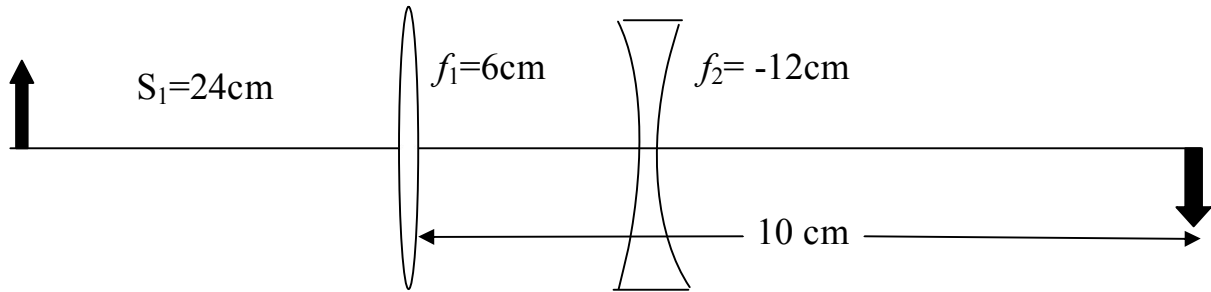
$$s'_2 = \frac{s_2 f_2}{s_2 - f_2} = \frac{(-6) * (-12)}{-6 + 12} = \frac{72}{6} = 12 \text{ cm}$$

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

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

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

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 ؟



$$\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s'_1} = \frac{1}{f_1} \Rightarrow \frac{1}{24} + \frac{1}{s'_1} = \frac{1}{6} \Rightarrow s'_1 = 8 \text{ cm}$$

$$s_2 = d - s'_1 = d - 8$$

$$s'_2 = 10 - d$$

$$\frac{1}{s_2} + \frac{1}{s'_2} = \frac{1}{f_2} \Rightarrow \frac{1}{d - 8} + \frac{1}{10 - d} = \frac{1}{-12}$$

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

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

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

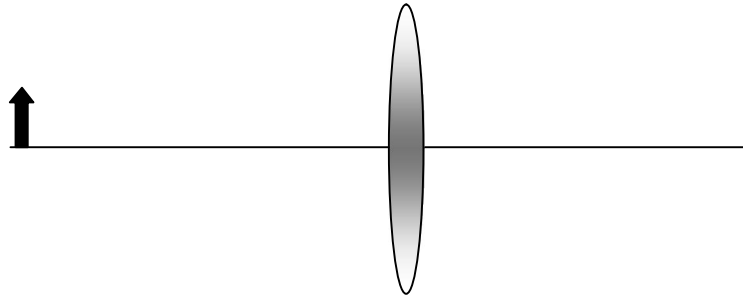
$$d^2 - 18d + 80 = 24$$

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

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

$$\therefore d = 14 \text{ cm} \text{ or } d = 4 \text{ cm}$$

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



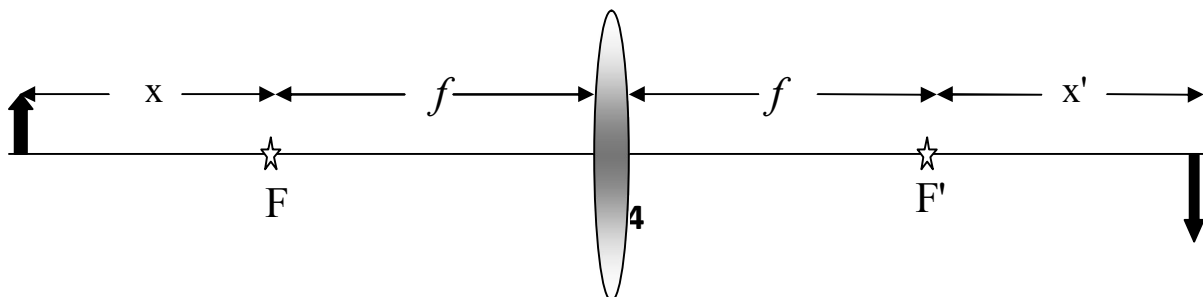
$$m = -\frac{s'}{s}$$

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

$$s' = 1.4 - s = 1.4 - 0.2 = 1.2 \text{ m}$$

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

(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 .



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

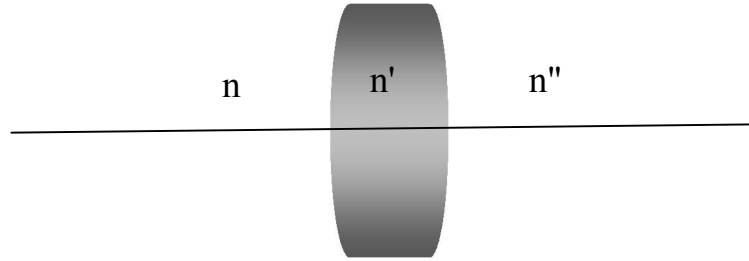
$$20 = \sqrt{10 * x'} \Rightarrow x' = 40 \text{ cm}$$

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

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

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.



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

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

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

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

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

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

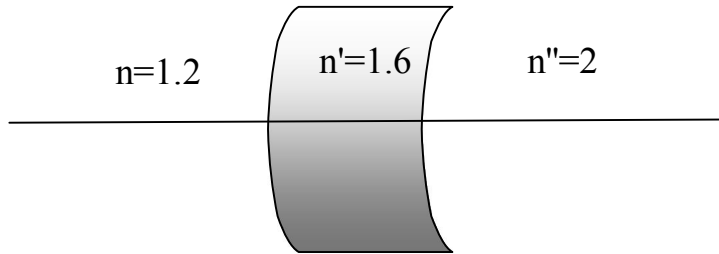
$$b) A_1F = -f \left(1 - \frac{d}{f'_2}\right) = -3.125 \left(1 - \frac{3.6}{9}\right) = -1.875 \text{ cm}$$

$$A_2F'' = f'' \left(1 - \frac{d}{f'_1}\right) = 3.125 \left(1 - \frac{3.6}{9}\right) = 1.875 \text{ cm}$$

$$c) A_1H = f \left(\frac{d}{f'_2}\right) = 3.125 \left(\frac{3.6}{9}\right) = 1.25 \text{ cm}$$

$$A_2H'' = -f'' \left(\frac{d}{f'_1}\right) = -3.125 \left(\frac{3.6}{9}\right) = -1.25 \text{ cm}$$

(8) عدسة هلالية سالبة سمكها (4.8 cm) ومعامل انكسارها (1.6) لها انصاف اقطار تكور (1.2) ، (r₁=+6 cm) ، (r₂=+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 الاول والثانوي للعدسة ، (b) موقع نقاط البؤرة الاولى والثانوية ، (c) موقع النقاط الاساسية الاولى والثانوية.



$$a) \frac{n'}{f'_1} = \frac{n}{f_1} = \frac{n' - n}{r_1} = \frac{1.6 - 1.2}{6} = 0.067$$

$$f_1 = \frac{1.2}{0.067} = 18 \text{ cm} , \quad f'_1 = \frac{1.6}{0.067} = 24 \text{ cm}$$

$$\frac{n''}{f'_2} = \frac{n'}{f_2} = \frac{n'' - n'}{r_2} = \frac{2 - 1.6}{5} = 0.08$$

$$f_2 = \frac{1.6}{0.08} = 20 \text{ cm} , \quad f'_2 = \frac{2}{0.08} = 25 \text{ cm}$$

$$\frac{n''}{f''} = \frac{n}{f} = \frac{n'}{f'_1} + \frac{n''}{f'_2} - \frac{dn''}{f'_1 f'_2} = \frac{1.6}{24} + \frac{2}{25} - \frac{4.8 * 2}{24 * 25} = 0.131$$

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

$$b) A_1F = -f \left(1 - \frac{d}{f'_2} \right) = -9.16 \left(1 - \frac{4.8}{20} \right) = -6.96 \text{ cm}$$

$$A_2F'' = f'' \left(1 - \frac{d}{f'_1} \right) = 15.3 \left(1 - \frac{4.8}{24} \right) = 12.24 \text{ cm}$$

$$c) A_1H = f \left(\frac{d}{f'_2} \right) = 9.16 \left(\frac{4.8}{20} \right) = 2.2 \text{ cm}$$

$$A_2H'' = -f'' \left(\frac{d}{f'_1} \right) = -15.3 \left(\frac{4.8}{24} \right) = -$$

1. المرايا (Mirrors)

المِرْآة هي أداة لها القابلية على عكس الضوء بطريقة تحافظ على الكثير من صفاتها الأصلية. تخضع الصورة المتكونة في المرايا الى قوانين الانعكاس . تمتاز الصور المتكونة في المرايا بخلوها من التأثيرات اللونية (الزيج 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 ، بالإضافة 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 للمرآة من معدن الالمنيوم غالبا وبعض المعادن التي لها انعكاسية عالية مثل الفضة والزنبق والنيكل .

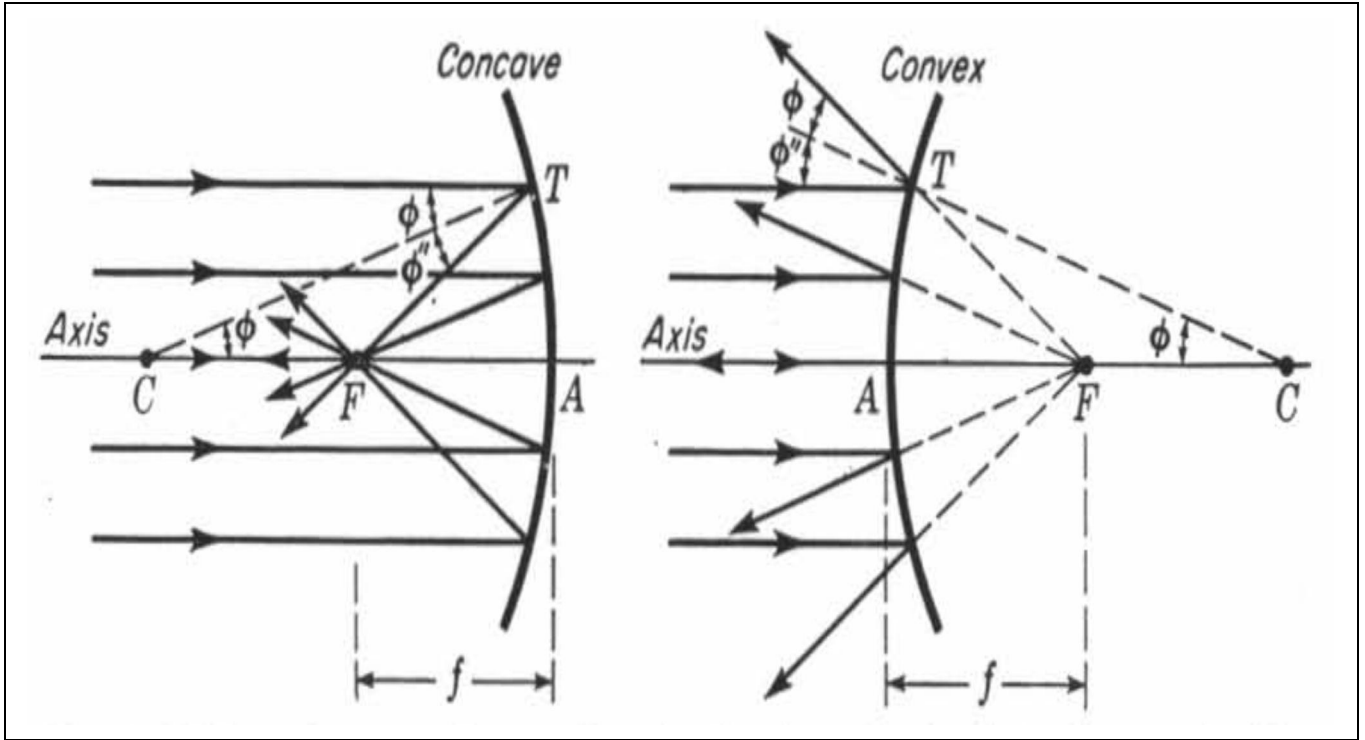
2. أنواع المرايا (Types of Mirrors)

هناك ثلاثة أنواع من المرايا تختلف حسب شكلها وطريقة تكوين الصور فيها هي : المرايا المستوية (plane mirrors) (سطحها غير منحنى) التي تستخدم في مجالات صناعية وطبية ومنزلية، والمرايا الكروية (spherical mirrors) التي يكون سطحها جزء من كرة ولها مركز تكور بنوعيهما 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 متجه 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)

تكوين الصور (Image Formation)

.4

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.

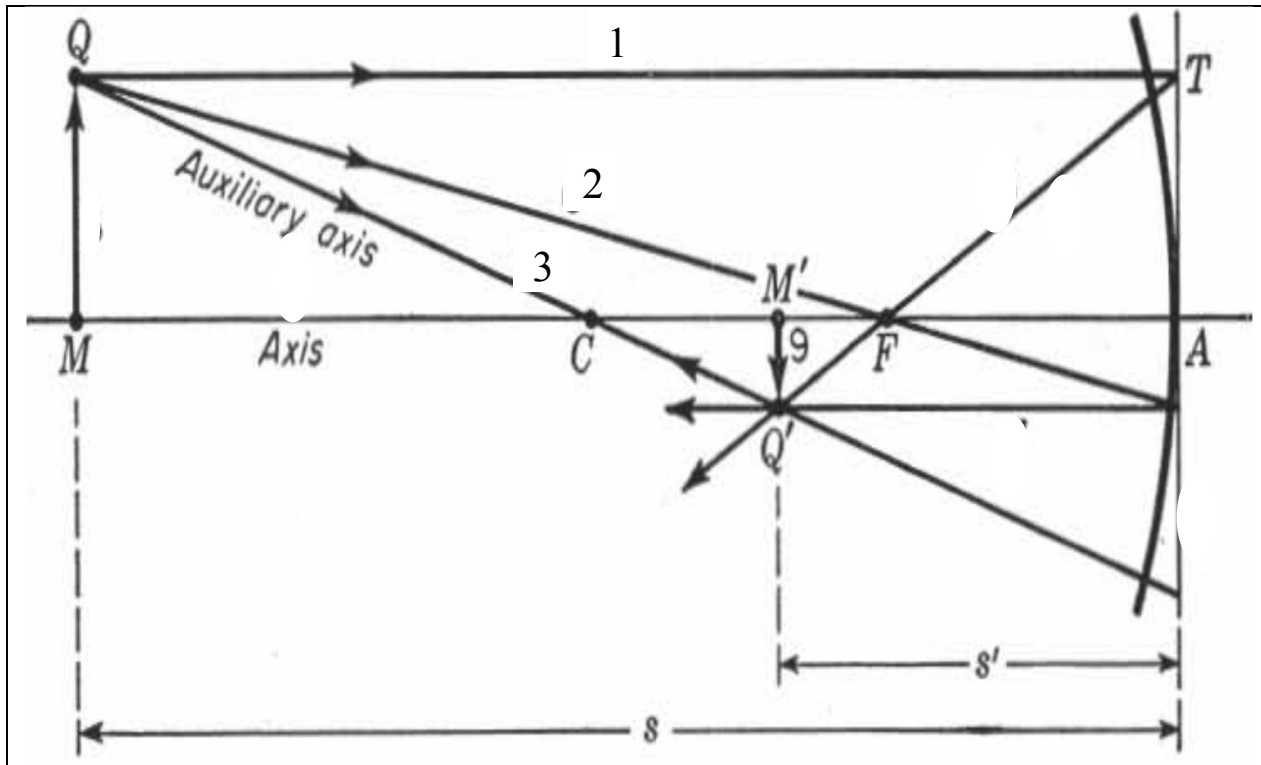
طريقة الرسم (Graphical Method)

(1)

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 للأجسام الشاخصة (اجسام لها ابعاد) ، وطريقة الشعاع المائل (oblique ray method) لتكوين صور للأجسام النقطية (اجسام لا بعد لها) .

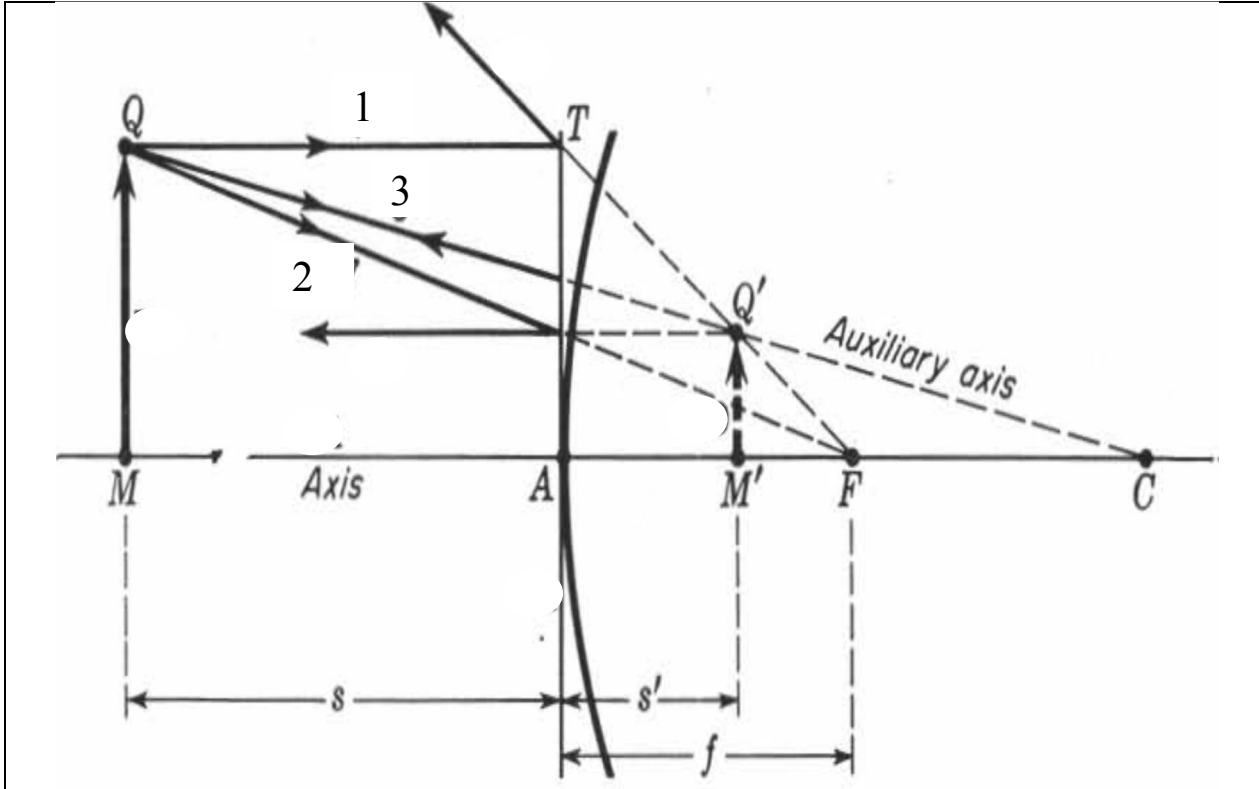
A. طريقة الشعاع الموازي (Parallel Ray) (Method)

تستخدم هذه الطريقة لتكوين الصور للأجسام الشاحصة 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 الاتجاه ، يسمى الشعاع (3) الشعاع الأساسي (principal ray) ، تتلاقى الأشعة 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 أكثر. 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

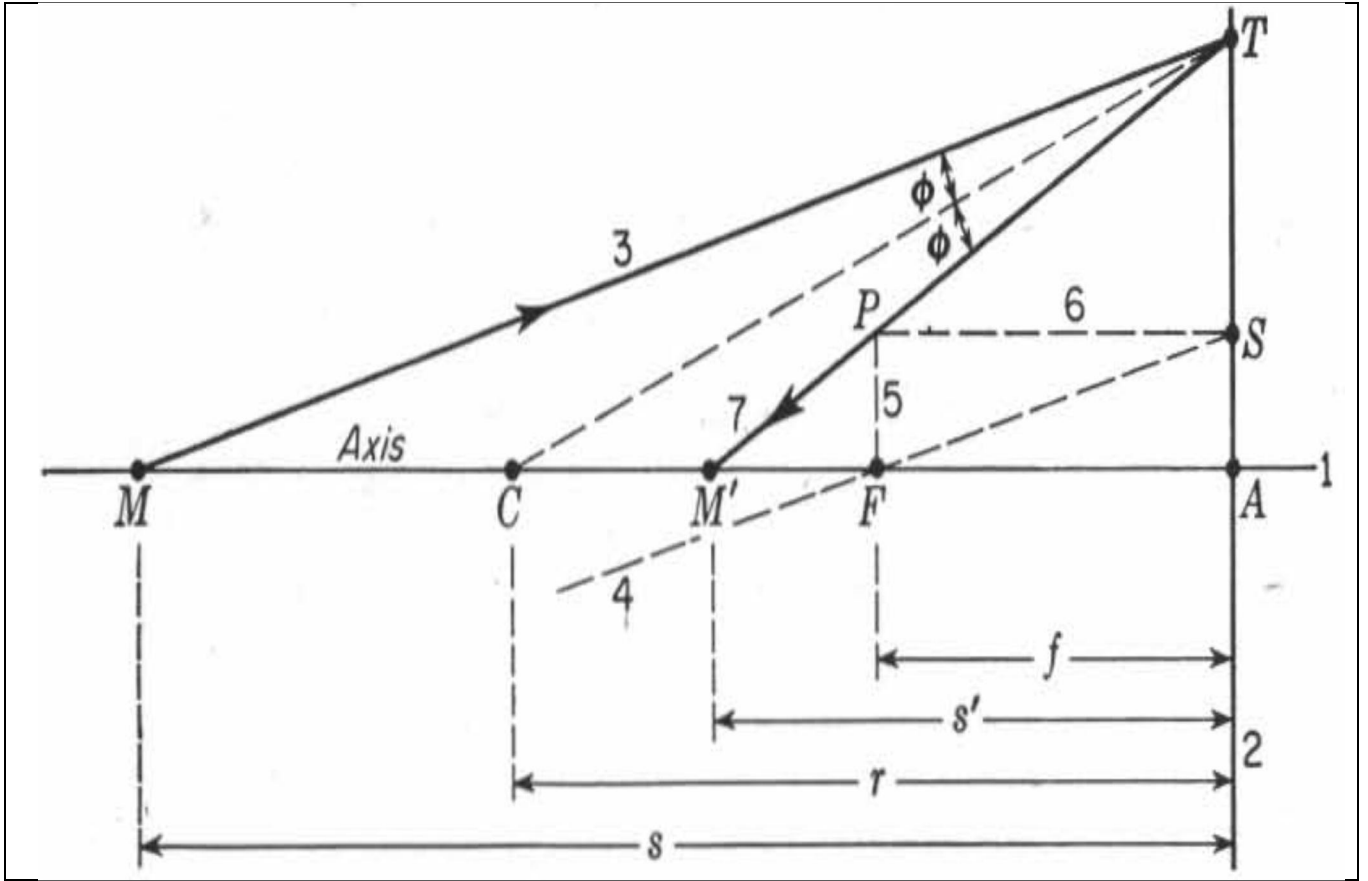
يمكن استخدام نفس الطريقة للمرآة المحدبة وباستخدام ثلاثة أشعة وتقاطعها بعد الانعكاس باستخدام تعريف البؤرة للمرآة المحدبة وكما موضح في الشكل (3) فتنكون صورة للنقطة (Q) هي نقطة (Q') تنتج من تقاطع امتدادات الأشعة المنعكسة وبالتالي تكون الصورة خيالية (حسب تعريف الصورة الخيالية).



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

B. طريقة الشعاع المائل (Oblique Ray Method)

تستخدم هذه الطريقة لتكوين الصور للأجسام 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 الاولى (s = f) فعندها تصبح الصورة في المالانهاية (s' = ∞) (والعكس صحيح) فتصبح المعادلة (1) :

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

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

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

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

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

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

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) بأنه النسبة بين البعد المستعرض للصورة (y') الى البعد المستعرض للجسم (y) ، او النسبة بين بعد الصورة الى بعد الجسم . حسب المعادلة :

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

قدرة

6.

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 الديوبيتير (Diopeter) ، وكما موضح في المعادلة :

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

اصطلا

7.

ح 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:

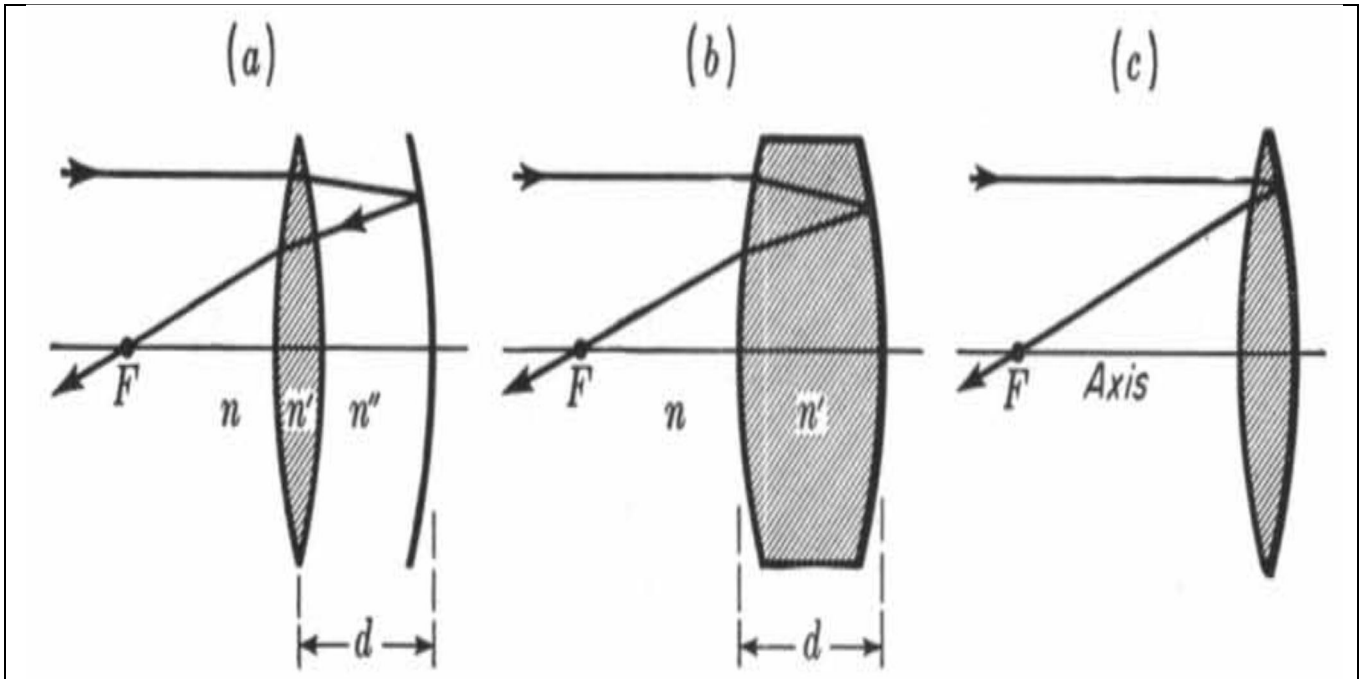
- موقع الصورة (image position) ، ويحسب من خلال قيمة (s')
- هل الصورة حقيقية ام خيالية (real or virtual) ، ويحسب من خلال إشارة (s')
- هل الصورة مكبرة ام مصغرة (magnified or minified) ، ويحسب من خلال قيمة (m)
- هل الصورة معتدلة ام مقلوبة (erect or inversed) ، ويحسب من خلال إشارة (m)

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 المالا نهابة .

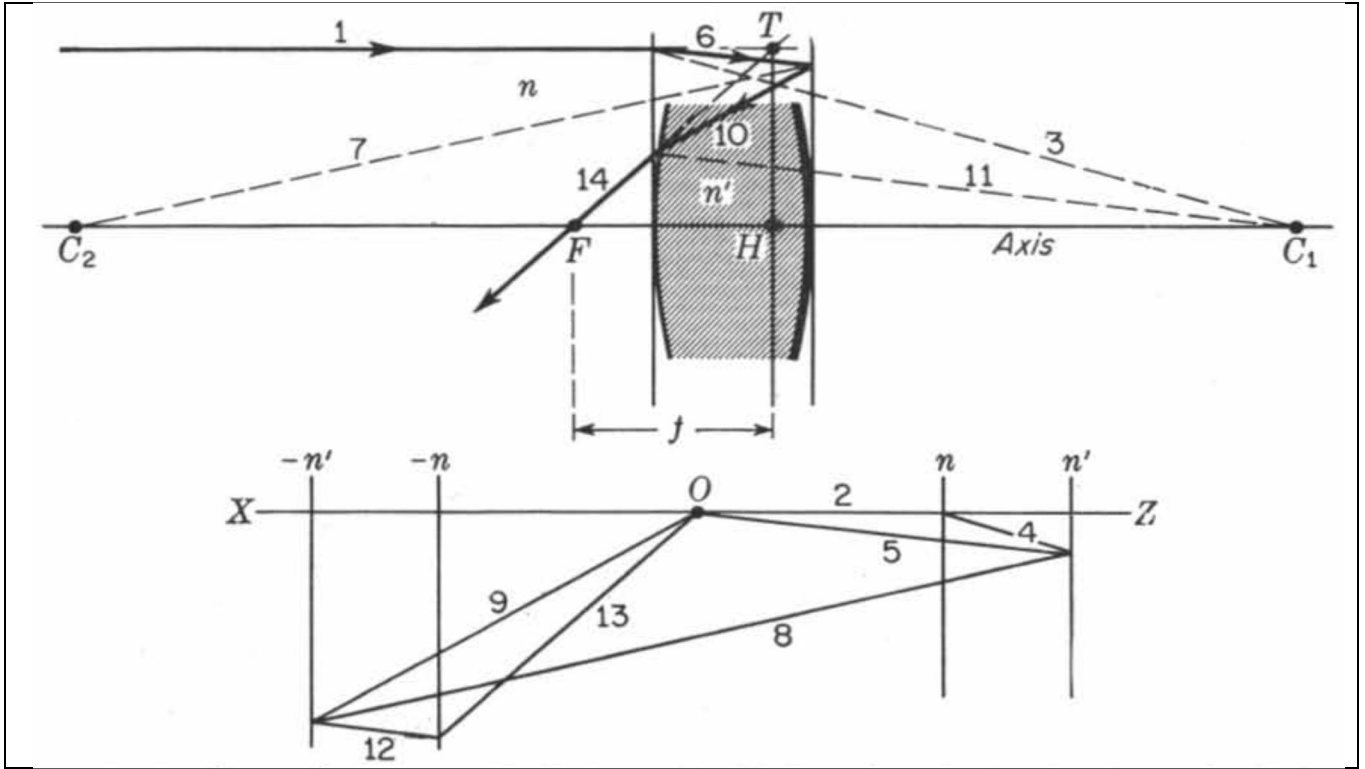
8. المرايا السميكة (Thick Mirrors)

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) : أنواع 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 الأخذ 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 (P₁) تمثل قدرة العدسة الرقيقة ، (P₂) 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_2, r_1) 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 للمراة السميكة للنوع الثالث كالآتي :

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

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) مرآة 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 .

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

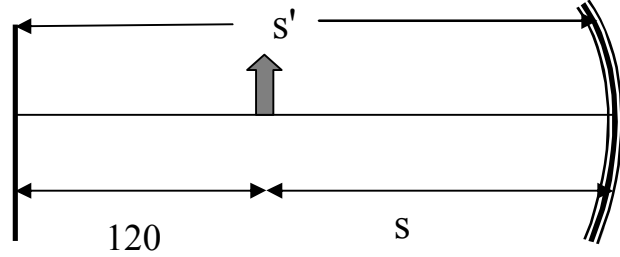
$$\frac{1}{60} + \frac{1}{s'} = -\frac{2}{-30} \Rightarrow s' = 20 \text{ cm}$$

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

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

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

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



$$s' = 120 + s$$

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

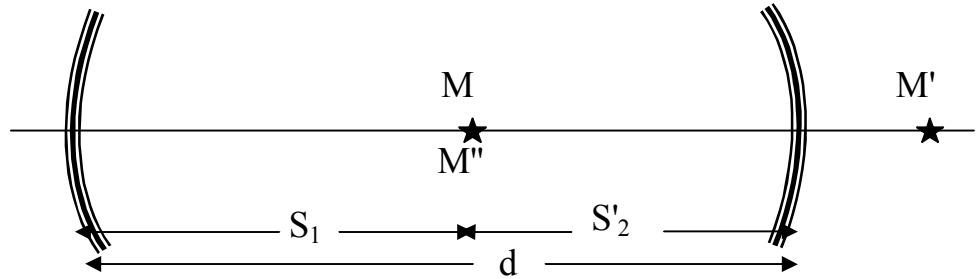
$$-16 = -\frac{120 + s}{s}$$

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

$$s' = 120 + 8 = 128 \text{ cm}$$

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

(3) مرأتين 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 المرأتين .



$$d = s_1 + s'_2 = 15 + s'_2 \Rightarrow s'_2 = d - 15$$

$$(mirror 1) \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s'_1} = -\frac{2}{r_1} \Rightarrow \frac{1}{15} + \frac{1}{s'_1} = -\frac{2}{-24} \Rightarrow s'_1 = 60 \text{ cm}$$

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

$$s_2 = d - s'_1 = d - 60$$

$$(mirror\ 1) \quad \frac{1}{s_2} + \frac{1}{s'_2} = -\frac{2}{r_2} \Rightarrow \frac{1}{(d - 60)} + \frac{1}{(d - 15)} = -\frac{2}{-28}$$

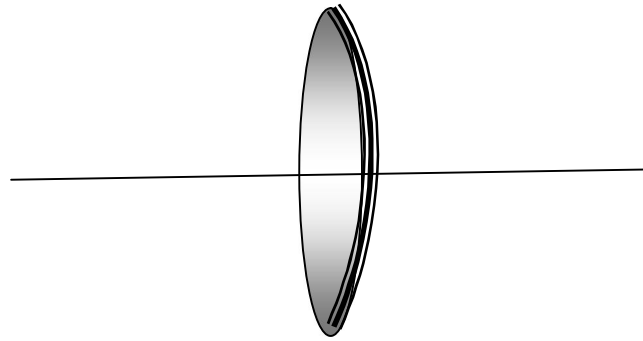
$$\frac{(d - 15) + (d - 60)}{(d - 60)(d - 15)} = \frac{1}{14}$$

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

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

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

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

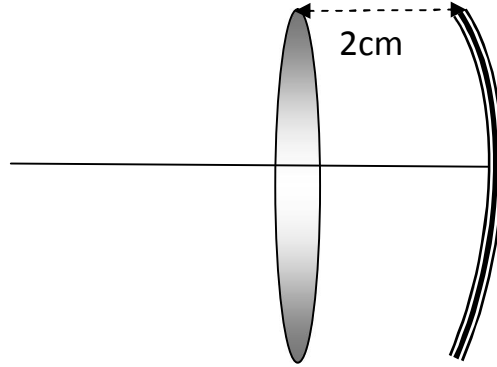


$$P_1 = \frac{n' - n}{r_1} = \frac{1.6 - 1}{12 * 10^{-2}} = 5\ D$$

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

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

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



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

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

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

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

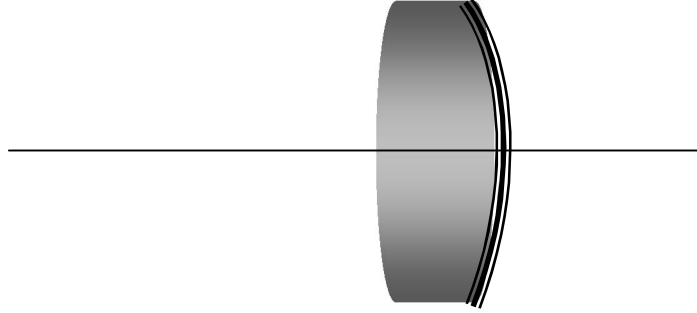
$$P = (1 - 0.02 * 8.33)(2 * 8.33 + 10 - 0.02 * 8.33 * 10) = 20.8 D$$

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

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

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

6) عدسة لامة محدبة الوجهين سمكها (3 cm) ومعامل انكسار زجاجها (1.6) وانصاف اقطار تكور سطحها (r₁=12 cm) ، (r₂=32 cm) ، فضض احد سطحها 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 :

$$\sin\theta = \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} - \frac{\theta^7}{7!} + \dots \quad (1)$$

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)

يتألف 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)

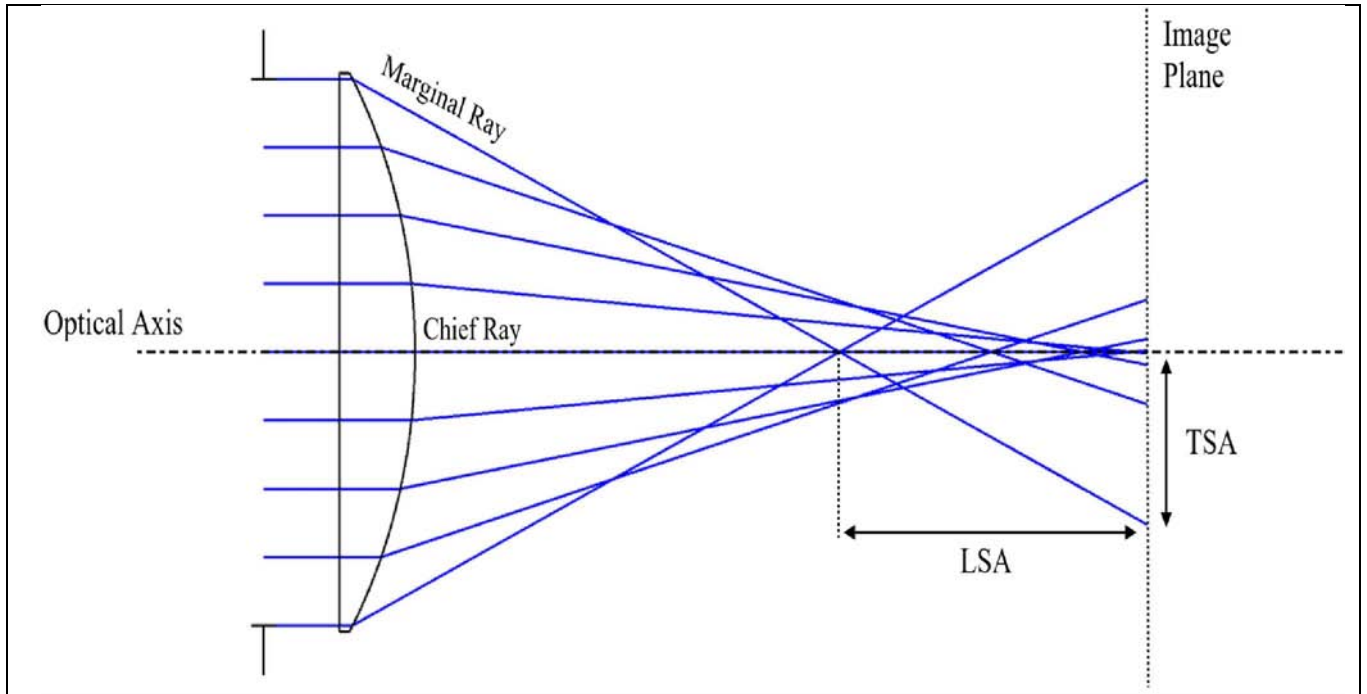
عند استخدام ضوء احادي الطول الموجي وسقوط الاشعة شبه المحورية وغير المحورية على السطح الكروي ينتج عدم تقاطع الاشعة في نقطة واحدة بعد الانعكاس او الانكسار ، تسمى هذه الظاهرة بالزيغ اللالوني . يتألف الزيغ اللالوني من خمسة انواع رئيسية تعتمد على شكل الزيغ الناتج وموقع الجسم بالنسبة للمحور البصري ، هذه الانواع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

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

A. 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 rays) في نقاط قريبة من العدسة او المرآة ، بينما تتقاطع الاشعة شبه المحورية (paraxial rays) في نقاط بعيدة عن العدسة او المرآة (الشكل (1)) ، فتتكون صورة غير واضحة ممتدة على المحور البصري ينتج زيغ يسمى الزيغ الكروي الطولي (longitudinal spherical aberration. LSA) بينما يتكون زيغ آخر على امتداد مستوى الصورة ينتج من تقاطع الاشعة في اكثر من نقطة في هذا المستوي يسمى الزيغ الكروي المستعرض (transverse spherical aberration. TSA) .

ان شكل الصورة يكون مشوها عند حدوث الزيغ نتيجة نقصان قيمة التباين فيها (contrast) ، او اختلال في نمط انتشار الاشعة في مستوى الصورة . فمثلا عند استخدام مصدر نفطي فصورته المثالية (perfect image) يجب ان تكون نقطة ايضا . لكن واقعا تكون الصورة الناتجة عبارة عن بقعة (spot) تتضاءل شدتها تدريجيا عند الاطراف .



الشكل (1) : الزيغ الكروي الطولي والمستعرض

• طرائق تقليل الزيغ الكروي

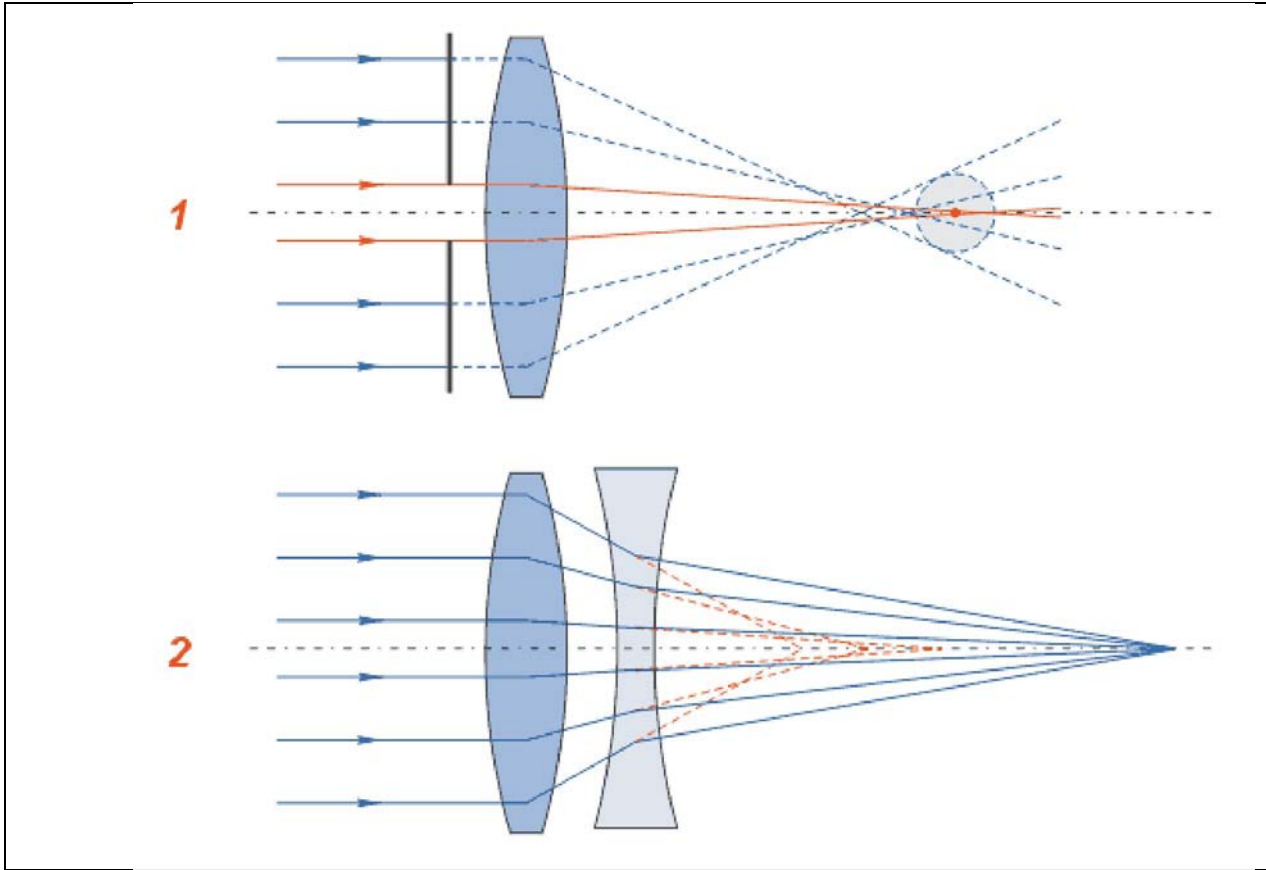
ان الزيغ الكروي لا يمكن إزالته نهائيا من العدسات والمرايا بسبب طبيعة السطح الكروي ، بل يمكن تقليله بشكل كبير حسب نوع الطريقة . ان اهم طرائق تقليل الزيغ الكروي هي :

1) استخدام حاجز ضوئي (Diaphragm)

عند استخدام حاجز ضوئي امام او خلف العدسة او المرآة يسمح بمرور الاشعة شبه المحورية فقط ، عندها تحجب الاشعة غير المحورية فيقل الزيغ الكروي نتيجة لذلك ، وهي طريقة تستخدم في الكثير من الاجهزة البصرية لكونها فعالة وسهلة الاستخدام ، لكن هذه الطريقة تتسبب في نقصان كمية الاشعة الساقطة على الجهاز البصري فتقل شدة الصورة على حساب نقصان الزيغ كما في الشكل (2-1).

2) استخدام العدسة المركبة (compound lens)

ان الزيغ الكروي للعدسة اللامة كمية موجبة والزيغ الكروي للعدسة المفرقة كمية سالبة . لذلك عند استخدام عدسة مركبة تتكون من عدسة لامة واخرى مفرقة يلغى الزيغ الناتج من العدستين احدهما الاخر (الشكل (2-2)).

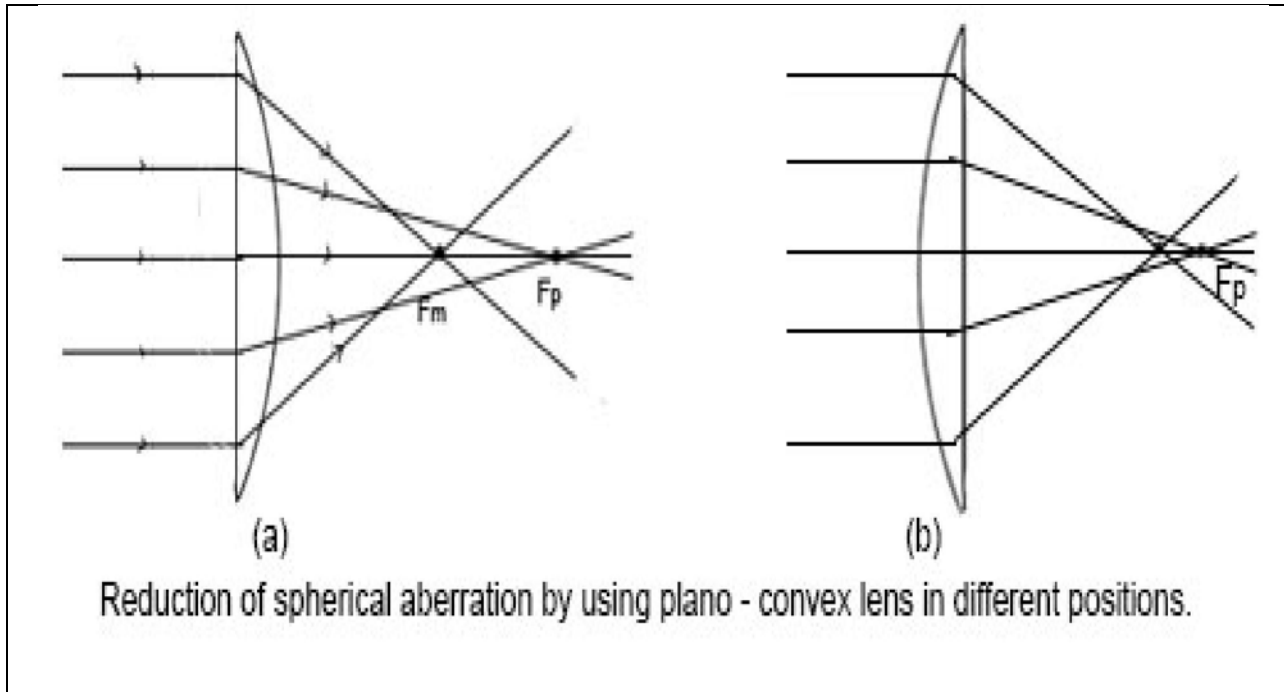


الشكل (2) : إزالة الزيغ الكروي (1). استخدام الحاجز ، (2). استخدام العدسة المركبة

(3) استخدام عدسة محدبة مستوية (Plano- Convex Lens)

ان شكل العدسة له دور كبير في كمية الزيغ الكروي الناتج ، فمثلا عند استخدام عدسة محدبة مستوية (plano- convex lens) ، بحيث يكون السطح المحدب مواجهاً للضوء الساقط (الاشعة عمودية على العدسة) فيحدث انكسار في سطحي العدسة فيقل الزيغ الكروي بصورة كبيرة نتيجة الانكسار المزدوج للاشعة (انحراف اكبر للاشعة) . اما اذا كان السطح المستوي للعدسة مواجهاً للاشعة الساقطة ، فيحدث انكسار في سطح واحد فقط (لا ينكسر الشعاع الساقط عمودياً على السطح المستوي) فيقل الزيغ الكروي بصورة قليلة مقارنة في الحالة الاولى للعدسة كما في الشكل (3).

يمكن استخدام عدسة محدبة الوجهين بانصاف اقطار تكور مختلفة في وجهيها لتقليل الزيغ الكروي ، حيث تصمم بجعل انحراف الاشعة متساوي في سطحيها وبالنتيجة يقل الزيغ الكروي الى اقل ما يمكن .



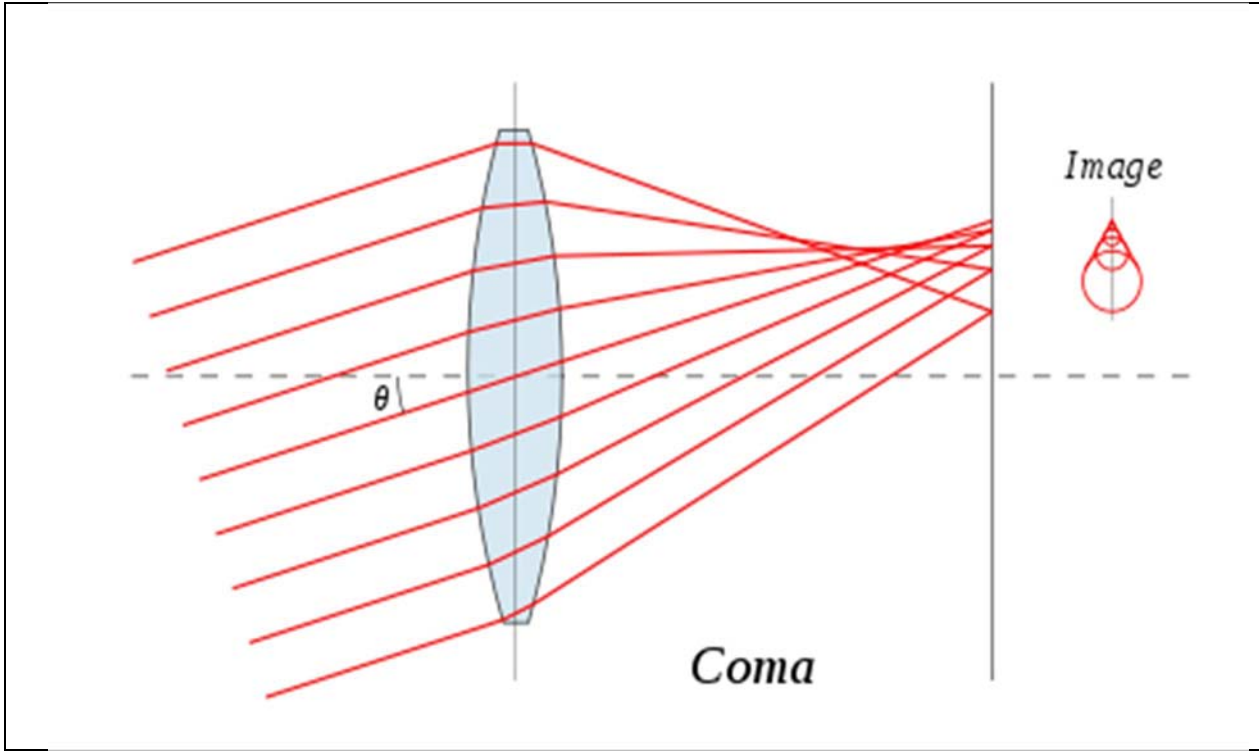
الشكل (3) : استخدام عدسة محدبة مستوية لتقليل الزيغ الكروي

4) استخدام عدسة او مرآة غير كروية (Aspherical Lens or Mirror)

ان استخدام عدسة او مرآة ذات سطح غير كروي يجعل الاشعة الساقطة عليها تتجمع مع بعضها (بعد الانكسار او الانعكاس) في نقاط قريبة من البؤرة نتيجة خصوصية شكل السطح بغض النظر عن نوع الاشعة (شبه او غير محورية). لذلك تستخدم هذه السطوح غير الكروية في كثير من التطبيقات البصرية للتخلص من الزيغ الكروي ، أهمها في عكس الاشعة في الأطباق اللاقطة (receiving dish) ذات السطح ذو القطع المكافئ (parabola) للحصول على اشعة متجمعة في نقطة واحدة هي نقطة الاستقبال (LNP receiver) ، فنحصل على مجال استقبال واسع للاشعة بالإضافة الى تبؤر جيد لها . كذلك توجد مجموعة من العدسات غير الكروية الخاصة لهذا الغرض حسب نوع النظام البصري المستخدم ، أهمها عدسة شميدت (Schmidt) ، وعدسة ماكسوتوف (Maksutov) .

B. زيغ المذنّب (Coma Aberration)

هو زيغ يحدث في العدسات والمرآيا نتيجة اختلاف معامل التكبير الجانبي للاشعة الساقطة عليها . يحدث هذا الزيغ نتيجة وجود الجسم خارج المحور البصري (off axis) لذلك تنتشر الاشعة بعد الانكسار او الانعكاس على مستوى الصورة (اذا كان المصدر نقطي) على شكل دوائر غير متحدة المركز ومتدرجة الحجم فتصبح على شكل مذنّب (coma) كما في الشكل (4) .



الشكل (4) : زيغ المذنب

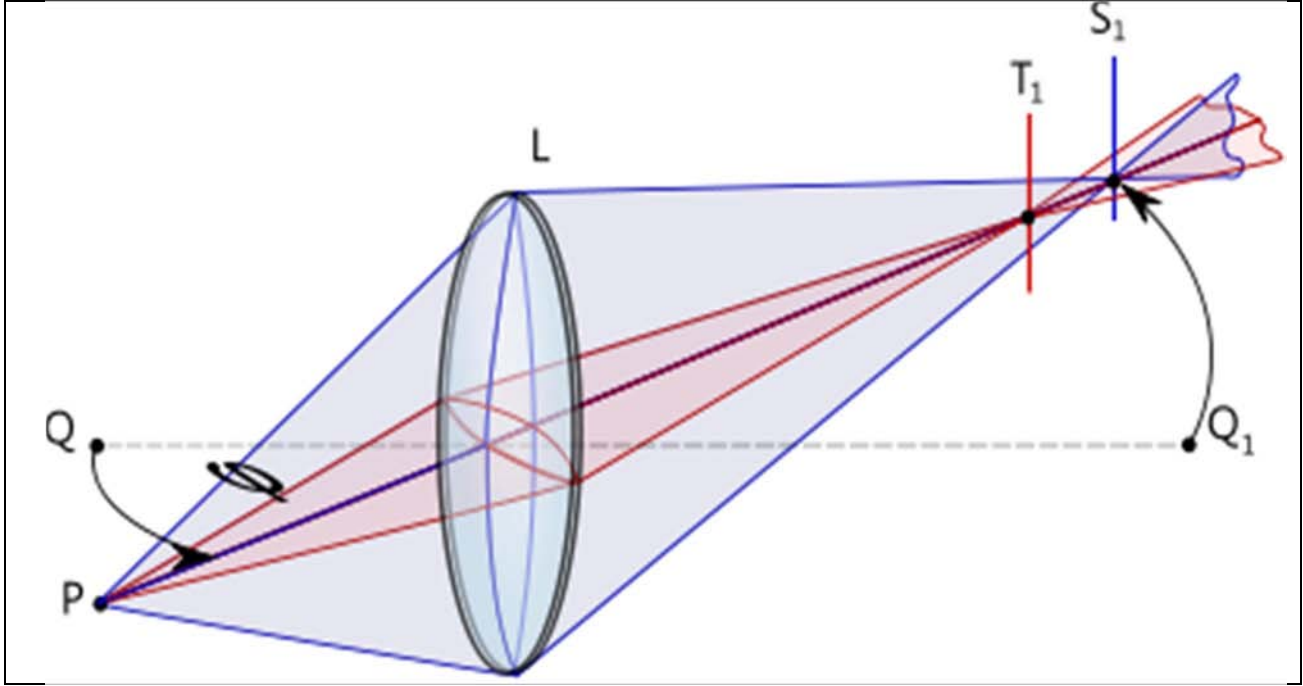
- طرائق تقليل زيغ المذنب
كما هو الحال في الزيغ الكروي ، يستخدم حاجز ضوئي امام او خلف العدسة او المرآة لتقليل زيغ المذنب لحجب الاشعة غير المحورية التي تزيد من تشوه الصورة ، لكن هذه الطريقة تقلل من كمية الاضاءة الواصلة الى النظام كما اسلفنا . كما يمكن استخدام عدسة بانصاف اقطار مناسبة لتقليل هذا الزيغ الى اقل ما يمكن ، وهذه الطريقة مستخدمة كذلك لتقليل الزيغ الكروي لكن لا يمكن استخدام نفس المواصفات لتقليل الزيغ الكروي والمذنب معا .

C. الزيغ اللابؤري (Astigmatism Aberration)

هو عيب بصري يجعل الأشعة الضوئية الساقطة على النظام البصري تتقابل في بؤرتين : الأشعة الساقطة الرأسية تتجمع في بؤرة ، وتتجمع الأشعة الساقطة الأفقية في بؤرة أخرى . وللتوضيح إذا استخدم النظام البصري اللابؤري في تكوين صورة للحرف (T) فإن الخط الأفقي يكون حادا في بؤرة ، والخط الرأسية تكون صورته حادة في بؤرة أخرى على المحور البصري كما في الشكل (5) .

تنتشر الاشعة في هذا الزيغ في مستويين ، عرضي ورأسي يمتد على طول المحور البصري على شكل بيضوي ، على العكس من زيغ المذنب الذي ينتشر في مستوى عمودي على المحور البصري .

هناك نوعان من الزيغ اللابؤري : الاول يحدث عندما يكون الجسم خارج المحور والنظام البصري يكون متناظر تماما ، اما النوع الثاني يحدث عندما لا يكون النظام البصري متماثلاً حول المحور البصري. قد يكون ذلك بسبب التصميم (كما في حالة وجود عدسات اسطوانية)، أو بسبب خطأ في تصنيع سطوح المكونات . فيحدث الزيغ حتى من أشعة قادمة من أجسام تقع على المحور البصري. هذا النوع من الزيغ يشكل أمراً في غاية الأهمية لطب العيون، حيث أن العين البشرية غالباً ما يصيبها هذا الانحراف نتيجة عيوب في شكل القرنية أو العدسة.



الشكل (5) : الزيغ اللابؤري

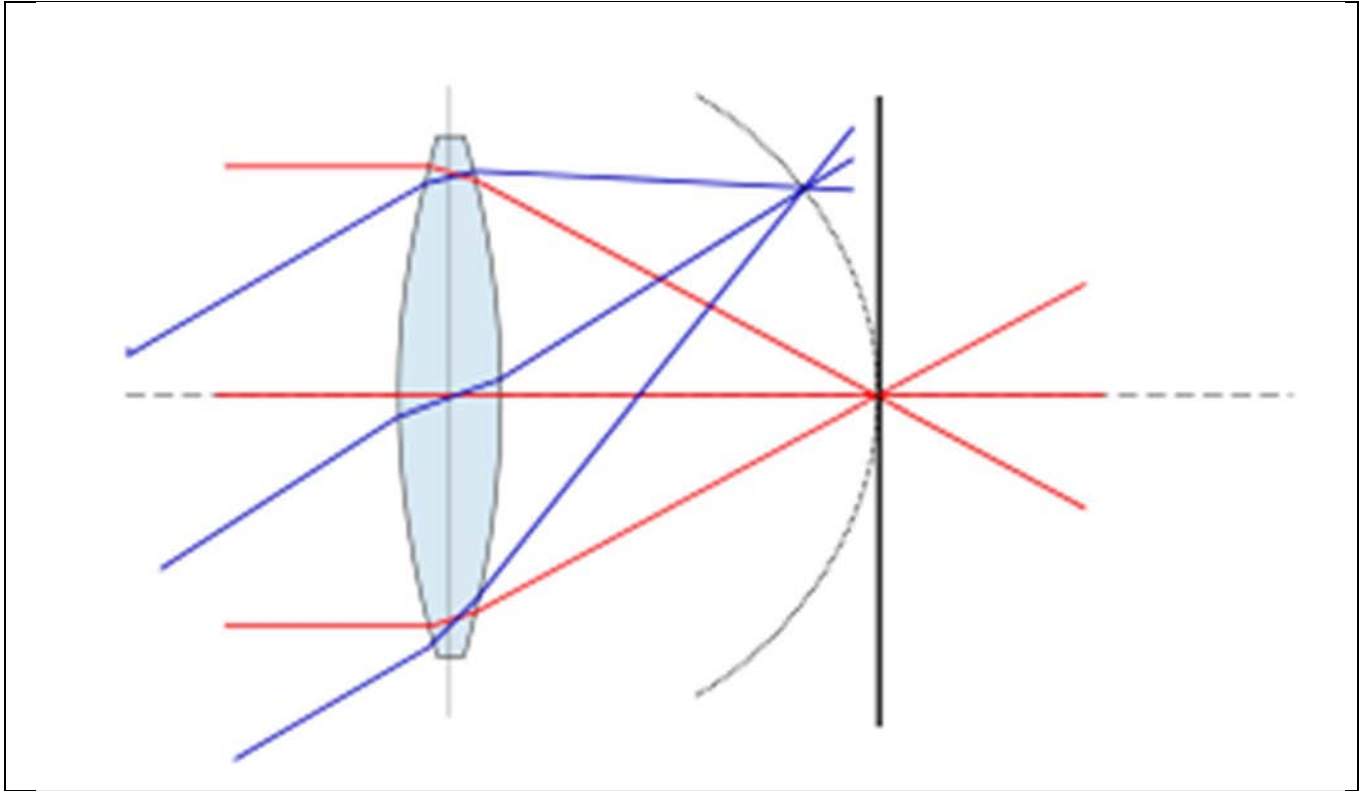
- طرائق تقليل الزيغ اللابؤري
لتقليل الزيغ اللابؤري يمكن استخدام حاجز ضوئي امام العدسة او المرآة في مكان مناسب لحجب بعض الاشعة غير المحورية ، وبذلك يقل الزيغ . او ممكن استخدام عدسة اسطوانية (cylindrical lens) امام النظام البصري لتصحيح عدم التناظر الموجود في النظام ، وهذه الطريقة شائعة في تصحيح العيب البصري في عين الانسان باستخدام النظارة الطبية ذات الشكل الاسطواني .

D. زيغ تكور المجال (Field Curvature Aberration)

يحدث هذا النوع من الزيغ اذا كان الجسم خارج المحور البصري فلا تتكون الصورة على سطح الصورة المستوي ، بل تكون على سطح منحنى يسبب في انحاء الصورة وتشوهها كما في

الشكل (6) . ان الاشعة شبه المحورية القادمة من الجسم تتجمع في نقطة البؤرة تقريبا ، بينما الاشعة غير المحورية تتجمع في نقاط بعيدة عن البؤرة ، نتيجة لذلك تتكون الصورة على سطح منحني .

- طرائق تقليل زيف تكور المجال
ممكن تقليل هذا الزيف عن طريق استخدام سطح منحني لاستقبال الصورة (كما في شبكية عين الإنسان) وهذا الامر كفيل بجعل الصورة واضحة ولا تعاني اي انحناء . كذلك فان العدسات ذات البعد البؤري القليل نسبيا (اقل من 50 cm) تعاني بشكل اكبر من تكور المجال ، لذلك يفضل استخدام عدسات ذات بعد بؤري كبير نسبيا . يمكن ايضا استخدام حاجز ضوئي امام النظام البصري لتقليل الاشعة غير المحورية وبذلك يقل الزيف .

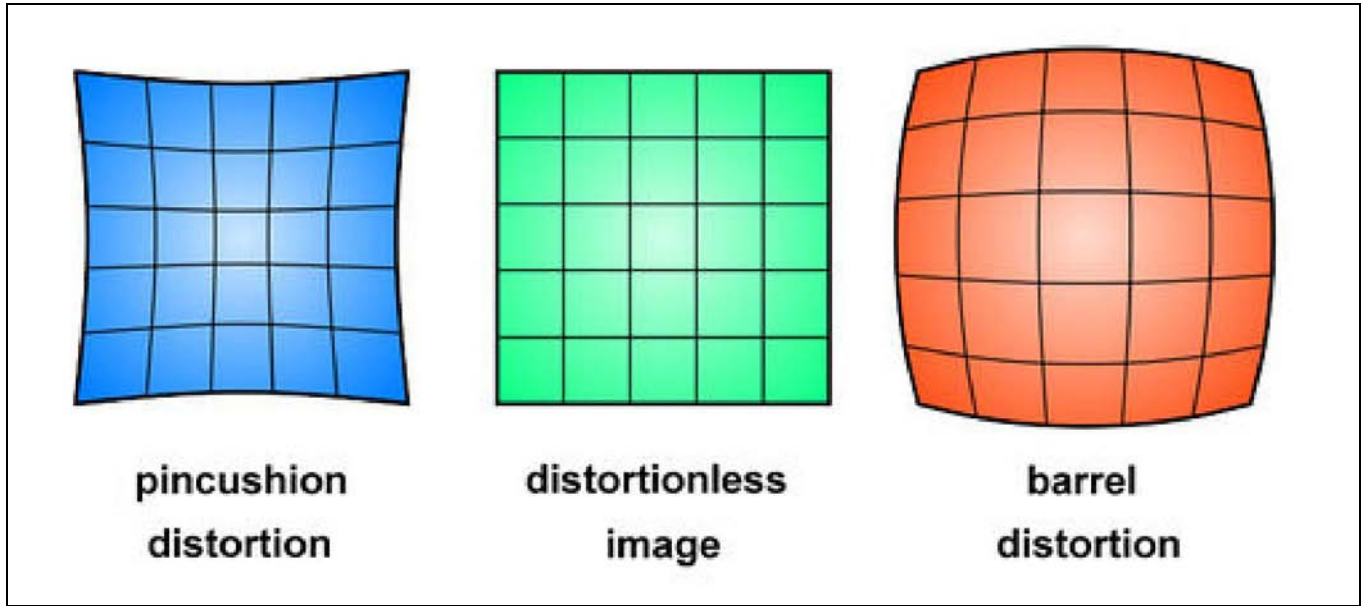


الشكل (6) : زيف تكور المجال

E. زيف التشوه (Distortion Aberration)

يحدث هذا الزيف نتيجة اختلاف معامل التكبير الجانبي في مستوى الصورة ، فيتكون بتناظر قطري (radially symmetric) في مستوى الصورة نتيجة مرور الاشعة شبه المحورية وغير المحورية خلال النظام البصري بعد مرورها من حاجز ضوئي.

عندما يزداد التكبير الجانبي في مستوى الصورة مع ابتعاد الأشعة عن المحور البصري ، يحدث تشوه للصورة على شكل تمدد في الأطراف . يسمى هذا النوع بالتشوه الوسادي (pincushion distortion) ويحدث عند وضع حاجز ضوئي خلف العدسة ، وعندما يقل التكبير الجانبي في مستوى الصورة مع ابتعاد الأشعة عن المحور البصري ، يحدث تشوه للصورة على شكل تقلص في الأطراف . يسمى هذا النوع بالتشوه البرميلي (barrel distortion) أو تشوه عين السمكة (fish eye distortion) ويحدث عند وضع حاجز ضوئي أمام العدسة كما في الشكل (7) .



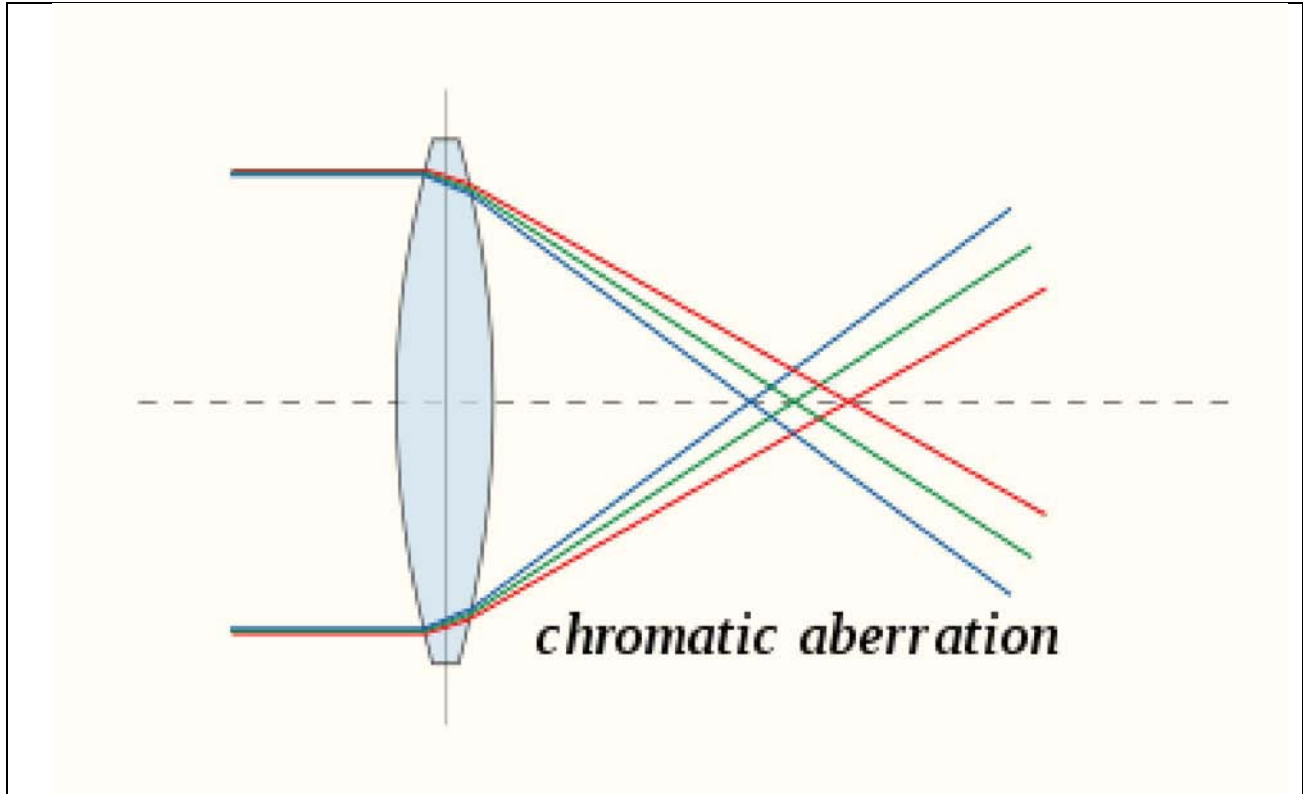
الشكل (7) : على اليمين التشوه البرميلي ، على اليسار التشوه الوسادي ، في الوسط صورة غير مشوهة

- طرائق تقليل زيغ التشوه
إن العدسة المنفردة لا تعاني اي زيغ تشوه ، لكون هذا الزيغ يحدث نتيجة وجود حاجز ضوئي أمام او خلف العدسة . لذلك ممكن إلغاء هذا الزيغ بإزالة الحاجز او استخدام عدستين متماثلتين بينهما حاجز لإلغاء التقلص والتمدد في الصورة فيختفي هذا الزيغ .

4. الزيغ اللوني (Chromatic Aberration)

الزيغ اللوني نوع من الزيغ يحدث في الضوء المركب (متعدد الأطوال الموجية) ، ويحصل في العدسات فقط (لا يحدث في المرايا) ، ويمكن تعريفه بأنه تشويه في الصورة بسبب تجمع الأشعة الضوئية في نقاط مختلفة ، مما يؤدي لظهور الصورة محاطة بحزم ملونة . ، والسبب في ذلك هو ظاهرة التفريق ، لكون البعد البؤري للعدسة يعتمد على معامل الانكسار والذي بدوره يعتمد على الطول الموجي والضوء المركب يحوي على أكثر من طول موجي لذلك تتكون أكثر من صورة وبمواقع مختلفة وبأحجام مختلفة تبعا للأطوال الموجية الداخلة كما في الشكل (8).

يتألف الزيغ اللوني من نوعين : النوع الاول يسمى الزيغ اللوني الطولي (longitudinal chromatic aberration) الذي يحدث نتيجة اختلاف موقع البؤرة على طول المحور البصري نتيجة اختلاف الاطوال الموجية مع معامل الانكسار ، بينما النوع الثاني يسمى الزيغ اللوني المستعرض (transverse chromatic aberration) الذي يحدث نتيجة اختلاف موقع الصورة في المستوى البؤري (اختلاف التكبير الجانبي مع الطول الموجي) نتيجة اختلاف الاطوال الموجية مع معامل الانكسار .



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 تلتصقان 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 :

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

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

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

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

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 :

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

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 :

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

(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

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

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

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

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

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

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

$$r_1 = 9.08 \text{ cm} , \quad r_2 = -9.08 \text{ cm}$$

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

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

$$r_3 = -9.08 \text{ cm} , \quad r_4 = -93.45 \text{ cm}$$

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

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

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

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

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

$$f_2 = 33 \text{ cm}$$

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

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

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

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

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

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

$$f_2 = -54.5 \text{ cm} , \quad f_1 = 26.1 \text{ cm}$$

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

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

$$r_1 = 24.8 \text{ cm}$$

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

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

$$r_4 = -23.9 \text{ cm}$$

1. مقدمة (Introduction)

درسنا فيما سبق ظواهر الانكسار والانعكاس التي تندرج ضمن البصريات الهندسية ، اي يعتبر فيها مسار الضوء بشكل اشعة مستقيمة . لكن حقيقة الامر ان الضوء يسير في الوسط بشكل موجي ، اي يخضع لصفات الموجة الكهرومغناطيسية من سرعة وطول موجي وتردد وطاقة وزخم . ان من اهم الظواهر البصرية التي تندرج ضمن الطبيعة الموجية للضوء هي ظاهرة التداخل (interference) . لذلك يجب في البداية التعرف على صفات الموجة الكهرومغناطيسية للتمهيد لموضوع التداخل .

2. الموجة الكهرومغناطيسية (Electromagnetic Wave)

الموجة هي اضطراب للصفات الفيزيائية في الوسط الناقل لها ، وهي احد اشكال انتقال الطاقة هناك نوعين من الموجات حسب طريقة انتشارها : النوع الاول هو الموجات الطولية (longitudinal waves) (مثل موجات الصوت والناضب الحلزوني) يكون اتجاه تذبذب الموجة مع اتجاه انتشارها على شكل تضاعط وتخلخل . اما النوع الثاني هو الموجات المستعرضة (transverse waves) (مثل موجات الماء والحبل المتحرك والموجات الكهرومغناطيسية) يكون اتجاه تذبذب الموجة عمودي على اتجاه انتشارها .

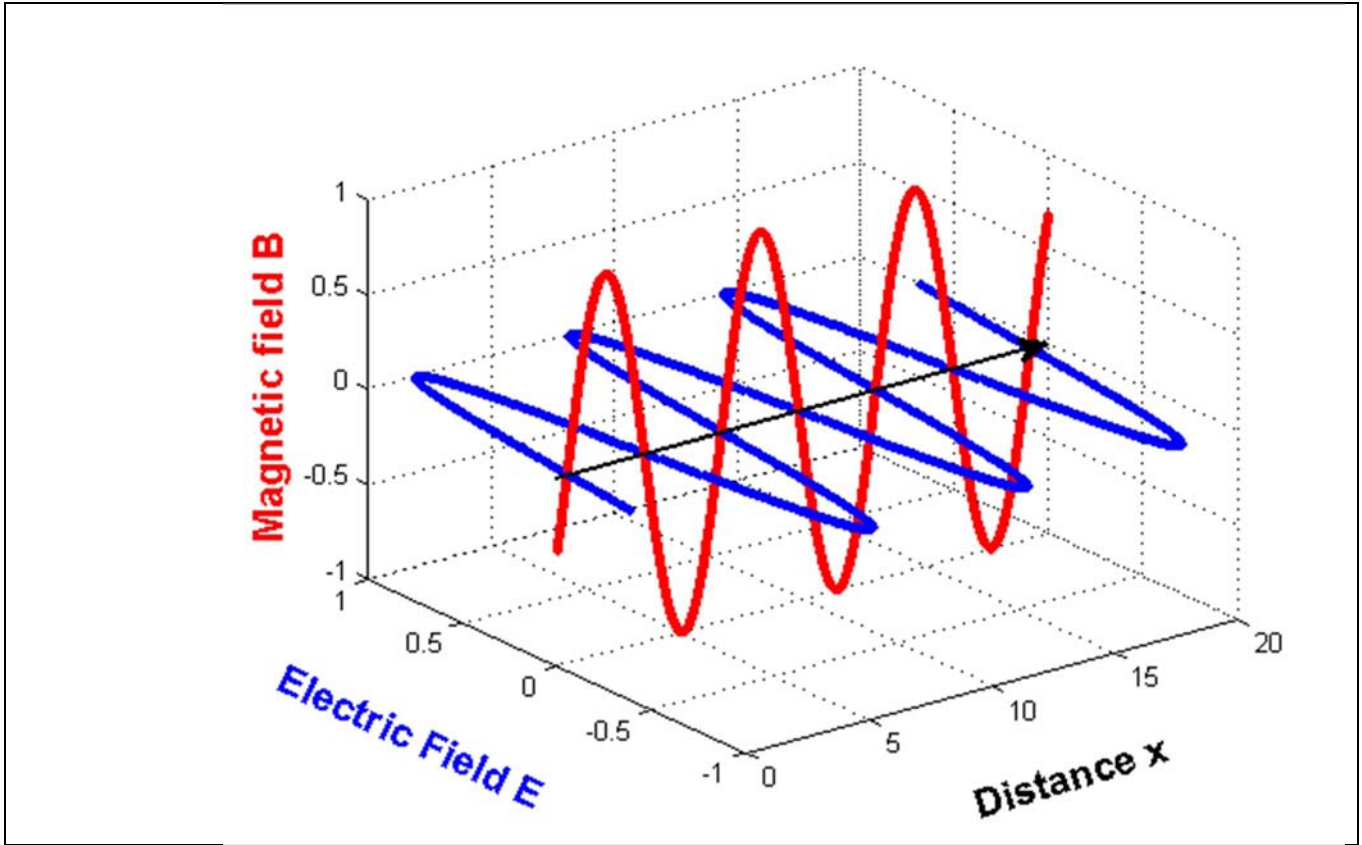
تنتقل الموجات الكهرومغناطيسية في الفراغ والوسط المادي ، بينما بقية الموجات (التي تسمى الموجات الميكانيكية) تنتقل في الوسط المادي فقط حيث تنتقل فيه الموجات وتنقل الطاقة من مكان إلى آخر بدون إزاحة جزيئات الوسط بشكل دائم، أي أنه لا تنتقل أي كتلة مع انتقال الموجة .

للموجة الكهرومغناطيسية صفة الدورية أي لها نمط متكرر من الشدة في فترات زمنية متتابة بفترة فاصلة بينها بحركة توافقية تخضع للدالة الجيبية (sine function) على شكل قمم وقيعان (crests and valleys) كما في الشكل (1) . يسمى عدد التكرار في الموجة لوحدة الزمن بالتردد (frequency) ، والمسافة بين قمتين او قاعين بالطول الموجي (wavelength) ، تسير هذه الموجة في الفراغ بسرعة ثابتة ($c=3 \times 10^8$ m/s) لا تضاهيها اي سرعة في الكون (حسب اخر النظريات) . ان الدالة الجيبية التي تصف حركة الموجة الكهرومغناطيسية هي :

$$y = a \sin(\omega t - kx) \quad \dots \dots (1)$$

حيث (a) تمثل سعة الموجة (amplitude) ، (ω) السرعة الزاوية (angular velocity) حيث ($\omega = 2\pi f$) ، (k) العدد الموجي (wave number) حيث ($k = 2\pi/\lambda$) . ان الموجات تنقل

الطاقة من مكان الى اخر ، وتسمى كمية الطاقة المارة في زمن معين على وحدة المساحة بالشدة (intensity) التي تتناسب مع مربع سعة الموجة .



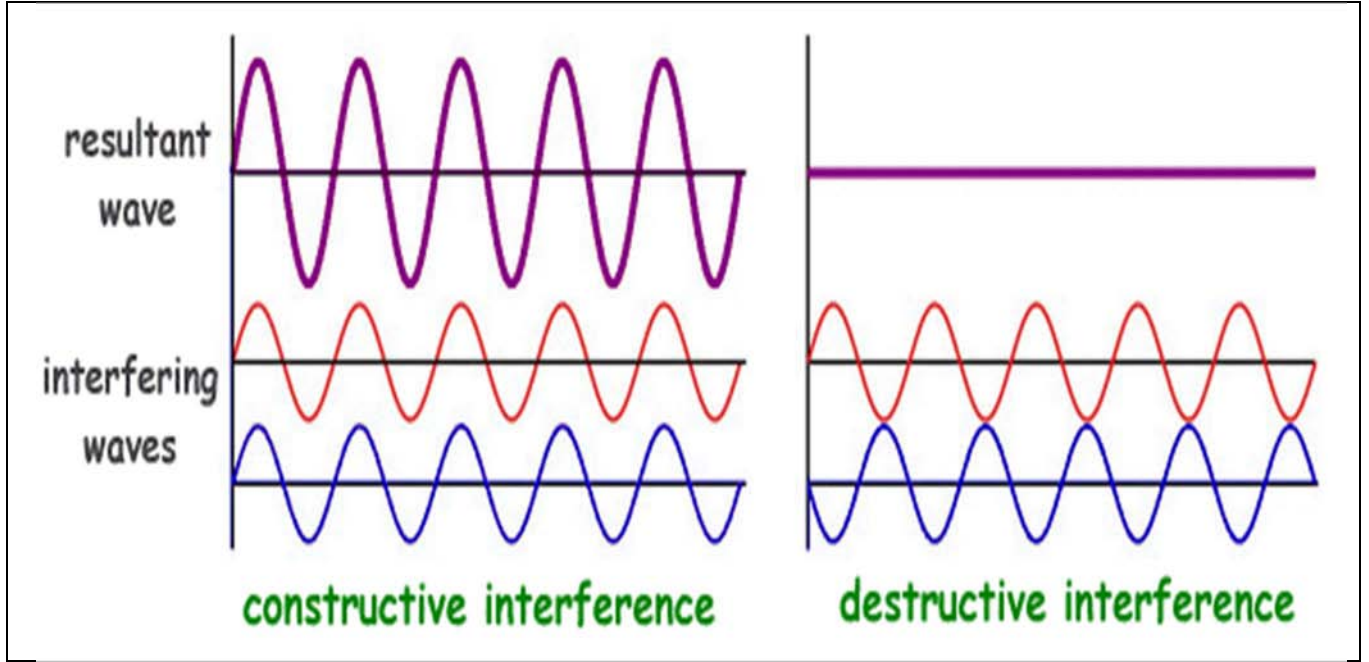
الشكل (1) : الموجة الكهرومغناطيسية

3. تداخل موجتان (Two Waves Interference)

عند انتقال **موجتين متشابهتين** (coherence waves) (متساوية في التردد والسعة ولفق الطور بينهما ثابت مع الزمن) في وسط معين وبنفس الاتجاه ، تحدث ظاهرة مثيرة بين الموجتين وهي التداخل . اي تتراكب الموجتين مع بعضها حيث تندمجان معا مكونة موجة جديدة تختلف من حيث السعة مشكلة نمط من التداخل يشبه نوعا ما تراكب موجات الماء عند إسقاط حجرين على بركة ماء راكد .

يخضع تداخل الموجتين الى مبدأ التراكب (superposition principle) الذي يشير الى ان سعة الموجة المتولدة من التداخل ناتجة من المجموع الجبري لسعات الموجات المتداخلة . لذلك يمكن ان تتولد موجة بسعة عظمت ناتجة من جمع قمتين او قعرين معا اذا كان فرق الطور (phase difference) بين الموجتين المتداخلتين يساوي $(\delta = 0, 2\pi, 4\pi, 6\pi, \dots, m\pi)$ ، فتكون الشدة المتولدة المتولدة من التداخل هي اعظم ما يمكن (maximum intensity) لكونها تتناسب مع مربع السعة كما ذكرنا ، فيسمى التداخل المتكون في هذه الحالة **بالتداخل البناء** (constructive interference) . او تتكون موجة بسعة صغرى ناتجة من جمع قمة مع قعر اذا

كان فرق الطور بين الموجتين المتداخلتين يساوي $(\delta = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots, m\pi)$ ، فتكون الشدة المتولدة المتولدة من التداخل هي اقل ما يمكن (minimum intensity) ، فيسمى التداخل المتكون في هذه الحالة بالتداخل الهدام (destructive interference) كما في الشكل (2) .



الشكل (2) : التداخل البناء والتداخل الهدام

إذا كان هناك موجتين متشابهتين تسيران في نفس الاتجاه ، معادلة الموجة لهما هي :

$$y_1 = a_1 \sin(\omega t - \phi_1) \quad \dots \dots (2)$$

$$y_2 = a_2 \sin(\omega t - \phi_2) \quad \dots \dots (3)$$

حيث (ϕ) تمثل طور الموجة $(\phi = kx)$. عند تداخل هاتان الموجتان يحدث اندماج بينهما مكونة موجة جديدة سعتها تتحدد حسب مبدأ التراكب . فتكون معادلة الموجة الجديدة هي :

$$y = y_1 + y_2 = a_1 \sin(\omega t - \phi_1) + a_2 \sin(\omega t - \phi_2)$$

$$y = A \sin(\omega t - \phi) \quad \dots \dots (4)$$

حيث (ϕ) تمثل طور الموجة المتولدة ، (A) سعة الموجة المتولدة التي ترتبط بعلاقة مع سعتي الموجتين المتداخلتين وفرق الطور بينهما كما يلي :

$$A^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos \delta \quad \dots \dots (5)$$

نلاحظ من خلال المعادلة (5) اعتماد سعة الموجة المتداخلة على سعتي الموجتين المتداخلتين وفرق الطور بينهما ، ولكون السعتين ثابتتين فيبقى الدور على فرق الطور ليحدد نوع التداخل المتولد

نفرض ان الموجتين المتداخلتان لهما نفس السعة ($a_1=a_2=a$) ، فتكون المعادلة (5) بالصورة الاتية :

$$A^2 = a^2 + a^2 + 2a^2 \cos \delta = 2a^2(1 + \cos \delta) \dots \dots (6)$$

$$A^2 = 4a^2 \cos^2 \delta/2 \dots \dots (7)$$

بما ان الشدة تتناسب مع مربع السعة ، فتكون محصلة الشدة للموجة المتولدة كما يلي :

$$I \propto A^2 = 4a^2 \cos^2 \delta/2 \dots \dots (8)$$

اذا كان فرق الطور بين الموجتين المتداخلتين ($\delta = 0, 2\pi, 4\pi, 6\pi, \dots, m\pi$) فتكون قيمة ($\cos^2 \delta/2 = 1$) ، فتصبح الشدة باقصى قيمة ويكون التداخل بناء :

$$I_{max} \propto A^2 = 4a^2 \dots \dots (9)$$

اما اذا كان فرق الطور بين الموجتين المتداخلتين ($\delta = \pi, 3\pi, 5\pi, 7\pi \dots, m\pi$) فتكون قيمة ($\cos^2 \delta/2 = 0$) ، فتصبح الشدة باقل قيمة ويكون التداخل هدام :

$$I_{min} \propto A^2 = 0 \dots \dots (10)$$

ممکن رؤية نمط التداخل المتكون على شكل اهداب مضيئة (تداخل بناء) واهداب مظلمة (تداخل هدام) ، شكل الاهداب يحدد حسب نوع جهاز التداخل وحسب حزمة الضوء المتداخل . فيمكن ان تكون الاهداب على شكل خطوط متوازية (كما في تجربة الشق المزدوج ليونك) ، او تكون على شكل حلقات متحدة المركز (كما في تجربة مايكلسون وتجربة نيوتن) .

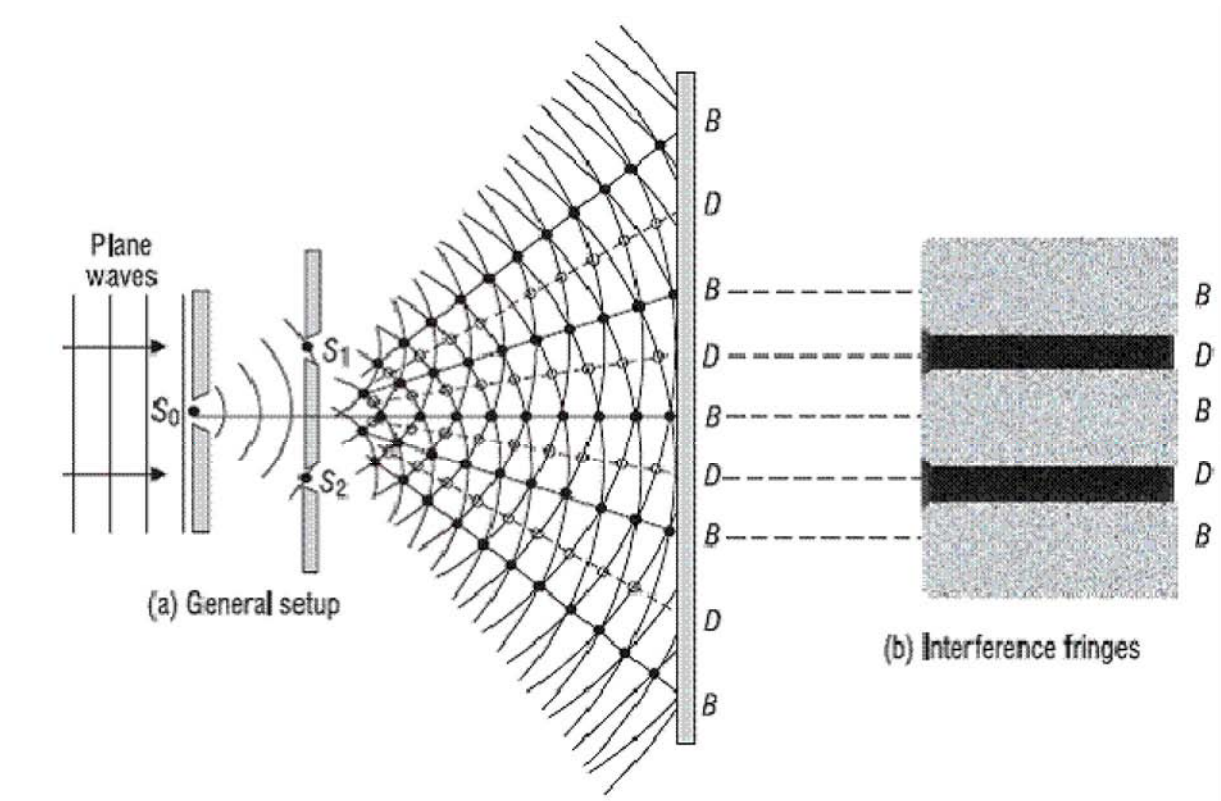
يمكن الحصول على التداخل باجراء تجارب عديدة ، لكنها تعتمد على مبدئين اساسيين : الاول هو مبدأ تجزئة جبهة الموجة (wave front division principle) ، والثاني مبدأ تجزئة السعة (amplitude division principle) . وسوف نأخذ تجربتين في هذا الفصل كمثال لكل مبدأ هي تجربة الشق المزدوج ليونك (مبدأ تجزئة جبهة الموجة) وتجربة الغشاء الرقيق (مبدأ تجزئة السعة) .

4. تجربة يونك للشق المزدوج (Young's Double Slit experiment)

تجربة يونك للشق المزدوج هي إحدى أهم التجارب الفيزيائية التي أسهمت في البحث في طبيعة الضوء وإثبات طبيعته الموجية ، ثم استخدمت في اثبات وجود خاصية موجية لجميع الجسيمات مثل الإلكترونات وغيرها. تعتمد هذه التجربة على انحراف الضوء عند شقين رفيعين في حاجز مانع للضوء، حيث يقوم الانحراف بتحويل كلا الشقين إلى مصدرين ضوئيين متشابهين

ومترافقين، وينتج عنها عند استقبال الضوء على حاجز أمامهما أنماط تداخل تتميز بأهداب ضوئية مضيئة وأخرى مظلمة .

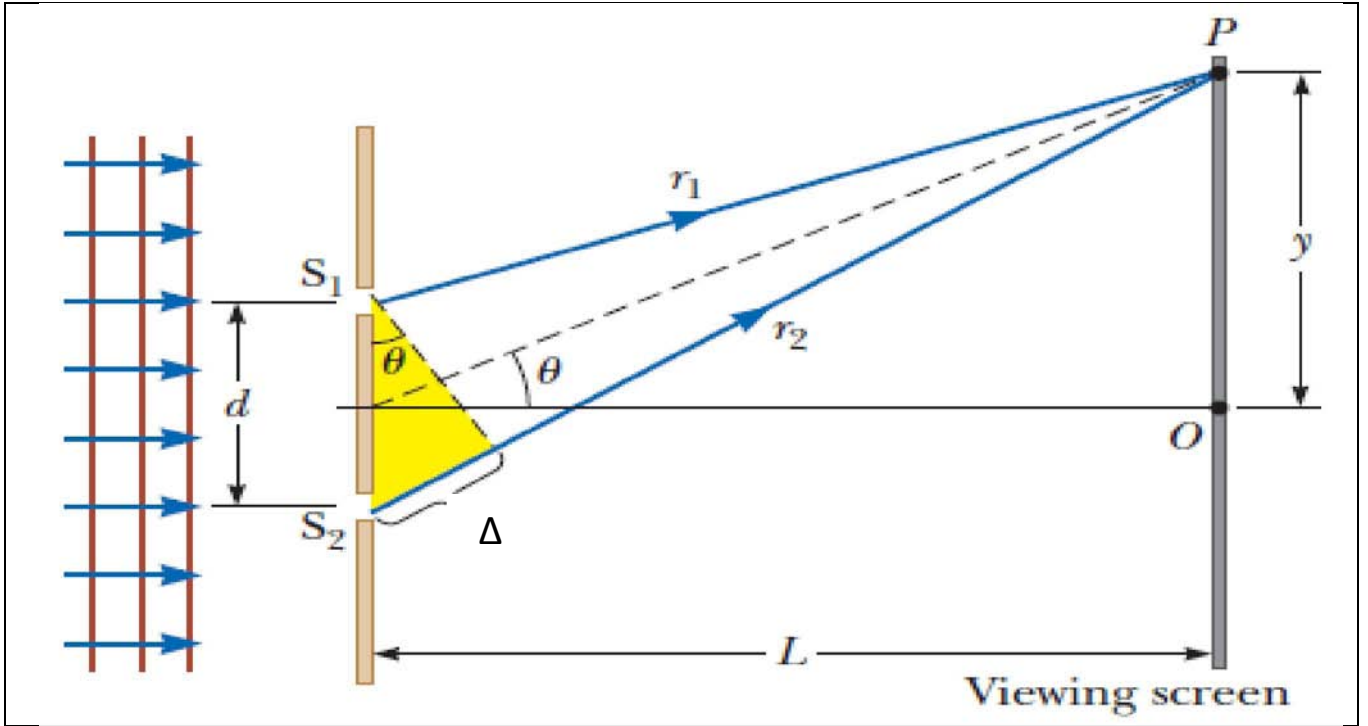
في هذه التجربة يمرر الضوء خلال شق ضيق (S) ليكون حزمة ضوئية ضيقة ، ليمر بعدها خلال شقين (S_1 , S_2) متساويين في العرض (لتكون سعة الحزمتين المتولدتين متساوية) وتفصلهما نفس المسافة مع (S) (ليكون فرق الطور بين الحزمتين ثابت مع الزمن) ، كذلك يكون التردد ثابت لكون الضوء من مصدر واحد . فتصبح الموجات المتداخلة من الشقين هي موجات متشابهة كما في الشكل (3) .



الشكل (3) : تجربة يونك للشق المزدوج

عند تداخل الموجات المتولدة من الشقين (S_1 , S_2) ينتج نمط التداخل على الشاشة (OP) كما في الشكل (4) . يكون الهدب المركزي مضيئاً على الشاشة في نقطة (O) حسب معادلة الشدة (معادلة (8)) ، لكون فرق المسار (Δ) بين (S_1O) و (S_2O) هو صفر (مسارين متساويين) ، فيكون فرق الطور (δ) بين الموجات المتداخلة في هذه النقطة صفر أيضاً ، حسب العلاقة :

$$\delta = k\Delta \quad \dots \dots (11)$$



الشكل (4) تكوين أهداب التداخل في تجربة يونك

لتحديد نوع التداخل في اي نقطة على الشاشة ولتكن نقطة (P) التي تبعد مسافة (y) عن الهدب المركزي (النقطة O) ، يجب معرفة فرق المسار (Δ) بين الموجتين المتداخلتين في هذه النقطة الذي بدوره يحدد فرق الطور (δ) ومنه يعرف مقدار الشدة للهدب المتكون في النقطة (P) ، اي نوع التداخل (بناء او هدام) .

ان فرق المسار بين (S_1P) و (S_2P) هو (Δ) كما في الشكل (4) :

$$\Delta = S_2P - S_1P \quad \dots \dots (12)$$

$$\Delta = d \sin \theta \quad \dots \dots (13)$$

حيث (d) تمثل المسافة بين الشقين ، والتي تعتبر صغيرة جدا اذا ما قورنت مع المسافة بين الشقين والشاشة (L) . لذلك تكون الزاوية (θ) صغيرة جدا ، ويمكن استخدام التقريب الاتي :

$$\sin \theta \approx \tan \theta = \frac{y}{L} \quad \dots \dots (14)$$

فتصبح المعادلة (13) كما يلي :

$$\Delta = \frac{dy}{L} \quad \dots \dots (15)$$

$$\delta = k\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{dy}{L} \quad \dots \dots (16)$$

تمثل المعادلة (16) فرق الطور للموجتين المتداخلتين في نقطة (P) على الشاشة . فيكون التداخل بناء والشدة في أعظم قيمة اذا كان فرق الطور :

$$\delta = 0, 2\pi, 4\pi, 6\pi, \dots, m\pi$$

$$\Delta = 0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots = m\lambda$$

$$\frac{dy}{L} = m\lambda \quad \dots \dots (17) \quad (\text{constructive interference})$$

حيث (m) هو عدد صحيح (m = 0, 1, 2, 3, ...) يسمى مرتبة التداخل . ويكون التداخل هدام والشدة في اقل قيمة اذا كان فرق الطور :

$$\delta = \pi, 3\pi, 5\pi, 7\pi \dots, m\pi$$

$$\Delta = \frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \frac{5\lambda}{2}, \frac{7\lambda}{2} \dots = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$$

$$\frac{dy}{L} = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad \dots \dots (18) \quad (\text{destructive interference})$$

5. التداخل في الأغشية الرقيقة (Thin Film Interference)

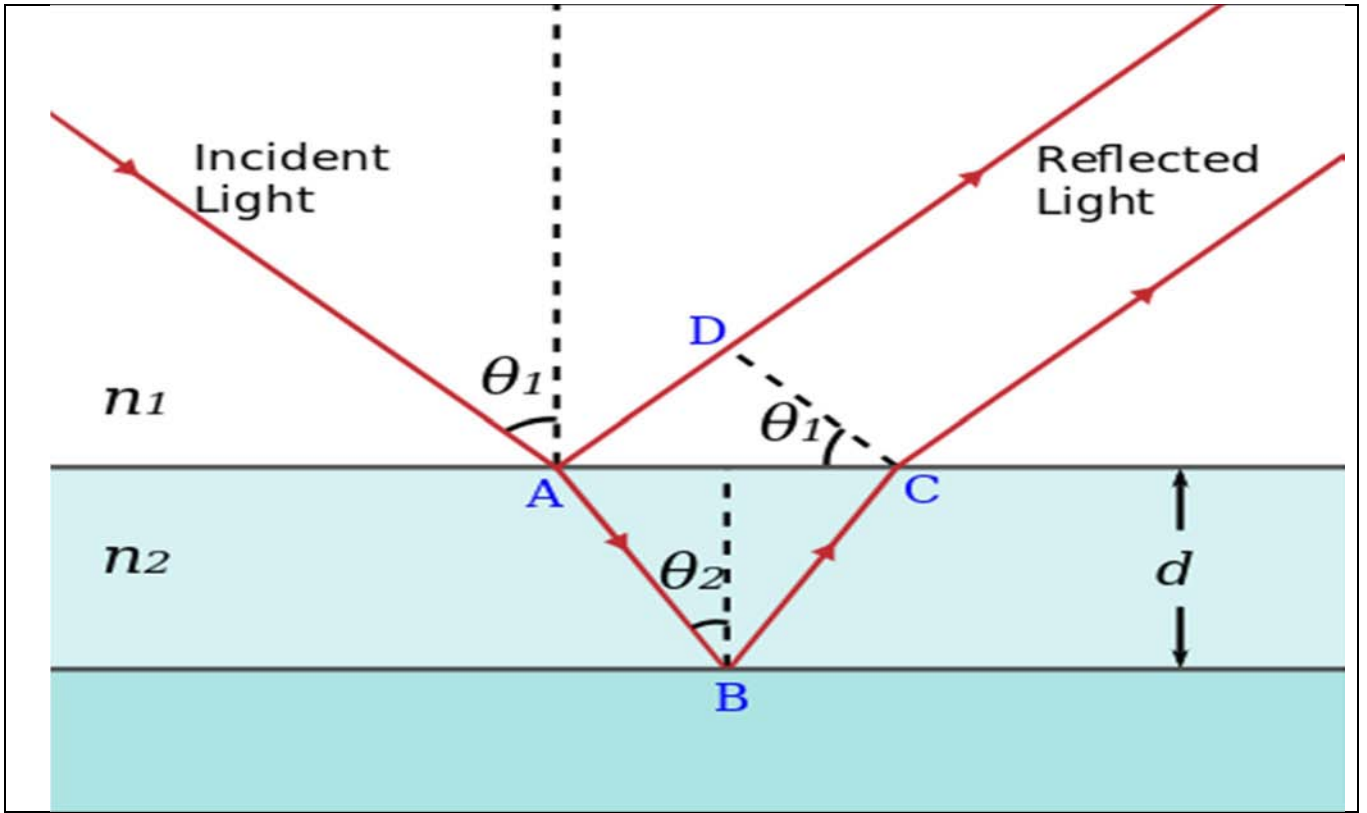
هناك بعض الظواهر في الطبيعة ناتجة من التداخل بين موجات الضوء المنعكسة من الاغشية الرقيقة مثل الالوان المتولدة من فقاعات الصابون وفي اغشية الزيت . تعمل هذه الظواهر على التداخل بمبدأ تجزئة السعة ، اي ان سعة الموجة تنقسم الى قسمين نتيجة الانعكاس من سطحين متتاليين ، بعدها تتداخل الموجات مع بعضها مولدة نمط تداخل .

في الشكل (5) شعاع ضوئي يسقط بزاوية (θ_1) على سطح غشاء رقيق سمكه (d) في نقطة (A) ، نلاحظ ان قسم من الشعاع ينعكس الى نفس الوسط الاول (n_1) ، وقسم ينفذ (ينكسر) الى داخل الغشاء (n_2) (مع إهمال الجزء الممتص) ويسقط على السطح السفلي له في نقطة (B) بزاوية سقوط (θ_2) . هذا الشعاع ينقسم الى جزئين قسم ينفذ الى خارج الغشاء وقسم ينعكس متجها الى النقطة (C) . عند نقطة (C) ينقسم الشعاع ايضا الى منعكس الى داخل الغشاء ونافذ الى الوسط العلوي (n_1) . وهكذا

تتكرر هذه العملية من الانعكاس والانكسار وفي كل مرة تقل شدة الضوء نتيجة تجزؤ السعة في عملية الانعكاس والانكسار .

هذه العملية تكون اشعة منعكسة متوازية حسب الشكل (5) ، تتداخل هذه الاشعة مع بعضها تداخل بناء او هدام حسب فرق الطور بين الشعاعين المتداخلين . وفرق الطور هنا يعتمد على ثلاثة امور هي :

- سمك الغشاء (d) الذي يحدد فرق مسار الاشعة المتداخلة
- معامل انكسار الغشاء
- زاوية سقوط الشعاع الاصلي على سطح الغشاء



الشكل (5) : التداخل في الاغشية الرقيقة

جدير بالذكر ان الضوء المنعكس من السطح الفاصل بين وسطين يحدث له ازاحة طور (phase shifting) مقدارها (π) اذا كان $(n_1 < n_2)$ ، فينتج نمط تداخل على شكل اهداب مظلمة ومضيئة اذا كان الضوء احادي الطول الموجي ، أو على شكل حزمة الوان اذا كان الضوء المستخدم مركب (ابيض مثلا) .

ان فرق الطور بين الشعاعين المتداخلين يحسب من خلال فرق المسار البصري (optical path difference OPD) بين الشعاعين الذي يساوي حسب الشكل (5) :

$$OPD = n_2(AB + BC) - n_1AD \dots \dots (19)$$

$$AB = BC = \frac{d}{\cos\theta_2} \dots \dots (20)$$

$$AD = 2d \tan\theta_2 \sin\theta_1 \dots \dots (21)$$

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \quad (\text{Snell's law})$$

$$OPD = n_2 \left(\frac{2d}{\cos\theta_2} \right) - 2d \tan\theta_2 n_2 \sin\theta_2 \dots \dots (22)$$

$$OPD = 2n_2 d \left(\frac{1 - \sin^2\theta_2}{\cos\theta_2} \right) \dots \dots (23)$$

$$OPD = 2n_2 d \cos\theta_2 \dots \dots (24)$$

اذا كان فرق المسار البصري يساوي طول موجي واحد او مضاعفات صحيحة له ، فالتداخل يكون بناء كما موضح في المعادلة :

$$\lambda, 2\lambda, 3\lambda, 4\lambda, \dots = m\lambda = 2n_2 d \cos\theta_2 \quad (\text{constructive interference})$$

اما اذا كان فرق المسار البصري يساوي نصف الطول الموجي او مضاعفات صحيحة لأنصافه ، فالتداخل يكون هدام كما موضح في المعادلة :

$$\frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \frac{5\lambda}{2}, \dots = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda = 2n_2 d \cos\theta_2 \quad (\text{destructive interference})$$

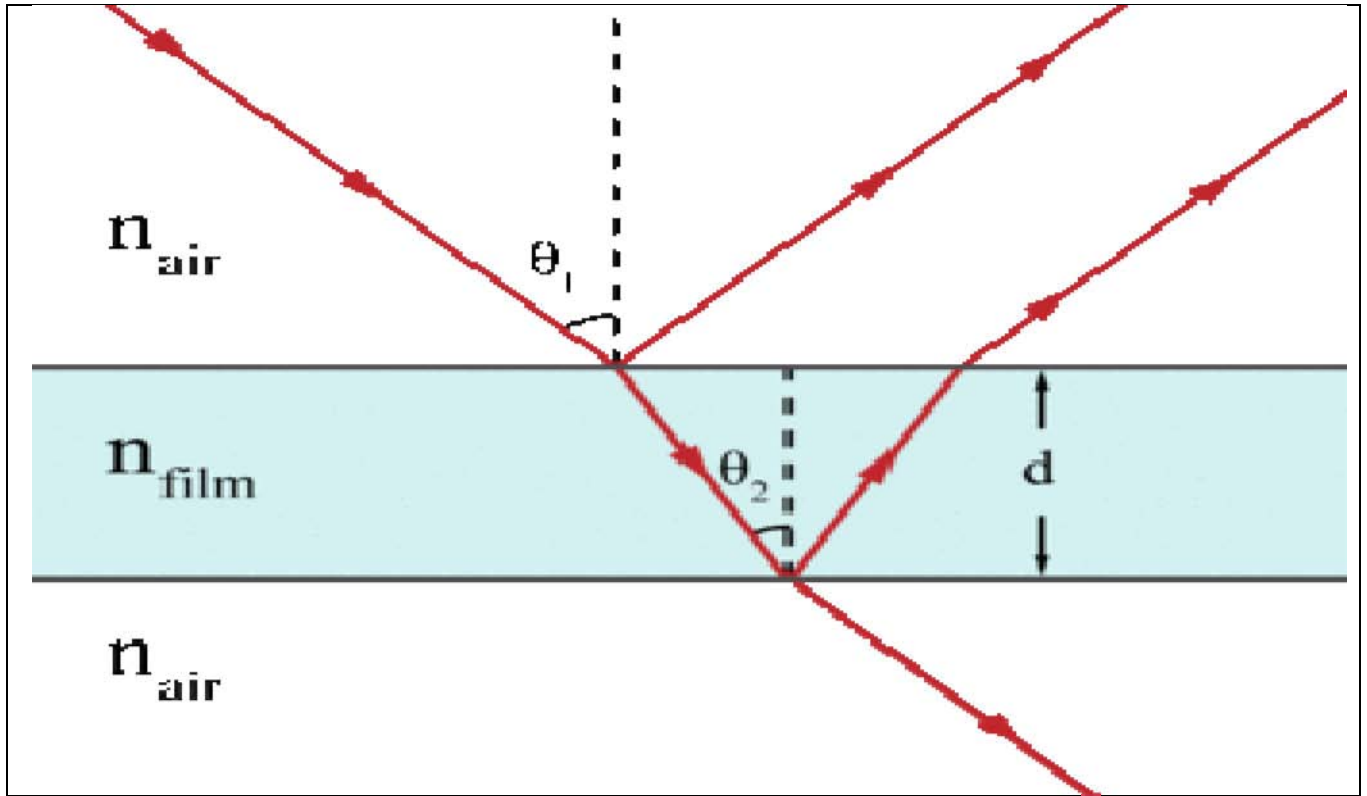
ان هناك امثلة كثيرة لظاهرة التداخل في الاغشية الرقيقة . تختلف حسب نوع الغشاء المستخدم ونوع الوسط المحيط بالغشاء ، من الامثلة المهمة في هذا الصدد هو التداخل في فقاعة الصابون ، والتداخل في طبقة الزيت ، والطلاء غير العاكس .

6. التداخل في فقاعة الصابون (Interference in Soap Bubble)

في حالة فقاعة الصابون ، الضوء ينتقل من الهواء ويسقط على غشاء فقاعة الصابون ، وبما ان معامل انكسار غشاء الفقاعة (الوسط الثاني) اكبر من معامل انكسار الهواء (الوسط الاول) $(n_{\text{film}} > n_{\text{air}})$ ، فالانعكاس الذي يحدث في الطبقة العليا من الغشاء (الطبقة الفاصلة بين الهواء والغشاء) سوف يولد إزاحة طور مقدارها (π) كما في الشكل (6) . ان القسم الأكبر من الضوء سوف ينفذ من الطبقة العليا (منكسرا) الى الطبقة السفلى من الغشاء (الطبقة الفاصلة بين الغشاء والهواء) ، الذي بدوره يعكس الضوء بدون إزاحة طور لكون هذا الانعكاس داخلي ، اي ان معامل انكسار الوسط الأول اكبر من معامل انكسار الوسط الثاني $(n_{\text{film}} > n_{\text{air}})$. فيحدث التداخل بين الشعاعين المنعكسين من الطبقتين العليا والسفلى بنمط تداخل يعتمد على سمك الغشاء ومعامل انكساره وزاوية سقوط الشعاع والطول الموجي للضوء المستخدم . ان شرط حدوث التداخل في فقاعة الصابون هو :

$$\left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda = 2n_{\text{film}}d\cos\theta_2 \quad (\text{constructive interference}) \quad \dots (25)$$

$$m\lambda = 2n_{\text{film}}d\cos\theta_2 \quad (\text{destructive interference}) \quad \dots (26)$$



الشكل (6) التداخل في فقاعة الصابون

7. التداخل في طبقة الزيت (Interference in Oil Film)

في حالة طبقة الزيت ، الزيت يطفو على طبقة من الماء وتكون فوقه طبقة من الهواء كما في الشكل (7) . الزيت يمتلك معامل انكسار قريب من $(n_{oil} = 1.5)$ ، ومعامل انكسار الماء $(n_{water} = 1.33)$. كما هو الحال في فقاعة الصابون فالزيت هنا محاط بطبقتين (الهواء والماء) اقل معامل انكسار منه $(n_{oil} > n_{water} > n_{air})$. فيحدث انعكاس في الطبقة العليا من الزيت بإزاحة طور مقدارها (π) لكون $(n_{oil} > n_{air})$ ، بينما يحدث انعكاس ثاني في الطبقة السفلى من الزيت بدون إزاحة طور لكون $(n_{oil} > n_{water})$. فيحدث تداخل بين الشعاعين المنعكسين بنفس شرط تداخل فقاعة الصابون :

$$\left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda = 2n_{oil}d\cos\theta_2 \quad (constructive \ interference)$$

$$m\lambda = 2n_{oil}d\cos\theta_2 \quad (destructive \ interference)$$

8. الطلاء غير العاكس (Anti Reflection Coating)