

## Geometrical optics – Optique géométrique

### الضوء الهندسي

يهدف الضوء الهندسي إلى دراسة انتشار الأشعة الضوئية في الأوساط الشفافة، قد تكون هذه الأوساط متجانسة أو غير متجانسة، وقد تحد هذه الأوساط سطوح عاكسة كلياً أو جزئياً. ينتشر الضوء في الأوساط المتجانسة وفق خط مستقيم إلى أن يبلغ السطوح الفاصلة بين وسطين شفافين مختلفين، حيث يتعرض للانعكاس أو الانكسار أو كليهما معاً. وعلى هذا يمكن معالجة انتشار الضوء ضمن جملة ضوئية باستخدام نتائج الهندسة، ومن هنا أتت تسمية هذه الطريقة في دراسة الضوء بالضوء الهندسي، وهي دراسة في غاية الأهمية عند النظر في تصميم الأجهزة البصرية على اختلاف أنواعها كالمقاريب والمجاهر وغيرها كثير.

## 1. مبدأ فيرما . المسير الضوئي

عند مرور الضوء في وسط قرينة انكساره  $n$  يُعرّف المسير الضوئي خلال فترة زمنية، بالمسافة التي يقطعها الضوء في الخلاء خلال الفترة الزمنية نفسها.

$$t = L_0 / v = L_0 \frac{n}{c}$$

ليكن  $L_0$  الطول الفعلي الذي عبره الضوء في الوسط ذي قرينة الانكسار  $n$  . يستغرق الضوء لعبور هذا الطول زمناً قدره: حيث تمثل  $v$  سرعة الضوء في الوسط المعتبر  $c$  سرعة الضوء في الخلاء. يعبر الضوء خلال هذا الزمن في الخلاء مسافة قدرها:

$$L = nL_0$$

تمثل القيمة السابقة المسير الضوئي. عند عبور الشعاع الضوئي عدة أوساط متجانسة متجاورة كما في الشكل 1 . أ، فإن المسير

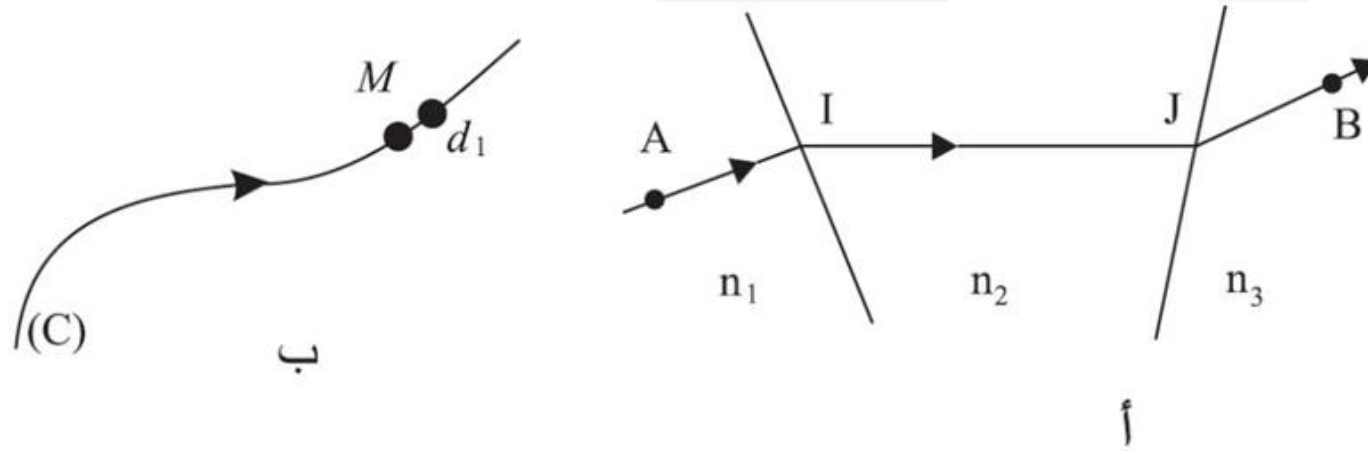
$$\text{المسيري} = \text{LAB} = (AB) = n_1 AI + n_2 IJ + n_3 JB$$

وإذا سلك الشعاع الضوئي في وسط غير متجانس طريقاً (c) (الشكل 1-ب)، يكون المسير

$$L = \int_{(c)} n \, dl$$

الضوئي:

يسمح مبدأ فيرما بتعيين الطريق الذي يسلكه الضوء وهو ينص على ما يأتي:



الشكل (1)



جامعة  
المنارة  
MANARA UNIVERSITY

عند انتشار الضوء من نقطة إلى أخرى يسلك الضوء الطريق الذي يتطلب الفترة الزمنية الأقصر؛ أي الطريق الذي يتمتع بالمسير الضوئي الأدنى. يترتب على هذا المبدأ نتائج نوردها فيما يأتي:

أ. الانتشار المستقيم: وهو سلوك الضوء طريقاً مستقيماً في الأوساط المتجانسة.

ب. مبدأ رجوع الضوء: يسلك الضوء الطريق ذاته الذي عبره في أثناء وروده.

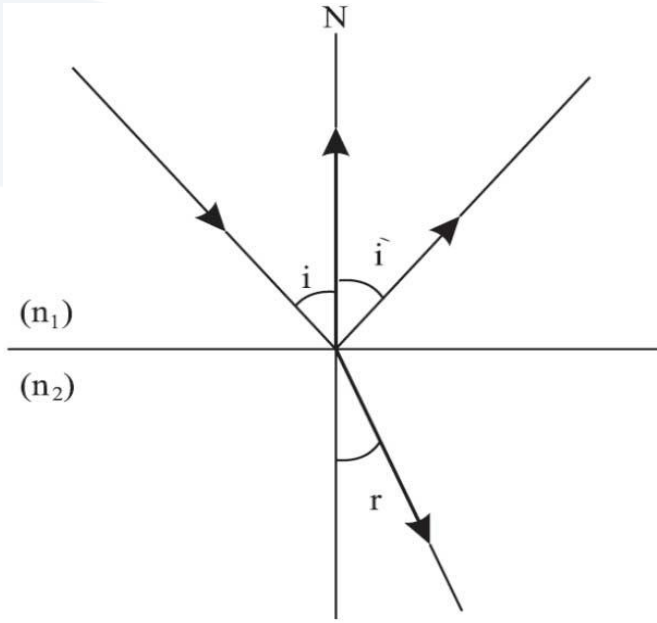
ت. قانونا سنل وديكارت: وهما ينصان على ما يأتي:

القانون الأول: يقع كلُّ من الشعاع المنعكس والشعاع المنكسر في مستوي الورد وهو المستوي

المعرف بشعاع الورد والناظم  $N$  في نقطة الورد على السطح الفاصل بين الوسطين الشفافين.

القانون الثاني: يربط هذا القانون بين الزوايا

الآتية:



الشكل (2)

زاوية الورود  $i$  وهي الزاوية التي يصنعها الشعاع لوارد مع الناظم في نقطة الورود.

زاوية الانعكاس  $i'$  وهي الزاوية التي يصنعها الشعاع المنعكس مع الناظم في نقطة الورود.

زاوية الانكسار  $r$  وهي الزاوية التي يصنعها الشعاع المنكسر مع الناظم في نقطة الورود (الشكل 2).

ويكتب هذا القانون بالشكل:

$$i = i'$$

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r$$

حيث تمثل  $n_1$  و  $n_2$  قرينتي انكسار الوسط الذي يرد منه الضوء والوسط الذي ينكسر فيه الضوء على الترتيب.

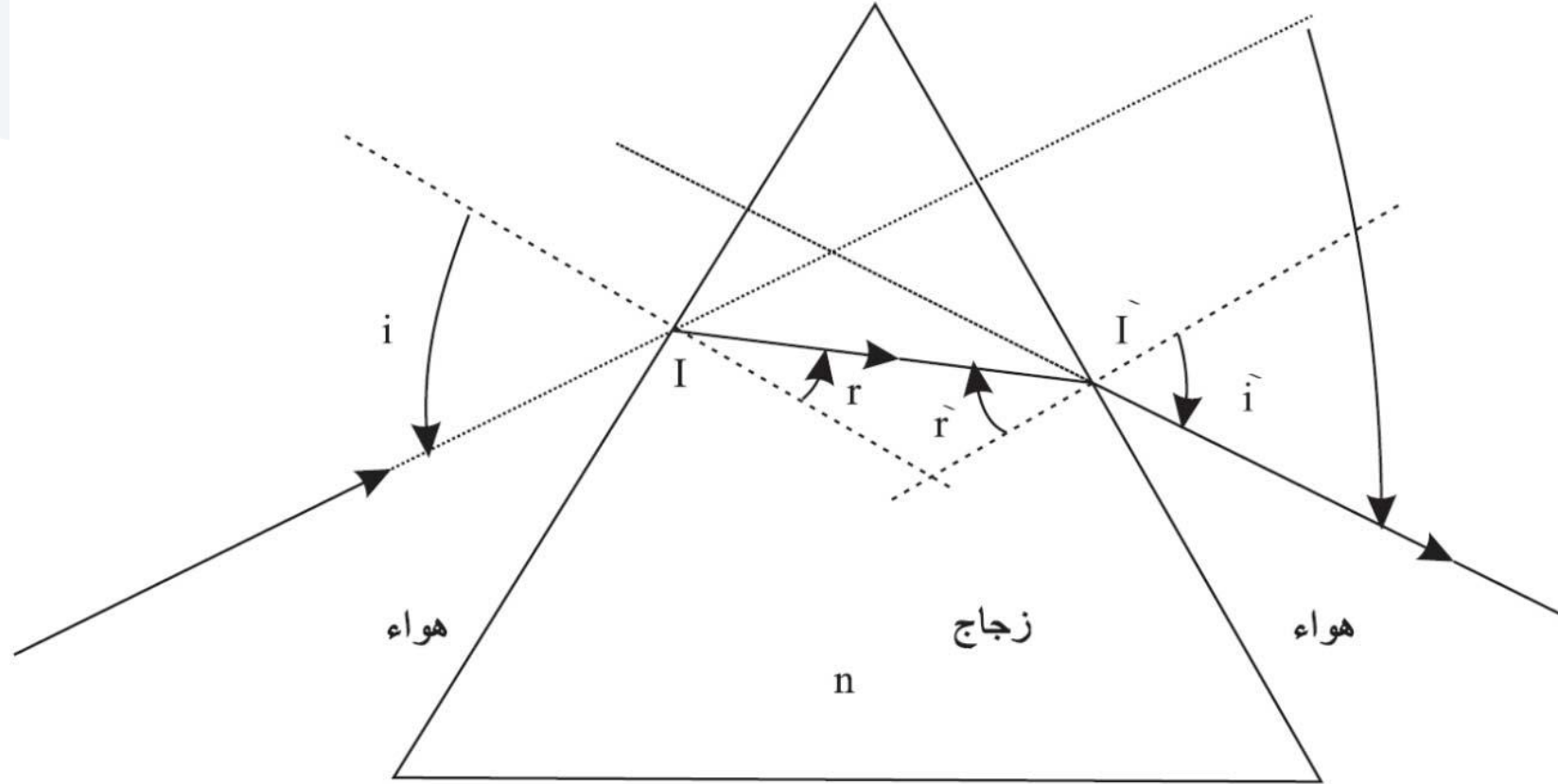
## 2. تطبيق: الموشور

الموشور هو كتلة زجاجية متجانسة تحدّها ثلاثة مستويات، والفصول المشتركة لهذه المستويات متوازية، يُسمّى سطحاً الموشور اللذان يعبرهما الضوء وجهي الموشور، ويُسمّى السطح الثالث قاعدة الموشور. يُسمّى الفصل المشترك لوجهي الموشور حرف الموشور. لتكن  $n$  قرينة انكسار مادة الموشور. تُسمّى زاوية رأس الموشور  $A$  الزاوية بين وجهيه. لتكن  $i$  زاوية ورود حزمة ضوئية على الوجه الأيسر للموشور ولتكن  $r$  زاوية الانكسار بعد عبور وجه الورد، و  $r'$  زاوية الورد على الوجه الثاني (وجه البروز)، و  $i'$  زاوية البروز. نصطلح اتجاهها موجباً للزوايا الاتجاه المعاكس لجهة دوران عقارب الساعة فيما يتعلق بزوايا الوجه الأول، والاتجاه الموافق لجهة دوران عقارب الساعة فيما يتعلق بزوايا الوجه الثاني. لتكن  $D$  زاوية الانحراف بين الشعاعين الوارد والبارز ونعتبر قيمتها موجبة مع اتجاه دوران عقارب الساعة (الشكل 3).



جامعة

A



الشكل (3)

ترتبط الزوايا السابقة بالعلاقات الآتية:

$$\sin i = n \cdot \sin r, \sin i' = n \cdot \sin r'$$

$$A = r + r'$$

$$D = i + i' - D$$

وإذا ورد شعاع ضوئي على الوجه الأول للموشور فإنه لكي يبرز من الوجه الثاني يجب أن تتحقق المتراجحة الآتية:

$$i_0 \leq I \leq \frac{\pi}{2}$$

حيث

$$\sin i_0 = n \sin \left[ A - \text{Arc sin} \left( \frac{1}{n} \right) \right]$$

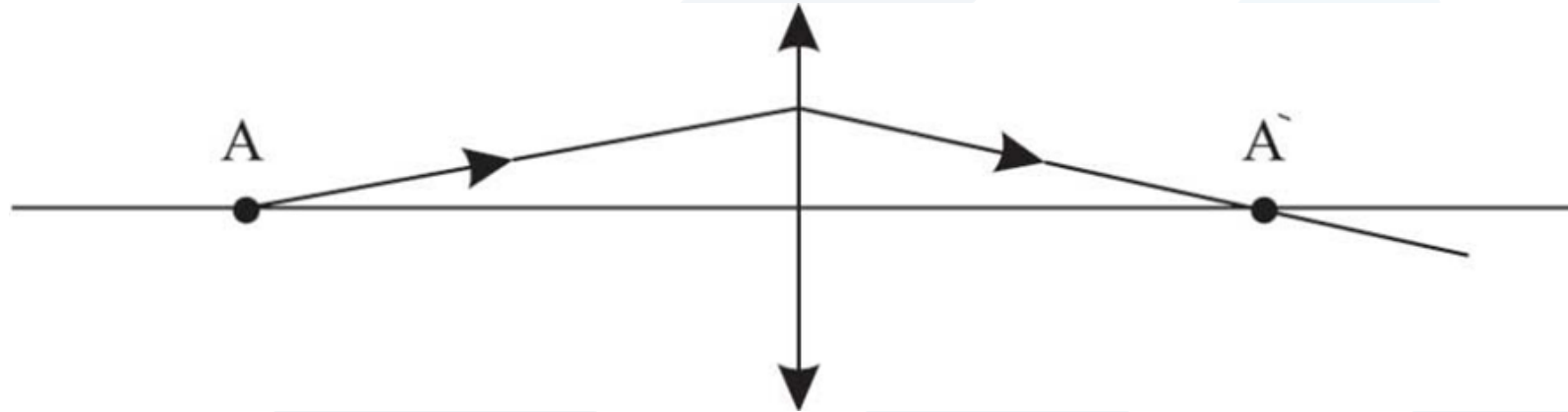
تتعلق قرينة انكسار الموشور بطول موجة الشعاع الضوئي الوارد على الموشور، ومن ثم تؤدي إضاءة الموشور بحزمة ضوئية بيضاء أي تحتوي على طيف واسع من أطوال الموجة - إلى خروج الحزمة من الوجه الثاني للموشور وقد تبددت إلى حزم بألوان مختلفة مرتبة بحسب ألوان الطيف.



### 3 . النقطية

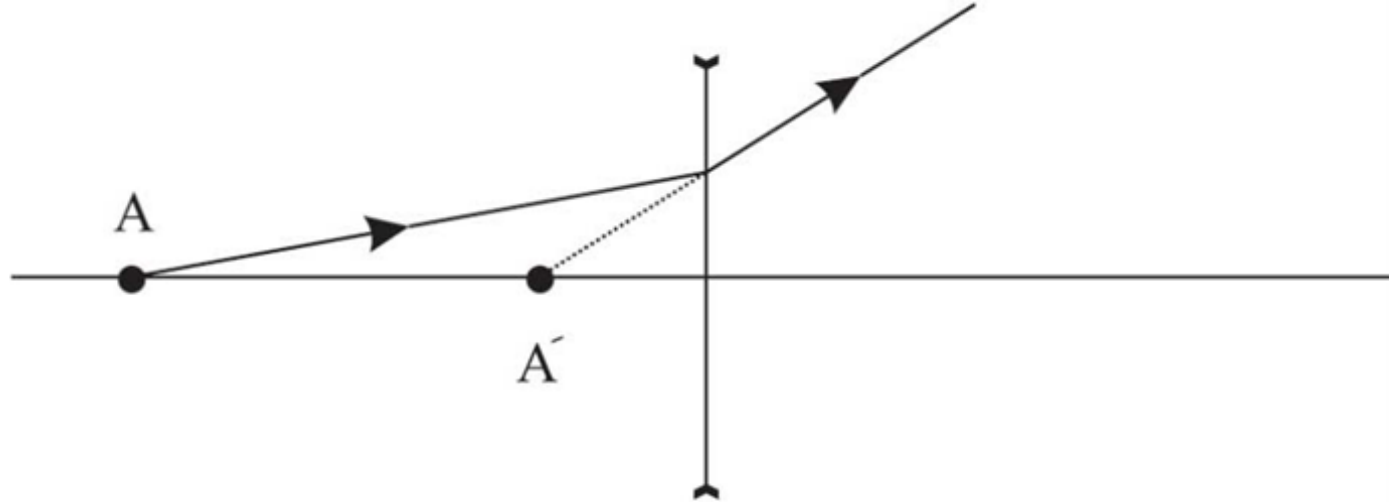
نسمي جملة ضوئية  $S$  مجموعة من الأوساط المتجانسة الشفافة المحدودة بسطوح كاسرة أو عاكسة

ليكن  $A$  منبعاً نقطياً يرسل أشعة ضوئية على  $S$ . إذا التقت جميع الأشعة بعد خروجها من الجملة في النقطة  $A'$  نفسها، فإننا نقول عن  $A'$  إنها خيال النقطة  $A$ ، ونقول عن هذا الخيال إنه حقيقي (الشكل 4).



الشكل (4)

أما إذا خرجت هذه الأشعة متباعدة وكأنها صادرة من نقطة عن  $A'$  فنقول عن  $A'$  إنها خيال وهمي للنقطة  $A$  (الشكل 5).



الشكل (5)

إذا كانت  $A'$  خيالاً لـ  $A$  ووُضع في  $A'$  منبع ضوئي نقطي، فإن  $A$  ستكون خيالاً لـ  $A'$ ، وذلك حسب مبدأ رجوع الضوء. يُقال عن النقطتين  $A$  و  $A'$  إنهما مترافقتان بالنسبة إلى الجملة. وبهذا الصدد يكون:

أ - يمكن التحقق من أن محرقى مجسم قطع ناقص هما نقطتان مترافقتان إذا كان سطحه عاكساً كلياً.

ب - إن الأشعة الواردة من اللانهاية على سطح مجسم قطع مكافئ عاكس والموازية لمحور القطع تلتقي في محرقه، لذا فإن نقطة موجودة على محور القطع في اللانهاية ومحرق القطع نقطتان مترافقتان.

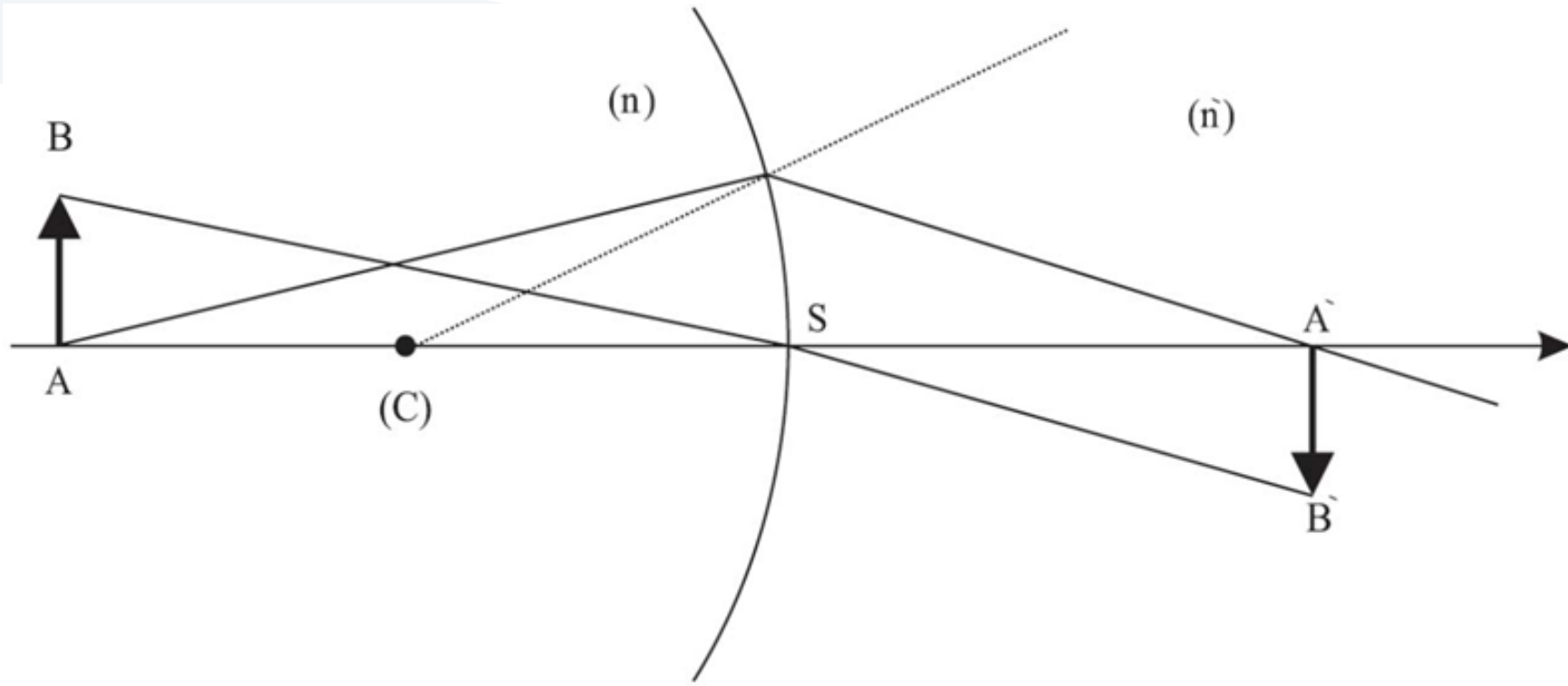
ج . المرآة المستوية : كل نقطتين متناظرتين بالنسبة إلى سطح المرآة هما نقطتان مترافقتان.

#### 4. الكاسر الكروي

يُسمّى كاسراً كروياً السطح الكروي الذي يفصل بين وسطين شفافين. يُسمّى محوراً أساسياً للكاسر المحورُ المار من مركز الكاسر ومن ذروته، ويُسمّى محور ثانوي كل محور يمر من مركزه. يتمتع الكاسر الكروي بالنقطية إذا صنعت الأشعة الضوئية زوايا صغيرة مع محور الكاسر.

دساتير الكاسر الكروي:

ليكن  $AB$  جسماً صغيراً متوضعاً على محور كاسر كروي مركزه  $C$  وذروته  $S$  وليكن  $A'B'$  خيال  $AB$  (الشكل 6). ولتكن  $n$  قرينة انكسار الوسط الذي يقع فيه الجسم، و  $n'$  قرينة انكسار الوسط الذي يقع فيه الخيال.



الشكل (6)

تُكتب دساتير الكاسر الكروي ضمن الشرط الذي ذكرناه:

$$-\frac{n}{SA} + \frac{n'}{SA'} + \frac{n' - n}{SC}$$

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{n \overline{SA'}}{n' \overline{SA}}$$

حيث ترمز  $\gamma$  إلى تكبير الكاسر الكروي.

## الأبعاد المحرّقة، التقريب

المحارق: هي النقاط المرافقة لنقاط موجودة في اللانهاية ومتوضعة على المحور.

وعلى هذا، المحرق الجسمي هو النقطة من المحور التي يكون خيالها بالكاسر في اللانهاية. والمحرق

الخيالي هو النقطة من المحور التي تلتقي فيها الأشعة الواردة على الجملة موازية للمحور.

يعطى موقع المحرق الجسمي بالعلاقة:

$$f = \overline{SF} = \frac{n}{n - n'} \overline{SC}$$

يُسمّى  $f$  البعد المحرقي الجسمي، ويعطى موقع المحرق الوهمي بالعلاقة:

$$f' = \overline{SF'} = \frac{n'}{n' - n} \overline{SC}$$

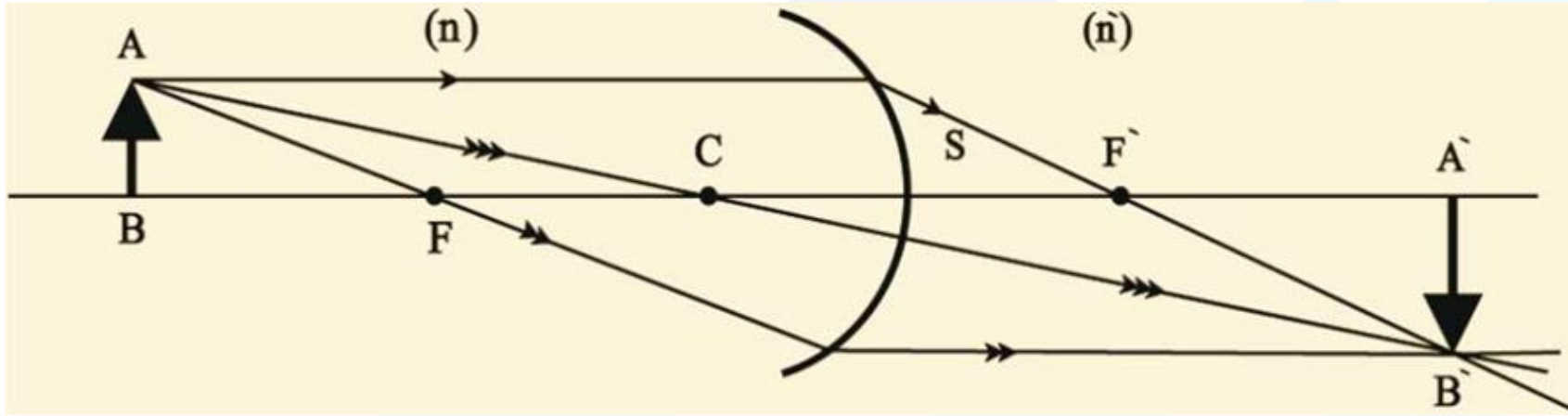
يُعرّف تقريب الكاسر الكروي بأنه المقدار:

$$v = \frac{n}{\overline{SF}} = \frac{n'}{\overline{SF'}} = \frac{n' - n}{\overline{SC}}$$



بتوجيه المحور باتجاه الضوء نلاحظ أن الجملة تكون مُقَرَّبَةً إذا كان تقريبها موجباً وتكون مُبَعَّدَةً إذا كان تقريبها سالباً.

لإنشاء خيال جسم في كاسر كروي نتبع ما يلي: انظر الشكل (7):

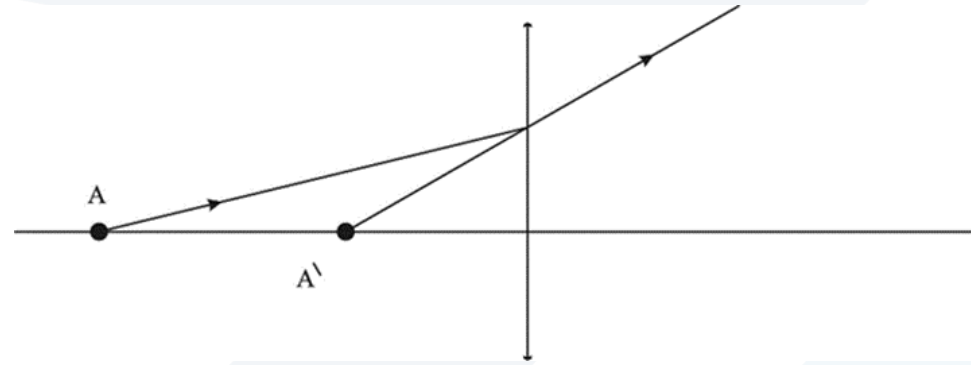


الشكل (7)

- كل شعاع يمر بالمحرق الجسمي يبرز من الكاسر موازياً للمحور الأساسي.
- كل شعاع يرد على الكاسر موازياً للمحور الأساسي يبرز ماراً من المحرق الخيالي.
- كل شعاع يرد على الكاسر ماراً من مركزه يبرز دون أن يعاني أي انكسار.

## الكاسر المستوي

يُمثل الكاسر المستوي الشكل (8) حالة خاصة من الكاسر الكروي حيث يكون نصف قطر التقوس لانهائياً.



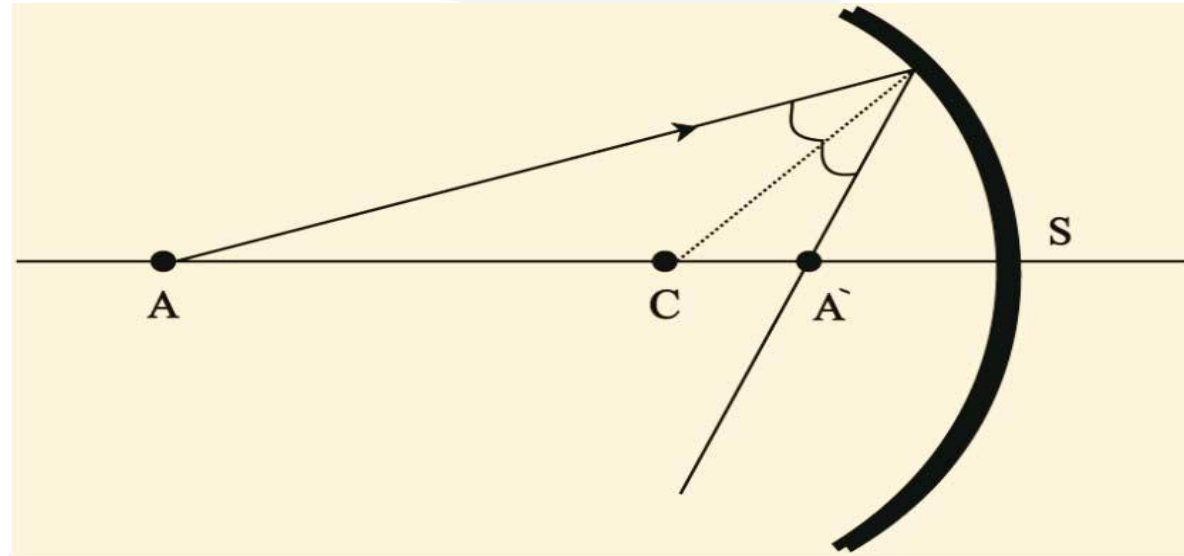
الشكل (8)

استناداً إلى علاقات الكاسر الكروي تكون محرقاً الكاسر المستوي متوضعين في اللانهاية، وتأخذ علاقة الترافق الشكل:

$$\frac{\overline{SA'}}{\overline{SA}} = \frac{n'}{n}$$

## 5. المرايا الكروية

تعريف المرآة الكروية: هي سطح كروي عاكس، فإذا كان السطح الداخلي هو السطح العاكس كانت المرآة مقعرة الشكل (9). أما إذا كان السطح الخارجي هو العاكس فالمرآة محدبة.



الشكل (9)

تُكتب دساتير المرآة الكروية عندما تكون الأشعة الواردة عليها قريبة من المحور بالشكل:

$$\frac{1}{SA} + \frac{1}{SA'} = \frac{2}{SC}$$

وفي حال جسم AB خياله  $A'B'$  يكون تكبير المرآة  $\gamma$  معطى بالعلاقة:

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = -\frac{\overline{SA'}}{\overline{SA}}$$

ويكون المحرقان الجسمي والوهمي منطبقين، ويحققان العلاقة:

$$\overline{SF} = \overline{SF'} = \frac{\overline{SC}}{2}$$

## 6 . العدسات الرقيقة

### تعريف العدسة

هي أداة تضم كاسرين كرويين أو كاسرين أحدهما كروي والآخر مستوي يشكلان جملة متمركزة بحيث يمر محور الجملة من مركزي الكاسرين.

يُقال عن عدسة إنها رقيقة إذا كانت ثخانتها عند المحور الأساسي صغيرة مقارنة بنصفي قطري تقوس الكاسرين، وصغيرة بالنسبة إلى الفرق بين نصفي قطري تقعر الكاسرين إذا كان هذان في الاتجاه نفسه.

ضمن هذه الشروط يمكن اعتبار ذروتي الكاسرين منطبتين في نقطة تسمى المركز الضوئي للعدسة، تتمتع العدسة بجوار هذه النقطة بخواص صفيحة متوازية الوجهين ذات ثخانة صغيرة. ومن ثم فإن الشعاع الذي يمر من مركز العدسة يعبرها دون انحراف.

ليكن الخيال  $A'B'$  المكوّن لجسم  $AB$  بالعدسة التي مركزها  $O$ ، ولتكن  $n$  قرينة انكسار مادة العدسة الموجودة في الهواء.

باستخدام دساتير الكاسر الكروي نجد:

$$-\frac{1}{OA} + \frac{1}{OA'} = \frac{1}{OF'} = \frac{1}{f'}$$



يسمى الطرف الثاني تقريب العدسة  $v$ :

$$v = \frac{1}{f'}$$

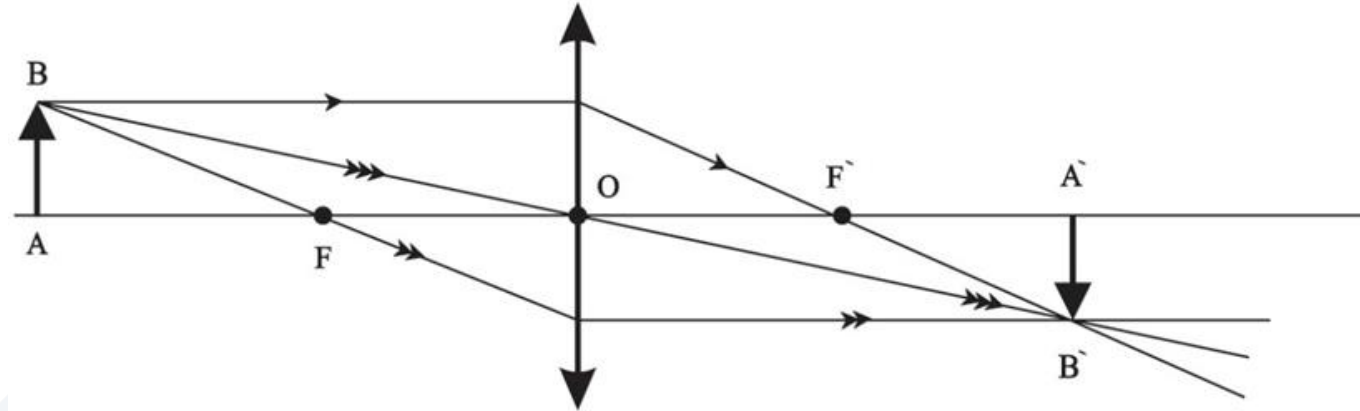
ويُكتب تكبير العدسة:

$$\frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$$

ويكون محرقا العدسة متناظرين بالنسبة إلى مركز العدسة.

## تشكيل الأخيطة في العدسات آ . العدسات المقربة:

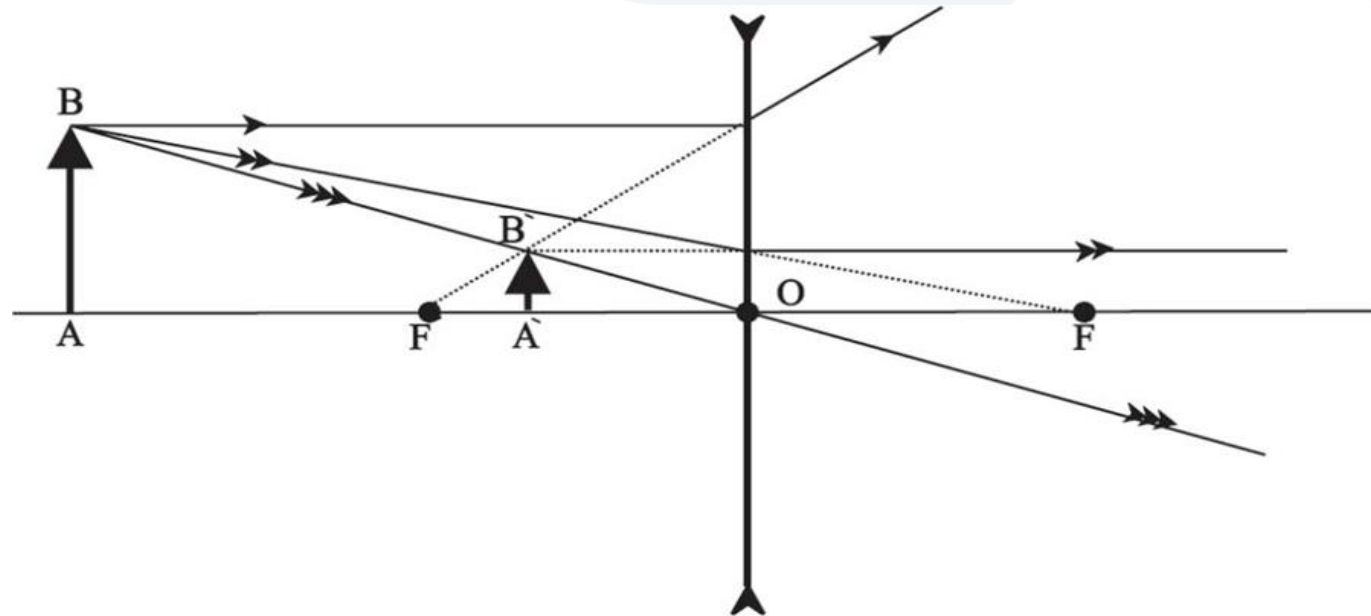
- 1 . كل شعاع يرد على العدسة ماراً من مركزها يخرج دون انحراف.
- 2 . كل شعاع يرد على العدسة موازياً لمحورها الأساسي يخرج ماراً من المحرق الخيالي.
- 3 . كل شعاع يرد على العدسة ماراً من محرقها الجسمي يخرج موازياً للمحور الأساسي.
- 4 . كل شعاع يرد على العدسة موازياً لمحور ثانوي للعدسة يخرج ماراً من نقطة تقاطع هذا المحور مع المستوي المحرقي الخيالي (الشكل . 10).



الشكل (10)

## ب . العدسات المبعدة:

العدسات المبعدة يكون محرقها الجسمي وهمياً وكذلك محرقها الخيالي؛ وهذا ما يجب مراعاته لدى إنشاء خيال ما (الشكل . 11).

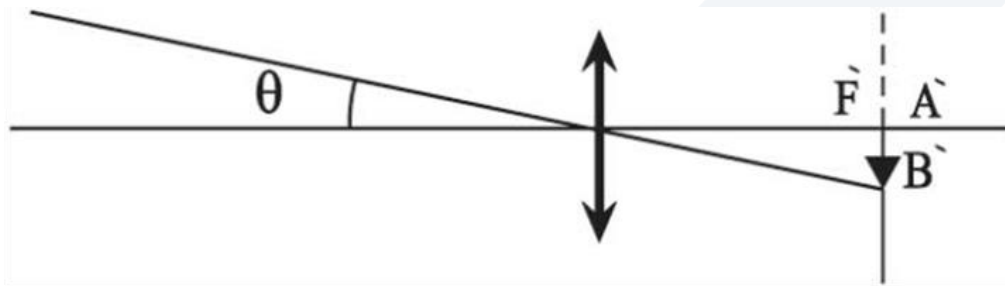


الشكل (11)

## حالة جسم أو خيال في اللانهاية

يعبر عن الجسم في هذه الحالة بقطره الظاهري  $\theta$  وهو بالتعريف الزاوية التي يُرى هذا الجسم ضمنها. فعلى سبيل المثال نرى الشمس من سطح الأرض بقطر ظاهري قدره  $0.50$  درجة وبسبب بعد الشمس يمكن اعتبارها جسماً متوضعاً في اللانهاية، وكذلك حال الكواكب والنجوم.

يتشكل الخيال في هذه الحالة في المستوي المحرقى الخيالي، ويكون طول هذا الخيال (الشكل 12)



الشكل (12)

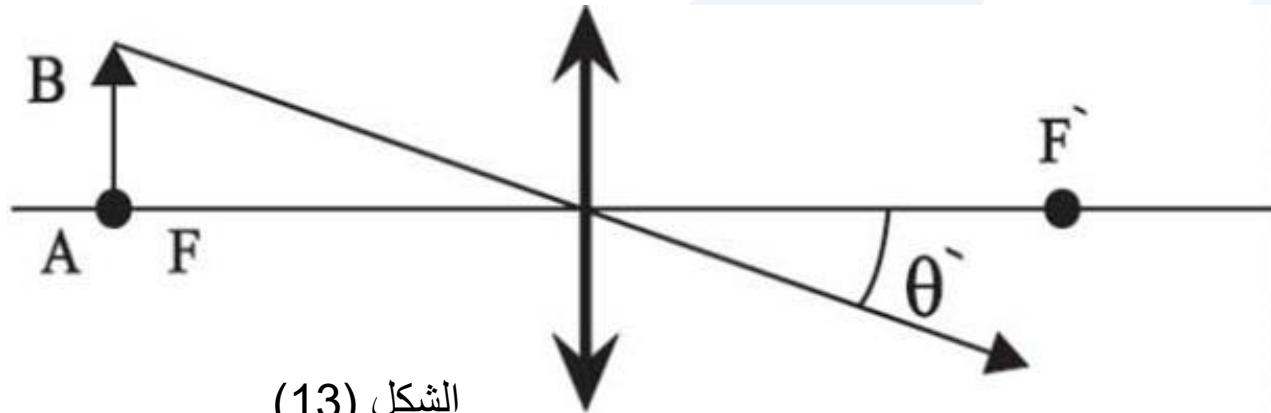
$$f \theta = f' \theta$$

مساوياً:

تُكوّن العدسة المقربة لجسم طوله AB متوضع في مستويها المحرق الجسمي خيالاً متوضعاً في اللانهاية له قطر

ظاهري قدره (الشكل 13):

$$\theta' = \frac{\overline{AB}}{f'} = \frac{\overline{AB}}{f}$$



الشكل (13)

وتجدر الإشارة إلى أن عدم تمتع العدسة بالنقطية يؤدي إلى ظاهرة الزيوغ الضوئية [ر].