الفصل السابع

الضوء الهندسي

I ـ مقدمة:

ينحصر مجال الضوء الهندسي المميز عن مجال الضوء الفيزيائي، في الحالات حيث تكون تأثيرات الانعراج العائدة إلى الطبيعة الموجية للضوء مهملة وهذا كافٍ للقبول بأن الأشعة الضوئية تنتشر وفق خطوط مستقيمة.

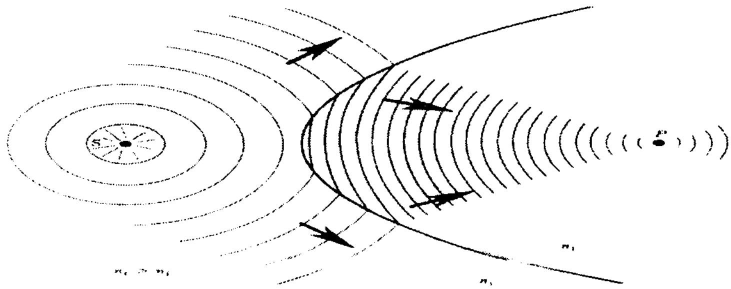
لنتفحص الآن كيف يتحول شكل جبهة الموجة عندما تجتاز سطحاً بينياً منحنياً يفصل بين وسطين ناقلين.

لنفترض بأن جزءاً من موجة كروية يخرج من المنبع النقطي S ، ولنحاول إعادة تشكيل موجة كروية متقاربة وفق منحى في النقطة P (الشكل 1) وهذا يتطلب كبح الجزء المركزي للموجة بالنسبة لجوانبها.

عندما تنتقل الموجة ببطء أكبر في الوسط الذي قرينة انكساره أكبر، فهذا يوحي لنا بانبساط السطح البيني بجوار المستقيم SP ، وبالتالي فإن أطراف الموجة تنتقل بسرعة أكبر فتتجاوز الجزء المركزي للموجة، مما يؤدي إلى عكس جبهة الموجة.

أما إذا أردنا أن تكون جبهة الموجة مستوية، عندئذٍ يجب أن يكون السطح البيني أكثر تسطحاً بحيث تلحق الجوانب الجزء المركزي دون أن تتجاوزه.

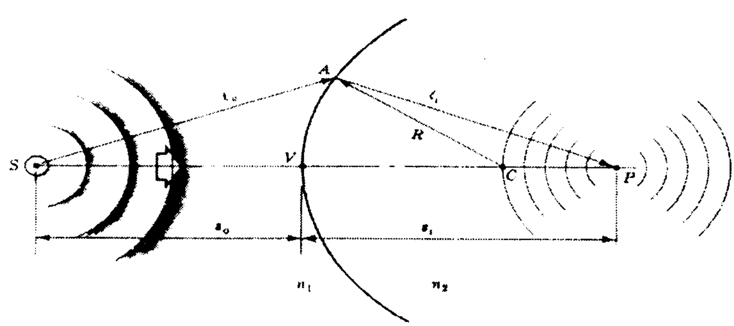
هناك عدد كبير من السطوح غير الكروية التي تقدم فائدة ضوئية كبيرة، لكن ما يعيبها هو أنها صعبة التنفيذ. وبالرغم من هذا فإنها تستخدم عندما تبرر فائدتها كلفتها المرتفعة.



الشكل 1

II – السطوح الكروية الكاسرة:

يوضح (الشكل 2) السطح الفاصل الكروي الذي نصف قطره R ومركزه C.



الشكل 2

عندما تكون A في جوار V (هذا يعني أن: $S_o \approx \ell_o$، $S_i \approx \ell_i$)

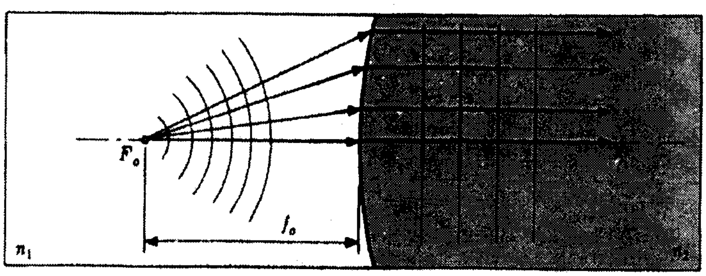
فإن:

$$\frac{n_1}{s_o}+\frac{n_2}{s_i}=\frac{n_2-n_1}{R}$$

وأن الأشعة التي تصنع زوايا صغيرة مع المحور الضوئي تسمى بالأشعة الرئيسية.

يوجد بعد خاص $S_o = f$ يسمى بالبعد المحرقي الجسمي بحيث أن $S_i = \infty$ والأمواج المتنقلة في وسط ناقل تكون مستوية (الشكل 3) وبالتبديل المباشر نحصل على:

$$f_o=\frac{n_1}{n_2-n_1}R$$

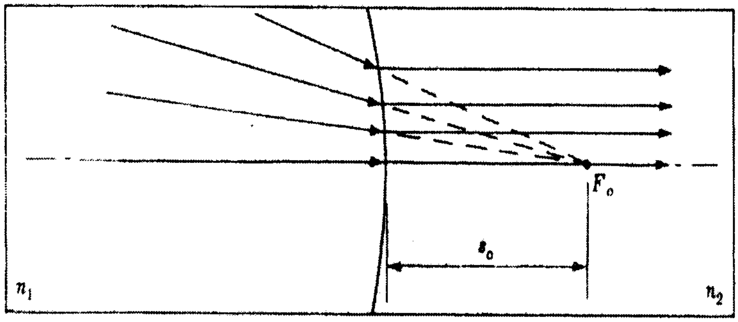


الشكل 3

أما عندما $S_o = \infty$ فإن $S_i = f_i$ والأمواج الواردة تكون مستوية وبالتالي يعطى البعد المحرقي الخيالي بالعلاقة التالية:

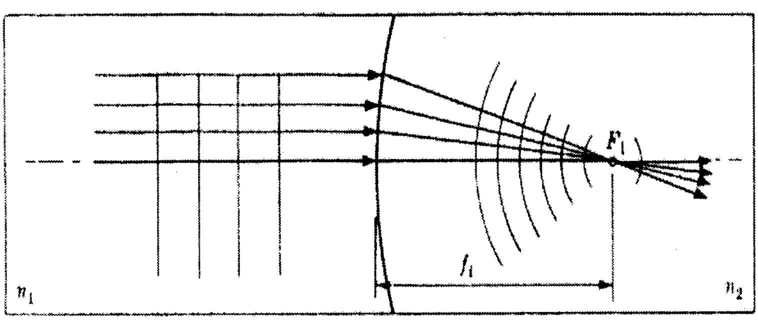
$$f_i=\frac{n_2}{n_2-n_1}R$$

ويكون الجسم حقيقيا عندما يكون الضوء متباعدا عنه، ووهميـــا في الحالـــة العكسية (الشكل 4).

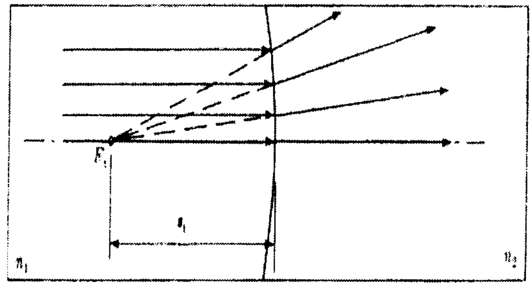


الشكل 4

ويكون الخيال حقيقيا عندما يكون الضوء متقاربا نحوه. ووهميـــا في الحالـــة العكسية (الأشكال 5 و6) وإن إصطلاح الإشارة مشابه لما هو موجود في (الجدول1) أي إننا نفترض بأن الضوء يأتي من اليسار وبالتالي فإن القيمة السالبة لكل من S_o وS_i يعني جسما أو خيالا وهميا.



الشكل 5



الشكل 6

III – العدسات:

العدسة : هي عبارة عن جملة كاسرة مكونة من سطحين بينيين أو أكثر، أحدهما على الأقل مقوس. آخذين بعين الاعتبار فقط العدسات الرقيقة التي قرينة انكسارها منتظمة وسماكتها لا تلعب أي دور ضوئي.

يوضح (الشكل 7) المصطلحات المرافقة لعدسة كروية رقيقة ومسار الضوء الذي يجتاز السطحين البينيين. وأنه عندما تكون السماكة $\overline{V_1V_2}$ مهملة وبالاختصار على الأشعة المحورية نستطيع أن نبين أن:

$$\frac{1}{S_o}+\frac{1}{S_i}=(n_{\ell m}-1)\left(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}\right)$$

حيث: $n_{\ell m}={n_\ell}/{n_m}$

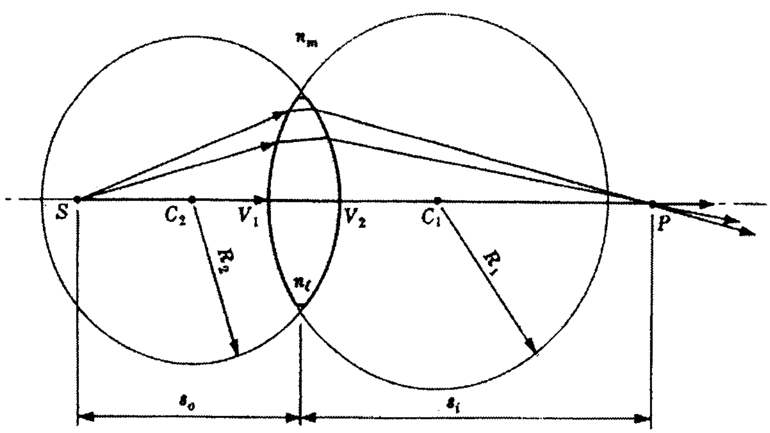
R_1، R_2 أنصاف أقطار انحناء سطحي العدسة.

تعبر هذه العلاقة عن معادلة العدسات الرقيقة، ملاحظين أنه إذا $S_o=\infty$ فإن $\frac{1}{f_i}$ يساوي إلى الطرف الأيمن من المعادلة وكذلك عندما $S_i=\infty$ فإن $\frac{1}{f_o}$ يساوي أيضا إلى الطرف الأيمن من المعادلة ومنه نجد أن: $f_o=f_i=f$ وبالتالي نحصل على:

$$\frac{1}{f}=(n_{\ell m}-1)\left(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}\right)$$

ويمكن أيضا كتابة معادلة العدسات الرقيقة على شكل معادلة غوص

$$\frac{1}{S_o}+\frac{1}{S_i}=\frac{1}{f}$$

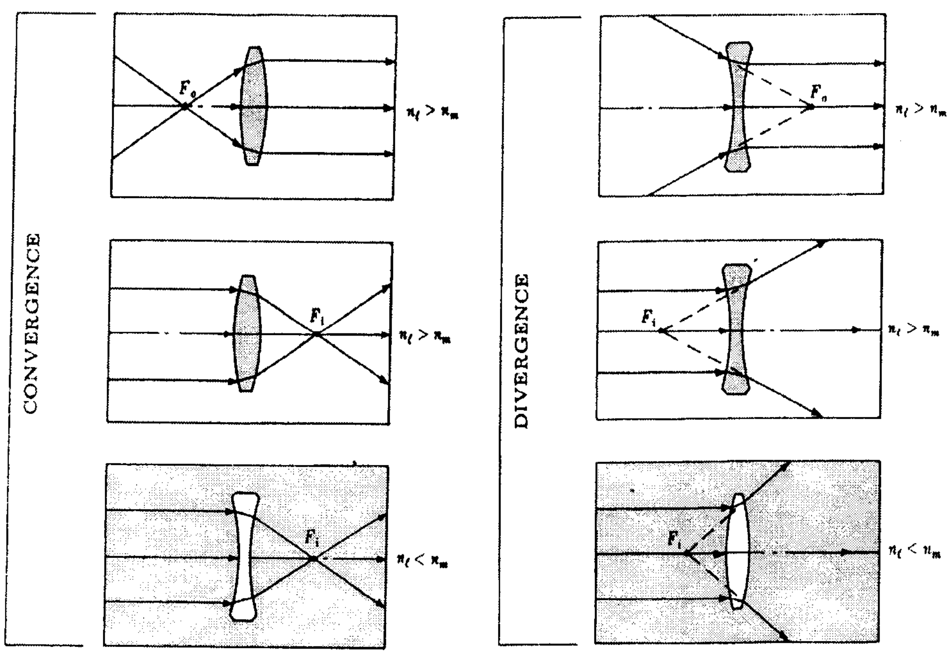


الشكل 7

أما الموجة الكروية الصادرة من S (الشكل 7) فإنها تسقط على العدسة الموجبة (العدسة التي سماكة مركزها أكبر من سماكة أطرافها). وإن المنطقة المركزية لجبهة

الموجة أكثر تباطؤا من أطرافها وتنعكس الجبهة متقاربة في P ، ومنطقي أن يسمى هذا العنصر من النمط بعدسة مقربة، وبالتالي تكون الأشعة منحرفة نحو المحور.

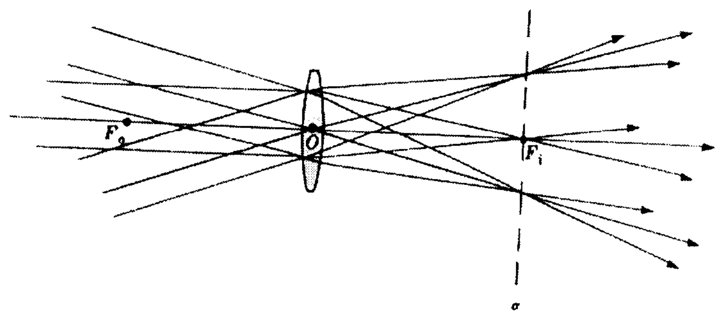
وبعد النظر إلى (الشكل 8) فإن الوصف السابق يتطلب أن تكون قرينة انكسار الوسط n_m أقل من قرينة انكسار العدسة n_ℓ بيد أنه إذا $n_m \rangle n_\ell$ فستكون العدسة المقربة بالتأكيد أكثر تضيقا في المركز، وبشكل أكثر عمومية ($n_\ell \rangle n_m$) فالعدسة الأكثر رقة في مركزها تسمى بالعدسة السالبة، مقعرة (تقوس داخلي) أو مبعدة؛ ولهذا فإن الضوء الذي يجتاز العدسة من هذا النمط يميل للابتعاد عن المحور الضوئي.



الشكل 8

IV – هندسة العدسات الرقيقة:

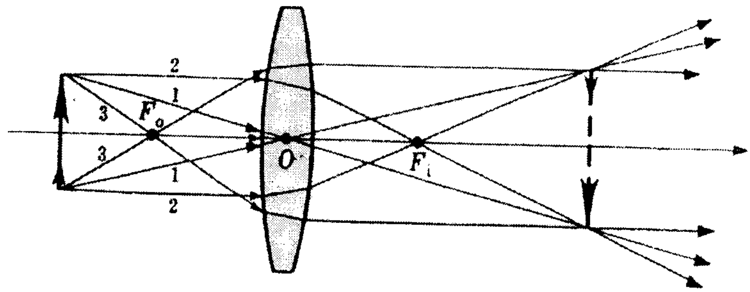
رأينا سابقا أن حزمة الأشعة الموازية للمحور تلتقي في نقطة وحيدة بعد عبورها عدسة رقيقة موجبة. وبالفعل كل حزمة أشعة متوازية ستكون ملتقية في نقطة من السطح σ المار من F_i (الشكل 9) وإنه في حالة التقريب المحوري، يطلق على هذا السطح المستوي اسم المستوي المحرقي الخيالي. ونفس الشيء بالنسبة للمستوي المحرقي الجسمي المار من F_o عموديا على المحور الضوئي.

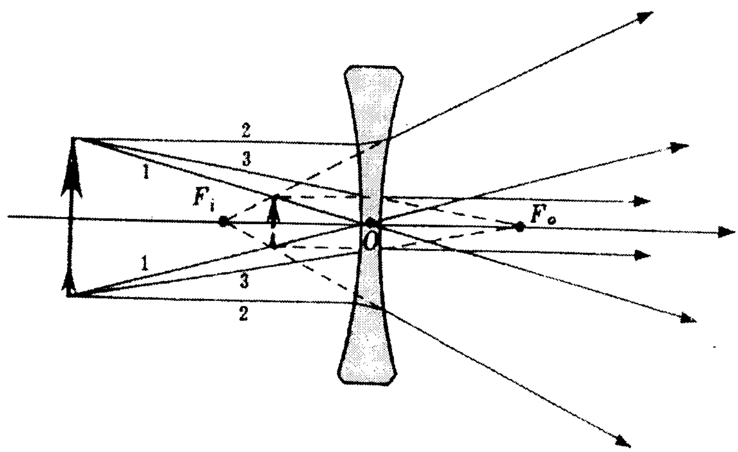


الشكل 9

من بين جميع الأشعة الصادرة عن جسم، يوجد عمليا ثلاثة منها سهلة المتابعة عند اجتيازها العدسة (الشكل 10).

- شعاع (1) مار من المركز الضوئي لا ينحرف.
- شعاع (2) يسقط على العدسة موازيا للمحور الضوئي، سيمر من Fi.
- شعاع (3) مار من F_o، سيبرز موازيا للمحور الضوئي.



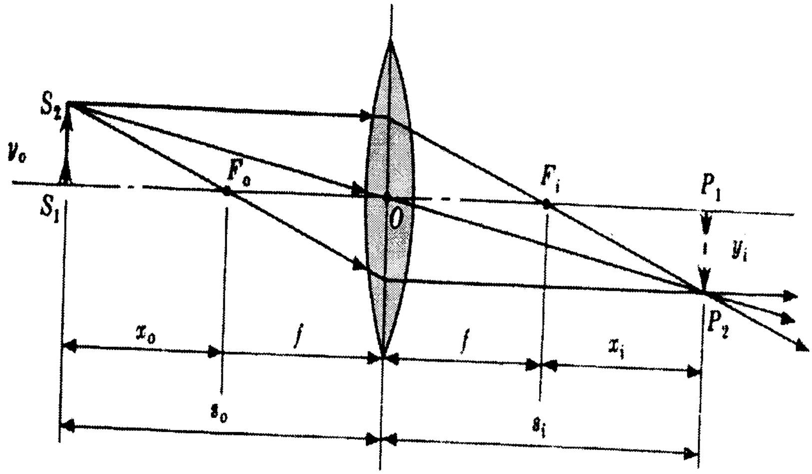


الشكل 10

ضمن هذه الشروط، يكفي رسم شعاعين من الأشعة الثلاثة لكل نقطة من الجسم حيث يعين تقاطعهما الخيال.

أما علاقة نيوتن للعدسات الرقيقة فهي: $x_i\, x_o = f^2$

يوضح (الشكل 11) الأبعاد المختلفة الواردة في هذه العلاقة.



الشكل 11

بينما يوضح (الجدول 1) اصطلاح الإشارات المختلفة الموافقة.

S_o , f_o	+	على يسار V
S_i, f_i	+	على يمين V
R	+	عندما C على يمين V
y_o, y_i	+	فوق المحور الضوئي
x_o	+	على يسار F_o
x_i	+	على يمين F_1

جدول 1

اصطلاح الإشارات للسطوح الكروية

هذا ويمكن قياس المسافات ابتداء من المركز الضوئي 0 أو ابتداء من المستوى المار من 0 عموديا على المحور الضوئي. ويكون أفضل إذا أمكن رسم الأشعة بحيث لا تخضع إلا لانكسار وحيد على المستوي بدلا من الانكسارات على السطحين.

أما التكبير العرضي فيعطى بالعلاقة التالية: $M_T = \frac{y_i}{y_o}$

وبعد الرجوع إلى المثلثات المتشابهة $S_1 S_2 O$ و $P_1 P_2 O$ نجد أن:

$$M_T = -\frac{S_i}{S_o}$$

أو وفق نيوتن: $$M_T = -\frac{x_i}{f} = -\frac{f}{x_o}$$

فعندما يكون الخيال على اليمين ومنتصبا فإن y_i تكون موجبة وكذلك M_T وبالتالي يكون هذا الخيال صحيحا.

والجدول 2 يختصر المعنى الفيزيائي لإشارات المقادير المختلفة بينما الجدول 3 يقدم لائحة خواص الأخيلة المعطاة بعدسات رقيقة محدبة (مقوسة للخارج) ومقعرة (مقوسة للداخل) ويجب الملاحظة أنه يمكن إسقاط خيال حقيقي على شاشة، بينما لا يمكن ذلك بالنسبة لخيال وهمي.

المقدار	الإشارة	
	+	–
S_o	جسم حقيقي	جسم وهمي
S_i	خيال حقيقي	خيال وهمي
f	عدسة مقربة	عدسة مبعدة
y_o	جسم صحيح	جسم مقلوب
y_i	خيال صحيح	خيال مقلوب
M_T	خيال صحيح	خيال مقلوب

جدول 2 المفهوم الفيزيائي للإشارات في حالة عدسات رقيقة

تحدب				
خيال				جسم
مقاس نسبي	توجه	تموضع	نمط	تموضع
مصغر	مقلوب	$f< S_i<2f$	حقيقي	$\infty>S_o>2f$
نفس المقاس	مقلوب	$S_i = 2f$	حقيقي	$S_o = 2f$
مكبر	مقلوب	$\infty>s_i>2f$	حقيقي	$f<S_o<2f$
		$\pm\infty$		$S_o = f$
مكبر	صحيح	$\|S_i\| > S_o$	وهمي	$S_o < f$

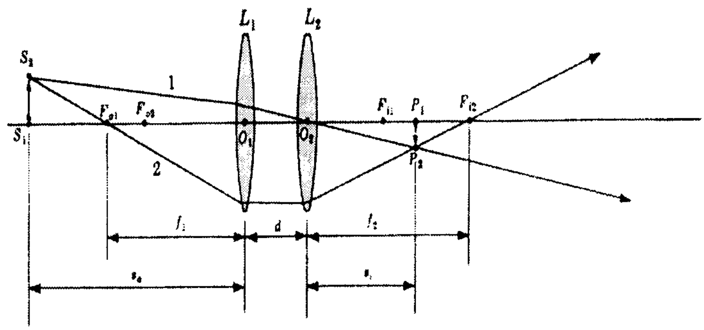
تقعر				
خيال				جسم
مقاس نسبي	توجه	تموضع	نمط	تموضع
مصغر	صحيح	$\|S_i\|<\|f\|$	وهمي	في أي مكان

جدول 3 ميزات العدسات الرقيقة من أجل أجسام حقيقية

V – تركيب العدسات الرقيقة:

سندرس الآن تشكل الأخيلة المعطاة بتركيب العدسات الرقيقة.

يوضح (الشكل 12) أن كلا من f_1 وf_0 أكبر من d.

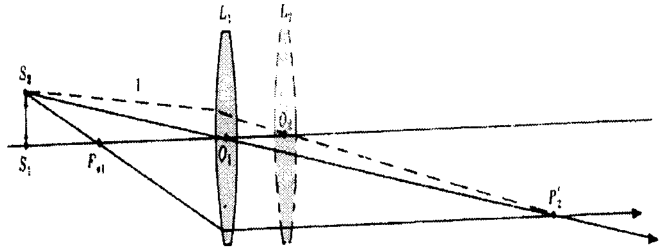


الشكل 12

والشعاعان (1) و(2) يلتقيان في P_2 لإعطاء خيال مكبر ومقلوب وحقيقي.

ومن الواضح أن الشعاع (2) يمر من المحرقين F_{O1} وf_{i2} بينما الشعاع (1) فيمر من O_2 لكن بزاوية غير معروفة. وإنه إذا انتزعت العدسة L_2 فإن مسار هذا الشعاع لا يكون محددا.

لنتخيل أن العدسة L_2 مختفية (الشكل 13).



الشكل 13

إن جميع الأشعة الصادرة من S والواردة على L_1 ستلتقي في نقطة P_2' وبالتالي يكفي تعيين P_2' بمساعدة شعاعين مختارين بشكل ملائم، ثم إنشاء الشعاع (1) بمسار معكوس من P_2' مجتازا O_2 حتى S_2. والمعالجة التحليلية مبنية على أساس أن الخيـــال المعطى بالعدسة الأولى يفيد كجسم للعدسة الثانية وهكذا.

وإنه في حالة جملة مكونة من عدستين رقيقتين يكون:

$$S_i = \frac{f_2 d - [f_1 f_2 S_o /(So - f_1)]}{d - f_2 - [f_1 S_o /(S_o - f_1)]}$$

حيث:

S_o وS_i بعدا الجسم والخيال كما هو موضح على الشكل السابق.

فإذا كانت تكبيرات كل من العدستين M_{T1} وM_{T2} فالتكبير الكلي هو:

$$M_T = M_{T1} . M_{T2}$$

وبمعنى آخر تنتج العدسة الأولى خيالا وسيطا بتكبير M_{T1} والذي بدوره يكبر بالعدسة الثانية وبنسبة M_{T2} وبوضوح أكثر فإن:

$$M_T = \frac{f_1 S_i}{d(S_o - f_1) - S_o f_1}$$

إذا مددنا S_i نحو اللانهاية فإن S_o يأخذ القيمة الممثلة بالاختصار d.f.o (البعد المحرقي الجسمي) وهذا يعني:

$$d.f.o = \frac{f_1(d - f_2)}{d - (f_1 + f_2)}$$

وكذلك عندما S_o تمتد نحو ∞ فإن بعد الخيال الموافق يسمى بالبعد المحرقي الخيالي أو d.f.i.

$$d.f.i = \frac{f_2(d - f_1)}{d - (f_1 + f_2)}$$

ونستطيع القول إنه إذا وردت حزمة الأشعة المتوازية على العدسة المركبة ابتداء من اليسار فإنها تلتقي على يمين العدسة الأخيرة وعلى بعد d.f.i، أما إذا دخلت هذه الحزمة من اليمين فإنها تلتقي على يسار العنصر الأول وعلى مسافة d.f.o.

ونشير أيضا إلى أنه إذا تلامست العدسات $(d = o)$ فإن $d.f.o = d.f.i$ والقيمة المشتركة هي البعد المحرقي الفعلي:

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

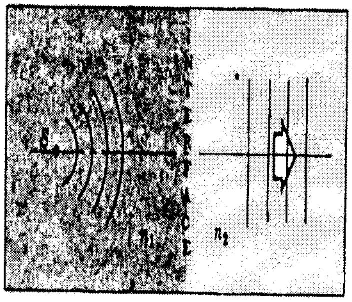
نعرف استطاعة عدسة على أنها مقلوب بعدها المحرقي $D = f^{-1}$ وعندما f تساوي واحد متر فإن D تساوي m^{-1} أو كسيرة. وإنه من أجل عدستين متلامستين فإن:

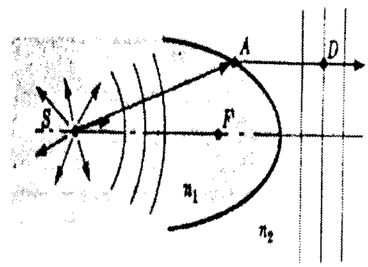
$$D = D_1 + D_2$$

تعبر عن الاستطاعة المركبة للعناصر المختلفة.

مسائل غير محلولة

- يمثل الشكل منبعا نقطيا مستمرا في وسط ما ($n_1>n_2$). صف السطح البيني الضروري كي تصبح جبهات الموجة مستوية.





- قضيب أسطواني زجاجي قرينة انكساره 1,5 مغمور بالهواء وطرفه الأيسر يلامس نصف كرة نصف قطرها 2Cm.

أين يوجد خيال المنبع النقطي الواقع على بعد 6Cm من قمة انحناء نصف الكرة، ثم حدد مكان الخيال عندما تكون الجملة مغمورة بالماء الذي قرينة انكساره 1,33.

- منبع نقطي واقع على محور عدسة (مستوية – محدبة) وعلى بعد 30 Cm منها مع العلم بأن الوسط المحيط هو الهواء ($n_{\ell m} = 1,5$) وأن نصف قطر انحناء العدسة هو 5 Cm.

حدد مكان الخيال:

a – عندما يدار الوجه المستوي نحو المنبع النقطي.

b – عندما يدار السطح المقوس نحو المنبع النقطي.

- عدسة رقيقة ثنائية التحدب بعدها المحرقي في الهواء 50Cm غمرت في سائل ناقل فأصبح بعدها المحرقي 250 Cm.

احسب قرينة انكسار السائل المجهول.

- سدادة من الفلين ارتفاعها 3Cm، وضعت على بعد 75 Cm من عدسة رقيقة موجبة بعدها المحرقي 25Cm.

بتطبيق علاقة غوص (علاقة العدسات الرقيقة) ادرس بشكل كامل الخيال الذي يتم الحصول عليه، ومن ثم تحقق من النتيجة بالرجوع للجداول.

أعد حل المسألة باستخدام علاقات نيوتن.

- عدسة رقيقة ثنائية التحدب، قرينة انكسارها 1,5 وأنصاف أقطار انحنائها 30 Cm و60Cm.

ما هي أبعاد الجسم والخيال المكافئة لخيال مصباح على الشاشة مختصر إلى النصف. ثم ارسم مخطط الأشعة.

- عدسة مركبة مكونة من عدسة رقيقة موجبة وعدسة رقيقة سالبة واقعة على بعد 20 Cm من الأولى. فإذا كانت الأبعاد المحرقية لهاتين العدستين على التسلسل 40 Cm + و40 Cm -. ما هي الأبعاد المحرقية لهذه الجملة.

- عدسة ثنائية التقعر بعدها المحرقي 60mm - ركبت على أسطوانة طولها 120 mm أمام عدسة مستوية ــ محدبة نصف قطر انحنائها 60mm وقرينة انكسارها 1,5.

صف بشكل كامل الخيال الذي تعطيه الجملة لنملة طولها 3mm موجودة أمامها.

- عدسة رقيقة (محدبة ــ مقعرة) موجبة ($n = 1,5$)، أنصاف أقطار انحنائـــها 5Cm و10Cm متحدة مع عدسة رقيقة (مستوية ــ مقعرة) قرينـــة انكســـارها ($n = 1,6$) ونصف قطر انحنائها 6Cm.

ما مقدار البعد المحرقي الفعلي للجملة واستطاعتها.

- عدســـة رقيقـــة ســـالبة (محدبـــة ــ مقعـــرة)، أنصـــاف أقطـــار انحنائـــها 60Cm و30Cm وقرينة انكسارها 1,5. معلقة أفقيا بحيث يكون وجهها المقعر نحو الأعلى. تم ملء فجوتها بزيت ناقل قرينة انكساره 1,6.

أوجد استطاعة الجملة وادرس الخيال الذي تعطيه لجسم واقع على بعـد 100 Cm أمام العدسة.