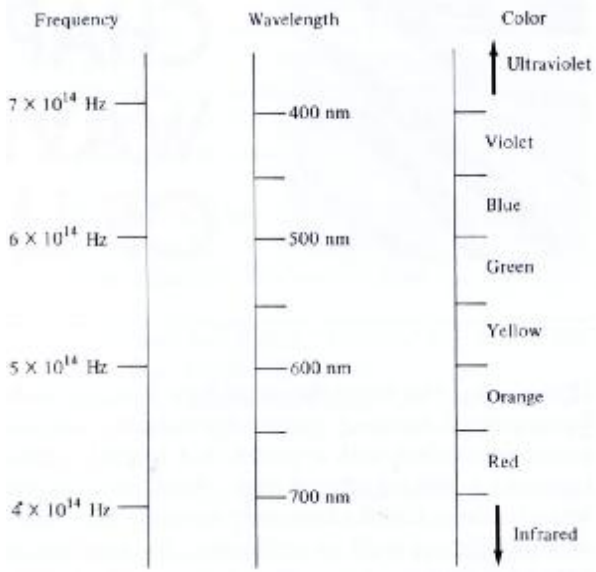
الفصل الثامن

8. الضوء

8. 1. معلومات موجزة عن طبيعة الضوء

الضوء حسب ماكسويل هو أمواج كهرطيسية تتأثر بها العين، وبما أن الضوء موجي فيمكن أن يعاني من الانعراج والتداخل والاستقطاب كشأن جميع الأمواج.

يشكل الضوء المرئي جزءاً من الطيف الكهرطيسي ويقع في منطقة بين الأشعة فوق ذات الطول الموجي الأقصر من 3800^oA البنفسجية والأشعة تحت الحمراء، إن الطول الموجي الأطول من 7500^oA، كما هو مبين بالشكل:



الشكل (8.1). يبين تغير الأطوال الموجية مع قيم التواتر الموافقة

ويستهدف علم الضوء دراسة انتشار الضوء في الخلاء والأوساط المادية. تعتبر المادة منبعاً للضوء. وتدل التجربة على أن أي تغيير كهرطيسي يطرأ على ذرة من ذرات المادة يجعل الذرة منبع إشعاع.

أما بخصوص طبيعة الضوء فقد أمكن تفسير جمع الظواهر والتجارب الضوئية بالنظريات القائلة بأن المنبع الضوئي يرسل فما حوله "جسيمات" من الطاقة يطلق على كل منها اسم الفوتون، ويواكب الفوتون في حركته موجة كهرطيسية بسيطة يتناسب تواترها v مع طاقته W:

$$W = hv \qquad (\mathbf{8.1})$$

حيث ترمز h إلى ثابت يسمى ثابت بلانك *planck* وتتعلق قيمته بالوحدات المستعملة للتعبير عن E، v وهو يساوي في الجملة السغثية:

$h=6.62.10^{-27}$ ارغة.ثانية

وبتعبير آخر نقول إن للضوء مظهرين متكاملين:

الطبيعة الجسيمية: ويتمثل بالفوتونات وهو يؤدي الدور الرئيسي في التفاعل العميق بين المادة والإشعاع.

الطبيعة الموجية: ويتمثل بالموجة الكهرطيسية المرافقة للفوتون، ويؤدي الدور الرئيسي في التفاعل بين الإشعاع والمادة.

ترسل أكثر المنابع الضوئية أمواجاً كهرطيسية، بتواترات مختلفة في آن واحد، نقول عندئذ عن الضوء الصادر إنه مركب أو متعدد الألوان. وهذا شأن الضوء الصادر عن الشمس والمصابيح الكهربائية، وغيرها.

أما إذا كانت جميع الأمواج الصادرة عن المنبع ذات تواتر واحد فنقول عن الضوء انه بسيط أو وحيد طول الموجة، والسبب في هذه التسمية هو أن اختلاف الطول الموجي من ضوء لآخر هو في حقيقته اختلاف في قيمة التواتر.

8. 2. سرعة انتشار الأمواج الضوئية، قرينة الانكسار المطلقة

تدل القياسات والتجارب على أن الأمواج الكهرطيسية، مهما اختلفت تواتراتها فإنها تنتشر في الخلاء بسرعة واحدة يرمز لها بـــC وقيمتها، حسب أحدث القياسات تساوي (بالسنتمتر في الثانية):

$$C = 2.99793.10^{10} \cong 3.10^{10} cm / \sec$$

أما في الأوساط المادية الشفافة فإن سرعة انتشار الضوء أصغر دوماً من سرعة انتشاره في الخلاء. فإذا رمزنا بـــV لسرعة انتشار الضوء في نقطة من نقاط وسط شفاف فإن النسبة:

$$n = \frac{C}{V} > 1 \qquad (8.2)$$

هي دوماً أكبر من الواحد (لأن سرعة الضوء في الخلاء أكبر من سرعته في الأوساط المادية)، ونسميها قرينة الانكسار المطلقة للوسط المعتبر في النقطة المعتبرة.

وتتعلق قرينة الانكسار بعوامل عديدة، منها ما يخص المادة ككثافتها. بنيتها البلورية، تركيبها الكيميائي) ومنها ما يخص الضوء نفسه (التواتر).

فمن ناحية الكثافة ρ تتغير قرينة الانكسار حسب دستور غلادستون.

$$\frac{n-1}{r} = K \qquad (8.3)$$

حيث يمثل K كمية ثابتة تتعلق بالوسط. فإذا اختلفت كثافة الوسط من نقطة لأخرى فإن n تختلف تبعاً لذلك. ويمكن الاستفادة من هذا الدستور في معرفة علاقة n بدرجة حرارة الوسط t وعامل تمدده الحجمي K وذلك بإبدال ρ بالعبارة $r_t = \frac{r_0}{1+Kt}$ (r_0 الكثافة في الدرجة صفر مئوية) فنجد:

$$(n_t - 1)(1+Kt) = \text{ثابت} \qquad (8.4)$$

لأن الجداء $r_0 K$ ثابت. ونرى أن قرينة الانكسار المطلقة تتناقص

بتسخين المادة وتتزايد بتبريدها.

ونذكر بهذه المناسبة أننا نقول عن الوسط أنه متجانس إذا كانت خواصه الفيزيائية لا تتغير كمياً من نقطة لأخرى فيه، فسرعة الضوء، وبالتالي قرينة الانكسار، في وسط متجانس لها قيمة واحدة في جميع النقاط.

وكثيراً ما تتعلق سرعة الضوء في الأوساط المتبلورة بمنحى الانتشار، فتتغير تبعاً لذلك قرينة الانكسار من منحى لآخر. ونقول عن الوسط أنه متاح إذا كان لسرعة الضوء فيه وبالتالي لقرينة الانكسار، القيمة نفسها مهما كان منحى الانتشار.

وتدل التجربة على أن الموجة الكهرطيسية تحتفظ بقيمة تواترها N، ومن ثم بقيمة دورها:

$$T = \frac{1}{N}$$

عندما تمر من وسط لآخر. فإذا رمزنا بـــ l_0 لطول الموجة في الخلاء وبـــ l لطولها في الوسط الشفاف كان لنا:

$$l_0 = CT$$
$$l = VT$$

وإذا قسمنا هاتين العلاقتين طرفاً على طرف واستفدنا من العلاقة (8.2) نجد:

$$l = \frac{l_0}{n} \qquad \textbf{(8.5)}$$

وبما أن $n>1$ نرى أن طول الموجة في المادة أصغر من طولها في الخلاء وأنه يتناقص كلما كانت المادة أشد كسراً أي كلما كانت n كبيرة.

وتدل التجربة فوق ذلك أن سرعة الضوء في المادة، ومن ثم قرينة انكسارها، تتعلق بتواتر الموجة المنتشرة N (أو بتعبير آخر، بطول الموجة في الخلاء $l_0 = \frac{C}{N}$).

تسمى هذه الظاهرة تبديد الضوء المركب بمعنى أن الأمواج المختلفة الداخلة في تركيب الضوء تنتشر في الأوساط المادية بسرعات مختلفة.

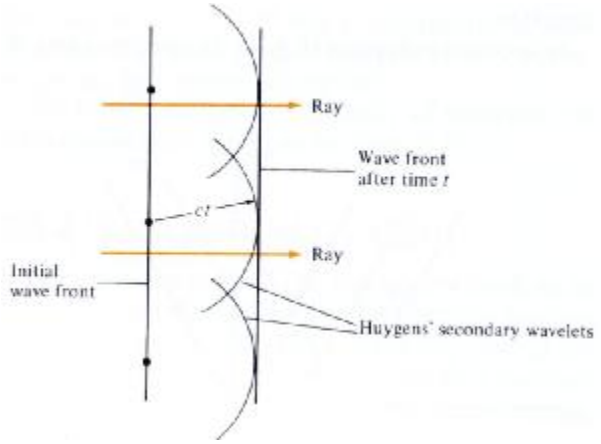
ونورد فيما يلي قرائن انكسار بعض المواد المستعملة، في درجة الحرارة *20* مئوية ومن أجل إشعاع الخط الأصفر *D* لعنصر الصوديوم ($l_0 = 0.589m$) الجدول (*2*) .

الجدول (8.1) قرائن انكسار بعض المركبات الكيميائية عند الطول الموجي $l_{\text{ف}} = 589nm$

الهواء	1.0003	الغليسيرين	1.4701
الماء	1.3330	البنزين	1.5014
الغول	1.3614	كبريت الفحم	1.6277
حمض الخل	1.3726	كبريت الزنك	2.36
الفلورين	1.4338	الماس	2.4173

8. 3. سطح الموجة. الشعاع الضوئي. الحزم الضوئية

مبدأ هايغنز (*1636-1695*): اقترح هايغنر النظرية الموجية واستطاع بهذا الاقتراح تفسير الخصائص الضوئية التي كان يصعب تفسيرها. وضع باقتراحه مفهوم سطح الموجة الذي تكون كل نقاطه في طور واحد، وينتشر الضوء وفق سطوح كروية تتزايد أنصاف أقطارها وفق منحني انتشار الضوء الشكل (8.2).



الشكل (8.2)

نعتبر منبعاً ضوئياً نقطياً يشع في الفراغ المحيط به أمواجاً كهرطيسية نمثلها بالتابع الجيبي:

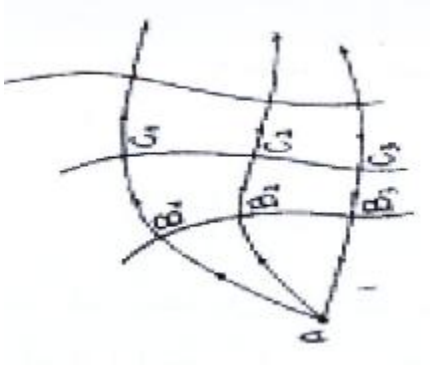
$$E = E_0 \cos 2p\, Nt \qquad (\mathbf{8.6})$$

يرمز E إلى قيمة المركبة الكهربائية للحقل الكهرطيسي، نعّرف سطح الموجة بأنه الحقل الهندسي للنقاط التي يكون فيها للحقل الكهربائي قيمة واحدة في لحظه ما. ومن الواضح أنه لا يمر من نقطه معينة من الوسط سوى سطح موجه واحد، وذلك لكي لا يكون للحقل في هذه النقطة أكثر من قيمة واحدة في لحظة معينة.

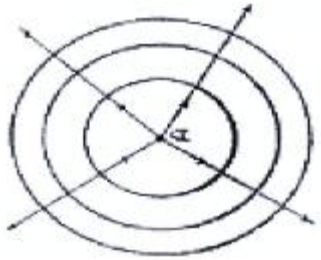
نعّرف الشعاع الضوئي أنه الخط العمودي في كل نقطة من نقاطه على سطح الموجة المار بتلك النقطة. ومن الواضح أن كل الأشعة الضوئية تمر من نقطه المنبع، والمنبع هو سطح موج لا متناه في الصغر قيمة الحقل فيه تساوي E_0 في بدء الزمن، حسب العلاقة (8.6). ويمثل الشعاع الضوئي عادة بخط يحمل سهماً في جهة الانتشار.

إن الشكل الهندسي لسطح الموجة، ومن ثم للشعاع الضوئي الشكل (8.3) في وسط غير متجانس وغير متناح هو شكل معقد، لأن سرعة انتشار الحقل E تختلف فيه من نقطة لأخرى ومن منحى لآخر، بيد أن استعمال أمثال هذه الأوساط نادر جداً إن لم يكن معدوماً وذلك لقلة فائدتها العملية. ولهذا السبب لا نهتم إلا بالأوساط المتجانسة والمتناحية حيث يكون لسرعة الضوء V قيمة ثابتة. وعلى هذا الأساس فإن اهتزاز الحقل E في نقطة تبعد عن المنبع بالمسافة 1 يكون متأخراً عن اهتزاز المنبع بالزمن $\Delta t = \frac{1}{V}$، أي أن قيمة الحقل بدلالة الزمن في هذه النقطة تحسب من الصيغة (بإهمال امتصاص الوسط للطاقة الضوئية):

$$E = E_0 \cos 2pN\left(t + \frac{1}{V}\right)$$



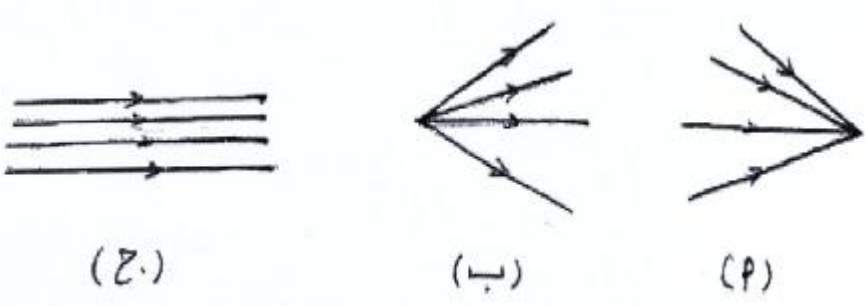
الشكل (8.3). سطوح الموجة والأشعة الضوئية الصادرة عن منبع نقطي A في وسط غير متجانس



الشكل (8.4). سطوح الموجة والأشعة الضوئية الصادرة عن منبع نقطي A في وسط متجانس ومتناح.

حيث نرى أن للحقل قيمة واحدة على جميع نقاط سطح الكرة التي مركزها المنبع A ونصف قطرها 1 الشكل (8.4)، أي أن سطوح الموجة الصادرة عن منبع نقطي في وسط متجانس ومتناح هي سطوح كرات متمركزة على المنبع. ومن مفهوم الشعاع الضوئي يدخل مفهوم الحزمة الضوئية، ونطلق هذه العبارة على مجموعة من الأشعة الضوئية المنطلقة من نقطة واحدة (حزمة مخروطة متباعدة) أو متجمعة في نقطة واحدة (حزمة مخروطية متقاربة)،

ونقول عن الحزمة أنها متوازية أو اسطوانية إذا كانت نقطة انطلاق الأشعة أو نقطة تلاقيها موجودة في اللانهاية، وفي هذه الحالة تنقلب سطوح الموجة إلى مستويات متوازية عمودية على منحى الأشعة.

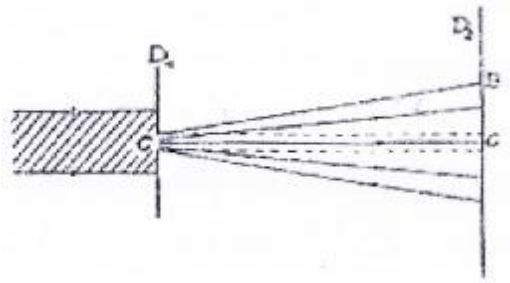


الشكل (8.5). أنواع الحزم الضوئية (أ) متقاربة، (ب) متباعدة، (ج) متوازية

هذا وتتعين فتحة الحزمة بزاويتها الصلبة (أي بمساحة السطح الذي تقطعته الحزمة على سطح الكرة التي مركزها نقطة التقاء الأشعة ونصف قطرها يساوي واحدة الطول أو بنصف زاويتها الرأسية إذا كانت مخروطية منتظمة.

ملاحظة هامة: أن تعريف الشعاع الضوئي بالنص الذي أعطيناه هو تعريف هندسي ومن المفيد أن نذكر أنه ليس للشعاع الضوئي وجود فيزيائي (واقعي تجريبي) ذلك لأن للحصول عليه يستوجب، مثلاً أن تقطع حزمة اسطوانة (آتية من الشمس مثلاً) بحاجز D_1 الشكل (8.6) ذي كوة دائرية صغيرة جداً C. بيد أن تحقيق هذه التجربة يدل على أن الحزمة النافذة من الكوة تصبح مخروطية بدلاً من أن تكون اسطوانية رفيعة جداً. وتزداد فتحة الحزمة المخروطية بتناقص مساحة الكوة، يطلق على هذه الظاهرة اسم انعراج (حيود) الضوء. وهي تتدخل في جميع التراكيب التجريبية التي تستهدف عزل شعاع ضوئي

وحيد، وسبب هذه الظاهرة هو الطبيعة الموجية للضوء. ويمكن مثلاً تحقيق تجربة مماثلة لتجربة الشكل (8.6) على الأمواج المنتشرة على سطح الماء وذلك بأن نضع على طريق هذه الأمواج حاجزاً ذا كوة صغيرة، فنشاهد عندئذ أن الأمواج النافذة من الكوة أوسع زاوية من الأمواج الواردة عليها.



الشكل (8.6). ظاهرة الانعراج

هذا وتتدخل حوادث الانعراج أيضاً عندما نبدل الحاجز D_1 بقرص قاتم (لا ينفذ منه الضوء) يأخذ مكان الكوة C فلا نرى عندئذ لهذا القرص على اللوحة D_2 ظلاً واضحاً.

8. 4. علم الضوء

يستهدف علم الضوء الهندسي إيجاد القوانين التي يخضع لها انتشار الضوء عبر سلسلة من الأوساط الشفافة المتجانسة المتناحية وذلك في سبيل تطبيق هذه القوانين على صنع وتحسين بعض الآلات الضوئية كالمجهر وآلات التصوير والنظارات الفلكية. فإذا استبعدنا وجود كوى ضيقة أو حواجز صغيرة على طريق الحزمة المنتشرة، فإن حوادث انتشار الضوء يمكن عندئذ دراستها وتفسيرها دون اللجوء إلى أية فرضية فيما يخص طبيعة الضوء. وعلم الضوء الهندسي يتناول بالتعريف دراسة الظواهر التي تتفسر بالمبادئ الثلاثة التي

نسوقها فيما يلي والتي يجب اعتبارها فرضيات أساسية برهانها الوحيد تصديق التجارب المخبرية لنتائجها الحسابية:

1- مبدأ الانتشار المستقيم

2- مبدأ استقلال الأشعة الضوئية

3- قوانين ديكارت.

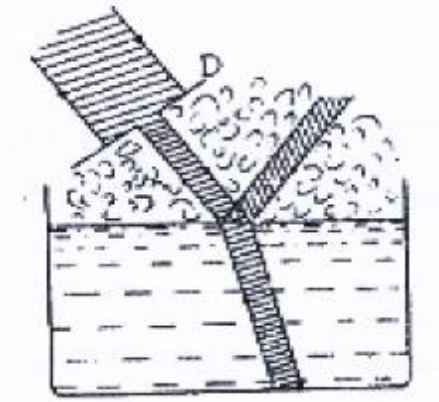
وسنتكلم عن كل منها في فقرة خاصة.

8. 5. مبدأ الانتشار المستقيم

يجيب هذا المبدأ على السؤال التالي: إذا كنا إزاء نقطتين A وB من وسط متجانس يمر منهما شعاع ضوئي، فما هو الشكل الهندسي للشعاع الضوئي بين هاتين النقطتين؟.

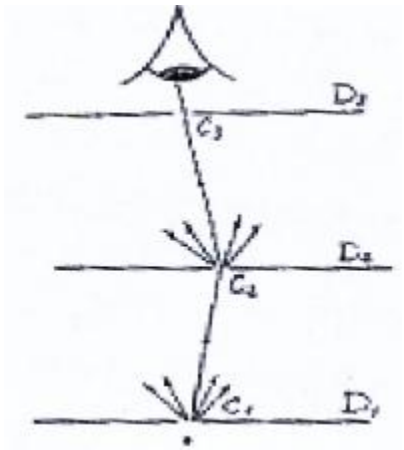
أن الشعاع الضوئي بين نقطتين من وسط متجانس هو خط مستقيم.

تؤيد هذا المبدأ أكثر الملاحظات الشائعة كظلال الأجسام وحوادث الخسوف والكسوف، ويمكن أن نورد التجربة المخبرية المرسومة في الشكل (8.7) حيث تسقط الحزمة الضوئية الواردة من الشمس. بعد خروجها من كوة الحاجز D، على سطح ماء أضيف إليه قليل من الفلورسين (مادة تتألق عندما يسقط عليها الضوء) فنرى عندئذ أن الحزمة المتوغلة في الماء (ونسميها الحزمة المنكسرة) ترسم قضيباً ضوئياً مستقيماً، كما ترسم الحزمة المنعكسة قضيباً آخر نراه مستقيماً بفضل الدخان المستعمل.



الشكل (8.7). تجربة تبرهن على الانتشار المستقيم

ولنلاحظ هنا أيضاً أن هذا المبدأ يصبح باطلاً عندما يصادف الضوء في طريقه حواجز أو كوى صغيرة، كما تدل على ذلك تجربة الشكل (8.8) حيث تستطيع العين بفضل انعراج الضوء أن ترى المنبع S من خلال الثقوب الثلاثة رغم أن الثقب C_2 محروف قليلاً عن الخط المستقيم الذي يصل بين الثقبين C_1 وC_3. وهكذا نرى أن استبعاد أمثال هذه الثقوب والحواجز الصغيرة شرط أساسي لصحة قوانين الضوء الهندسي.



الشكل (8.8). حوادث الانعراج تبطل مبدأ الانتشار المستقيم

8. 6. مبدأ استقلال الأشعة الضوئية

إذا افترضنا جملة ضوئية ذات أبعاد نستطيع معها إهمال حوادث الانعراج فإن التجربة تدل على صحة المبدأ التالي:

أن كل شعاع من الحزمة الضوئية مستقل في سلوكه عن الأشعة الأخرى. أي أن الشعاع لا يتأثر، في انتشاره ولا في انعكاسه ولا في انكساره، بما يحدث للأشعة الأخرى جملة أو تفصيلاً.

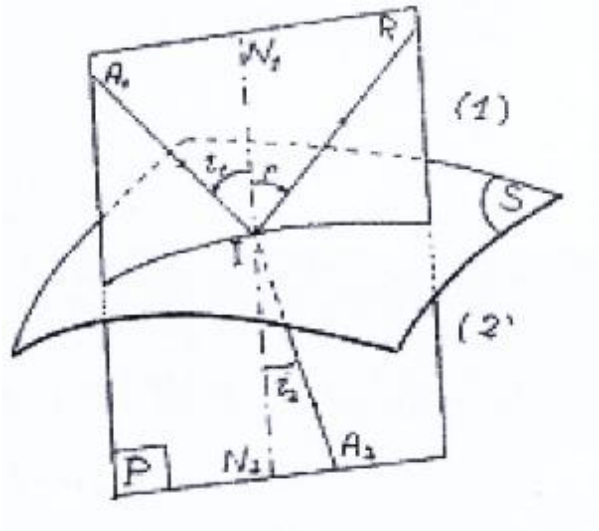
8. 7. قوانين ديكارت

نفترض أن الأوساط المادية شفافة (لا تمتص سوى جزء مهمل من الطاقة الضوئية المنتشرة فيها) متجانسة ومتناحية وأن الظروف التجريبية خالية من الانعراج. وأن الضوء المستخدم وحيد اللون، رغم أن هذا الشرط غير ضروري في حوادث الانعكاس.

لنفترض الآن شعاعاً ضوئياً وارداً A_1I على سطح مصقول S الشكل (8.9) يفصل بين وسطين شفافين (1) و(2)، قرينتا انكسارهما المطلقتان n_1, n_2 ويقطعه في النقطة 1 التي نسميها نقطة الورود. ولنرسم من هذه النقطة مستقيما N_1IN_2 عمودياً على S ونسميه الناظم، نسمي المستوي P الذي يحوي الناظر والشعاع الوارد مستوي ورود الشعاع A_1I.

تدل التجربة أن الشعاع الوارد ينقسم في غالب الأحيان، عند نقطة الورود إلى شعاعين، أحدهما IR يرتد في الوسط الذي أتى منه ونسميه الشعاع المنعكس، والآخر IA_2 يتوغل في الوسط الثاني ونسميه الشعاع المنكسر.

نطلق اسم زاوية الورود على الزاوية الحادة i_1 التي يجب أن يدورها الناظم حول نقطة الورود لكي ينطبق على المستقيم IA_1. وبالطريقة نفسها نعرف زاوية الانعكاس r وزاوية الانكسار i_2.



الشكل (8.9)

تستهدف قوانين ديكارت تعيين منحى الشعاعين المنعكس والمنكسر وذلك بالنصوص الثلاثة التالية:

أولاً: يقع الشعاعان المنعكس والمنكسر، كلاهما في مستوى الورود.

ثانياً: زاوية الانعكاس تساوي زاوية الورود وتعاكسها في الإشارة، أي أن r تتعين بالمساواة:

$$r = -i_1 \qquad (8.7)$$

ثالثاً: من أجل ضوء وحيد اللون يكون للجداء $n\sin i$ قيمة واحدة في الوسطين، أي أن زاوية الانكسار i_2 تتعين بالمساواة:

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \qquad (8.8)$$

التي تسمح بحساب i_2 إذا علمنا قيم الأقدار الثلاثة الأخرى.

ولنذكر أخيرا أن الدستور (8.8) كثيراً ما يعطي على الشكل:

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \qquad (8.9)$$

الذي يجعلنا نلفظ دستور ديكارت الثالث على الشكل: أن نسبة جيبي زاويتي الورود والانكسار ثابتة مهما كانت قيمة زاوية الورود، وهي مثل n_1 وn_2، موجبة دوماً. ويطلق عادة على هذه النسبة n_{21} اسم قرينة انكسار الوسط (2) بالنسبة للوسط (1) ويمكن أن تكون أكبر أو أصغر من واحد.

8. 8. ملاحظات حول قوانين ديكارت

1- إذا جعلنا $n_1=n_2$ في العلاقة (8.8) وبدلنا i_2 بـــ r فإننا نحصل على المساواة (8.7) مما يدل على أن الانعكاس يمكن اعتباره انكساراً في وسط قرينته تساوي قرينة وسط الورود وتعاكسها بالإشارة. وعلى أساس هذا الاصطلاح يمكن الاستغناء عن قانون ديكارت الثاني لأنه يصبح نتيجة للثالث.

2- تدل العلاقة (8.8) على أن الشعاع الساقط من وسط إلى آخر أشد كسراً (أي عندما يكون $n_2>n_1$ فنجد $i_2>i1$)، ينكسر مقترباً من الناظم والعكس بالعكس، فنقول: إن الشعاع المنكسر يقترب من الناظم أو يبتعد عنه حسبما يكون الوسط الساقط عليه أشد أو أقل كسراً من الوسط الوارد منه.

3- يمكن أن نستنتج بسهولة أن الشعاعين، المنعكس والمنكسر، يقعان في طرف واحد بالنسبة للناظم وهو الطرف الذي لا يحوي الشعاع الوارد، وأن الشعاع الوارد عمودياً ينعكس على نفسه أو ينفذ في الوسط الآخر دون انحراف.

4- لما كانت قرائن انكسار معظم المواد تتراوح بين 1 و3 فإن الدستور (8.8) يدل على أن i_2 تكون صغيرة عندما تكون i_1 صغيرة، ويمكن عندئذ إلباس جيوب الزوايا بأقواسها وكتابة الدستور (8.8) على الشكل:

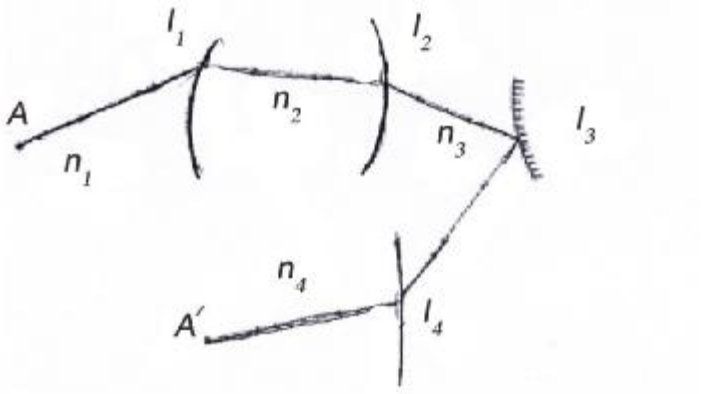
$$n_1 i_1 = n_2 i_2 \quad (\textbf{صغيرة } i_1) \qquad (\mathbf{8.10})$$

الذي يسمى دستور كبلر *kepler*

5- أن قرينة الانكسار المطلقة للهواء الغازي تتجاوز *1.0005* فإنه يمكن إلباسها بالواحد والباس قرائن انكسار المواد بالنسبة للهواء بقرائنها المطلقة.

6- ينتج من المساواة (8.7) أنه إذا ورد على النقطة I الشكل (8.9) شعاع وفق RI فإنه ينعكس حتماً وفق IA_1. كما ينتج من المساواة (8.8) أنه إذا ورد شعاع وفق A_2I فإنه ينكسر وفق IA_1. وعلى هذا الأساس يمكن أن نقول:

أن الطريق الذي يسلكه الضوء لا يتعلق بجهة انتشاره.



الشكل (8.10). مبدأ الرجوع المعكوس

يطلق عادة على هذه النتيجة اسم مبدأ الرجوع المعكوس، وهو يدل على انه إذا انطلق من النقطة A الشكل (8.10) شعاع AI_1 وسلك للوصل إلى A' عبر سلسلة أوساط وسطوح عاكسة، الطريق $AI_1I_2I_3I_4A'$ فإن الشعاع الذي ينطلق من A' وفق $A'I_4$ يسلك الطريق المعاكس $A'I_4I_3I_2I_1A$.

أن تطبيق هذا المبدأ يسهل حل كثير من المسائل في علم الضوء ويجنب المرء من ارتكاب الأخطاء، وينتج منه مباشرة أنه إذا كنا إزاء شعاعين ينتشران في اتجاهين متعاكسين عبر سلسلة من الأوساط وكان لهما قسم مشترك فإنهما يكونان حتماً منطبقين على طول الطريق.

8. 9. دراسة تفصيلية للانكسار. الانعكاس الكلي

ندرس في هذه الفقرة تغيرات زاوية الانكسار بدلالة زاوية الورود، ومن أجل ذلك نفترض أننا إزاء سطح فاصل بين وسطين يحققان دوماً المتراجحة $n_2<n_1$، فنميز بهذا الصدد حالتين:

1- الضوء يتجه نحو الوسط الأشد كسراً: أي أن الشعاع الضوئي يذهب الوسط (1) إلى الوسط (2). نلاحظ عندئذ أنه مهما كانت قيمة i_1 يوجد دوماً قيمة لـــi_2 معطاة بالدستور:

$$\sin i_2 = \frac{n_1}{n_2}\sin i_1 < I$$

لأن كلاً من $\frac{n_1}{n_2}$ و $\sin i_1$ أصغر من الواحد، وهذا يدل على وجود شعاع منكسر مهما كان منحى الورود، فعندما تتزايد i_1 من الصفر (ورود ناظمي) إلى 90^o (ورد مماسي) تتزايد i_2 من الصفر إلى قيمة 1 نحصل عليها من العلاقة السابقة بملاحظة أن $sin90=1$ فنجد:

$$\sin 1 = \frac{n_1}{n_2} \qquad (\mathbf{8.11})$$

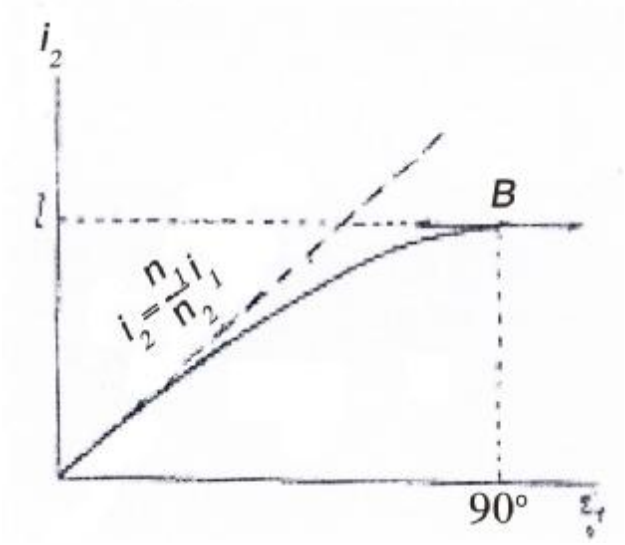
ونرسم منحني الشكل (8.11) الذي ينطلق من نقطة الأصل O مماساً للمستقيم $i_2 = \frac{n_1}{n_2} i_1$ (لأن هذا المستقيم يمثل تغيرات i_2 صغيرة عندما تكون i_1 صغيرة، دستور كبلر) وينتهي بالنقطة B مماساً للمستقيم $i_2=1$ لأن المشتق:

$$\frac{di_2}{di_1} = \frac{n_1}{n_2}\frac{\cos i_1}{\cos i_2}$$

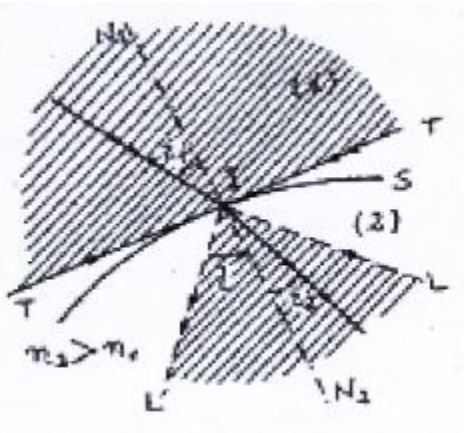
ينعدم في هذه النقطة ($cos90^o=0$). وهكذا ينتج أن زاوية الانكسار هي دوماً أصغر من *1* المعطاة بالدستور (8.11) فنقول: إذا ورد على نقطة من السطح الكاسر حزمة مخروطية ذاهبة نحو الوسط الأشد كسراً فإن جميع الأشعة المنكسرة تنحصر داخل مخروط ذروته نقطة الورود وزاويته تساوي *1* أي أن المنطقة البيضاء من الشكل (8.12) لا تحوي شعاع منكسر ينطلق من *1* وذلك مهما كانت فتحه الحزمة الواردة على *1*.

تسمى الزاوية *1* المعطاة بالدستور (8.11) زاوية الانكسار الحدي.

ولنلاحظ أخيراً على الشكل (8.11) أن i_2 تقترب من *1* ببطء شديد عندما تقترب i_2 من *90*.



الشكل (8.11)



الشكل (8.12). زاوية الانكسار الحدي 1

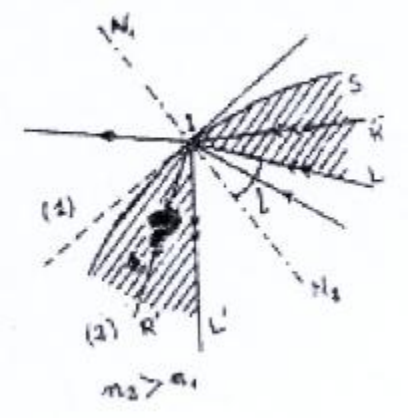
2- الضوء يتجه نحو الوسط الأضعف كسراً:

أي أن الشعاع الضوئي يذهب من الوسط (*2*) إلى الوسط (*1*) وتكون عندئذ i_2 هي زاوية الورود، ويدل مبدأ الرجوع المعكوس أن جميع الأشعة الواردة على *1* ضمن الزاوية *1* تنكسر في الوسط الآخر خاضعة لقانون ديكارت. وبصورة خاصة أن الشعاع *LI* الذي يرد بالزاوية *I* ينفذ في الوسط (*1*) مماساً للسطح الكاسر وفق *IT*، أما عندما تكون زاوية الورود $i_2>$ فإن دستور ديكارت لا يعطي حلاً مقبولاً، لأننا نحصل عندئذ على $\sin i_1>1$ وهذا مستحيل.

فما يحدث إذن للشعاع الذي يرد بزاوية أكبر من *1* ؟

تدل التجربة فعلاً أن هذا الشعاع لا يعطي أي شعاع منكسر في الوسط الآخر وإنما ينعكس بكامله في الوسط الذي أتى منه حسب قانون ديكارت في الانعكاس، أي أن جميع الأشعة التي ترد على *1* ضمن المنطقة المخططة من الشكل (8.13) تعاني انعكاساً كلياً في الطرف الآخر من الناظم حاملة معها جميع الطاقة الضوئية التي تملكها فنقول:

أن الأشعة الذاهبة نحو الوسط الأضعف كسراً إما أن تنكس جزئياً في هذا الوسط أو أن تنعكس كلياً وذلك حسبما تكون زاوية ورودها أصغر أو أكبر من زاوية الانكسار الحدي 1 التي تحسب من العلاقة (8.11).



الشكل (8.13). الانعكاس الكلي

وقد يكون من المفيد أخيراً أن نذكر أن الانكسار هو دوماً انكسار جزئي مصحوب بانعكاس جزئي وذلك مهما كانت جهة انتشار الضوء.

8. 10. معلومات إضافية عن الانعكاس

نعطي في هذه الفقرة بعض المعلومات عن كمية الطاقة المنعكسة وكمية الطاقة النافذة (المنكسرة) في وسط شفاف بالنسبة للطاقة التي تجرفها الحزمة الواردة.

لنرمز إذن بـــW_t للطاقة التي تصل إلى نقطة الورود وبـــW_r وW_t للطاقتين اللتين تحملهما الحزمتان المنعكسة والنافذة في النقطة نفسها، فيكون لدينا بموجب مبدأ انحفاظ الطاقة:

$$W_i = W_r + W_t$$

الشكل (8.12) تغيرات المقدرة العاكسة لسطح يفصل بين وسطين شفافين بدلالة زاوية الورود (*I*) الضوء يذهب نحو الوسط الأشد كسراً، (*II*) الضوء يذهب نحو الوسط الأضعف كسراً.

نطلق اسم المقدرة العاكسة للسطح *S* على النسبة:

$$R = \frac{W_r}{W_i}$$

واسم عامل النفاذية على النسبة:

$$T = \frac{W_t}{W_i} = 1 - R$$

تدل التجربة أن قيمة *R* تتعلق بطبيعة الوسطين المفصولين بالسطح *S* وأن تغيراتها بدلالة زاوية الورود *i* تتمثل بمنحنيات من الشكل (8.12)، حيث نرى أنها ثابتة من أجل زوايا ورود صغيرة لا تتجاوز *10* درجات وهي تخضع في هذا المجال للدستور:

$$R = \frac{I_r}{I_0} = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2$$ (من أجل ورود شبه ناظمي)

العلاقة صحيحة مهما كانت جهة انتشار الضوء، فلدينا مثلاً من أجل السطح الفاصل بين الهواء والزجاج العادي، *R=0.04 (T=0.96)*، أي انه لا ينعكس عن الزجاج سوى *4* في المائة من الضوء الوارد على الزجاج ورداً شبه ناظمي. أما القسم الأكبر الباقي فيمر إلى الوسط الآخر.

ونرى أيضاً على الشكل (8.12) (منحني *II*) أن *R* تقترب من الواحد عندما يذهب الضوء نحو الوسط الأضعف كسراً بزاوية قريبة من *1* حيث يحدث الانعكاس الكلي الذي يحمل جميع الطاقة الواردة ويختفي الشعاع المنكسر كما نرى على المنحني *1* أن الورود شبه المماسي يصحبه انعكاس شبه كلي مما

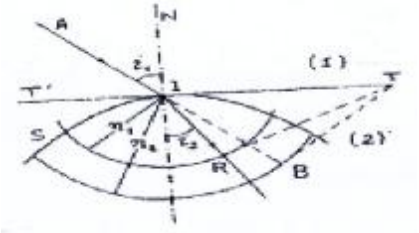
يدل على أن الطاقة التي يحملها الشعاع IL الشكل (8.12) معدومة، أي أن الشعاع TI يتابع عملياً طريقه، فإذا استقبلنا الحزمة المخروطية LIL' على لوحة عمودية على الناظم فإننا نرى عليها دائرة تتناقص إدارتها من المركز حتى تنعدم في المحيط.

8. 11. الإنشاء الهندسي للشعاع المنكسر

تسمح قوانين ديكارت بإنشاء الشعاعين، المنعكس والمنكسر دون صعوبة، فمن أجل الشعاع المنعكس يكفي إنشاء المستقيم المناظر للشعاع الوارد بالنسبة للناظم. أما بصدد الشعاع المنكسر فنكتفي بشرح الطريقتين التاليتين:

طريقة هايجنز *HUYGENS*

نفرض أن مستوي الورود هو مستوى الورقة الشكل (8.14) لنرسم دائرتين مركزهما نقطة الورود ونصفا قطريهما n_2, n_1 ثم لنمدد الشعاع الوارد $A1$



الشكل (8.14). إنشاء هايجنز

حتى يقطع دائرة الوسط الذاهب إليه (أي دائرة n_2 في هذه الحالة) في النقطة B لنرسم عندئذ من B مماساً لهذه الدائرة فيقطع المستقيم $T'IT$ (المماس لسطح الكاسر S في نقطة الورود) في النقطة T التي نرسم منها المماس TR للدائرة الأخرى n_1 فنرى بسهولة أن IR هو الشعاع المنكسر المطلوب، إذ لو رمزنا بـــi_2 للزاوية التي يصنعها هذا المستقيم مع الناظم لوجدنا بسهولة أن:

$$\sin i_1 = \frac{IB}{IT} = \frac{n_2}{IT}$$

$$\sin i_2 = \frac{IR}{IT} = \frac{n_2}{IT}$$

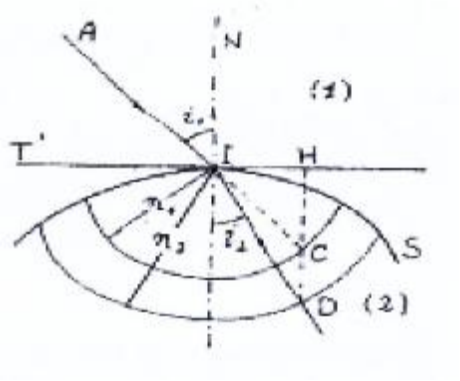
ولحصلنا بتقسيم هاتين المساواتين، طرفاً على طرف، على قانون ديكارت في الانكسار.

طريقة سطوح القرينة

ننشئ الدائرتين السابقتين ونرسم الشكل (8.15) من C، نقطة تقاطع الشعاع الوارد مع دائرة قرنية الوسط الذي أتى منه (أي n_1 في هذه الحالة)، المستقيم العمودي على أساس المماس $T'I$ فيقطع الدائرة الأخرى في النقطة D فنرى أن DI هو الشعاع المنكسر المطلوب، إذ قسمنا المساواتين:

$$\sin i_2 = \frac{IH}{ID} = \frac{IH}{n_2} \qquad \sin i_1 = \frac{IH}{ID} = \frac{IH}{n_1}$$

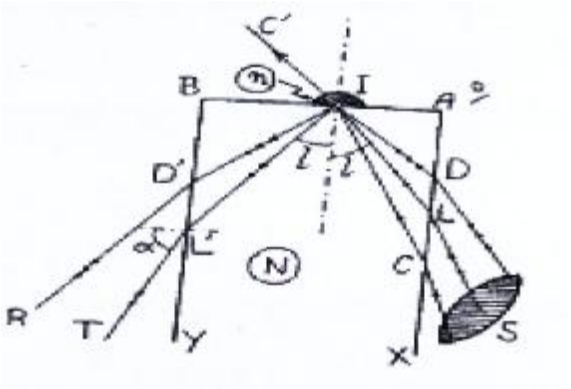
طرفا على طرف لحصلنا على القانون ديكارت في الانكسار.



الشكل (8.15). طرقة سطوح القرنية

8. 12. تطبيقات على الانعكاس الكلي

إن للانعكاس الكلي تطبيقات عديدة تكتفي هنا بذكر ثلاثة منها.



الشكل (8.16). قياس قرينة الانكسار بالانعكاس الكلي

1- **قياس قرينة الانكسار**: ويتم ذلك باستعمال قطعة من الزجاج شكل متوازي المستطيلات الشكل (8.16) وقرينة انكسارها N، يوضع على أحد وجوهها AD قطرة من سائل قرينة انكسارها $N>n$ فمن بين الأشعة الواردة من المنبع الضوئي S على سطح التماس بين الزجاج والسائل توحد أشعة، مثل LI، ترد تحت زاوية الانكسار الحدي 1 وتشكل مخروطاً ذروته I وزاويته الرأسية 21. وكل الأشعة الواردة خارج هذا المخروط، مثل DI تنعكس وتخرج من الوجه BY.

أما الأشعة الواردة ضمن هذا المخروط، مثل CI، فتنفذ في السائل لتخرج وفق IC' وتكون النتيجة ذلك أن الشعاع $L'T$ البارز عن LIL' يقسم مستوى الورقة إلى منطقتين، أحدهما مضيئة وتقع على يمين جهة انتشاره والأخرى مظلمة وتقع على يساره. فإذا رمزنا بـــα لزاوية بروز هذا الشعاع كان لنا (بتطبيق قانون ديكارت في النقطة L'):

$$\sin a = N \sin\left(90^o - 1\right) = N \cos 1 = N\sqrt{1-\sin^2 I}$$

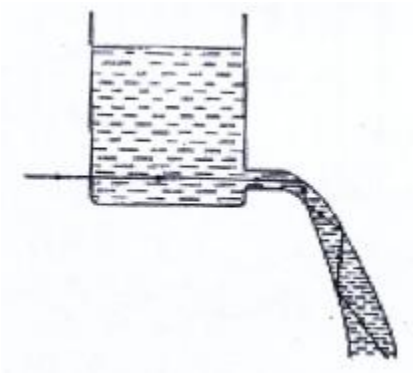
وبالاستفادة من أن $\sin I = \frac{n}{N}$ نجد العلاقة:

$$\sin a = \sqrt{N^2 - n^2}$$

التي تسمح، بعد قياس α بوسيلة ما، بحساب إحدى القرينتين بدلالة الأخرى. ونلاحظ أن الشروط $0 \le \sin a \le 1$ يستوجب أن تتحقق المتراجحتان $N \ge n$ (شرط الانعكاس الكلي) و $n > \sqrt{N^2 - 1}$ ويلجأ عادة إلى استعمال زجاج قرينة انكساره كبيرة ومعلومة. فمن أجل *N=1.626* مثلاً نجد أن هذه الطريقة تسمح بقياس قرائن انكسار السوائل المحصورة في المجال *1.626>n>1.202*. هذا ويمكن استعمال هذه الطريقة من أجل قطعة صلبة صغيرة ذات وجه مستو مصقول وتوضع بدلاً من القطرة.

النوافير الضوئية: ومبدأ عملها واضح في الشكل (8.17) حيث يمثل الشعاع الضوئي حزمة متوازية ضيقة من ضوء أحمر مثلاً، فتعاني على جوانب أنبوب الماء المتدفق من ثقب الإناء، انعكاسات كلية متوالية نتيجتها أن مسبر الضوء يصاحب تيار الماء الذي يبدو لنا عندئذ أحمر اللون.

دليل الضوء: ويطلق هذا الاسم على سلك غليظ من مادة شفافة مرنة الشكل (8.18) تعمل بموجب مبدأ النافورة الضوئية فيسير الضوء فيها متبعاً تعرج السلك. ودليل الضوء كثير الاستعمال في التنظير الطبي لفحص أعضاء الجسم الداخلية كالقصبات أو المعدة ويجهز لهذا الغرض في طرفيه بعد ستين أو أكثر تؤلفان مجهراً يشكل للمنطقة المفحوصة خيالاً مكبراً تراه العين، كما يستعاض عن السلك الغليظ، لالتقاط أكبر كمية من الضوء، بمجموعة أسلاك تشكل شفافة دقيقة تشكل حبلاً طويلاً يدخل من فم المريض مثلاً نحو العضو المدروس.



الشكل (8.17). نافورة ضوئية

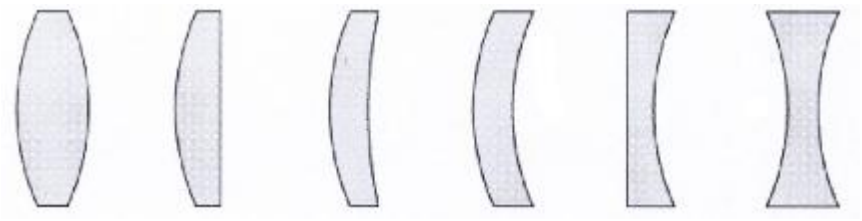
الشكل (8.18). دليل الضوء

8. 13. العدسات

العدسات وسط مادي شفاف محدد من طرفيه بسطحين مقعري الوجه أو محدبين أو سطحين أحدهما مقعر والأخر محدب، يلعب كل وجه للعدسة دور مجمع أو مشتت للضوء فالوجه المجمع يمتلك محرقاً حقيقياً أما الوجه المشتت للضوء فله محرقاً وهمياً.

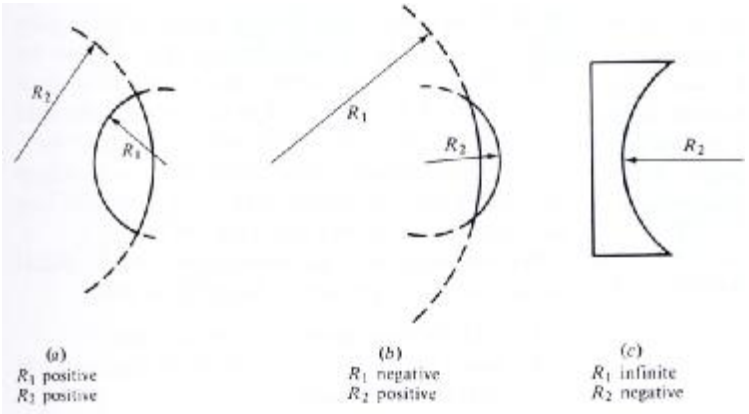
تحتوي العين جسماً بلورياً له شكل عدسة مقربة محدبة الوجهين شفافة تجتازه الحزمة الضوئية الآتية من اللانهاية بشكل خطوط متوازية وعندما تجتاز الجسم البلوري تتقارب في نقطة تسمى الشبكية يتشكل عليها الخيال.

نقول عن العدسة السميكة الحواف والمقعرة الوجهين –أو المقعرة والمستوية بأنها عدسة مبعدة أما العدسة الرقيقة الحواف والمحدبة الوجهين –أو محدبة ومستوية بأنها عدسة مقربة حسب الشكل:



الشكل (8.19). أشكال العدسات المقربة والمبعدة

في حالة العدسات المقربة يكون نصفي الوجهين موجبين أي إذا اعتبرها أن نصف قطر تحدب الوجه المقرب R يكون موجباً أما في حالة العدسات المبعدة فيكون نصف قطر تقعر الوجه سالب أي أن قيمة R سالبة وذلك حسب الشكل (8.20)



الشكل (8.20)

8. 14. قانون صانعي العدسات

يرتبط البعد المحرقي في العدسات بقرينة انكسارها (n) ولذلك بنصفي قطري انحنائها R_1، R_2 لخص العالم ستيل ما سبق بقانون صانعي العدسات فعندما تكون العدسات في وسط من الخلاء قرينة انكساره $n=1$ فإننا نكتب القانون على الشكل:

$$\frac{1}{f}=(n-1)\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)$$

حيث n قرينة انكسار العدسة وf بعدها المحرقي.

مثال (1):

لدينا عدسة كالمبينة في الشكل (8.19)، مصنوعة من زجاج قرنية انكساره $n=1.5$. أوجد البعد المحرقي f لهذه العدسة:

1) عندما يكون نصف قطر تحدب الوجهين $0.1m$ و$0.2m$
2) عندما يكون وجه مستوي والآخر مقعر نصف قطره ($R=4m$)

الحل:

1) بما أن الوجهان محدبان فتكون قيمتا R_1 وR_2 موجبتان

$$\frac{1}{f}=(n-1)\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)$$
$$=(1.5-1)\left(\frac{1}{0.1}+\frac{1}{0.2}\right)=(0.5)(10+5)=7.5m^{-1}$$

2) عندما يكون الوجه مستوي $1/R=1/f=0$

والوجه الثاني مقعر أي سالب

$$\frac{1}{f}=(1.5-1)\left(0+\frac{1}{-4m}\right)=-0.125m^{-1}$$

أي $f=-8m$ والعدسة مبعدة.

مثال (2):

إذا وضعنا العدسة المقربة في المثال السابق في الماء فما قيمة البعد المحرقي الجديد للعدسة.

الحل:

بما أن قرينة انكسار الماء تساوي $n=1.33$ فتكون قرينة الانكسار النسبية $n=\frac{1.5}{1.333}=1.125$ وبالتالي يصبح البعد المحرقي:

$$\frac{1}{f}=(n-1)\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)$$

$$=(1.5-1)\left(\frac{1}{0.1m}+\frac{1}{0.2m}\right)\Rightarrow f=0.533m^{-1}$$

نلاحظ من المثالين السابقين أن البعد المحرقي قد ازدادت بوجود الوسط المائي، وهذا يفسر وجود السوائل في العين الإنسانية وفوائدها في تحسين مواصفات الرؤيا عند الإنسان.

8. 15. تداخل الضوء على الأملاح الرقيقة

كثيراً ما ينتج لدينا ألوان من انعكاس الضوء من على سطح فقاعة من الصابون أو طبقة رقيقة من الزيت الطافي على سطح الماء. ينشأ هذا اللون من تداخل الأضواء المنعكسة من على سطح طبقة الفيلم الرقيقة من الوجه المباشر لسقوط الضوء وانعكاس الضوء من على السطح المعاكس للسطح الذي سقط عليه الضوء. عندما تسقط حزمة ضوئية على سطح فيلم رقيق فإن الضوء المنعكس مباشرة يتداخل مع الضوء المنعكس من السطح الداخلي فإذا كان الفرق في المسير الضوئي يساوي عدداً صحيحاً من أطوال الموجة فإن التداخل بناء ويظهر لنا سطح الفيلم بألوان مختلفة إذا كان اللون الساقط على الفيلم هو اللون الأبيض.

إذا استخدمنا ضوءاً وحيد اللون وأسقطناه على سطح فيلم رقيق، الشكل (8.21). فإذا كانت قرينة انكسار الفيلم n وسماكته d والضوء الساقط عليه عمودياً فالضوء المنعكس من السطح الداخلي يسير مسافة إضافية قدرها $2d$. فإذا كان طول الموجة الساقطة يساوي l فإن هذا الطول يصبح l' داخل الفيلم الرقيق $l' = \frac{l}{n}$ ، في هذه الحالة، يكون من الصعب أن يكون الضوء المنعكس مباشرة والمرتد من السطح الداخلي طور واحد ويكون التداخل هدام ولا يحدث أي تداخل بنّاء.

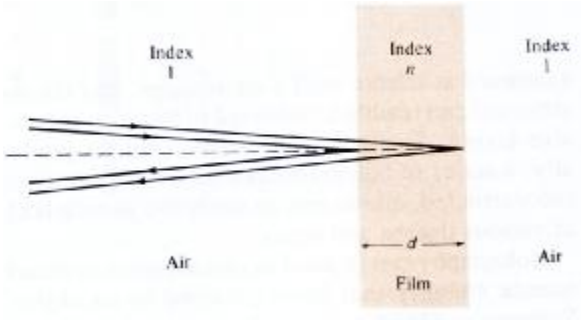
ويكون في هذه الحالة:

$$2d = m\,l' = m\,\frac{l}{n}$$

أي تكون الشدة المنعكسة بالحالة الدنيا عندما $2nd=ml \quad m=0, 1, 2\ldots$

وبشكل مماثل يكون التداخل بنّاء عندما يتحقق لدينا $m=0, 1, 2\ldots$

$$2nd = \left(m + \frac{1}{2}\right) l$$



الشكل (8.21)

<u>مثال:</u>

فيلم من الصابون قرينة انكساره $n=1.33$، وتكون سماكة الفيلم محققة لانعكاس أعظمي للون الأحمر $700nm$ عند الورود الناظمي:

1) ما هي سماكة الفيلم
2) إذا أضئنا الفيلم باللون الأبيض بسقوط ناظمي، فإذا شاهد ملاحظ الضوء المنعكس فما هو الضوء الذي سيشاهده.

الحل:

1) بوضع $m=0$ في معادلة الانعكاس الأعظمي نجد:

$$d = \frac{(m+½)\,l}{2n} = \frac{½(700)}{2(1.33)} = 132nm$$

2) إذا أخذنا نصف طول الموجة ($700nm$) أي أخذنا طول الموجة $350nm$ فإن ذلك يعطينا موجة منعكسة بشدة دنيا وعلى حافة الضوء المرئي $400nm$.

8. 16. دراسة موجزة عن العين

العين هي العضو من جسم الإنسان الذي يقوم بنقل الصور والمرئيات إلى المخ، فيتم الإحساس بها. تسكن العين داخل جوف الحجاج في الجمجمة ويفصلها عنه وسادة شحمية تحمي العين انظر الشكل (8.22) والعين حساسة للطاقة الفوتونية في منطقة الطيف الكهرطيسي تسمى بمنطقة الطيف المنظور. وتتكون العين من قسمين هما:

- ملحقات العين
- كرة العين

أ. **ملحقات العين**:

- **الحاجبان**: يمنعان وصل عرق الجبهة إلى العينين.
- **الجفنان والأهداب**: لتخفيف شدة الضوء الوارد إلى العينين، وإعاقة دخول الغبار إلى العين.

- **الغدتان الدمعيتان**: تفرزان الدموع التي تدفئ، وترطب كرة العين وتغسلها من الغبار، وتقودها إلى القناة الدمعية، ثم إلى الحفرتين الأنفيتين.
- **الملتحمة**: غشاء جلدي رقيق شفاف، يلتصق على الوجه الأمامي للعين.
- **العضلات المحركة**: ست عضلات أربع مستقيمة وعضلتان منحرفتان ترتكز هذه العضلات من جهة على كرة العين، ومن جهة أخرى على جدران الحجاج. وتقوم هذه العضلات بتحريك كرتي العينين بكافة الجهات.

ب. كرة العين: **تشمل كرة العين**.

1- جدران العين.

2- الأوساط الشفافة.

1- الطبقات المكونة لجدران كرة العين: وهي من الأمام إلى الخلف:

أ- **الصلبة أو البيضاء**: واقية تتحدب من الأمام قليلاً لتشكل القرنية الشفافة. وهي غشاء صلب. ومقاوم سماكته *lmm*، وقرنية انكساره تختلف قليلاً عن 1.35.

ب- **المشيمة**: طبقة غنية بالأوعية الدموية، وجهها الداخلي اسود يجعل جوف كرة العين مظلماً، ووجها الأمامي مسطح يدعى القزحية، وهو ملون بحسب الأشخاص، وفي وسطها الحدقة وهي فتحة متغيرة القطر، كما نجد خلف القزحية الجسم الهدبي المكون من ألياف عضلية لا إرادية، وأوعية دموية وفي مركز طبقة القزحية هنالك ثقب يسمى الحدقة، أو البؤبؤ وبالتالي فإن القزحية تقوم بدور حجاب الفتحة في منظومة العين الضوئية.

حيث أن هذه الفتحة يمكن أن يتغير اتساعها بوساطة عضلات موجودة

في القزحية، وتخضع لتأثير الجملة العصبية المركزية، فتقلص هذه العضلات وانبساطها يغير فتحة الحدقة من *2-3 mm* في حالة الإضاءة القوية ومن *6-8mm* في حالة الإضاءة الضعيفة، وبذلك يتم التحكم بمقدار التدفق الضوئي الساقط على العين.

ج- **الشبكية**: تتألف شبكية عين الإنسان من عدة طبقات تحميها بشرة سطحية، وتضم المستقبلات الضوئية المؤلفة من المخاريط والعصيات.

كما يخرج من الشبكية ألياف العصب البصري الذي يتصل بالمخ. تسمى منطقة خروج ألياف العصب البصري النقطة العمياء لخلوها من العصي، والمخاريط، وفي الشبكية انخفاض صغير مقابل للحدقة هو اللطخة الصفراء، تبلغ قوة البصر شدتها.

2- الأوساط الشفافة: تتوضع من الأمام إلى الخلف:

أ- **القرنية الشفافة**

ب- **الخلط المائي**: سائل شفاف كالماء يملأ حجرة العين الأمامية بين القرنية والقزحية.

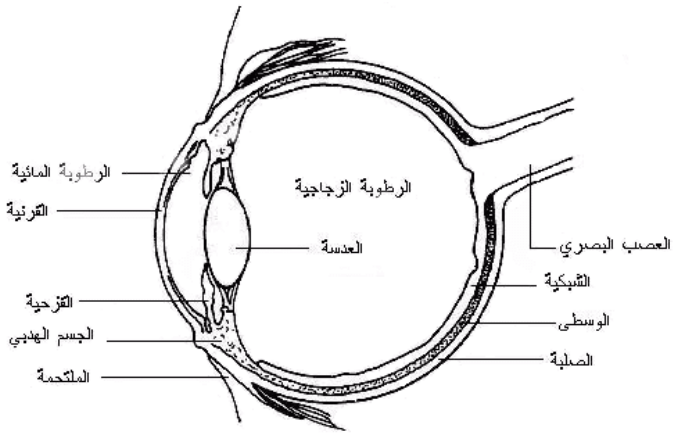
ج- **الجسم البلوري (عدسة العين)**: عدسة محدبة الوجهين، ووجهها الخلفي أكثر تحدباً من وجهها الأمامي، يثبتها في مكانها أربطة معلقة متصلة بالجسم الهدبي.

د- **الخلط الزجاجي**: إن حجرة العين الخلفية مملوءة بمادة هلامية شفافة تسمى الخلط الزجاجي، حيث تلتصق هذه المادة عند قعر العين بطبقة الشبكية، التي تحتوي على مستقبلات الضوء العضوية.

وأخيراً فإن مقلة العين بكاملها، مملوءة في الفراغات بين الأجزاء

المذكورة سابقاً بسائل شفاف يقع تحت ضغط يزيد عن الضغط الجوي بمقدار من *18*/ إلى /*20*/ مم زئبقي.

وهذه الزيادة في الضغط تسمى ضغط العين الداخلي وهو يساعد على احتفاظ العين بشكلها الكروي.



الشكل (8.22)

8. 17. دور وبنية الشبكية

هي الطبقة المستقبلة للضوء، وتحتوي المستقبلات الضوئية على أصبغة حساسة، يزول لونها بتأثير الضوء وتولد كمونات فعل تسري في ألياف العصب البصري.

وتمتاز هذه الاستجابة بسرعة حدوثها الفائقة، الأمر الذي يسمح للعين بالقيام بحركاتها المستمرة التي تنقل الخيال المتشكل على الشبكة باستمرار، من منطقة إلى أخرى مجاورة بما يؤمن استمرارية الرؤية.

ونميز في الشبكية نوعين من الخلايا الحساسة للضوء هي العصي

والمخاريط، ويكون عمل المخاريط، إدراك البيئة المحيطة بظروف الإضاءة الجيدة (الرؤية النهارية)، وهي حساسة لونياً وتكون بكثافة عالية في اللطخة الصفراء.

بينما يكون عمل العصي إدراك البيئة المحيطة في ظروف الإضاءة الضعيفة (الرؤية الليلية)، وهي غير حساسة لونياً.

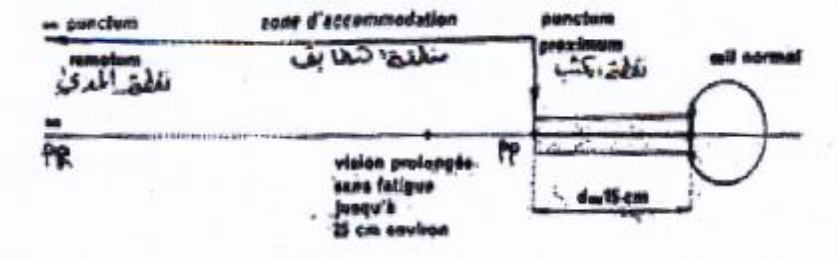
ويبدو أن هناك ثلاثة أنماط من المخاريط، يجري كل نمط منها صباغاً ضوئياً له مجاله امتصاصه الضوئي الانتقائي الخاص به فهناك النمط الأزرق الذي تقع عصابة امتصاصه عند الموجة *440* نانومتر. والنمط الأخضر عند الموجة *530* نانومتراً، وأخيراً النمط الأحمر عند الموجه *575* نانومتراً.

8. 18. المطابقة

وهي عملية ضبط وإحكام آلي لتوضع الخيال على الشبكية وهي فعل انعكاسي، وتتم المطابقة بواسطة الجسم البلوري الذي يتمتع بمرونة طبيعية، بتأثير الجسم الهدبي.

وبدراسة العمل الوظيفي للعين تبين أنه أثناء عملية المطابقة فإن المسافة ما بين المركز البصري، والشبكية تبقى ثابتة، والذي يتغير هو تحدب وجوه الجسم البلوري، لذا فإن الجسم البلوري قادر على تغيير بعده المحرقي بحيث يستطيع إعادة الترافقات الضوئية للمستوي الجبهي الملاحظ (الجسم)، ومستوي الشبكية (الخيال).

فعملية المطابقة تتلخص في أن العين تقلص بعدها المحرقي لدى اقترب الجسم منها وتمدده لدى ابتعاده عنها بحيث يرتسم الخيال دوماً على الشبكية والشكل (8.23) يوضح لنا حدود مطابقة العين السليمة.



الشكل (8.23)

يوجد على المحور البصري منطقة تطابق، ولكي تتم رؤية الأجسام بشكل واضح، يجب أن تقع هذه الأجسام ضمن هذه المنطقة. إن أبعد نقطة عن العين في هذه المنطقة تسمى نقطة المدى، ومن ثم فإن العين السليمة تستطيع رؤية هذه النقطة، والنقاط المجاورة دون تعب لأنها تشكل أخيلة تقع على الشبكية، وذلك دون الحاجة لعملية المطابقة. وأقرب نقطة للعين من منطقة المطابقة تسمى نقطة الكثب، وأنه لتمييز هذه النقطة يجب على العين أن تقوم بعملية مطابقة عظمى، وهذا ما يتعب العين عند النظر المطول إلى هذه النقطة.

فعندما تكون العين سليمة (ضوئياً) نلاحظ أن نقطة المدى تقع في اللانهاية بينما تقع نقطة الكثب على بعد A تتراوح قيمتها مابين *15-20* سنتيمتر في سن العشرين، هذا البعد يسمى البعد الأصغري للرؤية الواضحة ويتزايد عموماً بتقدم السن لأن العين تضعف عندئذ قدرتها العضلية على المطابقة.

كما أن قدرة العين على المطابقة تختلف باختلاف الأشخاص، وتتناقص مع تقدم الإنسان بالعمر، وترتبط بكمية الإضاءة ونوعيتها.

تعد حساسية العين في أعلى درجاتها من أجل ضوء وحيد اللون، وإضاءة مقدارها *10000* لوكس.

8. 19. شذوذ البصر وإصلاحه

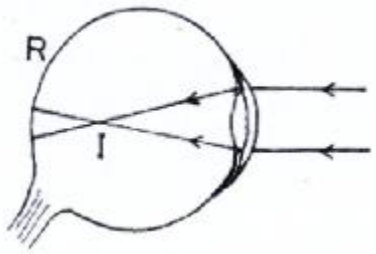
نقول عن العين أنها شاذة إذا كان محرقها الخيال F' وهي في الراحة غير واقع على الشبكية والشذوذ نوعان:

أ- العين الحسيرة (قصر النظر)

نطلق هذه الصيغة على عين يقع محرقها الخيال، وهي مرتاحة أمام الشبكية الشكل (8.24) أي أن العين المسيرة أشد تقريباً من السليمة فهي في حالة الراحة لا ترى أجسام اللانهاية بوضوح ولو طابقت لاستفحل الأمر.

ولكن إذا اقترب الجسم تدريجياً اقترب خياله من الشبكية حتى يرتسم عليها، دون مطابقة، عندما يصبح الجسم في نقطة المدى.

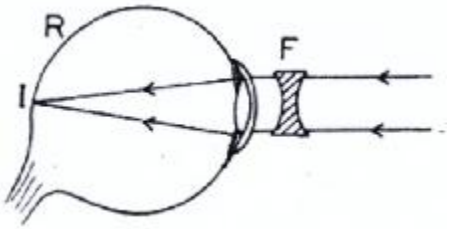
فنقطة المدى في العين المسيرة واقعة إذن على مسافة محدودة أمام العين، وينتج من ثبات سعة المطابقة أن نقطة الكثب أقرب أيضاً إلى العين الحسيرة منها إلى العين السليمة.



الشكل (8.24)

أي أن النقطة البعيدة لمثل هذه العين المصابة بقصر النظر تكون أقل من اللانهاية، وكذلك تكون النقطة القريبة لها أقل من *25cm* ولإصلاح التقريب الكبير للجسم البلوري، يجب وضع عدسة مبعدة على بعد من *1* إلى *2* سنتيمتر من قرنية العين (نظارات عادية)، الشكل (8.25) يهدف الرؤية الواضحة ابتداء من نقطة المدى.

ونشير هنا إلى أن العدسة المبعدة تشكل للجسم البعيد والمرئي خيالاً وهمياً وأصغر من الحسم ومقرب، هذا الخيال يقوم بدور جسم بالنسبة للعين التي تشكل له خيالاً عل الشبكية. ونلاحظ أن المصاب بقصر النظر لا يكون بحاجة لأي تصحيح عند النظر إلى الأجسام القريبة.



الشكل (8.25)

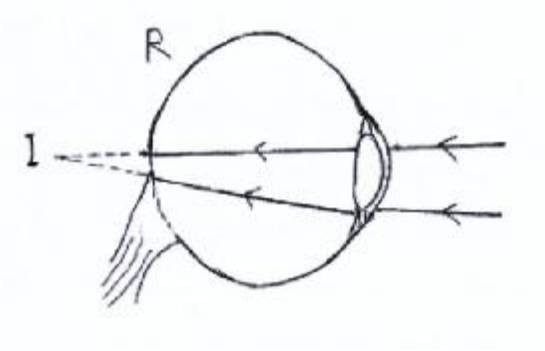
ب - العين الطامسة (بعد النظر)

نطلق هذه الصفة على عين يقع محرقها الخيال، وهي مرتاحة، وراء الشبكية الشكل (8.26) أي أن العين الطامسة أقل تقريباً من السليمة. ويجب عليها أن تطابق لكي تعود F'' إلى الشبكية ولكي نرى أجسام اللانهاية بوضوح. أما في حالة الراحة، ولكي يتشكل خيال حقيقي على الشبكية يجب أن يكون الجسم وهمياً وواقعاً وراء F' في نقطة معينة هي نقطة المدى حسب تعريف هذه النقطة أي أن نقطة المدى في العين الطامسة هي نقطة وهمية واقعة على مسافة محدودة وراء المحرق الخيال. وينتج أيضاً من ثبات سعة المطابقة أن نقطة الكثب أبعد عن العين الطامسة منها عن العين السليمة.

أما إصلاح الشذوذ فيستهدف جعل العين شبيهة بالعين السليمة وهذا يتم وضوحاً بوضع عدسة رقيقة، قريبة جداً من العين، تعطي لأجسام اللانهاية خيالات واقعة في نقطة المدى.

فإصلاح الحسر أو الطمس يتم إذن باستعمال عدسة ينطبق محرقها الخيال على نقطة مدى العين.

أي أن تقريب العدسة المصلحة يساوي $\frac{1}{\Delta}$ (حيث D البعد الأعظمي للرؤية الواضحة). فمن أجل عين حسيرة (D سالب) يجب استعمال عدسة مبعدة فتخفف من شدة تقريب العين وغالباً ما يستعمل هلال مبعد أما من أجل عين طامسة (D موجب) فيجب استعمال عدسة مقربة. فتعدل ضعف تقريب العين وغالباً ما يستعمل هلال مقرب.



الشكل (8.26)

ج- مد البصر الشيخي (القدع)

يصاب به الإنسان بعد سن (*45-50*) سنة حيث تقل مرونة الجسم البلوري تدريجياً مع تقدم العمر، وتفقد العضلات التي تتحكم في تحدب الجسم البلوري قوتها، لذا فإن العين تفقد تدريجياً قدرتها في المطابقة، ويعود سبب ذلك بأن نقطة المدى ثابتة، بينما نقطة الكثب تبتعد تدريجياً.

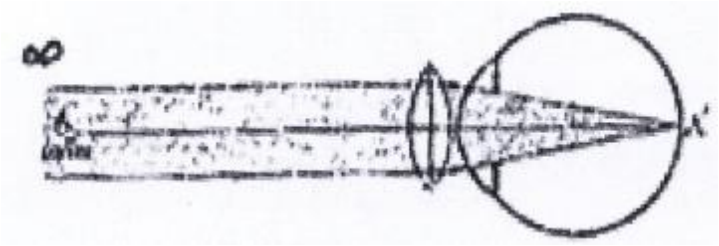
وبالتالي فإن التقدم في السن يتسبب في جميع أنواع العيوب، أي توجد عيون سليمة قادعة، وعيون حسيرة قادعة، وعيون طامسة قادعة. فعندما تكون

العين سليمة يجب أن نبعد الكتاب أثناء القراءة، وذلك بغية الرؤيا الواضحة. وحسير البصر إذا قدعت عينيه، يستعمل نظارات مبعدة لرؤية الأجسام البعيدة ونظارات مقربة للقراءة.

د - العين المصابة بالساد

عندما تشيخ العين تفقد الأوساط المكونة للجسم البلوري شفافيتها، فتبدو عاتمة، ومن ثم فإن الضوء لا يستطيع اختراقها، والوصول إلى الشبكية فتعمى العين لذا يتم استئصال الجسم البلوري، وبالتالي فإن العين التي تخضع لمثل هذه العملية هي عين مصابة بالساد.

وبما أن الجسم البلوري، والشبكية يعتبران أحد العناصر المقربة للعين، فإن العين في هذه الحالة هي عين طامسة، وفي نفس الوقت فإنها لا تستطيع القيام بالمطابقة، لأن المطابقة من خصائص الجسم البلوري، إذاً فهي قادعة ولما كان محرق هذه العين المصابة بالساد يقع على بعد 5 أو 6 سنتمتر خلف الشبكية، فإنها تصلح بوساطة عدسة مقربة تشكل لنقطة بعيدة B خيالاً يقع على بعد 5 أو 6 سنتمتر خلف العين ومن ثم تقوم القرنية بكسر الأشعة المتقاربة خلف العين، وتجمعها في B' الواقعة على الشبكية، فترى العين النقطة B بوضوح تام انظر الشكل (8.27).



الشكل (8.27)

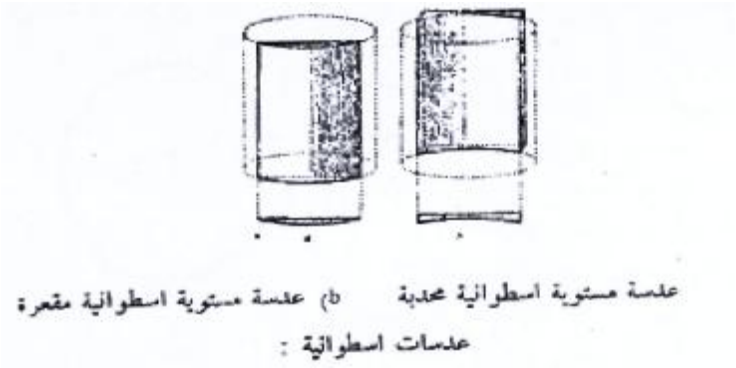
ه- العين المتصفة باللانقطية (العين الشوشاء)

اللانقطية هي إحدى عيوب العين، وهي العين التي لا تشكل خيال نقطي واقع على المحور لجسم نقطي، وسبب اللانقطية أن العين المصابة بها لا تؤلف جملة دورانية حول محورها، أي أن السطوح التي تحدد أوساط العين المختلفة ليست كروية كما فرضناها في العين السليمة، بل أن تحدب القرنية الشفافة أو الجسم البلوري يكون غير منتظم، ويختلف من شخص لآخر، ويمر بقيمتين إحداهما عظمى والأخرى صغرى.

فالجملة الضوئية التي تتألف منها العين المصابة باللانقطية، تكون متناظرة بالنسب لمستويي تناظر يمران بخط البصر ويكونا متعامدين فيما بينهما.

يتم تقويم عيب التناظر للعين وتحديد العدسة المصححة التي تسمح بإعادة التناظر الدوراني للعين، وغالباً ما يتم التصحيح بعدسات اسطوانية، أو كروية اسطوانية مناسبة، وهي نفسها غير نقطية، ولكن في اتجاه معاكس الشكل (8.28)

العدسات الكروية الاسطوانية وتستخدم عندما تكون العين حسيرة وغير نقطية، أو طامسة وغير نقطية، والوجه الكروي إما مبعد أو مقرب.



الشكل (8.28)

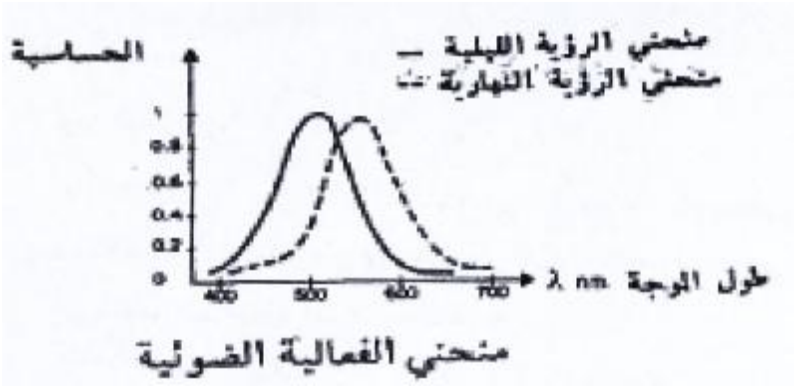
8. 20. منحني الفعالية الضوئية

إن العين غير حساسة للأشعة فوق البنفسجية، وتحت الحمراء، بينما تمتلك حداً أعلى من الحساسية من أجل الأشعة الخضراء، ذات الأطوال الموجة *555* نانومتراً.

ونطلق على العلاقة مابين الأضواء التي تعطي الحساسية نفسها من أجل الأشعة ذات الأطوال l والأشعة l_m اسم معامل الفعالية الضوئية.

ويتبدل هذا المعامل عندما تتبدل l من *400* انغستروم إلى *800* انغستروم ونلاحظ في الشكل (8.29) أنه يأخذ القيمة (*1*) عندما تكون $l=l_m$ بينما يعطي الرقم (*0.5*) من أجل طول موجة *500* انغستروم (الأزرق)، وطول موجة مساوٍ *600* انغستروم (الأصفر).

وللحصول على الحساسية الضوئية نفسها تجاه الضوئين الأزرق والأصفر، يلزمنا ضعف الشدة الضوئية بالمقارنة مع شدة اللون الأخضر ذي الطول الموجة $l=555$ انغستروم؟



الشكل (8.29)

8. 21. العدسة المكبرة

هي أحد أبسط الأجهزة البصرية، وهي عدسة مقربة مخصصة للنظر إلى الأخيلة المكبرة لأجسام صغيرة، يوضع الجسم المنظور بالعدسة المكبرة عادة في المستوي المحرقي للعدسة أو أقرب من ذلك إلى العدسة بقليل والشكل (8.30أ) يبين جسماً صغيراً AB وخياله في العين A_1B_1. فإذا وضع الجسم AB على مسافة أفضل رؤيا (L) عن العين، يرى عندئذ بالزاوية البصرية φ_0. نضع الآن عدسة مكبرة أمام العين، ونحرك الجسم AB بحيث يصبح في مستواها المحرقي الشكل (8.30ب) تقع عندئذ من كل نقطة من الجسم AB على العين بعد العدسة المكبرة حزمة من الأشعة المتوازية.

فتجمعها المجموعة البصرية للعين على الشبكية حيث يتكون الخيال A_2B_2، وبما أن الجسم يرى في هذه الحالة بزاوية φ أكبر من الزاوية φ_0، لذا يكون الخيال A_2B_2 أكبر من A_1B_1 ويستطيع الإنسان رؤية تفاصيل للجسم AB لم يكن باستطاعته رؤيتها عند النظر إليه بالعين المجردة يمكن التعبير عن تكبير العدسة المكبرة في هذه الحالة بالعلاقة التالية:

$$E = \frac{tg\, j}{tg\, j_0} = \frac{AB}{F} / \frac{AB}{L} = \frac{L}{F}$$

نلاحظ عند الإنسان السليم النظر $L=0.25m$ لذا تكون لدينا الصيغة النهائية لتكبير العدسة المكبرة.

$$E = \frac{L}{F} = \frac{0.25}{F} \qquad (\mathbf{8.12})$$

نلاحظ أنه في هذه الحالة تكون العين مكيفة على اللانهاية، لذا يرى الإنسان الجسم AB خلال العدسة المكبرة بدون توتر ولا يتعب لمدة طويلة.

إذا نقل الجسم AB من المستوى المحرقي وقرب للعدسة المكبرة الشكل (8.30جـ) يمكن عندئذ الحصول على خياله $A'B'$ على مسافة أفضل رؤيا (L).

وبما أن زاوية النظر تكون في هذه الحالة أكبر بشيء ما مما كانت عليه في الحالة السابقة، لذا يكون التكبير أيضاً أعظمي:

$$E = \frac{L}{F} + 1 \qquad (\mathbf{8.13})$$

من الشكل (8.30جـ) نجد:

$$tg\, j = AB / d$$

$$E = \frac{tg\, j}{tg\, j_0} = \frac{AB}{d} / \frac{AB}{L} = \frac{L}{d} = \frac{1}{d} L$$

بما أن الخيال $A'B'$ وهمي، لذا ينبغي وضع إشارة (-) أمام f في المعادلة:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$$

وذلك تصبح على الشكل التالي:

$$\frac{1}{d} - \frac{1}{L} = \frac{1}{F}$$

ومن العلاقة:

$$\frac{1}{d} = \frac{L + F}{LF}$$

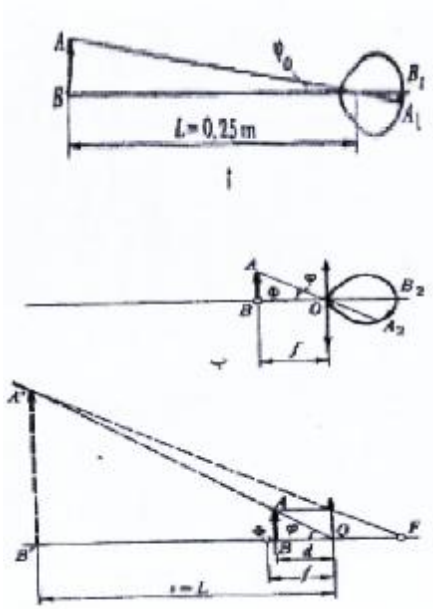
نجد:

$$E = \frac{(L+F)L}{LF} = \frac{L+F}{F} = \frac{L}{F} + 1$$

وهكذا فإنه إذا كانت العين مكيفة على مسافة أفضل رؤيا يكون تكبير العدسة المكبرة أكبر بواحد من التكبير عند تكييف العين على اللانهاية، ولكن في الحالة الأولى تكون العين في وضع توتر وتعب.

لذا فإنه عندما ينظر الإنسان خلال العدسة المكبرة تتكيف العين ذاتها بسرعة على اللانهاية وهذا يعني أن تكبير العدسة المكبرة يتحدد عملياً بالمعادلة

.(8.13)



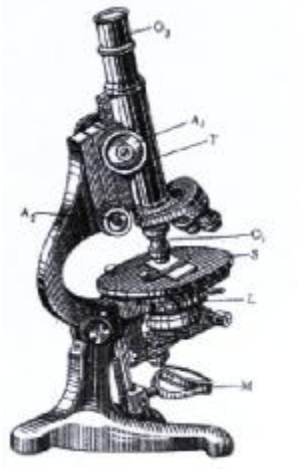
الشكل (8.30)

8. 22. المجهر

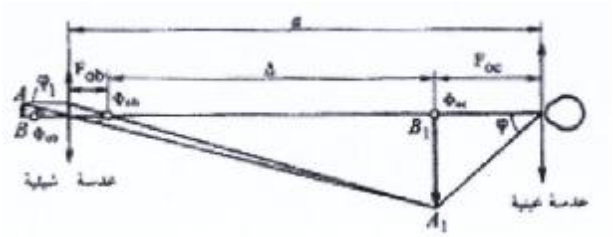
إن الجهاز الذي يمكن من الحصول على تكبير كبير عند النظر إلى أجسام صغيرة يدعى المجهر الشكل (8.31)، وهو يتكون من عدستين مجمعتين بقوة بصرية عالية. والعدسة التي يوضع أمامها الجسم تسمى عدسة جسيمية (O_1). والعدسة التي ينظر خلالها بالعين تسمى عدسة عينية (O_2).

العدسة الجحيمية والعدسة العينية للمجهر هما عبارة عن مجموعتين بصريتين مستقلتين محصورتين في إطارين منفردين مركبين داخل أنبوبة معدنية تسمى أنبوبة المجهر (T). يوضع الجسر المنظور على المنضدة (S)، ويضاء من الأسفل بواسطة المرآة (M)، ومجموعة العدسات (L) وللحصول على خيال واضح

تحرك الأنبوبة بواسطة لولبي A_1 أو A_2 يبين الشكل (8.32) مسير الأشعة داخل المجهر يوضع الجسم AB خلف المحرق الأساسي للعدسة الجسيمية، في المحرق الأساسي تقريباً. وتركب العدسة العينية بحيث يقع الخيال المقلوب والحقيقي للجسم في محرقها الأساسي، وتعمل كعدسة مكبرة (انظر الشكل (8.30ب).



الشكل (8.31)



الشكل (8.32)

لنوضح الآن كيف يحدد تكبير المجهر. فالشخص الذي ينظر في العدسة العينية يرى الخيال A_1B_1 بزاوية φ الشكل (8.32)

نجد:

$$tg\, j = \frac{A_1B_1}{F_{oc}}$$

$$A_1B_1 = (a - F_{oc})tg\, j_1$$

وبما أن

$$tg\,j_1 \approx AB / F_{ob}$$
$$A_1B_1 = (a - F_{oc})AB / F_{ob}$$

لذا فإن

$$tg\,j = \frac{A_1B_1}{F_{oc}} = \frac{(a - F_{oc})AB}{F_{oc}F_{ob}}$$

بما أن $tg\,j_0 \approx AB / L$ (حيث L مسافة أفضل رؤيا) لذا فإن تكبير المجهر:

$$E = \frac{tg\,j}{tg\,j_0} = \frac{(a - F_{oc})AB.L}{F_{oc}F_{ob}.AB} = \frac{(a - F_{oc})L}{F_{oc}F_{ob}}$$

وعند الأخذ بعين الاعتبار أن البعد المحرقي للعدسة الجسيمية صغير يمكن اعتبار المقدار $(a - F_{oc})$ مساوياً تقريباً للمسافة بين محرقي العدستين الجسيمية والعينية التي يرمز لها بـــ D، وتسمى طول أنبوبة المجهر ويمكن عندئذ التعبير عن تكبير المجهر بالعلاقة:

$$E = \frac{0.25}{F_{oc}}.\frac{\Delta}{F_{ob}} \qquad (\mathbf{8.14})$$

وبما أن: $E_{oc} = \frac{0.25}{F_{oc}}$ هو تكبير العدسة العينية فإن:

$$E_{x\}} = \frac{\Delta}{F_{ob}}$$

هو تكبير العدسة الجسيمية، لذا يمكن القول بأن تكبير المجهر يساوي حاصل ضرب تكبيري العدستين الجسيمية والعينية:

$$E = E_{oc}.E_{ob} \qquad (\mathbf{8.15})$$

نلاحظ أن الإنسان يرى من خلال المجهر خيالاً وهمياً ومكبراً ومقلوباً للجسم المنظور، وتعطي المجاهر البصرية تكبيراً لا يزيد على *1000* مرة.

مثال (1):

ضوء أخضر طول موجته $5\times10^{-7}m$ في الفراغ يجتاز سطحاً زجاجياً مستوياً قرينة انكساره $n=1.5$. والمطلوب:

1) ما هي سرعة الضوء في الزجاج
2) ما هو طول الموجة الضوئية في الزجاج

الحل:

1) باستخدام العلاقة $n=c/v$ تكون سرعة الضوء في الزجاج

$$v=\frac{c}{n}=\frac{3.00\times10^{8}\,ms^{-1}}{1.5}=2.00\times10^{8}\,ms^{-1}$$

2) لدينا في الفراغ $c=v$، $n=1$ وبذلك نكتب:

$$l_2=l_1\frac{n_1}{n_2}=\left(5\times10^{-7}\,ms\right)\left(\frac{1}{1.5}\right)$$
$$=3.33\times10^{-7}\,m$$

مثال (2):

عدسة مصنّعة من الزجاج قرينة انكساره، ما هي نسبة الضوء المنعكس بالنسبة للوارد ناظمياً.

الحل:

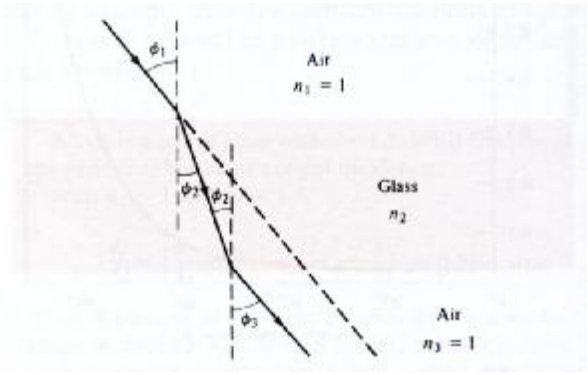
نعتبر أن $n_1=1$ و $n_2=1.5$

$$R=\frac{I_r}{I_0}=\left(\frac{n_2-n_1}{n_2+n_1}\right)^2=\left(\frac{1.5-1}{1.5+1}\right)^2=0.04$$

أي لدينا 4% من الضوء ينعكس فقط أما الضوء الباقي فينفذ من خلال الزجاج.

مثال (3):

يرد ضوءاً من الهواء إلى صفيحة زجاجية بزاوية ورود $\emptyset_1$ فإذا كانت قرينة انكسار الصفيحة n_2 الشكل (8.33) ما هي قيمة الزاوية التي تنفذ بها الحزمة الضوئية من الوجه الآخر للصفيحة الزجاجية.



الشكل (8.33)

الحل:

نعتبر قرينة انكسار الهواء $n_1=1$ وباستخدام علاقة ستيل-ديكارت

$$n_2 \sin f_2 = n_1 \sin f_1 = \sin f_1$$

بتطبيق ديكارت على السطح الثاني للصفيحة الزجاجية مع اعتبار أن $n_3=1$

$$n_2 \sin f_2 = n_3 \sin f_3 = \sin f_3$$

وبمقارنة المعادلات السابقة نستنتج أن:

$$\sin f_1 = \sin f_3$$

أي أن $f_1 = f_3$

يبين لنا هذا المثال أن الصفيحة الزجاجية لا تغير اتجاه الشعاع الضوئي الوارد وإنما تعمل على إزاحته.

مسائل الفصل الثامن

1- عرف كلاً مما يأتي:
   أ- سطح الموجة
   ب- الشعاع الضوئي
   ج- علم الضوء الهندسي
   د- ظاهرة انعراج الضوء
2- احسب تواتر وطاقة الفوتون البنفسجي الذي طول موجته *0.4* ميكرون يدخل شعاع بسيط في كرة شفافة متجانسة ويعاني داخلها انعكاسان جزئيان قبل أن يبرز منها.
3- ادرس تغيرات زاوية الانحراف (بين الشعاع الوارد والشعاع البارز) بدلالة زاوية الورود حيث أن: $n=1.31$
4- ما المقصود بكل مما يأتي:
   أ- ملحقات العين
   ب- جدار العين
   ج- الأوساط الشفافة
   د- الخلط الزجاجي
   ه- الجسم البلوري
5- تكلم عن بنية الشبكية
6- اشرح آلية المطابقة
7- عدد عيوب العين
8- ما المقصود بقصر النظر وكيف يعالج

9- ما المقصود ببعد النظر وكيف يعالج

10- اشرح عيب مد البصر الشيخي (القدع)

11- اشرح ما المقصود بالعين المتصفة باللانقطية

12- عرف زاوية الإبصار

13- صف المجهر، وكيف يحدد تكبير المجهر

14- اكتب ما تعرفه عن أنبوبة كبلر. وكيف نحدد تكبير أنبوبة كبلر

15- صف أنبوبة غاليلو

16- صف منظار فحص العين، وكيف يصلح الطبيب بواسطته عيب النظر.