

الفصل السادس 1/ طبيعة الضوء وانتقاله

(6-1) طبيعة الضوء:-

في عام (1670) أستطاع هويكنز (Huygrns) أن يفسر قانوني الانعكاس (Reflection) والانكسار (Refraction) على أساس النظرية الموجية (Wave Theory) والتي لم تلاقي قبولا حسنا آنذاك، لأسباب مختلفة، وفي عام (1827) أظهرت تجارب يونك (Young) على تداخل الضوء وكذلك تجارب فوكو (Foucault) وفريسنل (Fresnel) حول قياس سرعة الضوء في السوائل عدم صلاحية نظرية الجسيمات المادية للضوء في تفسير بعض الظواهر مثل الانكسار المزدوج في بعض البلورات أن هذه التجارب وما أعقبها من تجارب حول ظاهرة الحيود (Diffraction) أدت إلى ترشيح النظرية الموجية للضوء التي تم تثبيت مقوماتها النظرية على يد ماكسويل (Maxwell) فقد أثبت أن كل دائرة كهربائية يمر فيها تيار متناوب تشع موجات كهرومغناطيسية تقارب $(3 \times 10^8 \text{ m/sec})$. وقد تلي ذلك الإثبات العلمي على يد هيرتز (Hertz) فقد اثبت تجريبياً أن الموجات القصيرة المنبعثة من دائرة كهربائية متذبذبة لها نفس خواص موجات الضوء من تداخل وحيود واستقطاب وما شابه ذلك.

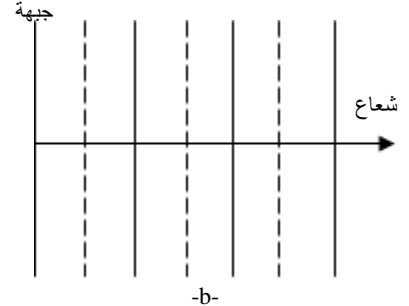
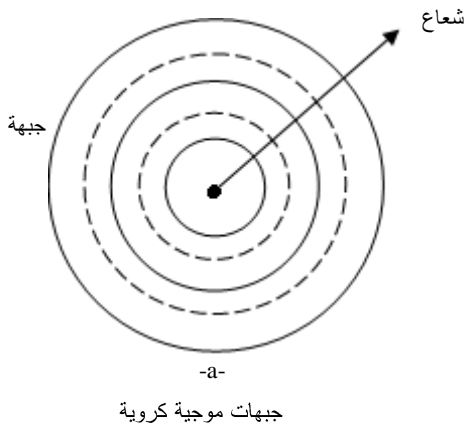
ولقد استجبت في مطلع القرن العشرين ظواهر طبيعية كظاهرة التأثير الكهروضوئي (photoelectric effect) عجزت النظرية الموجية عن تفسيرها مما دفع اينشتاين (Einstein) عام (1905) إلى استعارة فكرة الفوتون (photon) التي قدمها بلانك قبل ذلك ببضع سنين واستعملها الأول في تفسير هذه الظاهرة الجديدة فقد افترض أن الطاقة التي تحملها حزمة ضوئية لا تتوزع في الفراغ في المجالين الكهربائي والمغناطيسي للموجة وإنما تتركز في علب صغير أو فوتونات وبذلك أبقى على صورة ما للنظرية الموجية إذ أن للفوتون ترددا معينا والطاقة التي يحملها تتناسب وهذا التردد.

أن تركيز الطاقة في الفوتون يجعل من الممكن تفسير ظاهرة التأثير الكهروضوئي على أنها انتقال مباشر للطاقة بين الفوتون والإلكترون من إلكترون السطح الحساس الذي يسقط عليه الضوء. ولقد دعم هذه الصورة الجديدة للضوء تشتت كومبتن (Compton scattering) التي تنتج عند اصطدام فوتون وإلكترون ضعيف الارتباط بالذرة. وتبرهن هذه الظاهرة أن كلا من الفوتون والإلكترون يتصرفان قبل التصادم وبعده وكأنهما جسيمان ماديان لهما طاقة وزخم يخضعان لقانوني حفظ الطاقة وحفظ الزخم.

وهناك أدن ظواهر تؤكد الطبيعة الموجية للضوء وأخرى تشير إلى الطبيعة المادية له ويبدو أن التفكير الفيزيائي السائد اليوم يقبل الازدواجية في طبيعة الضوء فهو موجة وهو مادة في الوقت ذاته بل أن الفيزياء الكمية (Quantum physics) تقبل هذا المبدأ بالنسبة للضوء والدقائق المادية (مثل الإلكترونات والبروتونات....) على حد سواء.

(6-2) جبهة الموجة والشعاع (Wave front and ray)

تعالج مسألة انتقال الضوء بنجاح على أساس النظرية الموجية، وقد وجد أنه من المناسب أن يمثل سلسلة الموجات باستعمال ما يسمى بجبهات الموجات، وتعرف الجبهة بأنها المحل الهندسي لجميع النقاط التي لها نفس الطور (phase) وكما هو موضح بالشكل (1).



(تقترب الجبهة الكروية من جبهة مستوية إذا ابتعدنا كثيراً عن مصدر هذه الموجات حيث نصف قطر الكرة كبيراً)

الشكل (1) جبهات الموجة

تمثل الموجات الضوئية المنقولة أحياناً بواسطة الأشعة بدلاً من جبهات الموجة ويمثل الشعاع مسار الجسم المادي في نظرية الجسيمات المادية للضوء أما في النظرية الموجية فإنه يمثل خطأ وهمياً يرسم باتجاه انتقال الموجة لذلك تمثل الأشعة في الشكل (1-a) بأنصاف أقطار الجبهات الكروية وفي الشكل (1-b) بمستقيمات عمودية على الجبهات المستوية وبصورة عامة يكون الشعاع خط مستقيمات عمودية على الجبهة إذا كان الوسط متجانساً أما عند السطوح الفاصلة بين وسطين مختلفين كالماء والهواء فإن الشعاع يغير اتجاهه ولكنه يبقى مستقيماً في الوسطين (المتجانسين).

(6-3) قاعد هويكنز (Huygen's principle):-

تمكننا قاعدة هويكنز من تحديد الشكل الذي ستكون عليه جبهة الموجة إذا كان هذا الشكل معروفاً في أية لحظة زمنية سابقة. وتنص هذه القاعدة على أنه يمكن اعتبار أية نقطة من نقاط جبهة الموجة مصدراً لموجات (wavelets) ثانوية تنتشر من مراكزها في جميع الاتجاهات بسرعة تساوي سرعة انتقال الموجة في الوسط نفسه وبذلك يكون شكل الجبهة في أية لحظة زمنية هنا تالية ممثلاً بشكل غلاف هذه الموجات الثانوية. ويمثل الغلاف هنا سطحاً مماساً لجبهات الموجات الثانوية.

(6-4) معامل الانكسار (Index of Refraction):-

تسير الموجات الضوئية جميعاً بسرعة واحدة في الفراغ ولكن سرعتها تتباين في الأوساط المادية ويؤدي ذلك الى ظاهرة التفريق أو (التحلل الضوئي) (dispersion). ويعرف معامل الانكسار (Index of Refraction) لمادة ما ولموجة ضوئية معينة بأنه النسبة بين سرعة الضوء في الفراغ (C) وسرعة تلك الموجة في المادة (v) ويرمز له بالرمز (n) وهو عدد مجرد من الوحدات أي أن:

$$n = \frac{C}{v} \dots\dots(1)$$

(6-5) أطوال الأمواج الضوئية:-

أن اقصر موجة تؤثر في حاسة البصر هي التي طولها حوالي (0.00004 cm) وهو طول موجة الضوء البنفسجي. أما أطول موجة فهي التي طولها (0.0007 cm) وهو طول موجة الضوء الأحمر، ويقع بينهما ما يسمى بالطيف المنظور (Visible spectrum). ومن العلاقات الأساسية التي تصح لكافة أنواع الموجات العلاقة بين سرعتها (C) وطول موجتها (λ) وترددها (γ) وهي:-

$$C = \gamma \lambda \dots\dots(2)$$

وبما أن سرعة الموجة تتغير من وسط إلى آخر بينما يبقى التردد ثابتاً (أي عدد الموجات التي تعبر أي مقطع في الوسط في وحدة الزمن). لذلك فإن طول الموجة يتغير من وسط إلى آخر، ففي الماء مثلاً يكون طول الموجة الضوئية ثلاثة أرباع طولها في الفراغ لأن سرعة الضوء في الماء تعادل ثلاثة أرباع قيمتها في الفراغ .

(6-6) الطيف الكهرومغناطيسي (Electromagnetic spectrum):-

أن الموجات المنبعثة من المصادر الضوئية تشع من قبل ذرات وجزيئات المصدر وتتراوح أطوالها من الأشعة تحت الحمراء الطويلة إلى الأشعة المنظورة إلى الأشعة فوق البنفسجية ولكي تكون عملية الإشعاع ممكنة يجب أولاً أن تحرض أو تهيج الذرات و الجزيئات بشيء من الطاقة الإضافية كذلك التي تنتج من الطاقة الحرارية للجزيئات أو عن طريق التصادم في حالة التفريغ الكهربائي حيث تخزن الذرات هذه الطاقة وقتياً ثم تشعها بشكل موجات كهرومغناطيسية وهذه ظاهرة كمية (Quantum phenomena) يزداد فيها تردد الموجات المشعة كلما ازدادت الطاقة المرافقة لعملية الإشعاع. وتشارك الإلكترونات الخارجية للذرة في عملية الإشعاع هذه ولقيم معتدلة من طاقة التحريض أما إذا ازدادت هذه الطاقة فإنه يصبح بالإمكان التأثير على الإلكترونات الداخلية للذرة وزحزحتها عن مواقعها وينتج في هذه الحالة أشعاع يتميز بأموال قصيرة الأطوال. وعندما تتباطأ الإلكترونات السريعة نتيجة مرورها في وسط مادي يصاحب تباطؤها انبعاث أمواج تتراوح أطوالها بين (10⁻⁵ cm) و (10⁻¹⁰ cm) تسمى بالأشعة السينية (X-Rays).

ونستطيع أن نحصل على موجات أقصر بهذه الطريقة لو لا الصعوبات في الحصول على الإلكترونات ذات الطاقة الأعلى من ذلك. وهناك أمواج ذات أطوال أقصر مما ذكرنا ترافق عملية انحلال نواة الذرة المشعة وتسمى بأشعة كاما (Gamma Rays) وينبعث كذلك عند انحلال بعض النويات المشعة أشعة أخرى عرفت بجسيمات ألفا (Alpha) وجسيمات بيتا (Beta) لجهل طبيعتها. أن الطيف الكهرومغناطيسي هو طيف متصل من موجات أشعة كاما من جهة الأمواج الراديوية من جهة أخرى وكل منطقة تتداخل مع المنطقة التي تسبقها والتي تليها.

مثال: جد النسبة بين سمك طبقة من الماء ($n_1=1.33$) وطبقة من الزيت ($n_2= 1.47$) التي تجعل أقصر زمن لاختراقها من قبل الضوء متساويا.

الحل/ نفرض أن سمكي طبقتي الماء والزيت هما d_1 ، d_2 على التوالي وأن زمن أختراقها هو t وسرعة الضوء فيهما v_1 و v_2 يكون حينئذ:-

$$n_1 = \frac{C}{v_1} \quad \text{و} \quad n_2 = \frac{C}{v_2}$$

من هاتين العلاقتين نجد أن:-

$$\begin{aligned} \frac{v_1}{v_2} &= \frac{n_2}{n_1} \\ \text{وأن} \quad t &= \frac{d_1}{v_1} \quad \text{و} \quad t = \frac{d_2}{v_2} \\ \therefore t &= \frac{d_1}{v_1} = \frac{d_2}{v_2} \\ \therefore \frac{d_1}{d_2} &= \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1.47}{1.33} = 1.11 \\ \therefore \frac{\text{سمك طبقة من الماء}}{\text{سمك طبقة من الزيت}} &= 1.11 \end{aligned}$$

مثال: / أحسب عدد الأمواج المارة في صفيحة زجاجية سمكها d ومعامل انكسارها n عندما تخترقها موجة ضوئية طولها λ_o في الفراغ. /الحل

$$\begin{aligned} \text{عدد الموجات في الزجاج} &= \frac{d}{\lambda} \\ \text{حيث } \lambda &\text{ هو طول الموجة الضوئية في الزجاج} \\ n &= \frac{C}{v} \quad ; \quad C = \gamma \lambda_o \quad ; \quad v = \gamma \lambda \end{aligned}$$

ينتج إذن الآتي

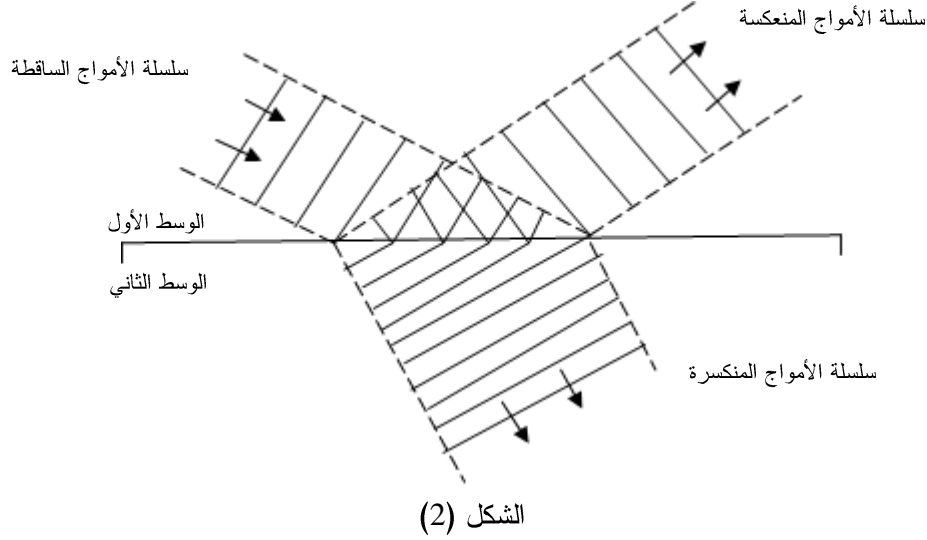
$$\begin{aligned} n &= \frac{\lambda_o}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{\lambda_o}{n} \\ \therefore \text{عدد الموجات في الزجاج} &= \frac{d \times n}{\lambda_o} \end{aligned}$$

ملاحظة: أن سرعة الضوء تتغير بتغير الوسط المادي عنها في الفراغ وهذا التغير يعود إلى تغير في طول الموجي علماً بأن التردد يبقى ثابت لذلك نجد أن:

$$\left. \begin{aligned} C &= \lambda_o \gamma \\ v &= \lambda \gamma \end{aligned} \right\} \text{تردد ثابت والسرعة متغير حسب الوسط التي تمر فيه الموجة الضوئية}$$

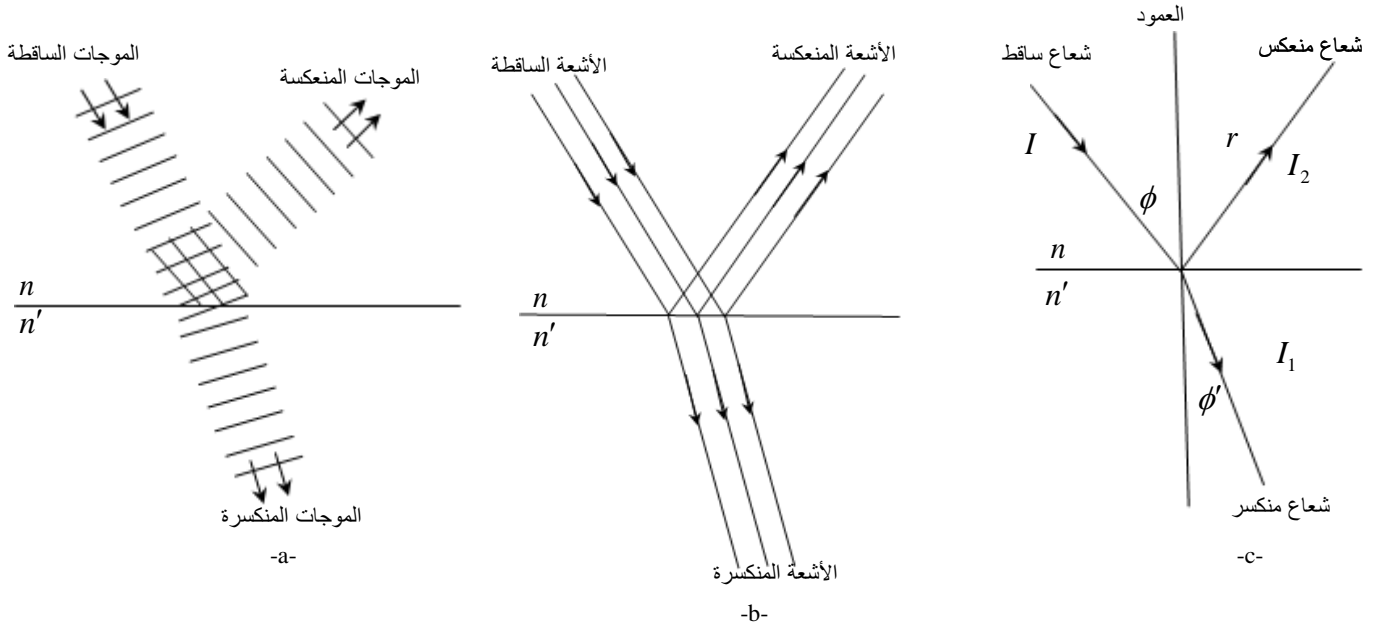
(6-7) الانعكاس والانكسار في السطوح المستوية (Reflection and refraction at plane surface):-

لدراسة ظاهرة انعكاس وانكسار الضوء بواسطة سطوح المرايا والموشير والعدسات سنأخذ الحالة العامة وهي انتشار سلسلة من الموجات الكهرومغناطيسية المستوية (Plane electromagnetic waves) في وسط شفاف، وسقوطها على سطح مستوي يفصل الوسط الأول عن وسط شفاف ثانٍ سرعة انتشار الموجات فيه تختلف عن سرعتها في الأول كما في الشكل (2).



(6-8) قوانين الانكسار والانعكاس (The Laws of refraction and reflection):-

لتسهيل دراسة الضوء، تمثل الموجات بأشعة ضوئية وهي عبارة عن خطوط وهمية مستقيمة ومتوازية تعتبر في اغلب الأحيان عمودية على جبهة الموجة والشكل (3) يمثل انعكاس وانكسار موجات مستوية على سطح يفصل بين وسطين شفافين.



الشكل (3)

قانون الانعكاس:- عندما ينعكس الشعاع الضوئي تكون زاوية الانعكاس مساوية لزاوية السقوط. والشعاع الساقط والمنعكس والعمود على السطح في نقطة السقوط تقع جميعها في مستوى واحد.

قانون الانكسار:- عندما ينكسر شعاع ضوئي يكون

$$n \sin \phi = n' \sin \phi' \dots (3) \text{ (Snell's law قانون سنيل)}$$

والشعاع الساقط والمنكسر والعمود في نقطة السقوط تقع في مستو واحد.

مثال:/(1) لنفرض بأن الوسط العلوي في الشكل (3) يتكون من الماء الذي معامل انكساره (1.33) والوسط السفلي من الزجاج الذي معامل انكساره (1.5). ولنفرض أن الشعاع الساقط يصنع زاوية (45°) مع العمود لذلك سيصبح الشعاع المنعكس زاوية قدرها (45°) مع العمود أيضاً. أوجد زاوية الانكسار.

$$n \sin \phi = n' \sin \phi' \text{ (قانون سنيل)}$$

$$1.33 \sin 45 = 1.5 \sin \phi'$$

$$\sin \phi' = 0.627$$

$$\phi' = \sin^{-1} 0.627$$

$$\phi' = 38.5^\circ$$

(2) افرض أن الشعاع سقط من الوسط السفلي في المثال السابق بزاوية (38.5°). أوجد زاوية الانكسار.

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

$$1.33 \sin 38.5 = 1.5 \sin \phi'$$

$$\phi' = \sin^{-1} 0.702$$

$$\phi' = 44.59^\circ$$

أي أن الشعاع سيسلك الطريق نفسه ولكن في الاتجاه المعاكس كذلك ينعكس قسم من الشعاع الساقط عند السطح بزاوية انعكاس مساوية لزاوية السقوط.

(6-9) الانعكاس الكلي (Total internal reflection):-

تكبر زاوية الانكسار كلما كبرت زاوية السقوط حتى تبلغ زاوية السقوط حداً معيناً تصبح فيه زاوية الانكسار (90°) عندها تنطبق الأشعة المنكسرة على السطح الفاصل بين الوسطين. وتسمى زاوية السقوط لهذه الحالة بالزاوية الحرجة (critical angle). ولزاوية سقوط أكبر من الزاوية الحرجة لا ينفذ الشعاع إلى الوسط الأول كما لو كان ساقط على عاكس وتسمى هذه الظاهرة بالانعكاس الكلي. ولا يجاد الزاوية الحرجة نعوض في قانون سنيل عن زاوية الانكسار (φ') بـ 90 درجة وعن زاوية السقوط (φ) بالزاوية الحرجة والتي سنرمز لها بالرمز (φ_c) أي أن:-

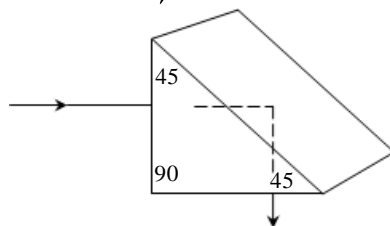
$$\sin \phi_c = \frac{n'}{n} \dots (4)$$

فمثلاً لا يجاد الزاوية الحرجة لسطح الهواء - الزجاج على فرض أن معامل انكسار الزجاج يساوي (1.5) عندئذ

$$\sin \phi_c = \frac{n'}{n} = \frac{1}{1.5} = 0.67$$

$$\phi_c = \sin^{-1} 0.67 \Rightarrow \phi' = 42^\circ$$

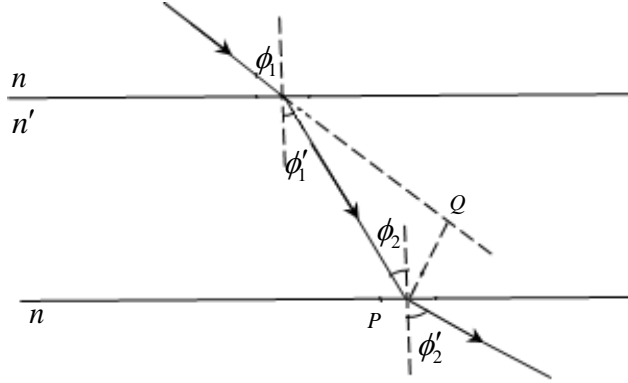
ولكون هذه الزاوية أقل بقليل من 45 درجة، شاع استعمال المواشير ذات الزوايا (45° - 90° - 45°) كسطوح للانعكاس الكلي في الأجهزة الضوئية والشكل (4) يبين أبسط أنواعها.



الشكل (4)

(6-10) الانكسار في لوح متوازي السطحين (Refraction by parallel plate):-

أن الشعاع النافذ من سطح السفلي للوح يكون موازياً للشعاع الساقط على سطحه العلوي أي أن الشعاع لا ينحرف عند مروره خلال اللوح وإنما يزاح عن اتجاهه بمسافة مقدارها (PQ) كما في الشكل (5).



الشكل (5)

نجد من قانون سنيل أن

$$n \sin \phi_1 = n' \sin \phi_1'$$

$$n \sin \phi_2 = n' \sin \phi_2'$$

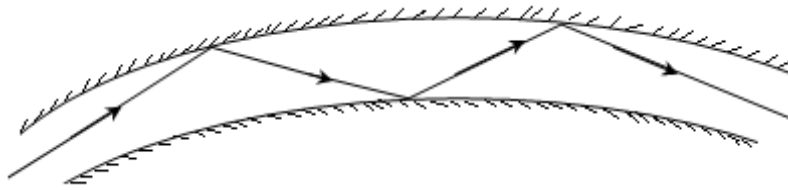
وواضح من الشكل أن

$$\phi_1' = \phi_2'$$

وهذا يعني أن الشعاع لا ينحرف عند مروره خلال اللوح وإنما يزاح عن اتجاهه كما هو مذكور سابقاً.

(6-11) بصريات الألياف (Fiber optics):-

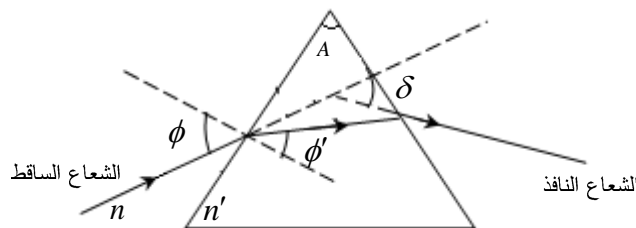
من التطبيقات المهمة على ظاهرة الانعكاس الكلي إضافة إلى استخدامها في النواظير ومراقب الغواصات، هو نقل الضوء والصورة بواسطة ألياف شفافة مصنوعة من اللدائن أو الزجاج حول مسارات مقوسة لاحظ الشكل (6) وتصنع هذه الألياف على شكل حزم، ويكون قطر كل ليفة في حدود 2 مايكرون وبأطوال 4 أمتار. وبهذه الطريقة يمكن إنارة المخاليط المعرضة للانفجار أو رؤية المعدة وتجاويف الجسم الأخرى، وكلما كان عدد الألياف كبيراً ودقيقة ازدادت الصورة وضوحاً، لأن كل ليفة تنقل جزءاً من صورة الجسم. لذلك هذه الطريقة ذات أهمية كبيرة في ميدان الطب والصناعات الدقيقة.



الشكل (6) انتقال الضوء في الألياف

(6-12) الانكسار في الموشور (Refraction by a prism):-

أفرض أن شعاعاً ضوئياً قد سقط بزاوية مقدارها (ϕ) على سطح موشور معامل انكسار (n) وزاوية رأسه A وببين الشكل (7) الشعاع الساقط والمنكسر والنافذ.



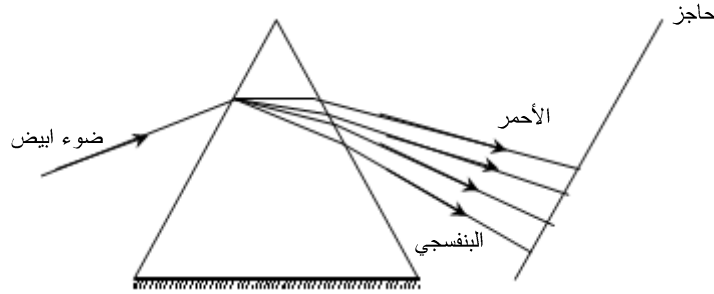
الشكل (7)

تعرف (δ) زاوية الانحراف بالزاوية المحصورة بين اتجاه الشعاع الساقط على الموشور واتجاه النفاذ منه. وعندما تكون الزاوية التي يدخل فيها الضوء من السطح الأول للموشور مساوية للزاوية التي يخرج منها من السطح الثاني، تأخذ زاوية الانحراف أصغر قيمة لها وتسمى في هذه الحالة بزاوية الانحراف الصغرى (δ_m) التي ترتبط مع معامل انكسار الموشور (n') بالعلاقة التالية:-

$$\frac{n'}{n} = \frac{\sin (A + \delta_m) / 2}{\sin A / 2} \dots\dots(5)$$

(6-13) تحليل الضوء (Dispersion):-

أن أغلب الأشعة الضوئية خليط من موجات ذات أطوال مختلفة قيمتها تقع على امتداد الطيف المرئي وهذه الموجات لها نفس السرعة في الفراغ، وتتغير في الأجسام المادية تبعاً لاختلاف طول الموجة، أي أن معامل الانتشار لمادة ما هو إلا دالة لطول الموجة النافذة فيها. ولهذا السبب تظهر المادة الشفافة خاصية تحليل الضوء لاختلاف انكسار الأمواج المختلفة فيها تبعاً لطول موجة كل منها. كما هو مبين في الشكل (8):-



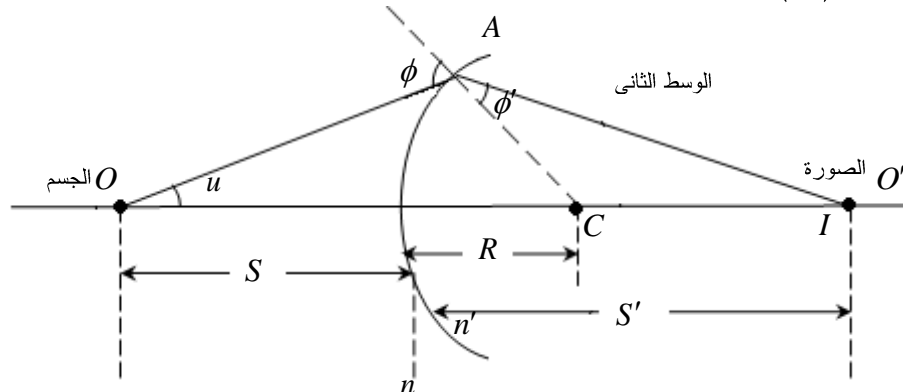
الشكل (8) الضوء النفاذ من الموشور ينتشر مكوناً ما يشبه مروحة يدوية شعاعيه الشكل ألوانها تكون الطيف الضوئي.

(6-14) الانكسار والانعكاس عن سطح كروي:-

أن هذا الفرع من البصريات يسمى بالبصريات الهندسية (Geometrical optics) وهي تقتصر عموماً على دراسة الأشعة التي تصنع زوايا صغيرة مع المحور البصري أي الأشعة (Paraxial rays).

(6-15) الانكسار عن السطوح الكروية:-

نأخذ جسماً صغيراً يقع على المحور في النقطة (O) وعلى بعد (S) من السطح الكروي الفاصل بين الوسيطين الشفافين الذي نصف قطر تكور (R) كما في الشكل (9). فإذا أخذنا الشعاع (OB) الذي يصنع زاوية صغيرة (u) مع المحور البصري (O O')، فإنه يصنع زاوية سقوط (ϕ) وزاوية انكسار (ϕ') طبقاً لقانون سنيل.



الشكل (9) يوضح انكسار الضوء خلال وسطين شفافين يفصلهما سطح كروي.

$$\frac{n}{S} + \frac{n'}{S'} = \frac{n' - n}{R} \dots (6)$$

حيث أن (n): معامل انكسار الوسط الأول (السطح الكروي).

(n'): معامل انكسار الوسط الثاني.

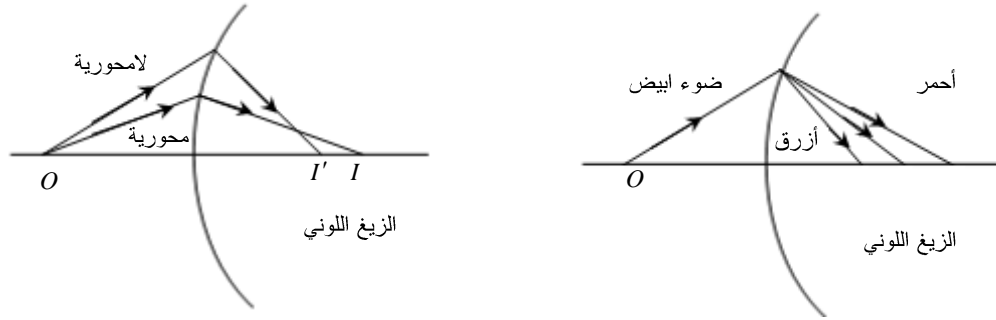
(R): نصف قطر تكور السطح الكروي.

(S): بعد الصورة عن السطح الكروي.

(S'): بعد الجسم عن السطح الكروي.

أن المعادلة (6) تعطي العلاقات العامة للانكسار على السطوح الكروية وهي في غاية الأهمية لأنها تصح على الأشعة المحورية وللعنسات والمرابا المصححة للزيف الكروي (Spherical aberration).

أما الأشعة البعيدة عن المحور فأنها لا تتجمع في نفس النقطة (I) المتكونة بالأشعة المحورية، لأن التقريب السابق الذكر للنسب المثلثية لا يصح. ولهذا السبب تكون الصورة المتولدة في العدسة أو المرآة المنفردة مشوشة (Blurred) ويسمى هذا العيب بالزيف الكروي. أما اعتماد بعد الصورة على معامل انكسار الوسطين في المعادلة (5) فإنه يؤدي إلى تحليل السطح، ويسمى هذا العيب بالزيف اللوني (chromatic aberration) كما في الشكل (10).



الشكل (10) يوضح بعض عيوب السطوح الكاسرة.

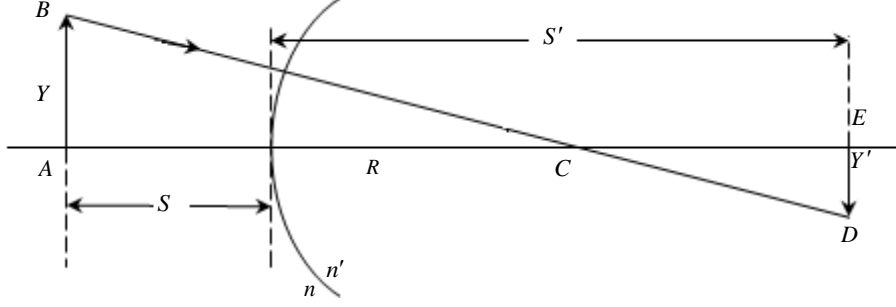
(6-16) اصطلاح الإشارات (Sign convention):-

عند تطبيق العلاقة (5) نواجه حالات يقع فيها الجسم إلى يمين السطح الكروي وإلى يسار في حالات أخرى قد تقع الصورة إلى يمين السطح الكروي أو يساره وقد تقع الأجسام وصورها فوق المحور البصري أو تحته لذلك فأن اختيار اصطلاح للإشارات الجبرية للكميات (Y, R, S') و (Y') (طول الصورة) يجعل غير الضروري اشتقاق علاقة خاصة لكل من هذه الحالات الكثيرة بل يصبح ممكناً استعمال العلاقة (5) لكافة الحالات المارة الذكر وكمايلي:-

- 1- يرسم مصدر الضوء (الجسم) إلى يسار السطح الكروي دائماً.
- 2- يعتبر بعد الجسم (S) موجباً عندما يكون الجسم إلى يسار السطح وسالباً إذا كان يمينه.
- 3- يعتبر بعد الصورة (S') موجباً إذا كان إلى يمين يسار السطح وسالباً إذا كان إلى يساره.
- 4- يعتبر نصف قطر التكور (R) موجباً إذا كان مركز التكور (C) إلى اليمين وسالباً إذا كان إلى يسار السطح الكروي.
- 5- يكون طول الجسم (Y) أو الصورة (Y') موجباً إذا كان معتدلاً وسالباً إذا كان مقلوباً. وتكون جهة الشعاع الساقط على السطح هي جهة الجسم.

(6-17) التكبير الجانبي أو المستعرض:-

يعرف التكبير (m) للصورة بأنه النسبة بين طول الصورة (Y') إلى طول الجسم (Y) مع أخذ الإشارة بنظر الاعتبار طبقاً لاصطلاح الإشارات الأنفة الذكر. أي التكبير يكون سالماً للصورة المقلوبة (حقيقة عادة) موجباً للصورة المعكولة (خيالية عادة). ولحساب التكبير الناتج من انكسار الضوء خلال سطح كروي يفضل وسطين نستخدم المعادلة التالية حسب الشكل (10).



$$m = \frac{Y'}{Y} = -\frac{n S'}{n' S}$$

$$m = -\frac{n S'}{n' S} \dots (7)$$

وتسمى المعادلة (6) بقانون التكبير للسطح الكاسر.

(6-18) تطبيقات (Applications):-

يمكننا استخدام المعادلات (3)، (6)، (7) من اشتقاق اغلب قوانين البصريات الهندسية في المرايا والعدسات وبسهولة وسوف نبين كيف يتم ذلك لبعض الحالات المهمة.

a- البعدان البؤريان (First and second focal lengths):-

إذا وضع جسم على بعد يسمى البعد البؤري الأول (f_1) من السطح الكاسر فإن الأشعة التي تغادر ذلك السطح تكون متوازنة، أي أن الصورة تكون في اللانهاية.

$$S = f_1 \quad \text{و} \quad S' = \infty$$

وباستخدام المعادلة (6) نجد أن:-

$$\therefore \frac{n}{f_1} + \frac{n'}{\infty} = \frac{n' - n}{R}$$

$$f_1 = \frac{n R}{n' - n}$$

أما إذا كان الجسم في اللانهاية ($S = \infty$) فإن الأشعة تتجمع بعد انكسارها في البؤرة الثانية وعلى بعد (f_2) من السطح الكروي ويسمى بالبعد البؤري الثاني ويحسب كالآتي:-

$$\frac{n}{\infty} + \frac{n'}{f_2} = \frac{n' - n}{R}$$

$$f_2 = \frac{n' R}{n' - n} \Rightarrow \therefore \frac{f_2}{f_1} = \frac{n'}{n}$$

b- العمق الظاهر والحقيقي (Apparent and real depths):

إذا كان السطح الكاسر للضوء مستويا كما هي الحالة لسطح الماء أو سطح زجاجي مستو فأن.

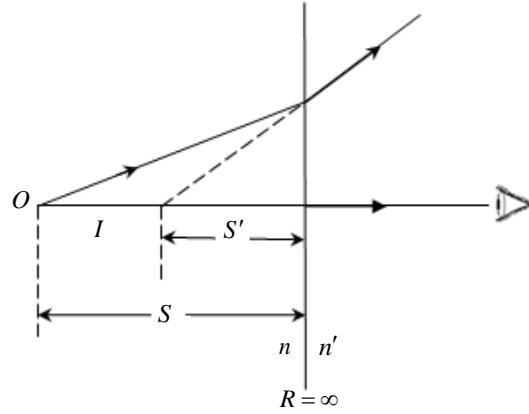
$$R = \infty$$

لذلك تصبح العلاقة (6) بالشكل التالي:-

$$\frac{n}{S} + \frac{n'}{S'} = \frac{n' - n}{\infty}$$

$$\frac{n}{S} + \frac{n'}{S'} = 0$$

$$\frac{S}{S'} = -\frac{n}{n'} \dots\dots(8)$$



الشكل (11)

وتسمى المسافة (S) بالعمق الحقيقي، (S') بالعمق الظاهري والإشارة السالبة تدل على أن الصورة واقعة في جهة الجسم دائماً كما في الشكل (11) أي إلى يسار السطح الفاصل بين الوسطين كذلك فأن التكبير (m) يحسب من المعادلة (7) هكذا:

$$m = -\frac{n S'}{n' S} = -\frac{n}{n'} \left(\frac{-n'}{n} \right) = +1$$

أي أن الصورة غير مكبرة ومعتدلة (خيالية).

ملاحظة:- أن المعادلة (8) تشير إلى أن العمق الحقيقي قد يكون أكثر أو أقل من العمق الظاهري تبعا لقيمة n و n' فإذا كان الوسط الثاني هواء (n' + 1) فأن:-

$$n = -\frac{S}{S'}$$

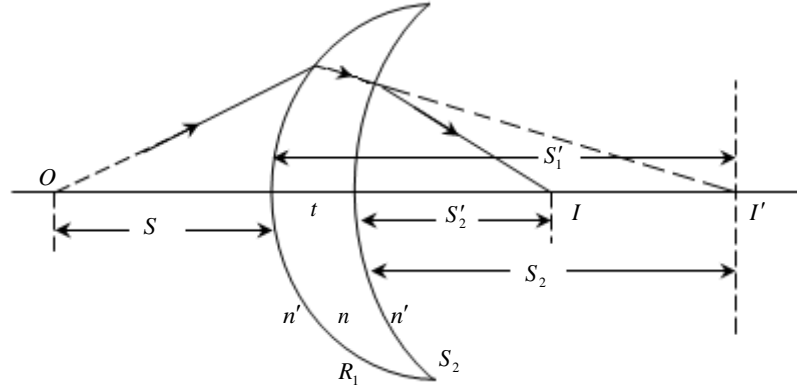
مع ملاحظة الإشارة السالبة للعمق الظاهري (S') عند التعويض.

c- العدسات الرقيقة (Thin Lenses):

العدسة: جسم بصري محاط بسطحين كاسرين لهما محور مشترك، فإذا كان للعدسة سطحان فقط، سميت العدسة بسيطة (Simple lenses) وإذا كان لها أكثر من سطحين، سميت عدسة مركبة (Compound lenses) أن جميع العدسات الجيدة هي من النوع المركب. أي أنها تتكون من مجموعة من العدسات البسيطة المتحددة المحور. وقد تكون متلاصقة أو مفصولة بعضها عن بعض.

ففي الشكل (12) عدسة هلالية نصف قطر تكور وجهيها R₁ و R₂ مغمور في وسط انكسار (n') ومعامل انكسار مادتها (n). تأخذ شعاعاً محورياً يصدر من الجسم في (O) الذي يبعد (S) عن السطح الأول وعند انكسار الشعاع في الوجه الأول يكون صورة (I') وهمية وعلى بعد (S'₁) طبقاً للمعادلة (9):-

$$\frac{1}{S} + \frac{1}{S'} = \frac{1}{f} \dots\dots(9)$$



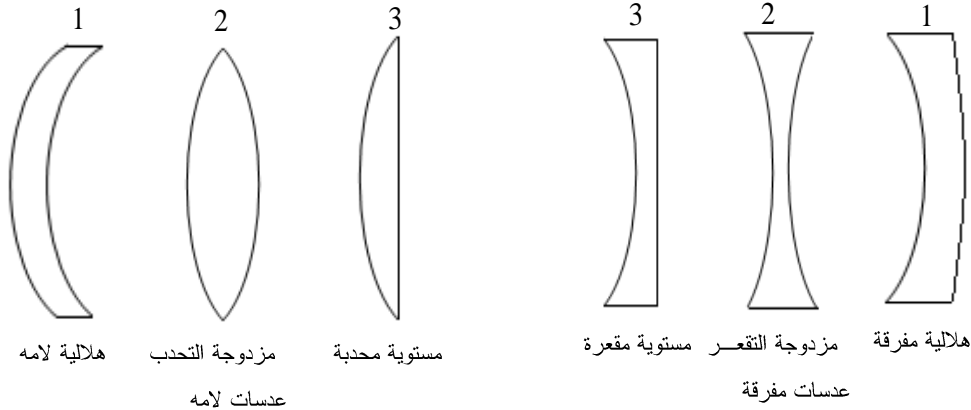
الشكل (12) تكوين الصورة في العدسة الرقيقة.

وتعطي هذه المعادلة (9) العلاقة للانكسار على العدسات الرقيقة وتسمى هذه المعادلة بمعادلة كاوس نسبة إلى العالم الرياضي كارل كاوس علماً بأن:

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \dots\dots(10)$$

وتسمى المعادلة (10) بمعادلة صانعي العدسات (lens makers equation).

ملاحظة:- تكون العدسة لامة (converging) إذا كان بعدها البؤري (f) موجباً، ومفرقة (Diverging) إذا بعدها البؤري سالباً، والشكل (13) يمثل بعض الأنواع الشائعة من العدسات.



الشكل (13) بعض الأنواع الشائعة من العدسات الرقيقة.

ولحساب التكبير الكلي للعدسة الرقيقة نستخدم المعادلة التالية:-

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

والإشارة السالبة تدل على أن الصورة المقلوبة (الحقيقية) تتكون من خلف العدسة ألامه بالنسبة للجسم (لأن S ، S' موجبان) والعكس صحيح.

d- انعكاس الضوء وقوانين المرايا:-

يمكن اشتقاق قوانين الانعكاس من قوانين الانكسار السابقة وباستخدام العلاقة (الانعكاس).

$$n = n'$$

لأن الضوء الساقط يعود إلى الوسط الذي قدم منه وباتجاه معاكس للسقوط. حينئذ يصبح قانون سنيل بالشكل الآتي:-

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

$$\therefore \phi = -\phi' \dots (11)$$

أي أن زاوية السقوط تساوي زاوية الانعكاس وتقع على الجهة الأخرى من العمود (الإشارة السالبة).

كذلك المعادلة (5) تصح لجميع المرايا الكروية بالشكل التالية:-

$$\frac{1}{S} - \frac{1}{S'} = -\frac{2}{R}$$

وتكون R سالبة للمرايا المقعرة (لامه) وموجبة للمرايا المحدبة (مفرقة) وتساوي ∞ للمرايا المستوية (حينئذ $S = S'$) ويكون التكبير لجميع المرايا الكروية (والمستوية):-

$$m = -\frac{n S'}{n' S} = \frac{S'}{S}$$

وبما أن $S = S'$ للمرايا المستوية فأن ($m = +1$) أي أن المرآة المستوية تولد صورة خيالية وغير مكبرة.

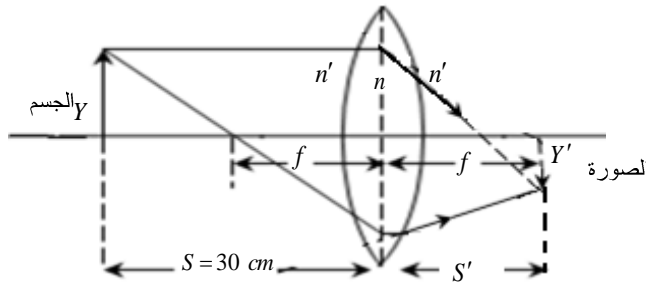
وإذا كان ($S = \infty$) فأن $S' = f$ (لاحظ $f_1 = f_2 = f$).

$$\therefore -\frac{1}{f} = -\frac{2}{R}$$

$$\therefore f = \frac{R}{2}$$

وتكون f و R نفس الإشارة.

مثال:/ قضيب زجاجي طوله (10 cm) موضوع في الهواء، محدب الوجهين نصف قطر تكور الوجه الأول (10 cm) والثاني (20 cm)، فما موقع وأوصاف الصورة النهائية لجسيم صغير يقع إلى يسار الوجه الأول وعلى بعد (30 cm) منه (معامل انكسار الزجاج 3/2).



الشكل (14)

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

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{1.5}{1} - 1 \right) \left(\frac{1}{10} - \frac{1}{(-20)} \right) \Rightarrow$$

$$\frac{1}{f} = 0.5 \times (0.1 + 0.05)$$

$$f = 13.3333 \text{ cm}$$

$$\frac{1}{S} + \frac{1}{S'} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{30 \text{ cm}} + \frac{1}{S'} = \frac{1}{13.3333 \text{ cm}}$$

$$\frac{1}{S'} = \frac{1}{13.3333} - \frac{1}{30} \Rightarrow$$

$$\frac{1}{S'} = 0.075 - 0.033$$

$$S' = +23.980 \text{ cm}$$

$$m = \frac{-S'}{S} = \frac{-23.980}{30} = -0.7993$$

بما أن (S') موجب أذن الصورة تقع يمين العدسة وتكبير سالباً أذن الصورة مقلوبة (حقيقية عادة).

أي أن الصورة تقع على بعد (23.980 cm) إلى يمين السطح الثاني مقلوبة، حقيقية و مصغرة لأن قيمة التكبير الكلي ($m = -0.7993$) كما موضح في الشكل أعلاه

مثال: /مرآة كروية مقعرة (concave) نصف قطر تكورها (50 cm) أين يجب أن يقع جسم بالنسبة للمرآة بحيث تكون صورته مكبرة أربع مرات؟

الحل/ بما أن المرآة مقعرة لذلك فأن نصف قطر تكورها يكون سالباً وكذلك بعدها البؤري (f).

$$\therefore f = \frac{R}{2} = -\frac{50}{2} = -25 \text{ cm}$$

وهناك حالتان تكون فيها الصورة مكبرة أربعة أمثال الجسم:-

1- عندما تكون الصورة خالية وخلف المرآة.

$$\therefore m = 4 = \frac{S'}{S}$$

$$\therefore S' = 4 \times S$$

وبتطبيق القانون التالي:-

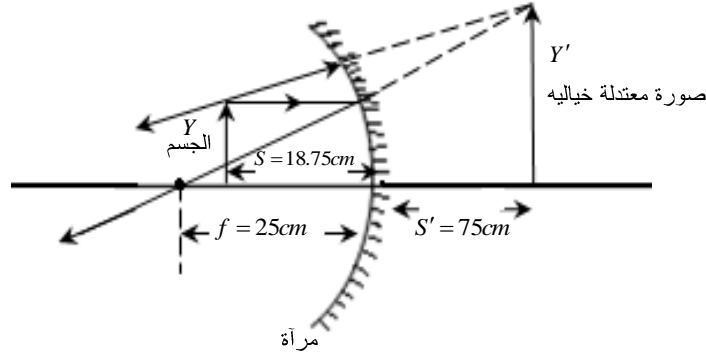
$$\frac{1}{S} - \frac{1}{S'} = -\frac{2}{R} \Rightarrow \frac{1}{S} - \frac{1}{4.5} = -\frac{2}{(-50)} = \frac{1}{25}$$

$$\therefore S = \frac{75}{4} = 18.75 \text{ cm}$$

أي أن الجسم يقع بين البؤرة والمرآة.

بعد الصورة $S' = 75 \text{ cm}$

بما أن (S) قيمة موجبة أذن الجسم يقع إلى يسار السطح العاكس وبما أن ($R = -50 \text{ cm}$) و ($f = 25 \text{ cm}$) وأن ($S = 18.75 \text{ cm}$) أذن الجسم يقع بين المرآة والبؤرة. وأن (S') قيمة موجبة أذن الصورة تقع إلى يمين السطح الكاسر وبما أن التكبير ($m = +$) أذن الصورة معتدلة (خيالية عادة).



2- عندما تكون الصورة حقيقية (مقلوبة) حينئذ يكون:-

$$m = -4 = \frac{S'}{S}$$

$$\therefore S' = -4 S$$

وبالتعويض نحصل:

$$\frac{1}{S} - \frac{1}{S'} = \frac{-2}{R}$$

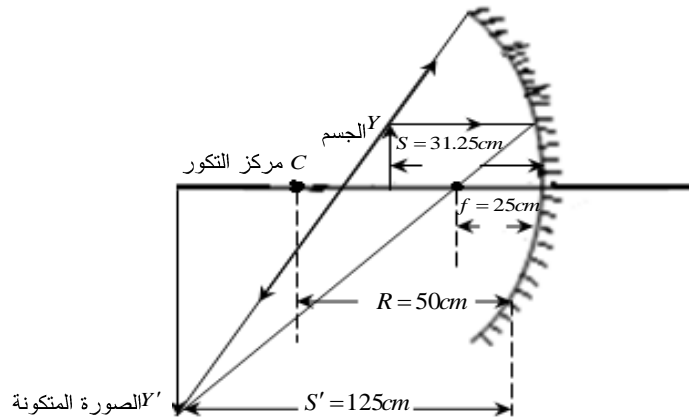
$$\frac{1}{S} + \frac{1}{4S} = \frac{1}{25}$$

$$\therefore S = \frac{125}{4} = 31.25 \text{ cm} \Rightarrow$$

$$S = 31.25 \text{ cm} \text{ بعد الجسم}$$

$$S' = -125 \text{ cm} \text{ بعد الصورة}$$

بما أن (S) قيمة سالبة أذن الجسم يقع إلى يمين سطح المرآة (السطح الكاسر). وبما أن (R = 50 cm) والذي يمثل المسافة بين المرآة ومركز التكور وأن (f = 25 cm) وأن (S = 31.25 cm) أذن الجسم يقع بين مركز التكور والبؤرة. وأن S' قيمة سالبة أذن الصورة تقع إلى يسار السطح العاكس وبما أن التكبير (m = -) أذن الصورة حقيقية (مقلوبة).



مثال:/ عدسة رقيقة هلالية الشكل موضوعة في الهواء ومصنوعة من الزجاج نصف قطر تكور كل من وجهيها (10 cm-) و (20 cm-)، شكل أذناه فما بعده البؤري وما أوصاف الصورة المتكونة لجسم صغير موضوع على بعد (20 cm) إلى يساره.؟ (معامل انكسار الزجاج 1.5).

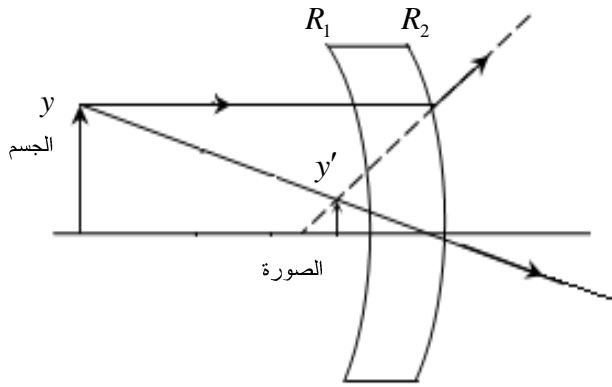
الحل/ بما أن موضوعة في الهواء لذلك نطبق المعادلة أذناه لحساب f :-

$$\begin{aligned}\therefore \frac{1}{f} &= (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \\ \frac{1}{f} &= (1.5-1) \left(\frac{1}{(-10)} - \frac{1}{(-20)} \right) \\ \frac{1}{f} &= -\frac{1}{40} \Rightarrow \\ \therefore f &= -40 \text{ cm}\end{aligned}$$

أن $f = -40 \text{ cm}$.

أن $(f = -)$ لذلك فإن العدسة مفرقة.

ولإيجاد أوصاف الصورة نستخدم المعادلة التالية لحساب بعد الصورة:-



$$\frac{1}{S} + \frac{1}{S'} = \frac{1}{f}$$

$$\therefore \frac{1}{40} + \frac{1}{S'} = -\frac{1}{40}$$

$$S' = 20 \text{ cm}$$

أي أن الصورة إلى جهة الجسم (خيالية) ولحساب التكبير نعوض في المعادلة التالية:-

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

$$m = -\frac{(-20)}{40} = +\frac{1}{2}$$

$$m = +0.5$$

أي إن هذه الصورة معتدلة ومصغره كما هو متوقع من العدسات المفرقة.

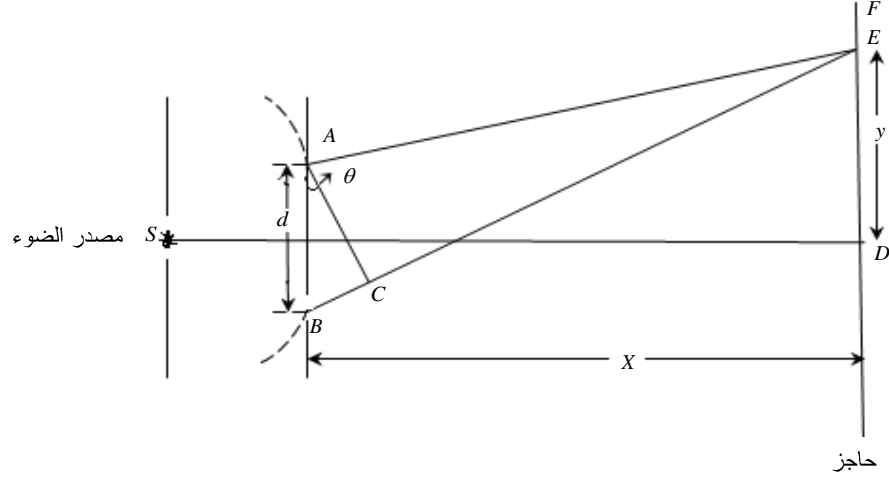
(6-19) تداخل وحيود الموجات الضوئية (Interference and diffraction):-

في سنة (1801) أجرى توماس يونك (Thomas Young) تجربته المعروفة التي اثبت فيها تداخل الضوء وبذلك يكون قد حسم مناقشات من سبقه مع العلماء من أمثال هاكنز و أكد الطبيعة الموجية للضوء بشكل تجريبي قاطع.

استعمل يونك في تجربيه مصدراً ضوئياً موضوعاً خلف حاجز يحتوي على شق ضيق كما في الشكل (15) يليه شق مزدوج (slit double) يبعد شقاه ببعدين متساويين عن الشق (S).

ولقد لوحظ تكون سلسلة متعاقبة من المناطق المضيئة والمظلمة على الحاجز (DF) الواقع على مسافة (X) من موقع الشق المزدوج يظهر فيها الموقع (D) مضيئاً خلافاً لما قد يكون متوقعاً مما يدل على أن الضوء ينحني حول الحواجز والحافات ولا يسير بخطوط تامة الاستقامة وتسمى هذه الظاهرة بالحيود (Diffraction).

ومن الممكن تفسير نمط الأهداب المضيئة والمظلمة المتكونة على الحاجز (DF) على أساس أن الضوء حركة موجية خاضعة لقاعدة هاكنز حيث تعمل كل نقطة من نقاط الجبهة الصادرة عن الشق المنفرد (S) والساقطة على الشق المزدوج (AB) كمصدر لموجات ثانوية تنطلق بنفس الطور نظراً لتساوي بعد (A و B) عن الشق (S) لذلك يتكون هذب مضيء عند التقاء موجتين بطور واحد وهذب مظلم عند التقائهما بطور متعاكس أي يحدث تداخل تقوية عند التقاء قمة بأخرى وتداخل أتلقي عند التقاء قمة بموجة أخرى.



الشكل (15) تتداخل الضوء عند مروره خلال شقين ضيقين متوازيين A و B.

(6-20) الحيود (Diffraction):-

أن الضوء ينحني حول حافات الحواجز التي تعترضه وتنتشر قليلاً في مناطق ظلالها الهندسية ومثل هذه الظاهرة تحدث بوضوح أكبر كلما كان طول الموجة كبيراً بالنسبة لأبعاد الشقوق التي تمر منها الموجة ولذلك فهي أوضح بالنسبة للموجات المائية والصوتية والموجات الراديوية منها للموجات الضوئية المنظورة نظراً لقصر طول موجات الأخيرة بالنسبة للأولى وتسمى هذه الظاهرة بالحيود. ويستند تفسير هذه الظاهرة أيضاً إلى قاعد هاكنز إلا أن في هذه ظاهرة الحيود يدخل في التفسير عدد كبير من المقاطع لجبهة الموجة.

تمارين الفصل السادس

- س1/ سقطت حزمة ضوئية على لوح زجاجي بزاوية (60°) فانكسر قسم منها وانعكس القسم الآخر بحيث صنع الشعاع المنكسر زاوية 90° درجة مع الشعاع المنعكس أوجد معامل انكسار الزجاج.
- س2/ سقط شعاع ضوئي على سطح مستو بفصل وسطين شفافين معامل انكسارهما (1.6) و (1.4) فإذا كانت زاوية السقوط تساوي (30°) درجة وكان منشأ الحزمة الضوئية من الوسط ذا معامل الانكسار العالي أوجد زاوية الانكسار.
- س3/ ما مقدار البعد البؤري لعدسة زجاجية في الهواء إذا كان نصف قطري $(+10 \text{ cm})$ و (-20 cm) .
- س4/ ما مقدار البعد البؤري للعدسة في السؤال السابق رقم (3) لو غمرت في الماء.
- س5/ جسم طوله (1 cm) وضع على بعد (20 cm) من قطب مرآة مقعرة نصف قطر تكورها (50 cm) . أحسب موضع وحجم الصورة المتكونة هل الصورة حقيقية أم خيالية؟ معتدلة أو مقلوبة.
- س6/ قضيب زجاجي اسطواناني الشكل أحد طرفيه سطح كروي، نصف قطره (20 mm) كما هو مبين في الشكل أدناه إذا كان القضيب في الهواء، جد صورة نقطة واقعة على محور القضيب وعلى مسافة (80 mm) من يسار قطب السطح الكروي. إذا غمر القضيب في الماء، فما مسافة الصورة.
- س7/ مرآة مقعرة استخدمت لتكبير خيط المصباح على شاشة تبعد (4 m) أمتار عن المرآة. فإذا كان طول الخيط $(1/2 \text{ cm})$ وارتفاع الصورة المتولدة (40 cm) . فما مقدار البعد البؤري للمرآة وما بعد الخيط عنها.
- س8/ ما هي زاوية الانحراف الصغرى لموشور متساوي الزوايا إذا كان معامل انكساره (1.414) .