كلية العلوم

القسم : **الكيمياء**

السنة : **الاولى**

المادة : فيزياء عامة ١

المحاضرة : السادسة/نظري/

{{ مكتبة A to Z }}

2024 2025

Facebook Group : مكتبة A to Z

كلية العلوم ، كلية الصيدلة ، الهندسة التقنية ، تكنلوجيا المعلومات والاتصالات

يمكنكم طلب المحاضرات برسالة نصية (SMS) أو عبر (What's app-Telegram) على الرقم 0931497960

الفصل الخامس

الضوء

5-1- مقدمة:

من أكثر الموضوعات جاذبية، موضوع الضوء. فنحن نعتمد على حاسة البصر أكثر من أية حاسة أخرى، فهي تمدنا بمعلومات أكثر من جميع الحواس الأخرى مجتمعة، وهي تعتمد بشكل أساسي على الضوء. حيث تعود معظم معرفتنا عن طبيعة الضوء إلى دراسة سلوكه عند اصطدامه بالمادة، كدراسة انعكاسه، وانكساره عندما يمر من وسط إلى آخر. ففي القرن السابع عشر تمت معرفة الكثير عن الضوء مثل الانعكاس، والانكسار، وكيف أن الضوء الأبيض ينطوي على طيف من الألوان. أما في القرن التاسع عشر فقد اكتشف تداخل الضوء، واستقطاب الموجات الضوئية، وقيست سرعة الضوء في الماء والهواء بدقة مقبولة.

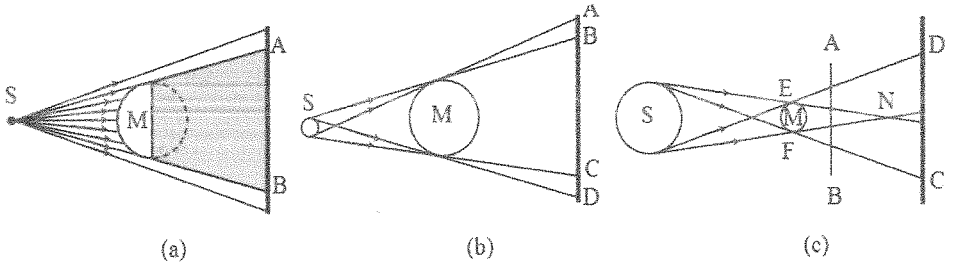
نحن نرى الأجسام بشكل عام بفضل الضوء المنعكس عنها، وتعد الشمس المصدر الرئيس للضوء، إلا أن هناك أجساماً أخرى منيرة تسمى منابع ضوئية، وفي الحقيقة إن أي جسم ترفع درجة حرارته بمقدارٍ كافٍ يصبح مضيئاً. فعند مرور تيار كهربائي في غاز تحت ضغط منخفض يحدث انفراغ *(discharge)*، ويصدر من الغاز ضوء مميز، كذلك المواد الصلبة تصدر ضوءاً عندما تقذف بالإلكترونات، أو بالأشعة فوق البنفسجية. كما يصدر عن بعض التفاعلات الكيميائية ضوء مرئي عند درجات حرارة منخفضة.

أحدَث القرن التاسع عشر زيادة كبيرة جداً في فهمنا لخواص الضوء حيث اكتشف تداخل الضوء، وتبين أن للضوء طبيعة موجية بمعنى أن الضوء عبارة عن أمواج كهرطيسية عرضانية، وتمت دراسة استقطابها، حيث تبين أنّ للضوء المرئي طولاً موجياً، يتراوح بين nm $(380\text{-}780)$، حيث $(1\ nm=10^{-9}m)$ علماً أن هناك إشعاعات تتميز بطول موجي أطول، وأخرى بطول موجي أقصر، وهي أمواج لا تراها العين إلا أنها

تتصف بخصائص فيزيائية مماثلة تماماً لخصائص الضوء المرئي. كما أن الضوء بالإضافة لسلوكه الموجي يسلك سلوكاً جسمياً، ففي بعض التجارب يسلك الضوء سلوكاً جسمياً (مؤلف من جسيمات صغيرة تدعى فوتونات معدومة الكتلة السكونية)، وفي بعضها الآخر يسلك سلوكاً موجياً.

5-2- انتشار الضوء:

ينتشر الضوء بشكل عام وفق خط مستقيم، ولا يكاد ينحني أي انحناء ويمكن استخدام هذه الخاصة في كشف استقامة الأشياء. يمكن التأكد من أن الضوء ينتشر بشكل مستقيم من خلال الأخيلة الواضحة التي يشكلها منبع ضوئي نقطي لجسم ما على شاشة معينة، كما في الشكل (*5-1-a*) أما إذا كان المنبع غير نقطي، فإن حدود الأخيلة تكون غير واضحة تماماً كما في الشكل (*5-1-b*).



الشكل (*5-1*)

وإذا كان المنبع الضوئي أكبر من الجسم كما في الشكل (*5-1-c*)، فإن منطقة الظل تكون المخروط *ENF* الذي يشكل الجسم قاعدة له. فإذا وضعت الشاشة عند *A* تشكلت منطقة ظل صغيرة، وأما إذا وضعت الشاشة عند *N*، فإن منطقة الظل تتقدم وخير مثال على ذلك هو ظاهرة الخسوف. والكسوف فإذا توسط القمر بين الشمس والأرض ألقى القمر بظله على الأرض، وعندها يحدث الكسوف الكلي، أو الجزئي للشمس، فإذا كانت الأرض قريبة بما فيه الكفاية من القمر حدث كسوف كلي، أما إذا كانت الأرض بعيدة عن القمر، يحدث كسوف جزئي. وقد يحدث أن يمر القمر في ظل الأرض فيحدث خسوف للقمر. كما أن آلة التصوير ذات الثقب توضح الانتشار

المستقيم للضوء، حيث تتشكل أخيلة مقلوبة وتبعاً لصغر وكبر ثقب الآلة تتشكل أخيلة واضحة، أو أقل وضوحاً علماً أنه إذا صغر الثقب كثيراً، ظهرت ظواهر الانعراج.

5-3- سرعة الضوء:

إن قيمة سرعة الضوء في الخلاء في الجملة الدولية، هي $c=299792458\ m/sec$، وهي تقرب عادة إلى الرقم $c=3\times10^8\ m/sec$. وقد جرت محاولات حثيثة لقياس سرعة الضوء من قبل غاليلو، ومن بعده الفلكي الدنماركي رومر، ثم العالم الفرنسي فيزو الذي قاس الزمن الذي يستغرقه الضوء للانتقال بين جبلين ذهاباً وإياباً، وكانت المسافة بين الجبلين $8.6\ km$، وكانت قيمة سرعة الضوء c التي أعطتها تجارب فيزو هي $c=3.1\times10^8\ m/sec$، ولكن أول قياسات عالية الدقة هي ما قام بها الأمريكي مايكلسون في عشرينيات القرن العشرين حيث قاس الزمن الذي يستغرقه شعاع ضوئي ذهاباً وإياباً بين قمتي جبلين يبعدان عن بعضهم $70\ km$، فوجد مايكلسون أن سرعة الضوء $c=2.99796\times10^8\ m/sec$ أما التجارب التي قررت القيمة الحالية لسرعة الضوء c كانت في بداية القرن العشرين، وتمت باستخدام قياسات للطول الموجي، والتردد الضوئي المنبعث بالليزر. إن الضوء ينتقل بأقصى سرعة له خلال الفراغ، بمعنى أن سرعته خلال المواد الأخرى أقل دائماً من c. بالإضافة إلى ذلك فإن سرعته خلال المواد المختلفة تعتمد على الطول الموجي للضوء، وعلى المادة نفسها، ويوضح الجدول (*1-5*) سرعة الضوء في بعض المواد عند الطول الموجي للضوء $589\ nm$

المادة	$v\ (10^8\ m/sec)$
الفراغ	*2.99792*
الهواء	*2.9970*
الماء	*2.25*
ايثانول	*2.20*

المادة	$v\ (10^8\ m/sec)$
بنزين	*2*
زجاج كروان	*1.97*
بولي سيترين	*1.89*
زجاج فلنت	*1.81*
ألماس	*1.24*

الجدول (*1-5*)

5-4- طول الموجة، والتواتر:

إن العلاقة بين تواتر الضوء، وسرعة انتشاره، وطول موجته هي كتلك العلاقة القائمة بين المقادير في الصوت، والتي سنراها لاحقاً وهي:

$$c = \nu.\lambda \qquad (5\text{-}1)$$

حيث c – سرعة الضوء، ν – تواتره، λ– طول موجته.

وقد وجد أن طول موجة الضوء الأصفر $590\ nm$، فإذا كانت سرعة الضوء هي $c=3\times10^{8}\ m/sec$، فإن تواتر الضوء الأصفر هو:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3\times10^{8}}{590\times10^{-9}} = 5.08\times10^{14}\ \frac{1}{\text{sec}}$$

ويمكن التعبير عن طول الموجة بالأنغستروم حيث: $1\ A^{o}=10^{-10}\ m$

5-5- تفاعل الضوء مع المادة:

إن الضوء شكل من أشكال الطاقة الكهرومغناطيسية، لذلك فالضوء يتفاعل مع المادة مولداً تياراً كهربائياً كما هو الحال في الخلية الكهرضوئية، ويساعد على إتمام عملية البناء الضوئي في النبات، ويجعلنا نحس بالدفء. هذا وإن الضوء عند سقوطه على جسم شفاف، ينقسم إلى: ضوء نافذ، وضوء ممتص، وضوء منعكس، وهذا ما يحدث أيضاً للأشعة الكهرومغناطيسية الأخرى مثل أمواج الراديو، والتلفاز، والرادار. وبما أن الضوء شكل من أشكال الطاقة لذا يمكن تطبيق قانون حفظ الطاقة، وعند ذلك نجد: الطاقة الضوئية الواردة تساوي الطاقة الضوئية المنعكسة + الطاقة الضوئية النافذة + الطاقة الضوئية الممتصة.

وبقسمة هذه المعادلة على الطاقة الضوئية الواردة نحصل على:

معامل الامتصاص + معامل النفاذ + معامل الانعكاس = 1

علماً أن المقادير السابقة تعتمد على طبيعة الأجسام التي يسقط الضوء عليها، فالأجسام المصقولة مثلاً تمتص نسبة قليلة من الضوء الوارد، أما الأجسام الخشنة، فتمتص نسبة أكبر، وتتحول هذه الطاقة الممتصة إلى أشكال أخرى كالطاقة الكهربائية كما في البطارية

الشمسية، أو طاقة كيميائية كما في فلم الكاميرا، أو طاقة كهربائية كما في الخلية الكهروضوئية، أو طاقة حرارية تعمل على تسخين الأجسام.

بالنسبة لمعامل النفاذ فهو نسبة الطاقة الضوئية النافذة إلى الطاقة الضوئية الواردة حيث تقاس شدة الإضاءة الواردة، ثم تقاس شدة الإضاءة النافذة، والنسبة بين شدة الإضاءة النافذة إلى شدة الإضاءة الواردة هي معامل النفاذ، وهو يعتمد أيضاً على طبيعة المادة المتلقية للضوء وسماكتها. وبالمشابهة فإن معامل الانعكاس، هو نسبة الطاقة الضوئية المنعكسة إلى الطاقة الضوئية الواردة، وبالتالي فمعامل الانعكاس هو نسبة شدة الضوء المنعكس إلى شدة الضوء الوارد.

5-6- خصائص الضوء، وتطبيقاته:

بما أن الضوء عبارة عن أمواج كهرومغناطيسية، فهو لا يحتاج لوسط مادي لينتقل فيه، ولكن سرعته تختلف من وسط لآخر، وله خصائص مختلفة:

1"- الخواص الهندسية: الانتشار المستقيم كما ذكرنا سابقاً، السرعة المحدودة بالفراغ، الانعكاس، الانكسار، التشتت (التبعثر).

2"- الخواص الموجية: التداخل، الانعراج، الاستقطاب، الانكسار المضاعف.

3"- الخواص الكمية: المدارات الذرية، سويات الطاقة، الليزر.

إن الأشعة الكهرومغناطيسية لها طول موجي يرمز له بـ λ، وتردد ν يحدد خصائصها، وسرعتها ترتبط مع المقدارين السابقين بالعلاقة:

$$c = \nu.\lambda$$

والطيف الكهرومغناطيسي، يبدأ بأمواج الراديو ذات الطول الموجي الكبير، والتردد المنخفض، وتستخدم في نقل الأصوات، وإشارة التلفزيون، والتلفون كما تستخدم أمواج الراديو في الطب لنقل معلومات عن دقات القلب، وفي الصناعة كأجهزة التحكم عن بعد مثلاً، وفي العلوم حيث يمكن التقاط أمواج الراديو بوساطة هوائيات مثبتة على تلسكوبات لدراسة الفلك.

بعدَ أمواج أو أشعة الراديو تأتي أشعة المايكروويف، وهي ذات طول موجي من 0.3 إلى 30 سنتيمتر، وهي معروفة لدى عامة الناس حيث تستخدم في تسخين وطهي الطعام، كما تستخدم هذه الأشعة في الاتصالات، ونقل المعلومات، وأجهزة الاستشعار عن بعد، وأجهزة الرادار بعد ذلك تأتي الأشعة تحت الحمراء *(infrared)*، وسميت تحت الحمراء لأن ترددها أقل من تردد الأشعة الحمراء. وهي أشعة حرارية تنبعث من كافة الأشياء من حولنا مثل الفرن، والمصباح الحراري، وكذلك تنبعث من أجسامنا، ومن الشمس، والأرض، وهذه الأشعة لا يمكن رؤيتها بالعين المجردة، ولكن الأجهزة الخاصة التي تستخدم الأشعة تحت الحمراء تمكننا من الرؤية في الظلام. حيث يسمى الجهاز المستخدم للرؤية الليلية بالبالوميتر *(Balometers)*. كما أن لهذه الأشعة استخدامات عديدة، ففي مجال الطب تستخدم لمعالجة الأمراض الجلدية مثلاً، وفي الصناعة تستخدم الأشعة تحت الحمراء في الأفران الخاصة للطلاء، كما تستخدم للتصوير في الظلام.

أما الجزء من الطيف الكهرومغناطيسي الذي يأتي بعد الأشعة تحت الحمراء، فهو الأشعة المرئية بألوانها المعروفة، والمشكلة لما يسمى بقوس قزح، والتي يمكن الحصول عليها من تحليل الضوء الأبيض بوساطة الموشور حيث ينكسر كل لون بزاوية خاصة حسب طوله الموجي. فأكبر طول موجي هو اللون الأحمر، وأقصره هو اللون الأزرق، أما الأشعة التي لها طول موجي أقصر من الطول الموجي للأزرق، فهي الأشعة فوق البنفسجية *(Ultraviolet)*، وهي غير مرئية بالنسبة للإنسان. تساعد هذه الأشعة على تنشيط التفاعلات الكيميائية في النباتات، أما التعرض لها طويلاً يقتل الخلايا النباتية، كما تسبب هذه الأشعة اسمرار الجلد عند التعرض المباشر لها، وهي موجودة في أشعة الشمس، ولكن الزجاج يمتص الأشعة فوق البنفسجية.

تستخدم الأشعة فوق البنفسجية في الطب لتعقيم أدوات الجراحة بوساطة مصابيح خاصة تصدرها، أما في الصناعة فتستخدم لصناعة الدارات الالكترونية الدقيقة، وفي العلوم تستخدم لدراسة مستويات الطاقة للذرات المختلفة.

إن للأشعة فوق البنفسجية مخاطر عدة، فهي تؤذي العين، وتحرق الجلد، وتدمر النباتات علماً أن شاشات التلفزيون تبعث أشعة فوق بنفسجية بالإضافة إلى الأشعة المرئية، ولهذا يجب أن تكون شاشات التلفزيون بعيدة عنا بقدر عشرة أضعاف قطر التلفزيون.

أما أشعة اكس *(x-rays)*، فهي تنتج عندما تفقد الالكترونات طاقتها فجأة عند اصطدامها بذرات أخرى، فعندما تصطدم الكترونات ذات سرعات عالية بمعدن، فإن هذه الالكترونات تعطي جزءاً من طاقتها إلى ذرات المعدن لإثارته، والجزء الباقي ينبعث على صورة أشعة اكس. وبما أن لها طول موجي أقصر من الطول الموجي للأشعة فوق البنفسجية، فإن طاقتها أكبر، فهي تستطيع أن تخترق جسم الإنسان، ولكن لا تخترق العظم، وبذلك يمكن تصوير العظم لتشخيص الكسور، أما في الصناعة فتستخدم أشعة اكس لفحص المواد المستخدمة في التصنيع، والتأكد من جودتها، وكذلك مراقبة الأمتعة في المطارات، وفي مجال العلوم تستخدم أشعة اكس لدراسة التركيب البلوري للمواد. إن التعرض طويلاً لأشعة اكس أكثر من اللازم، يؤدي إلى الإصابة بمرض السرطان، أو حرق خلايا الجلد، فهي خطيرة على الخلايا الحية، لذلك يستخدم حاجز من الرصاص للحماية منها حيث أن الرصاص أكثر المواد امتصاصاً لها.

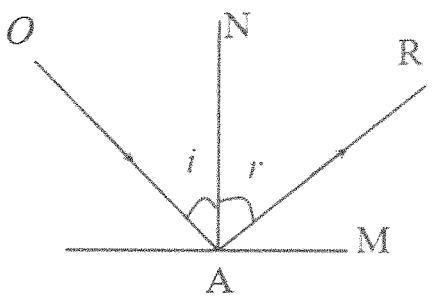
إن الأشعة ذات الطول الموجي الأقصر في الطيف الكهرومغناطيسي، وذات الطاقة العالية هي أشعة غاما *(Gamma-rays)*، وهي تنتج من التصادمات النووية، ومن العناصر المشعة، أما في الطبيعة فتنتج أشعة غاما من الشمس نتيجة للتفاعلات النووية، وتصل طاقة أشعة غاما إلى مليون الكترون فولت، ولكن تمتص هذه الأشعة عند اصطدامها بالغلاف الجوي للكرة الأرضية. إذاً الأشعة المرئية هي التي تصل إلى الأرض أما الأشعة ذات الأطوال الموجية الأقصر، فتمتص بوساطة طبقة الأوزون في الغلاف الجوي.

تستخدم أشعة غاما في الطب لقتل الخلايا المتسرطنة، ومنعها من النمو، أما في الصناعة فتستخدم لفحص أنابيب البترول، واكتشاف نقاط الضعف فيها كما تستخدم في تخليص المواد الغذائية المصنعة من الجراثيم والبكتيريا، وتستخدم أشعة غاما أيضاً في

المفاعلات، والقنابل النووية بالإضافة لاستخدامها في التجارب العلمية، واكتشاف أسرار النواة، والتعرض لها يسبب الإصابة بالسرطان، كأشعة اكس، ويعمل الرصاص على امتصاصها.

5-7- انعكاس الضوء:

الانعكاس هو ارتداد الضوء الوارد عن جسم ما، فيبقى في الوسط نفسه، ولا ينفذ إلى الوسط الآخر، فإذا وردت حزمة ضوئية من وسط متجانس إلى وسط آخر، فإن جزءاً منها ينعكس، والجزء الآخر يمتص في مادة الجسم العاكس، أو ينفذ منه إذا كان الجسم العاكس من مادة شفافة. فإذا كان السطح العاكس مفضضاً، بلغت نسبة الضوء المنعكس أكثر من 90 %، أما إذا كان السطح العاكس زجاجياً، فإن نسبة الضوء المنعكس لا تتجاوز 10 %، يبين الشكل (2-5) آلية الانعكاس حيث OA هو شعاع وارد بزاوية ورود i مع الناظم على السطح في نقطة الورود، أما RA، فهو الشعاع المنعكس، ويشكل زاوية r مع الناظم على السطح.



الشكل (2-5)

يحكم الانعكاس قانونان هما:

1"- إن الشعاع الوارد، والمنعكس، والناظم على السطح تقع جميعها في مستوي واحد.

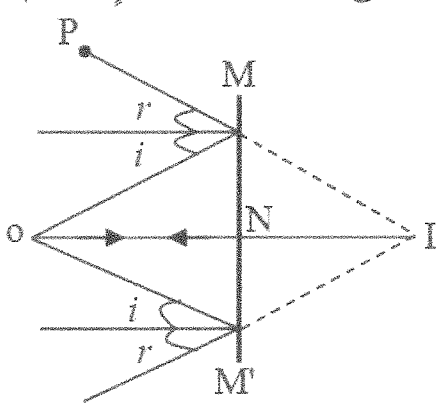
2"- إن زاوية الانعكاس، تساوي زاوية الورود.

إن الأسطح المصقولة التي تقل المسافة بين نتوءاتها عن ربع طول الموجة، تعكس الضوء بشكل جيد، أما إذا كانت خشنة، فإن الضوء الوارد يتبعثر في جميع الاتجاهات، وهكذا

يمكن أن يكون أي سطح عاكس بالنسبة لأي شعاع ذي طول موجي كبير، ولا يكون كذلك بالنسبة لطول موجي قصير. إن الانعكاس يستخدم في الرؤية حيث الشعاع المنعكس عن الأشياء يدخل العين، ويشكل خيالاً مقلوباً على الشبكية، كما يستخدم الانعكاس في التصوير، والمرايا في السيارات، وفي طب الأسنان أيضاً.

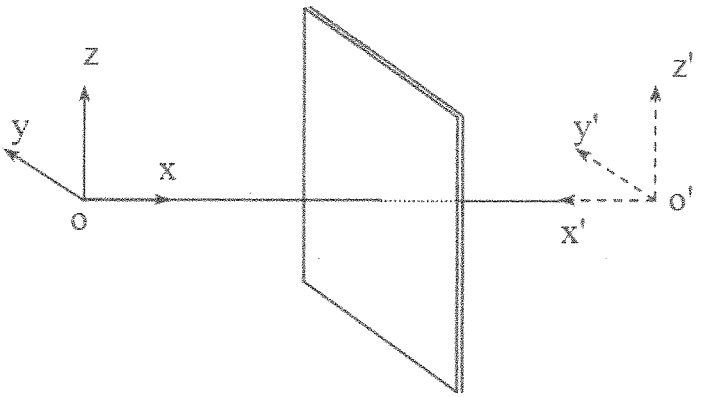
5-8- المرآة المستوية *(Plane mirror)*:

المرآة المستوية عبارة عن لوح زجاجي مستوٍ، أحد سطحيه مغطى بمادة عاكسة للضوء. فإذا وضعنا جسماً مضيئاً أمام مرآة مستوية كما في الشكل (*3-5*)، فإن النقطة *o* من هذا الجسم، تنشر الضوء في جميع الاتجاهات. قسم من هذه الأشعة الضوئية يرد على المرآة، فيرى الراصد الواقف أمام المرآة أن الأشعة تبدو صادرة من النقطة *(I)* خلف المرآة، وهي مضيئة، وبمثابة خيال للجسم، ويقال عنه إنه وهمي، ويبعد عن المرآة نفس بعد الجسم عنها، وهو خيال صحيح *(upright)*، ومساوٍ للجسم (لا يوجد تكبير).



الشكل (*3-5*)

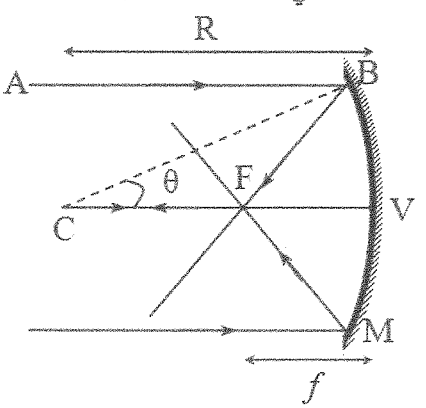
يبين الشكل (*4-5*) خيال جملة محاور متعامدة *oxyz*، والذي يرمز له بـ *o'x'y'z'*، ونلاحظ أن المحور *o'x'*، يتجه باتجاه معاكس لاتجاه المحور *ox*، ويقال عن خيال كهذا إنه خيال منحرف *(perverted)*. فالجسم والخيال يرتبطان ببعضهما كارتباط اليد اليمنى باليسرى، فإذا حيا شخص واقف أمام مرآة مستوية بيده اليمنى، بدا خياله، وكأنه يحيي بيده اليسرى.



الشكل (5-4)

5-9- المرآة المقعرة الكروية:

معلوم أن المرايا المستوية شائعة الاستخدام، أما المرايا الكروية، فهي قليلة الانتشار، وهي عبارة عن أجزاء من سطح كرة مجوفة. يسمى مركز الكرة التي اقتطعت منها المرآة ونرمز له بـ C بمركز تقعر المرآة. أما نصف قطر الكرة، فيسمى بنصف قطر التقعر. أما الخط الذي يخترق مركز الكرة، ويتعامد مع سطحها، يسمى بالمحور الرئيسي للمرآة، وعندما ينعكس الضوء عن السطح الداخلي للكرة، فإن المرآة تسمى مقعرة، أما إذا انعكس من على سطح الكرة الخارجي، فإن المرآة تكون محدبة.



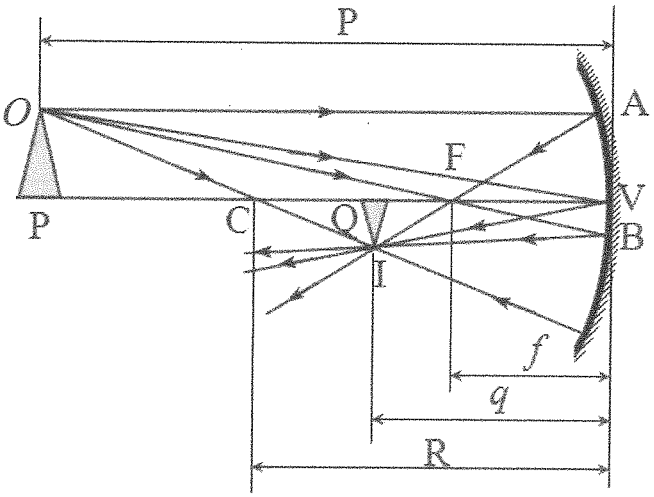
الشكل (5-5)

لننظر إلى شعاع ضوئي AB يرد على المرآة موازياً لمحورها الرئيسي كما في الشكل (5-5) ينعكس هذا الشعاع على المرآة صانعاً زاوية انعكاس مساوية لزاوية الورود، وبما أن AB

يوازي المحور الرئيسي إذاً $\hat{i} = \hat{\theta}$، والمثلث FBC متساوي الساقين أي $FC=BF$ وإذا كانت B قريبة من V، فإن BF، و VF متساويان تقريباً، وبالتالي VF يساوي FC تقريباً. وهكذا فإن F تكون في وضع متوسط بين المرآة، ومركز التقعر C. تسمى النقطة F بالمحرق الرئيسي للمرآة. وعليه فالمسافة بين الرأس V، والمحرق الرئيسي تسمى بالبعد المحرقي الذي نرمز له بالرمز f. إذاً البعد المحرقي f هو $f = \frac{R}{2}$، ولكن ليس صحيحاً تماماً أن كل الأشعة الموازية للمحور الرئيسي تنعكس لكي تمر من نفس النقطة F، فالأشعة التي تنعكس في نقطة تبعد كثيراً عن المحور الرئيسي، لا تمر من F، فلكي تمر من F يجب أن تكون $\hat{\theta}$ صغيرة، أو بشكل عام يجب أن يكون القوس BV أصغر بكثير من نصف قطر الكرة، ويطلق مصطلح الزيغ الكروي على العيب الذي يحدث عندما لا تمر الأشعة الموازية للمحور الرئيسي من المحرق، وهناك مرايا ذات مقطع مستعرض على هيئة قطع مكافئ، لا يوجد بها هذا العيب، فإذا كان مقطع المرآة مكافئياً وليس كروياً، فإن الأشعة الموازية للمحور الرئيسي لهذه المرآة، تنعكس مارة من نقطة وحيدة F مهما تكن أبعاد المرآة، وبالمثل فإن جميع الأشعة التي تصدر من منبع ضوئي، يقع بين رأس مرآة مكافئية ومحرقها، تتباعد بالانعكاس، أما إذا وضع المنبع أبعد من المحرق، فإن الأشعة تتقارب بعد الانعكاس، وتستخدم هذه الظاهرة في الأضواء الكاشفة للسيارات، لتعطي حزمة ضوئية عريضة من أحد المنابع ولتعطي حزمة ضوئية ضيقة من منبع آخر. وصناعة هذه المرايا أكثر كلفة من المرايا الكروية، وممكن استعمالها في التلسكوبات الفلكية حيث تكون الفتحة العريضة مطلباً أساسياً.

لنضع جسماً OP أمام مرآة مقعرة كما في الشكل (6-5)، ننشئ شعاع OA موازياً للمحور الرئيسي، فينعكس ماراً من F (المحرق الرئيسي)، ثم ننشئ شعاعاً OB ماراً من F فينعكس موازياً للمحور الرئيسي، أما الشعاع المار من المركز الرئيسي للتقعر C، فينعكس على نفسه. إن الأشعة المنعكسة الثلاث تمر من النقطة I ، إذاً النقطة I هي خيال النقطة O، وهو خيال حقيقي، فإذا وضعنا ورقة بيضاء عند I، فإننا نرى الخيال

الحقيقي للنقطة O وبإنشاء مماثل لنقاط أخرى من الجسم، نحصل على خيال كامل الجسم، ونلاحظ أنه خيال مقلوب.



الشكل 5-6

إذا وضع جسم عند IQ، فإن خياله سيكون عند OP، وتسمى النقطتان P، وQ نقطتان مترافقتان. لنرمز الآن بـ P لبعد الجسم عن المرآة، وبـ q لبعد الخيال عن المرآة، و بـ f للبعد المحرقي عندئذٍ نلاحظ أن المثلثين OPV وIQV متشابهان ونكتب:

$$\frac{OP}{IQ}=\frac{PV}{QV}=\frac{P}{q}$$

وكذلك المثلثان OPF، وBVF متشابهان، ونكتب:

$$\frac{OP}{BV}=\frac{PF}{FV}\Rightarrow\frac{P-f}{f}=\frac{P}{f}-1$$

ولما كان $BV=IQ$ فإنه يتضح من العلاقتين الأخيرتين أن:

$$\frac{P}{q}=\frac{P}{f}-1$$

وبقسمة الطرفين على P، وترتيب المقادير نجد:

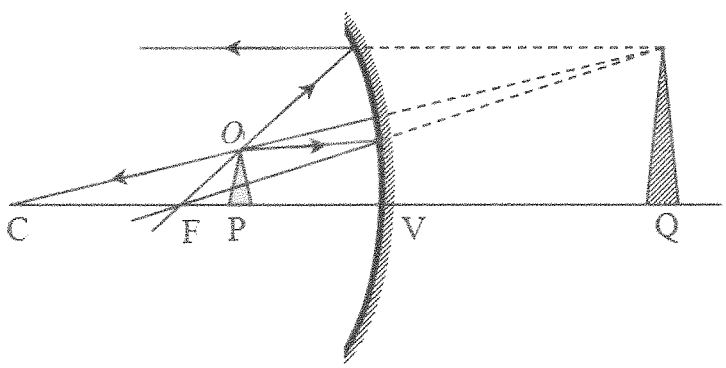
$$\frac{1}{P}+\frac{1}{q}=\frac{1}{f} \qquad (5\text{-}2)$$

إذا كان الجسم بعيداً جداً عن المرآة المقعرة ، كان $q=f$ أي يتشكل الخيال عندها في المحرق الرئيسي، وعندما يتحرك الجسم باتجاه المرآة، فإن خياله يبتعد عنها، فإذا ساوى بعد الجسم نصف قطر التقعر، ساوى بعد خياله نصف قطر التقعر كذلك، وتتساوى عندها أبعاد كل من الجسم وخياله. إذا ازداد قرب الجسم من المرآة، فإن الخيال يبتعد عنها حتى يبلغ الخيال اللانهاية عندما يكون الجسم في المحرق الرئيسي.

نلاحظ من الشكل (5-6) أنه، لما كان المثلثان OPV وIQV متشابهان، فإن:

$$\frac{\text{طول الخيال}}{\text{طول الجسم}} = \frac{\text{بعد الخيال}}{\text{بعد الجسم}} = -\frac{q}{P} \qquad (5\text{-}3)$$

وتعرف هذه النسبة باسم التكبير الخطي *Linear magnification*.



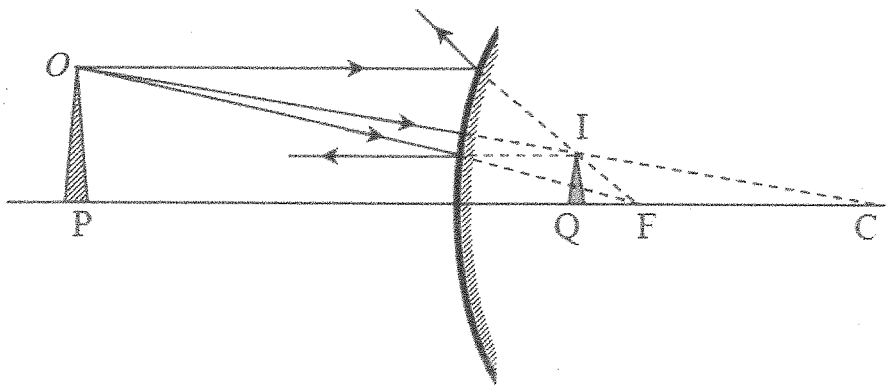
الشكل (5-7)

إذا وضع الجسم بين المحرق الرئيسي، ورأس المرآة V، فإن موقع الخيال سيكون خلف المرآة كما هو مبين في الشكل (5-7)، وهو صحيح كالجسم ووهمي وأكبر من الجسم ونلاحظ أنه عند $P<f$ فإن q تكون سالبة.

إن الإشارة (-) في العلاقة (5-3)، تحدد لنا هل الخيال صحيح أم مقلوب، فإذا كان التكبير موجباً، فإن الخيال صحيح بالنسبة للجسم، وإذا كان التكبير سالباً، فالخيال مقلوب حكماً.

5-10- المرآة المحدبة:

إن الشعاع الضوئي الوارد على مرآة محدبة موازٍ لمحورها الأصلي، ينعكس مبتعداً عن هذا المحور، ومع هذا إذا مددنا الشعاع المنعكس نحو الخلف، فإنه سيقطع المحور الرئيسي في نقطة F، هي المحرق الرئيسي للمرآة المحدبة، إن المحرق الرئيسي هنا وهمي، والأشعة الموازية للمحور الرئيسي، تنعكس بعيداً عن المحور بحيث تبدو وكأنها صادرة عن المحرق الرئيسي، لذلك تسمى المرآة هنا بالمرآة المبعدة.



الشكل (5-8)

وإذا وضع جسم أمام مرآة محدبة كما في الشكل (5-8) فإن الأشعة الصادرة عن النقطة O، تنعكس على المرآة، ولا تتلاقى أبداً، أما إذا مددت هذه الأشعة إلى خلف المرآة، فإنها تتلاقى في النقطة I، وهكذا نرى أن المرآة المحدبة تشكل للأجسام الحقيقية أخيلة وهمية صحيحة، وأصغر أبعاداً من الجسم. أما العلاقة التي تربط البعد المحرقي مع البعد الخيالي للمرايا المحدبة، فهي نفسها للمرايا المقعرة شريطة أن تعتبر أن البعد الخيالي سالباً (الخيال وهمي).

نتيجة: لرسم خيال جسم موضوع أمام مرآة، يلزمنا ثلاثة أشعة وهي:

1- شعاع صادر من الجسم، ويوازي المحور الرئيسي، ينعكس عليها ماراً من محرقها الرئيسي.

2- شعاع صادر من الجسم، ويمر من المحرق الرئيسي، ينعكس موازياً للمحور الرئيسي.

3- شعاع صادر من الجسم، ويمر من مركز تقعر المرآة ينعكس على نفسه.

اصطلاح:

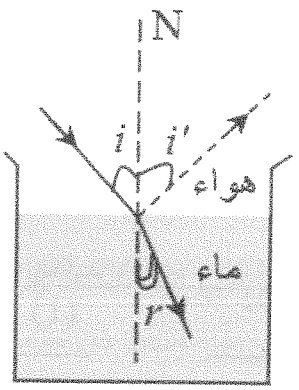
1- يكون بعد الجسم موجباً إذا وقع الجسم أمام المرآة، وسالباً في أي وضع آخر.

2- يكون بعد الخيال موجباً إذا وقع الخيال أمام المرآة (خيال حقيقي)، وسالباً فيما عدا ذلك (خيال وهمي).

3- يكون البعد المحرقي موجباً بالنسبة لمرآة مقعرة، وسالباً بالنسبة لمرآة محدبة.

5-11- الانكسار:

إن الشعاع الضوئي الوارد من وسط شفاف إلى آخر يعاني من تغير في اتجاه انتشاره، أي يغير مساره كما في الشكل (5-9)، ويسمى هذا التغيير بالانكسار، وتسمى الزاوية i (الكائنة بين الناظم والشعاع الوارد) بزاوية الورود، والزاوية r (الكائنة بين الناظم والشعاع المنكسر) بزاوية الانكسار، أما الزاوية i' (الكائنة بين الناظم والشعاع المنعكس)، فهي زاوية الانعكاس. بناءً على ذلك فإن المسطرة المغمورة في الماء، تبدو منكسرة عند الحد الفاصل بين الهواء والماء.



الشكل (5-9)

السبب الرئيسي وراء تغير اتجاه الشعاع عند انتقاله من وسط شفاف إلى آخر هو، كما ذكرنا سابقاً، بأن الضوء ينتقل بسرعات مختلفة في الأوساط المختلفة، ولذلك نعرف ما يسمى بقرينة انكسار الوسط التي هي النسبة بين سرعة الضوء في الفراغ، وسرعة الضوء في الوسط، أي:

$$n = \frac{c}{v}$$

حيث: n قرينة الانكسار، c سرعة الضوء في الفراغ، v سرعة الضوء في الوسط.

لذلك فإن تغير سرعة الضوء في الأوساط المختلفة، يعتبر تعليلاً واضحاً لسبب حادثة الانكسار، حيث تبين أنه عندما تسير موجة ضوئية في وسط بسرعة v_1، وتنتقل إلى وسط آخر تسير فيه بسرعة v_2، فإن الأمواج تغير اتجاه انتشارها بحيث يكون $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2}$ حيث تمثل i زاوية الورود، وr زاوية الانكسار. إن النسبة السابقة تمثل قرينة انكسار الوسط الثاني بالنسبة للأول، وتكتب:

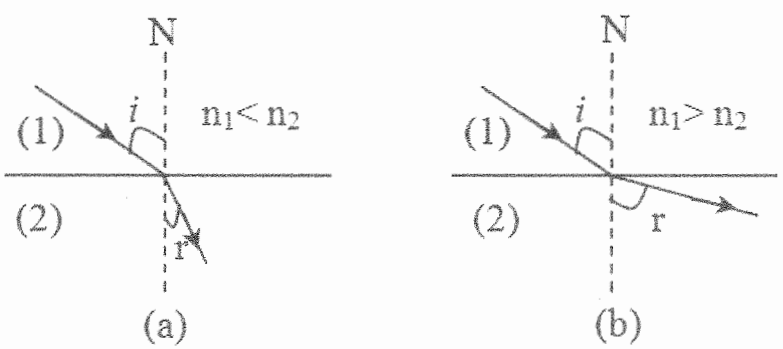
$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2}$$

ويمكن إعادة كتابة هذه المعادلة لتصبح:

$$n_2 \sin r = n_1 \sin i \qquad (5\text{-}4)$$

إن العلاقة السابقة تسمى بقانون سنل، ومنه نلاحظ أنه إذا كانت $n_1 < n_2$، فإن $\sin r < \sin i$ مما يعني أن $r < i$.

أما إذا كانت $n_1 > n_2$ كأن يرد الضوء من الزجاج إلى الهواء مثلاً، وفي هذه الحالة نجد أن $i < r$ كما في الشكل (*5-10*).



الشكل (*5-10*)

من المعادلة (*5-4*) نلاحظ أنه عندما $i = 0$ أي الشعاع الضوئي يرد بزاوية عمودية على السطح الفاصل بين الوسطين، فإن $r = 0$ أيضاً بغض النظر عن قيم v_2 , v_1، ونخلص

إلى ما يلي: لا يغير الضوء الساقط عمودياً على السطح الفاصل بين وسط وآخر من اتجاهه عند دخوله إلى الوسط الثاني.

إن قرينة الانكسار أكبر من الواحد دائماً، لأن الضوء يسير بأقصى سرعة في الفراغ، ويحتوي الجدول (5-2) قيم نموذجية لقرينة الانكسار n حيث نلاحظ أن n تقترب من الواحد بالنسبة للهواء في حين تكون n أكبر بالنسبة للألماس، علماً أن قرينة الانكسار هذه تتغير بشكل طفيف بتغير الطول الموجي، حيث تكون قيمته أكبر للضوء الأزرق من قيمته بالنسبة للضوء الأحمر.

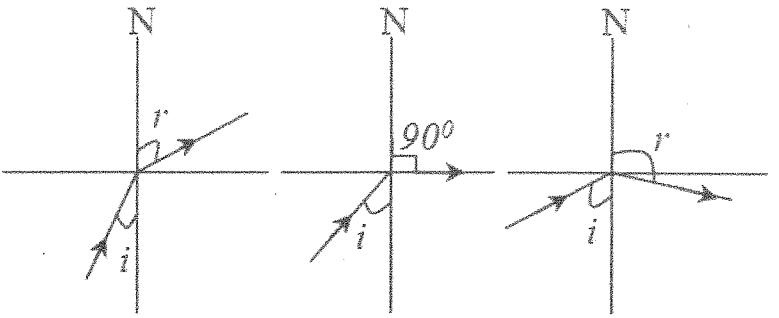
المادة	$n=\frac{c}{v}$
الهواء	1.0003
الماء	1.33
ايتانول	1.36
أستون	1.36
الغليسيرين	1.44
الكوارتز المنصهر	1.46
البنزين	1.5

المادة	$n=\frac{c}{v}$
زجاج كروان	1.52
كلور الصوديوم	1.53
بولي ستيرين	1.59
ثنائي كبريتيد الكربون	1.63
زجاج فلنت	1.66
الألماس	2.42

الجدول (5-2)

5-12- ظاهرة الانعكاس الكلي *Total internal reflection*:

عندما ينفذ شعاع ضوئي من وسط ذي معامل انكسار أكبر إلى وسط ذي معامل انكسار أقل، فإن الضوء سينكسر مبتعداً عن الناظم المقام على السطح الفاصل بين المادتين. وعليه فإن زاوية الانكسار تكون أكبر من زاوية الورود. فإذا زدنا زاوية الورود إلى حد بلغت عنده زاوية الانكسار 90° ، أي ينفذ الضوء مماساً للسطح الفاصل بين الوسطين كما في الشكل (5-11) تسمى زاوية الورود التي تبلغ من أجلها زاوية الانكسار القيمة 90° باسم الزاوية الحرجة *critical angle*.



الشكل (5-11)

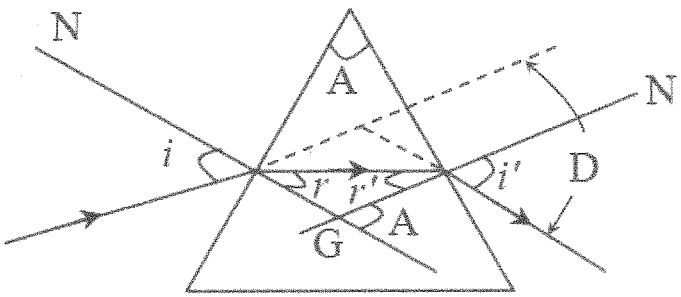
من تطبيقات ظاهرة الانعكاس الكلي استخدامها في توجيه الضوء عبر الألياف الضوئية حيث تحدث ظاهرة الانعكاس الكلي على سطح الألياف الضوئية، وتنتقل بذلك إلى أي مكان مثل نقل الكهرباء عبر الأسلاك، ومن استخدام الألياف الضوئية كوسط لنقل الضوء بوساطة الانعكاس الكلي في الطب، وهو ما يعرف باسم المنظار. كما تستخدم الألياف الضوئية في شبكات الحاسوب، وفي الاتصالات البصرية. فلدى اصطدام الضوء بجدار الليف بزاوية ورود أكبر من الزاوية الحرجة، يحدث انعكاس كلي للضوء، وما نوافير الماء الملونة إلا ترجمة للانعكاس الكلي للضوء، فهي تبقى على الضوء في خيط الماء حتى يرد الضوء بزاوية تفوق الزاوية الحرجة، فيخرج الضوء منه. ويتابع مسيره حتى يبلغ نهاية الليف حيث تكون زاوية الورود أقل من الزاوية الحرجة، فيخرج الضوء منه.

5-13- الانكسار في الموشور *Prism*:

الموشور هو وسط كاسر للضوء محدود بسطحين مستويين بحيث يكون له خمسة أوجه: اثنان متقابلان على شكل مثلث، والأوجه الثلاثة الأخرى على شكل مستطيل، ويصنع عادةً من مادة شفافة، ويستعمل الموشور لتحليل الضوء الأبيض للحصول على الطيف، كما يستعمل لإيجاد قرينة انكسار المادة الشفافة التي صنع منها، وكذلك لإيجاد قرينة انكسار السوائل.

إذا كانت مادة الموشور أكثر كثافة ضوئية من الوسط المحيط به، فإن شعاعاً ضوئياً وارداً على أحد وجهيه، ينكسر مقترباً من الناظم لدى دخوله الموشور، وعند بروزه من الوجه الآخر ينكسر مبتعداً عن الناظم كما في الشكل (5-12)، نسمي الزاوية $\hat{D}$

التي ينحرف فيها الشعاع البارز عن ممدد الشعاع الوارد باسم زاوية الانحراف *angel of deviation* أما عندما تكون زاوية ورود الضوء على أحد وجهي الموشور مساوية لزاوية بروزه على الوجه الآخر، فإن زاوية الانحراف تكون في قيمتها الدنيا، وتعرف عندئذٍ بزاوية الانحراف الأصغري.



الشكل (*5-12*)

يمكننا عن طريق قياس زاوية الانحراف الأصغري، وقياس زاوية رأس الموشور معرفة قرينة انكسار المادة التي صنع منها الموشور.

لنفرض أن $\hat{A}$ زاوية رأس الموشور، و $\hat{D}$ زاوية الانحراف الأصغري، و n قرينة انكسار مادة الموشور. من الشكل نلاحظ أن $\hat{A} = \hat{r} + \hat{r}'$ كما أن الانحراف عند الوجه الأول هو $\hat{i} - \hat{r}$، والانحراف عند الوجه الثاني $\hat{i}' - \hat{r}'$، وعليه فإن الانحراف الكلي هو:

ولما كان الانحراف الأصغري يعني تساوي زاوية الورود مع زاوية البروز فإن:

$$\hat{A} = 2\hat{r} \ , \ \hat{i} = \hat{i}' \ , \ \hat{r} = \hat{r}'$$

أي أن $D = 2i - A$ وبالتالي $i = \dfrac{A + D}{2}$ ومنه نجد أن قرينة الانكسار تساوي:

$$n = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\sin \dfrac{A + D}{2}}{\sin \dfrac{A}{2}} \qquad (5\text{-}5)$$

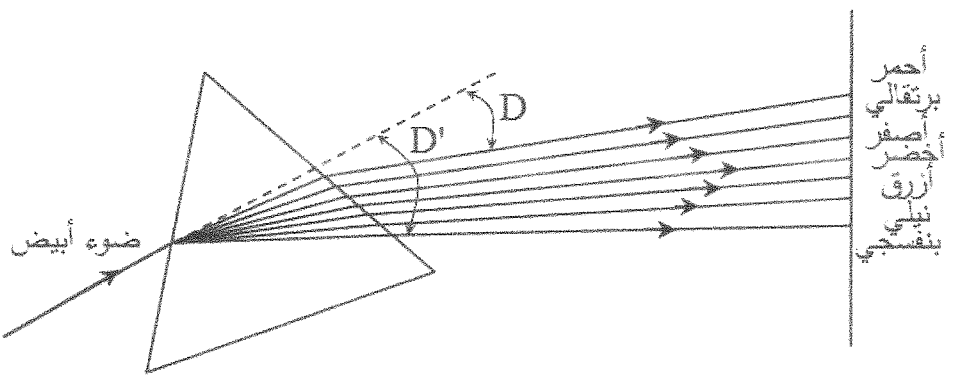
وفي حال موشور رقيق لا تزيد زاوية رأسه عن 10 درجات عندئذٍ يمكن إلباس الزوايا بجيوبها، ونحصل من العلاقة السابقة على:

$$D = A(n\text{-}1) \qquad (5\text{-}6)$$

مع ملاحظة أنه عند تطبيق العلاقة السابقة، لا داعي لتحويل الزوايا من درجات إلى راديان.

5-14- تبديد الضوء في الموشور:

إذا اعترض موشور ثلاثي مسار ضوء أبيض، فإن الضوء يتحلل إلى ألوان الطيف السبعة، وهي الأحمر، البرتقالي، الأصفر، الأخضر، الأزرق، النيلي، البنفسجي على الترتيب. وكل لون هو لون أساسي لا يمكن تحويله إلى ألوان أبسط منه، وينحرف الضوء البنفسجي ذو الطول الموجي الأقصر أكبر انحرافاً في حين ينحرف الضوء الأحمر ذي الطول الموجي الأكبر أقل انحرافاً. من ذلك نستنتج أن سرعة الضوء في الموشور مختلفة بالنسبة للألوان المختلفة. انظر الشكل (*5-13*).



الشكل (*5-13*)

5-15- تعيين قرينة انكسار السوائل:

هناك مجموعة من الطرق لقياس قرينة انكسار السوائل، وكل طريقة تعتمد على جهاز معين. سوف ندرس هنا طريقتين:

5-15-1- طريقة سيرل *Seral*:

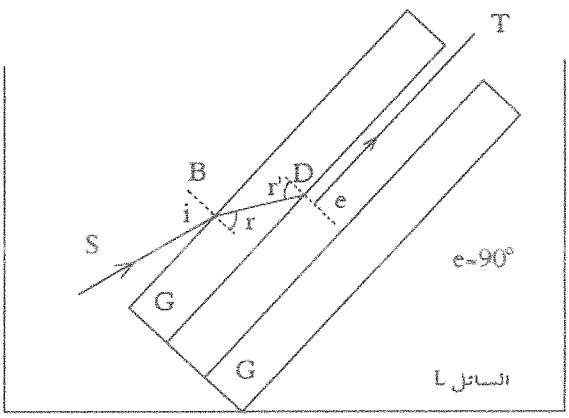
يستعمل لهذه الطريقة جهاز بسيط مكون من خلية زجاجية صغيرة مصنوعة من الكوارتز، مكونة من لوحين يحصران بينهما طبقة رقيقة من الهواء.

نضع الخلية في السائل المراد تعيينه قرينة انكساره، وتوضع المجموعة أمام تلسكوب T كما في الشكل (5-14).

نقوم بتدوير الخلية حول محور معين حتى نصل إلى الوضع الذي يتحقق فيه الانعكاس الكلي عند النقطة D.

عند النقطة B:

$$\frac{n_g}{n_L}=\frac{\sin i}{\sin r}\Rightarrow n_L=n_g\frac{\sin r}{\sin i} \qquad (5\text{-}7)$$



الشكل (5-14)

عند النقطة D:

$$n_{\text{هواء}}\cdot \sin e = n_g \sin r \qquad (5\text{-}8)$$

$$n_g=\frac{1}{\sin r} \qquad (5\text{-}9)$$

نعوض (5-9) في (5-7):

$$n_L=\frac{1}{\sin r}\times\frac{\sin r}{\sin i}\Rightarrow$$

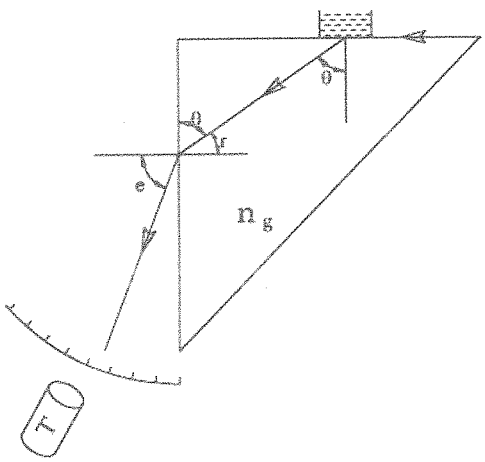
$$n_L=\frac{1}{\sin i} \qquad (5\text{-}10)$$

يمكننا قياس i بسهولة، بوساطة المنظار، وهكذا يمكننا أن نعين قرينة انكسار السوائل.

5-15-2- طريقة بولفريتش *Pulfrich*:

يتكون الجهاز من موشور قائم الزاوية ذي قرينة انكسار معروفة n_g ، ثُبت فوق أحد حروفه القائمة وعاء يحوي السائل المراد تعيين قرينة انكساره كما في الشكل (*15-5*).

من أجل تعيين قرينة انكسار السائل، نسقط حزمة وحيدة اللون مماسة للسطح الأول للموشور على السطح المشترك للوعاء والموشور، فينكسر الضوء بزاوية حرجة ضمن الزجاج، ويبرز من الوجه المقابل مكوناً زاوية بروز، ولتكن e. نطبق قانون الانكسار على الوجه الأول للموشور نجد:



الشكل (*15-5*)

$$n \sin i = n_g \sin\theta$$

حيث n قرينة انكسار السائل المفروض. وبالتالي:

$$n = n_g \sin\theta \Rightarrow \sin\theta = \frac{n}{n_g} \Rightarrow \sin^2\theta = \frac{n^2}{n_g^2} \qquad (5\text{-}11)$$

وبتطبيق قانون قرينة الانكسار عند وجه البروز في نقطة البروز:

$$n_g \sin r = n_{\text{هواء}} \sin e$$

$$\Rightarrow \sin r = \sin e$$

أو:

$$\cos^2\theta = \frac{\sin^2 e}{n_g^2} \qquad (5\text{-}12)$$

بجمع (5-11) و (5-12) نجد:

$$\frac{n^2}{n_g^2} + \frac{\sin^2 e}{n_g^2} = 1 \Rightarrow n^2 = n_g^2 - \sin^2 e$$

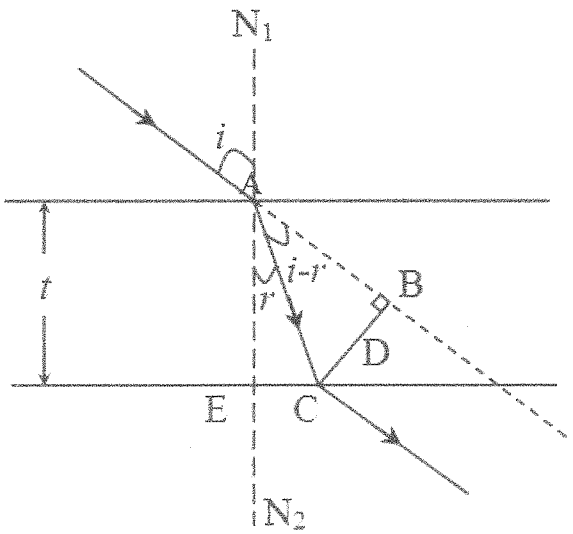
$$\Rightarrow n = \sqrt{n_g^2 - \sin^2 e} \qquad (5\text{-}13)$$

فإذا قمنا بقياس زاوية البروز e، ونعلم سلفاً قرينة انكسار مادة الموشور، فإننا نحصل على قرينة انكسار السائل n.

5-16- انكسار الضوء في صفيحة زجاجية متوازية الوجهين:

ندرس انكسار الضوء في هذه الحالة من خلال المثال الآتي:

يرد شعاع ضوئي على لوح زجاجي متوازي الوجهين سماكته $t = 2cm$، وبزاوية ورود قدرها $i = 45^0$ كما هو مبين في الشكل (5-16) والمطلوب:



الشكل (5-16)

1"- ارسم مسير الشعاع الوارد، والمنكسر، والبارز.

2"- احسب زاوية الانكسار r على الوجه الأول بفرض أن قرينة انكسار الزجاج هي $n = \sqrt{2}$.

3"- بين أن الانزياح D يعطى بالعلاقة $D=\frac{t.\sin(i-r)}{\cos r}$، واحسب قيمته العددية.

نطبق قانون الانكسار عند الوجه الأول فنجد:

$$1\times\sin 45=\sqrt{2}\sin r\Rightarrow\quad r=30^0$$

أما لحساب الانزياح D، فنجد من المثلث القائم ABC أن:

$$\sin(i-r)=\frac{BC}{AC}\Rightarrow BC=AC\sin(i-r)\qquad(1)$$

ولحساب AC نأخذ المثلث AEC القائم أيضاً فنجد:

$$\cos r=\frac{AE}{AC}\Rightarrow AC=\frac{t}{\cos r}\qquad(2)$$

نعوض (2) في (1) فنجد:

$$D=\frac{t}{\cos r}.\sin(i-r)=t.\frac{\sin(i-r)}{\cos r}$$

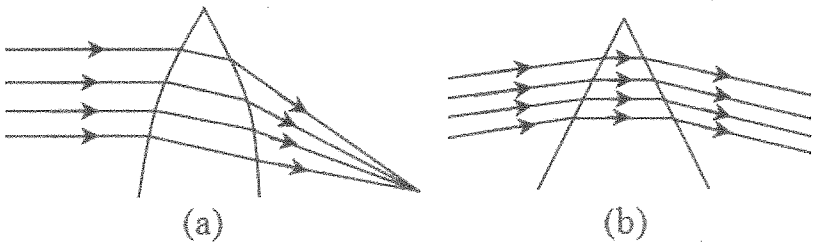
أي أن انزياح الأشعة عن مسارها ضمن صفيحة متوازية الوجهين يتعلق فقط بسماكة هذه الصفيحة، وزاويتي الورود والانكسار. أما لإيجاد القيمة العددية، فنعوض في(2) فنجد:

$$D=2.\frac{\sin(45-30)}{\cos 30}\cong 0.6\,cm$$

5-17- انكسار الضوء في العدسات:

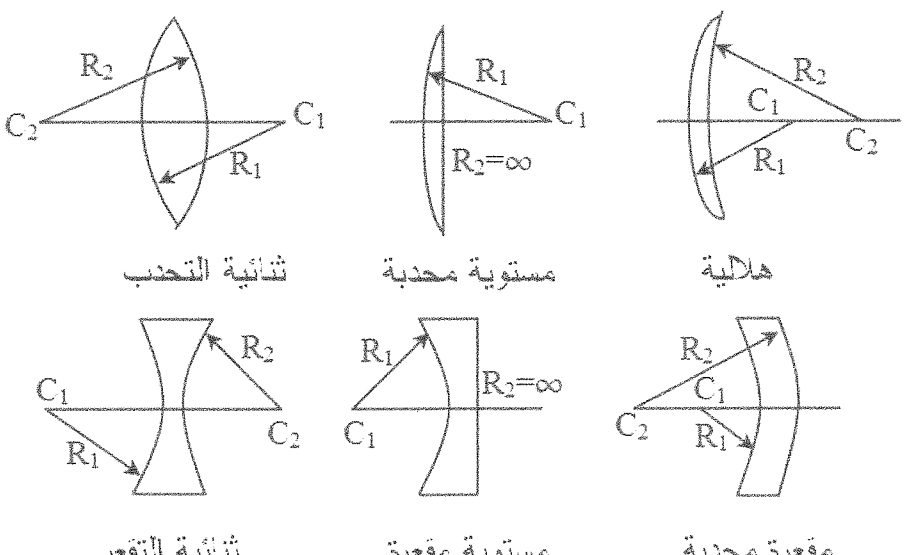
العدسات وسط كاسر للضوء، ويصنع من مادة شفافة، تستخدم العدسات لتجميع الضوء، أو تفريقه، ويكون عادةً سطحا العدسة عبارة عن مقاطع من سطوح كروية. إن الأشعة المتوازية، والواردة على موشور تبرز منه متوازية أيضاً، ولو أردنا تجميع هذه الأشعة بعد بروزها لوجب علينا حرف الشعاع الأعلى انحرافاً أكبر من الشعاع الأدنى، ويتحقق ذلك بشحذ سطحي الموشور كما في الشكل (17-5)، ولكن بشكل عام هذا لا يضمن أن تبرز الأشعة المتوازية من العدسة لتمر من النقطة ذاتها إلا إذا اخترنا مقاطع كروية كبيرة عندئذٍ نحصل على عدسة مقربة *converging*، إذاً العدسة المقربة

هي العدسة التي تقوم بتجميع الضوء في نقطة واحدة، وبالمثل نقول عن عدسة مبعدة *diverging* إذا كانت الأشعة المتوازية تتباعد بعد بروزها.



الشكل (*5-17*)

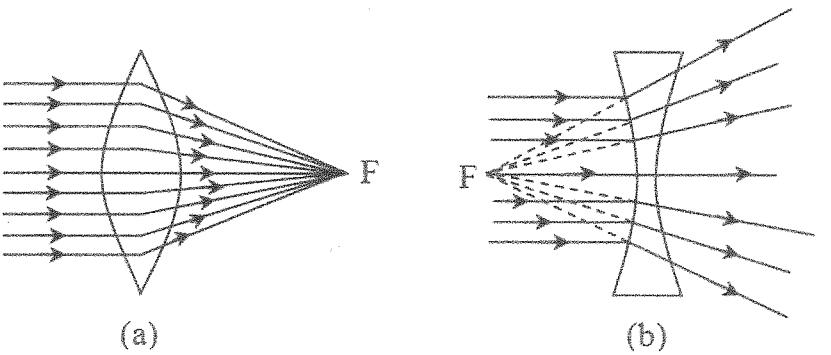
نميز العدسات عن بعضها مبعدة أم مقربة من حيث الشكل، فإذا كانت ثخينة في المنتصف، ورقيقة في الأطراف تكون مقربة، وتكون مبعدة إذا كانت ثخينة في الأطراف ورقيقة في المنتصف. للعدسات ست أشكال مألوفة، وهي كما في الشكل (*5-18*).



الشكل (*5-18*)

نسمي بالمحور الرئيسي للعدسة الخط الواصل بين مركزي تقعر وجهيها. وإذا كان أحد سطحي العدسة مستوياً فالمحور الرئيسي هو الخط العمودي النازل من مركز تقعر أحد السطحين على السطح المستوي للعدسة. إن الأشعة المتوازية الواردة على عدسة مقربة

والموازية لمحورها الرئيسي تتقارب مارةً من نقطة تدعى بالمحرق الرئيسي، أما في حالة عدسة مبعدة، فإن الحزمة الموازية للمحور الرئيسي، تنحرف بعد بروزها من العدسة متباعدة كما في الشكل (*5-19-b*) حيث لا تتقاطع أبداً بعد بروزها، وتبدو وكأنها صادرة عن محرق رئيسي وهمي.



الشكل (*5-19*)

إن البعد المحرقي لعدسة ما يتحدد بعدد من العوامل أكثر من حالة البعد المحرقي للمرآة نظراً لأن للعدسة سطحين منحنيين، ويعتمد مقدار الانكسار عند هذين السطحين على قرينة انكسار العدسة بالنسبة للوسط المحيط بها، ويعرف التعبير الرياضي الذي يربط كل هذه العوامل معاً بمعادلة صانع العدسات:

$$\frac{1}{f}=(n-1)\left(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}\right) \qquad (5\text{-}14)$$

حيث: n- قرينة انكسار العدسة بالنسبة للوسط المحيط بها.

أما R_1 , R_2 فهما نصفا قطري انحناء السطح الأمامي، والخلفي للعدسة على الترتيب، وتكون إشارتهما موجبة عندما يكون السطح الذي يمثلانه محدباً من ناحية الضوء، وسالبة عندما يكون مقعراً من ناحية الضوء.

إن المعادلة (*5-14*) تعطي الإشارة الصحيحة للبعد المحرقي بالنسبة لجميع أشكال العدسات المبينة في الشكل (*5-18*).

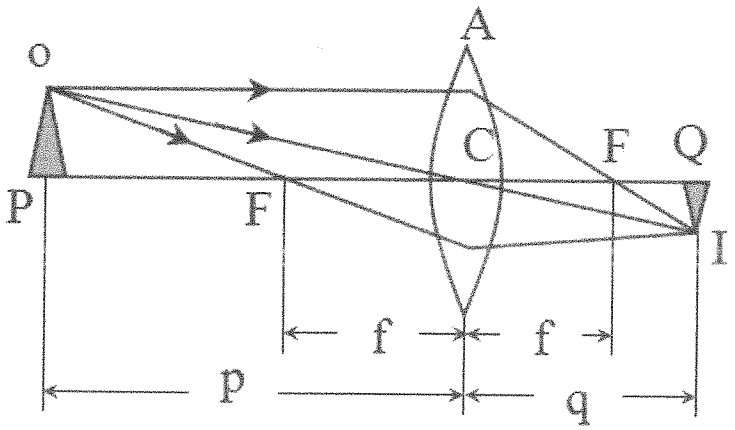
5-18- الأشعة الرئيسة في العدسات:

لرسم أخيلة الأجسام في العدسات، نحتاج كما في المرايا لثلاثة أشعة رئيسة وهي:

1"- شعاع موازٍ للمحور الرئيسي للعدسة، فينكسر بعد بروزه من العدسة ماراً من المحرق الرئيسي في العدسة المقربة، أو ينكسر وكأنه صادر عن المحرق الرئيسي في العدسة المبعدة.

2"- شعاع مار من المحرق الرئيسي لعدسة، يبرز موازياً لمحورها الرئيسي.

3"- شعاع مار من المركز البصري لعدسة، يمر منها دون أن يعاني أي انحراف.



الشكل (5-20)

إن هذه الأشعة الثلاثة واضحة في الشكل (5-20)، وهي على الترتيب $OAFI$ وOFI ثم OCI. فإذا كان P بعد الجسم عن العدسة، وq بعد الخيال عن العدسة، والمسافة من العدسة إلى أي من محرقيها الرئيسين، هي البعد المحرقي f، فإنه من تشابه المثلثين OPC، وIQC نجد:

$$\frac{OP}{IQ}=\frac{CP}{CQ}=\frac{P}{q}$$

وكذلك المثلثان ACF، وIQF مثلثان متشابهان، وعليه يكون:

$$\frac{AC}{IQ}=\frac{FC}{FQ}=\frac{f}{q-f}$$

ولما كان $AC=OP$ فإن:

$$\frac{AC}{IQ}=\frac{OP}{IQ}\Rightarrow\frac{p}{q}=\frac{f}{q-f}$$

وعليه فإن:

$$pq-pf=qf$$

وبقسمة الطرفين على pqf نجد:

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{q}=\frac{1}{f} \qquad (5\text{-}15)$$

وهي العلاقة التي تربط بين بعد الجسم، وبعد الخيال عن العدسة، والبعد المحرقي للعدسة.

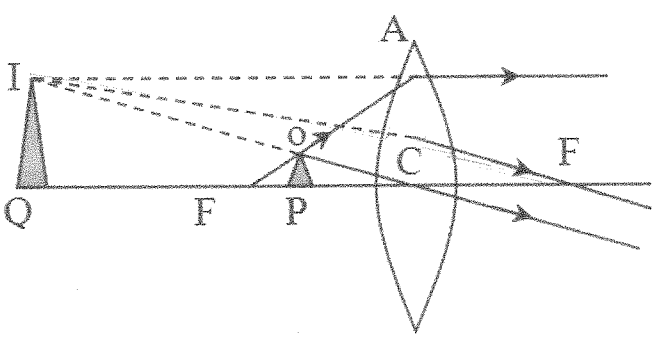
من الشكل (*5-18*) نلاحظ أيضاً أن $\frac{IQ}{OP}=\frac{q}{p}$، ولما كان IQ يمثل طول الخيال وOP يمثل طول الجسم فإن:

$$\text{التكبير الخطي}=\frac{\text{طول الخيال}}{\text{طول الجسم}}=\frac{\text{بعد الخيال}}{\text{بعد الجسم}}=\frac{q}{p}=-m$$

فإذا كانت $m>1$ كان الخيال مكبراً، وإذا كانت $m<1$ كان الخيال مصغراً.

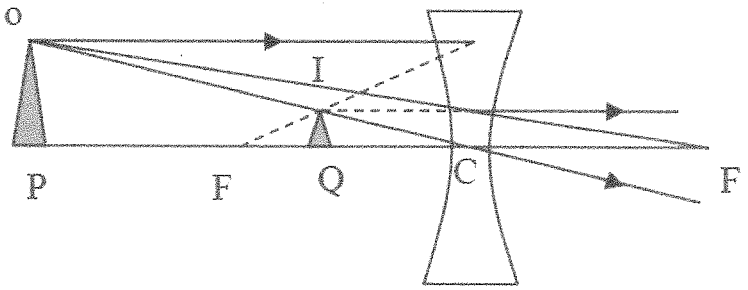
وإذا وضعنا في الشكل (*5-21*) جسماً عند IQ، فإننا سنجد خياله عند OP، إذاً فالنقطتان (P)، و(Q) نقطتان مترافقتان، فإذا وضع جسم في إحداهما يكون خياله في الأخرى.

إذا وضع جسم بين محرق العدسة المقربة ورأسها، فإن خياله سيكون وهمياً، وصحيحاً، ومكبراً كما في الشكل (*5-21*)، وفي هذه الحالة يكون بعد الخيال سالباً.



الشكل (*5-21*)

وإذا وضع جسم أمام عدسة مبعدة شكلت له خيالاً وهمياً صحيحاً، ومصغراً كما في الشكل (*22-5*)، وللتطبيق على العدسات المبعدة يؤخذ البعد المحرقي سالباً، وكذلك بعد الخيال q.



الشكل (*22-5*)

لكي تستخدم المعادلة (*15-5*) لجميع العدسات يجب أن نأخذ بعين الاعتبار ما يلي:

1"- بعد الجسم P موجب إذا كان الجسم أمام العدسة، وسالب إذا كان خلفها.

2"- بعد الخيال q موجب إذا تكوّن الخيال خلف العدسة (خيال حقيقي)، وسالب إذا تكوّن الخيال أمام العدسة (خيال وهمي).

3"- البعد المحرقي موجب بالنسبة لعدسة مجمعة (محدبة)، وسالب بالنسبة لعدسة مفرقة (مبعدة).

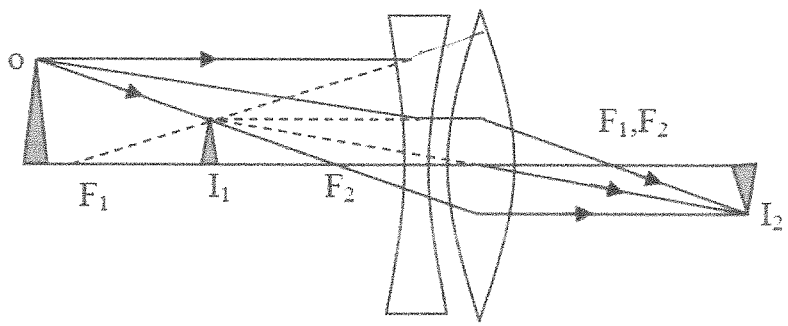
مما سبق نلاحظ ما يلي:

1- تكوّن العدسات المبعدة دائماً أخيلة وهمية صحيحة، ومصغرة إذا كان الجسم حقيقياً مهما كان موقع الجسم أمام العدسة.

2- تكون العدسة المقربة صورة حقيقية مقلوبة للجسم الحقيقي إذا كان الجسم موضوعاً أبعد من المحرق الرئيسي للعدسة، أما إذا كان الجسم أقرب من المحرق، فإن الخيال المتكون يكون وهمياً وصحيحاً. علماً أن إشارة التكبير الخطي تحدد لنا كما في المرايا فيما إذا الخيال صحيح أو مقلوب.

5-19- ضم العدسات:

يمكننا حساب موضع الخيال النهائي عند مرور الضوء من عدسة أولى إلى عدسة ثانية. أي عند ضم عدستين، بتطبيق قانون العدسات مرتين، فالجسم بالنسبة للعدسة الثانية هو الخيال الذي شكلته العدسة الأولى. وإذا اعترضت العدسة الثانية سبيل الأشعة قبل تقاطعها كما في الشكل (*5-23*)، فإن الجسم بالنسبة للعدسة الثانية، يؤخذ كما لو لم تكن العدسة الأولى هناك. فالبعد الجسمي في هذه الحالة للعدسة الثانية سالب، وذلك لأن الضوء ينحرف بفعل هذه العدسة قبل تشكيل الجسم بالنسبة لها. وإذا كان هناك عدسة ثالثة، فإن الخيال الذي تشكله العدسة الثانية هو بمثابة الجسم للعدسة الثالثة.



الشكل (*5-23*)

والخيال النهائي في جملة بصرية معقدة كتلك المكتشفة في كاشف المحيطات في الغواصات يمكن إيجاده بتطبيق متتالٍ لعلاقات المرايا والعدسات، وفي كل حالة يكون الجسم بالنسبة لأي عنصر بصري هو الخيال الذي شكله العنصر السابق له، وبالطبع ينبغي الانتباه لإعطاء الإشارات الصحيحة للأبعاد المختلفة. أما بالنسبة للعدسات المتلاصقة أي التي لا يفصل بينها أية مسافة، فالأمر مختلف بعض الشيء. فكل من فحص نظره عند الطبيب لاحظ أن الطبيب قد قام بجمع أكثر من عدسة لكي يصل إلى أفضل مجموعة من العدسات، فعندما يكون البعد المحرقي للعدسات أكبر بكثير من المسافة التي تفصل بين العدسات يمكن اشتقاق الصيغة النهائية بالشكل التالي:

إن موقع الصورة المتكونة بوساطة العدسة الأولى يعطى بالعلاقة:

$$\frac{1}{p_1}+\frac{1}{q_1}=\frac{1}{f_1}$$

فإذا كانت العدسة الأولى مجمعة، كان الخيال الناتج حقيقياً، ويقع خلف هذه العدسة، ولا بدَّ أن يكون خلف العدسة الثانية، لأن العدستين متلاصقتان، وبالتالي يقعان عند نفس الموضع عملياً.

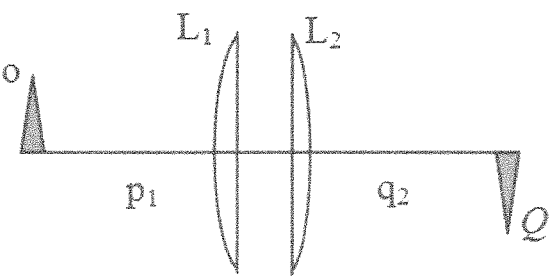
أي أن المسافة بين العدستين مهملة مقارنة بالبعد المحرقي. وهكذا يكون الخيال الأول جسماً وهمياً للعدسة الثانية، ولذلك $p_2=q_1$، وتطبيقاً لقاعدة الإشارات نلاحظ أن معادلة العدسة الثانية هي:

$$-\frac{1}{q_1}+\frac{1}{q_2}=\frac{1}{f_2}$$

وبجمع معادلتي العدستين معاً نجد:

$$\frac{1}{p_1}+\frac{1}{q_2}=\frac{1}{f_1}+\frac{1}{f_2}$$

وكما يتضح من الشكل (5-24)، فإن p_1 هو موقع الجسم الأصلي، وq_2 هو موقع الخيال النهائي.



الشكل (5-24)

أي أن هذه المعادلة هي نفس معادلة العدسة بالنسبة لعدسة منفردة بعدها المحرقي f، ويعطى بالعلاقة:

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

المجموعة مهملة بالمقارنة مع الأبعاد المحرقية المنفردة. كما أن هذه العلاقة تنطبق على أية مجموعة من العدسات المجمعة (المقربة)، والمفرقة (مبعدة) طالما استعملت الإشارات الصحيحة للأبعاد المحرقية.

مثال 1: وضع جسم ارتفاعه $2\ Cm$ على بعد $30\ Cm$ من مرآة مقعرة نصف قطر انحنائها $10\ Cm$ والمطلوب إيجاد بعد الخيال وطوله، ثم هل هو صحيح، أم مقلوب وهل هو حقيقي أم وهمي؟

الحل: إن البعد المحرقي للمرآة هو $f = \frac{R}{2} = 5\ Cm$، وعلى ذلك يكون بعد الخيال هو:

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{f} - \frac{1}{p} = \frac{1}{5} - \frac{1}{30} = \frac{5}{30}$$

وبأخذ المقلوب نجد:

$$q = \frac{30}{5} = 6\ Cm$$

ومن علاقة التكبير الخطي نجد طول الخيال أي:

$$M = \frac{q}{p} = \frac{6}{30} = \frac{1}{5}$$

أي أن الخيال صُغر إلى خمس طول الجسم، ولما كان طول الجسم $2\ Cm$، فإن طول الخيال هو:

$$\text{طول الخيال} = 2 \times \frac{1}{5} = \frac{2}{5}\ Cm$$

ورأينا سابقاً أن الأجسام الموضوعة أبعد من نصف قطر التقعر أمام مرآة مقعرة تتكون لها أخيلة حقيقية، ومقلوبة، ومصغرة. ويمكن التأكد من الحل بسرعة إذا رسمت الأشعة.

مثال 2: وضع جسم على بعد $5\ Cm$ من مرآة مقعرة بعدها المحرقي $10\ Cm$. أوجد موضع الخيال، وخصائصه.

الحل: بتطبيق علاقة المرآة نجد:

$$\frac{1}{q}=\frac{1}{f}-\frac{1}{p} \Rightarrow \frac{1}{q}=\frac{1}{10}-\frac{1}{5}=-\frac{1}{10} \Rightarrow q=-10\,cm$$

ولهذا يمكننا تحديد نوع الخيال من الإشارة الجبرية للبعد q، فإذا كان موجباً، فإن الخيال يكون حقيقياً، ويقع أمام المرآة، أما إذا كان q سالباً، فالخيال وهمي، ويقع خلف المرآة. إن خصائص الخيال لجسم موضوع أقرب من f هو أنه وهمي، وصحيح، ومكبر ويكون التكبير:

$$\text{التكبير الخطي} = -\frac{\text{بعد الخيال}}{\text{بعد الجسم}} = -\frac{\text{طول الخيال}}{\text{طول الجسم}} = \frac{+10}{5} = +2\ Cm$$

أي أن ارتفاع الخيال يبلغ ضعف ارتفاع الجسم.

مثال 3: استخدمت مرآة محدبة نصف قطر انحنائها $100\ Cm$ لكي تعكس الضوء الصادر عن جسم موضوع أمامها على مسافة $75\ Cm$. أوجد موضع الخيال، وطوله، وهل هو صحيح أم مقلوب؟

الحل: نلاحظ أن $p=75\ Cm$، و $f=\frac{R}{2}=-50\ Cm$ لأنها محدبة، إذاً:

$$\frac{1}{q}=\frac{1}{f}-\frac{1}{p}=\frac{1}{-50}-\frac{1}{75}=-\frac{5}{150} \Rightarrow q=-30\,Cm$$

تدل الإشارة السالبة على أن الخيال وهمي، ويقع خلف المرآة، ويبدو كأن الأشعة تخرج منه متفرقة، والتكبير هو:

$$M=-\frac{-30}{75}=0.4$$

أي أن حجم الخيال هو 40 في المئة من حجم الجسم، وتحدد الإشارة الموجبة أن الخيال صحيح.

مثال 4: نفرض أنه لدينا مرآة مقعرة بعدها المحرقي $40\ Cm$ أين يمكن وضع جسم ما لنحصل على صورة له على بعد $100\ Cm$ أمام المرآة.

الحل: من قانون المرايا نجد:

$$\frac{1}{p}=\frac{1}{f}-\frac{1}{q}=\frac{1}{40}-\frac{1}{100}=\frac{3}{200}$$

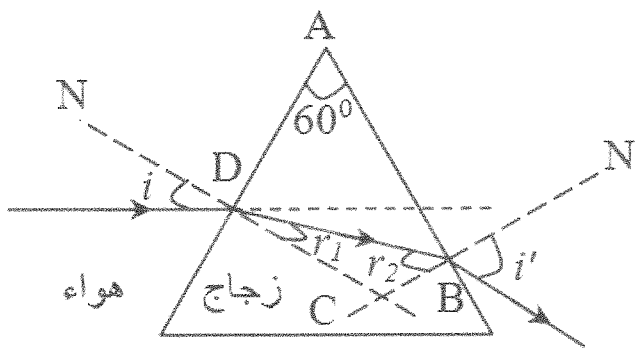
ومنه نجد:

$$p=+66.7\ Cm$$

والخيال حقيقي. أما إذا كان طول الخيال $2.5\ Cm$، فإن الطول الواجب أن يكون عليه الجسم هو $1.67\ Cm$ (أثبت ذلك).

مثال 5: يرد شعاع ضوئي على موشور متساوي الأضلاع قرينة انكساره 1.46، وفي اتجاه يوازي قاعدة الموشور والمطلوب:

إيجاد زاوية البروز على الوجه الثاني للموشور.



الشكل (5-25)

الحل: نطبق قانون سنل عند النقطة B من الشكل (5-25) فنجد:

$$n.\sin r_2=n'\sin i' \qquad (a)$$

حيث: n – قرينة انكسار الزجاج (مادة الموشور).

n' – قرينة انكسار الهواء.

لنوجد الآن كل من الزاوية r_2، والزاوية i':

1"– إن:

$$\hat{r}_1+\hat{r}_2+\hat{c}=180^0 \qquad (b)$$

2"– إن الشكل $ABCD$ رباعي دائري لذلك الزاوية $\hat{c}$ تساوي 120^0.

3"- بما أن الموشور متساوي الأضلاع إذاً كل من زواياه 60^0، وبالتالي $\hat{i} = 30^0$

لنطبق الآن قانون الانكسار عند النقطة D فنجد:

$$n' \sin 30 = n \sin r_1$$

بالتعويض بالقيمة العددية نجد:

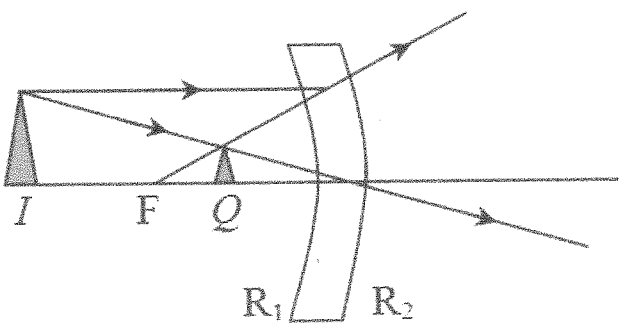
$$1 \times \sin 30 = 1.46 \times \sin r_1 \quad \Rightarrow \quad r_1 = 20^0$$

نعوض عن $\hat{r}_1, \hat{c}$ بقيمتيهما في العلاقة *(b)*، فنجد أن $\hat{r}_2 = 40^0$ بالعودة إلى العلاقة *(a)* نجد:

$$1.46 \times \sin 40 = 1 \times \sin i' \Rightarrow \hat{i}' = 69.8^0$$

افترض أن نفس الموشور أحيط بزجاج قرينة انكساره 1.60 بدلاً من الهواء، ارسم مسار الأشعة في هذه الحالة (يترك للطالب).

مثال6: لدينا عدسة مبعدة كما في الشكل *(5-26)* قرينة انكسارها 1.46، ولها سطحان كرويان نصفا قطريهما $R_1 = 2.5\ Cm$ و$R_2 = 4\ Cm$، ما هو موضع الخيال إذا وضع جسم على بعد $15\ Cm$ أمام العدسة؟



الشكل *(5-26)*

الحل: لدينا حسب قانون العدسات:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

وكذلك $\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$، وبما أن التقعر من جهة الضوء إذاً حسب اصطلاح الإشارات، فإن R_1 وR_2 سالبتان إذاً:

$$\frac{1}{f}=(1.46-1)\left(\frac{1}{-2.5}-\frac{1}{-4}\right)\Rightarrow\frac{1}{f}=-0.069$$

ولكن $p=+15\ Cm$ إذاً:

$$\frac{1}{q}=\frac{1}{f}-\frac{1}{p}=-0.069-\frac{1}{15}=-0.136$$

$$q=\frac{1}{-0.136}=-7.35cm$$

مثال 7: تكون عدسة مبعدة بعدها المحرقي $20\ Cm$ خيالاً لجسم ارتفاعه $3\ Cm$ موضوع على بعد $40\ Cm$ أمام العدسة والمطلوب: إيجاد موضع الخيال، والتكبير الخطي، وهل هذا الخيال صحيح، أو مقلوب؟

الحل: بما أن الجسم حقيقي، والعدسة مبعدة، فإننا نتوقع وجود خيال وهمي صحيح، ومصغر. وبما أن الجسم موضوع أمام العدسة إذاً $p=+40\ Cm$، وكون العدسة مبعدة، فإن $f=$ -20 Cm بتطبيق قانون العدسات نجد:

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{p}+\frac{1}{q}\ \Rightarrow\frac{1}{q}=\frac{1}{f}-\frac{1}{p}$$

$$\frac{1}{q}=-\frac{1}{20}-\frac{1}{40}=-\frac{3}{40}\ \Rightarrow q=-13.3\ cm$$

وتدل الإشارة (-) على أن الخيال وهمي، وأمام العدسة، أما التكبير الخطي فهو:

$$M=-\frac{q}{p}=-\frac{13.3}{40}=-\frac{1}{3}$$

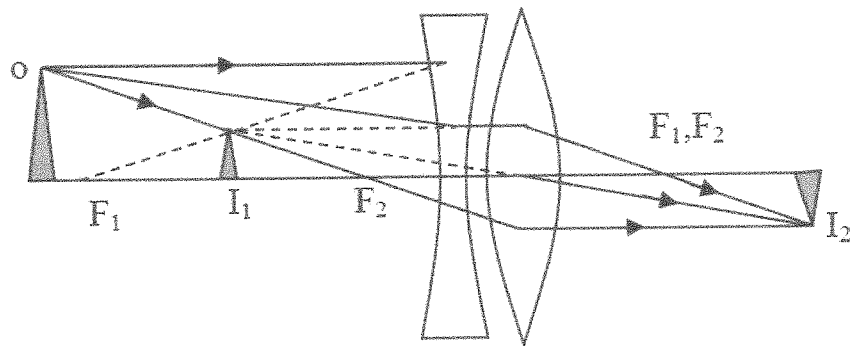
وتدل الإشارة الموجبة في قيمة M إلى أن الخيال صحيح أما طوله:

$$Q=\text{نسبة التكبير}\times\text{طول الجسم}$$

أي أن:

$$Q=\frac{1}{3}\times 3=1\,cm$$

مثال 8: وضع جسم على بعد $25\ Cm$ من عدسة مبعدة بعدها المحرقي $15\ Cm$، وتوضع خلف هذه العدسة عدسة مقربة بعدها المحرقي $10\ Cm$، وعلى بعد $5\ Cm$ منها كما في الشكل (27-5). أوجد موقع الخيال النهائي في جملة العدستين.



الشكل (27-5)

الحل: لدينا بالنسبة للعدسة الأولى:

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{q}=\frac{1}{f} \Rightarrow \frac{1}{25}+\frac{1}{q}=-\frac{1}{15}$$

وبالتالي $q=-\frac{75}{8}\ Cm$ بالنسبة للعدسة الثانية يكون بعد الجسم الذي هو الخيال الناتج عن الأولى:

$$p=\frac{75}{8}+5=\frac{115}{8}Cm$$

إذاً:

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{q}=\frac{1}{f} \Rightarrow \frac{8}{115}+\frac{1}{q}=\frac{1}{10}$$

وبالتالي $q=33\ Cm$، وهو بعد الخيال النهائي عن العدسة الثانية.