



منشورات جامعة دمشق
كلية العلوم

الضوء الهندسي

الدكتور معن سليم

أستاذ مساعد في قسم الفيزياء

1445 – 1446هـ

2024 – 2025 م

جامعة دمشق







منشورات جامعة دمشق
كلية العلوم

الضوء الهندسي

الدكتور معن سليم

أستاذ مساعد في قسم الفيزياء

1445 - 1446هـ

2024 - 2025 م

جامعة دمشق



فهرس المحتويات

الصفحة

7	مقدمة المؤلف
9	مقدمة عامة
13	1- الفصل الأول: انتشار الضوء
25	2- الفصل الثاني: تعريفات ومبادئ وقوانين أساسية في الضوء الهندسي
41	3- الفصل الثالث: الانعكاس الكلي الداخلي وأهم تطبيقاته وظاهرة تبديد الضوء
59	4- الفصل الرابع: الانعكاس والانكسار على سطوح مستوية
83	5- الفصل الخامس: الانعكاس والانكسار على سطوح كروية
125	6- الفصل السادس: قوانين العدسات الرقيقة ودراسة تشكل الأحيلة فيها
157	7- الفصل السابع: قوانين العدسات الثخينة ودراسة تشكل الأحيلة فيها
187	8- الفصل الثامن: إصطلاحات الإشارة وفقا لمفهوم المنظومة الضوئية
195	9- الفصل التاسع: الحظارات
205	10- الفصل العاشر: الزيوغ الهندسة والزيوغ اللونية
235	11- الفصل الحادي عشر: العين والرؤية والآلات البصرية
255	ملحق: (1): حل بعض مسائل الفصول
281	ملحق: (2): جدول بأهم الثوابت الأساسية في الضوء

283

ملحق (3): المصطلحات العلمية

315

المراجع العربية والأجنبية



مقدمة المؤلف

يُدرس الضوء الهندسي ظاهرة انتشار الضوء في أوساط مختلفة وذلك باعتبار أن للضوء طبيعة موجية. ولكن فُرض أن الضوء ينتشر وفق أشعة وذلك بغية تبسيط دراسة ظاهرتي الانعكاس والانكسار في الأدوات الضوئية. في هذا الكتاب دُرست كل من ظاهرتي الانعكاس والانكسار بشكل منفصل، وذلك بغرض التسهيل للقارئ، ولكن يجب دائماً أن يتذكر الطالب بأن هاتين الظاهرتين غالباً ما تحدثان معاً، أي إنَّ الشعاع الضوئي يعاني من انعكاس وانكسار في آن واحد. كذلك أتمنى على الطالب دوماً قراءة القوانين فيزيائياً والتركيز على صيغ القوانين بالحالة العامة وعليه أن يتدرب على كيفية الانتقال من الحالة العامة إلى الحالة الخاصة، وبالتالي مهما تغيرت أوساط انتشار الضوء يمكنه أن يكيف هذه القوانين مع هذه الأوساط الجديدة. لقد تم وضع عدد من الأمثلة المحلولة وغير المحلولة أملاً بأن يقوم الطالب بمحاولة حل هذه المسائل بنفسه، وذلك قبل حل بعضها في الدرس.

قُسِم هذا الكتاب إلى إحدى عشر فصلاً بالإضافة إلى بعض الملاحق والمراجع العلمية، فقد تناول الفصل الأول دراسة انتشار الضوء، والفصل الثاني تناول تعريفات ومبادئ وقوانين أساسية في الضوء، وتم في الفصل الثالث دراسة ظاهرة الانعكاس الكلي الداخلي وأهم تطبيقاته ودراسة ظاهرة تبدد الضوء. أما الفصل الرابع والخامس فتناول دراسة الانعكاس والانكسار على سطوح مستوية وكروية على التوالي، والفصل السادس دُرست فيه قوانين العدسات الرقيقة ودراسة تشكل الأخيلة فيها. الفصل السابع تناول قوانين العدسات الثخينة ودراسة تشكل الأخيلة فيها. أما الفصل الثامن يدرس اصطلاحات الإشارة وفقاً لمفهوم المنظومة الضوئية. الفصل التاسع والعاشر فتناولوا الحظارات والزيوغ (الهندسية واللونية)

على التوالي، واختص الفصل الحادي عشر بدراسة بعض تطبيقات الضوء الهندسي وهي الآلات البصرية والعين البشرية. وأخيراً تضمنت الملاحق حل بعض مسائل الفصول وجدولاً بأهم الثوابت الأساسية في الضوء، كما ضم الكتاب بعض المصطلحات العلمية المستخدمة والمراجع العلمية.

يشكر المؤلف أعضاء اللجنة العلمية المؤلفة من السادة الدكتور كمال كايد والدكتور كنج الشوفي والدكتور إبراهيم الغريبي والمدقق اللغوي الدكتور سامر محمود زيود على اقتراحاتهم العلمية واللغوية القيمة كما ويشكر المؤلف الدكتور تمام مطاوع من المعهد العالي لبحوث الليزر وتطبيقاته على ملاحظاته القيمة والتي أغنت هذا الكتاب آملين الفائدة والإفادة من الجميع.

المؤلف

مقدمة عامة

من الأخطاء الشائعة في الامتحانات النظرية للضوء الهندسي هي في حساب أجوبة المسائل. هنا أود أن اذكّر بأن الضوء الهندسي يختلف عن باقي المقررات من حيث دقة الإجابات. فهناك فرق كبير كما سنرى لاحقاً بين أن يكون الخيال في اللانهاية أو في نقطة ما أو أن يكون الخيال وهمياً أو حقيقياً أو أن يكون الخيال صحيحاً أو مقلوباً، فطبيعة الخيال يحددها الجواب النهائي. قد يكون معظم الطلاب لم يستخدموا الآلة الحاسبة خلال مراحل دراستهم بالمرحلة الثانوية ومن هنا يجب على جميع الطلاب التدرب على استخدام الآلة الحاسبة بشكل جيد قبل دخولهم الامتحان حتى لا يخسروا أي علامة نتيجة الخطأ بالحساب، وبالتالي بتحديد طبيعة الخيال. بغية التدرب على الآلة الحاسبة نضع فيما يلي بعض الأمثلة يطلب من الطالب حسابها بالآلة الحاسبة:

مثال 1: أوجد نتائج مايلي بالدرجات وبالراديان:

$$\tan \theta = 0.7 \Rightarrow \theta = ?$$

$$\sin \theta = -0.3 \Rightarrow \theta = ?$$

$$\cos \theta = 0.4 \Rightarrow \theta = ?$$

$$\tan \theta = -0.83 \Rightarrow \theta = ?$$

مثال 2: بفرض $f = 10 \text{ cm}$ أوجد قيم q من أجل القيم التالية لـ $p = 5 \text{ cm}$ و $p = 10 \text{ cm}$ و $p = 12 \text{ cm}$ و $p = 15 \text{ cm}$ و $p = -10 \text{ cm}$ و $p = -5 \text{ cm}$ و $p = 33 \text{ cm}$ باستخدام العلاقة التالية:

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

مثال 3: بفرض $f = -10 \text{ cm}$ أوجد قيم q من أجل القيم التالية لـ $p = 5 \text{ cm}$ و $p = 10 \text{ cm}$ و $p = -10 \text{ cm}$ و $p = 15 \text{ cm}$ و $p = 12 \text{ cm}$ و $p = 40 \text{ cm}$ و $p = 253 \text{ cm}$ باستخدام العلاقة التالية:

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

مثال 4: أوجد ناتج مايلي:

$$9 \times 10^{19} \frac{5 \times 10^{-9} \times 2.56 \times 10^{-8}}{(12.44 \times 10^{-2})^2} = ?$$

$$\frac{1}{20 - x} + \frac{1}{150} = \frac{1}{123} \Rightarrow x = ?$$

$$\frac{1152 \times 10^{-3}}{23} = -\frac{303}{x} \Rightarrow x = ?$$

$$e^{15} = ?$$

$$\ln(13) = ?$$

$$\log(1500) = ?$$

$$\sqrt{456} = ?$$

$$\sqrt[3]{12345} = ?$$

$$(234)^5 = ?$$

مثال 5: إذا كان $\bar{a} = 2017.34cm$ و $\bar{b} = 10.543m$ أوجد قيمة z المعطاة

$$z = \frac{b^3 \sqrt{a}}{(a-b)^2} \text{ واستنتج وحدة المقدار } z.$$

ملاحظة: من الأخطاء الشائعة أيضاً هي عند التعويض في أي معادلة لا تراعى فيها تجانس جملة الواحدات القياسية، فمثلاً إذا كان لدينا العلاقة التالية:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \text{ حيث إن } f \text{ و } p \text{ و } q \text{ كلها أبعاد، فيجب أن تقدر كل منها بالمتري أو}$$

كل منها بالسم أو الخ. فمن الأخطاء الشائعة مثلاً هي أن تقدر f مثلاً بالسم و q و p بالمتري.



الفصل الأول انتشار الضوء

- 1.1- طبيعة الضوء
- 1.2- قياس سرعة الضوء
- 1.3- مصادر الضوء
- 1.4- وسطاء الموجة الضوئية
- 1.5- مجال الأمواج الضوئية
- 1.6 - صدر الموجة والشعاع الضوئي



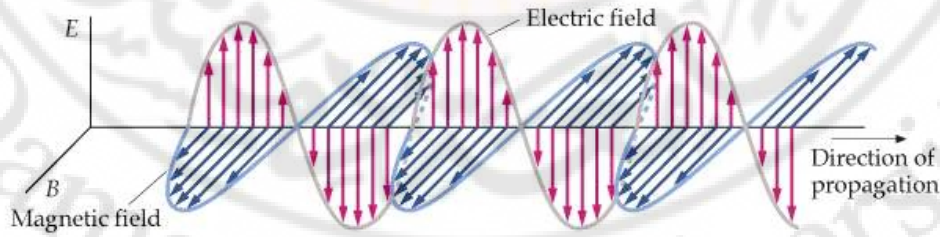
الفصل الأول انتشار الضوء

1.1 – طبيعة الضوء

في بدايات القرن الماضي توصل العلماء إلى أن للضوء طبيعة ثنائية (جسيمية – موجية)، فالنموذج الموجي للضوء يصف بشكل أفضل انتشار الضوء في حين النموذج الجسيمي يصف بشكل أفضل إصدار الضوء وامتصاصه. وهذه النتيجة أتت بعد جهود كبيرة من العلماء على مر العصور. فيما يلي لمحة تاريخية تصف كيف بدأ العلماء يفكرون بطبيعة الضوء. اعتقد اليونان أنَّ الضوء يتكون من جسيمات صغيرة تصدر عن منبع الضوء، وهذه الجسيمات تحرض حاسة الرؤية نتيجة دخول هذه الجسيمات إلى عين الناظر. العالم نيوتن استخدم هذا المفهوم الجسيمي للضوء لتوضيح ظاهرتي انكسار الضوء وانعكاسه. معظم العلماء قبلوا بنظرية نيوتن الجسيمية للضوء، ففي عام 1678؛ استطاع الفيزيائي النمساوي هيغنز (Christian Huygens) (المعاصر لنيوتن) من توضيح خواص كثيرة للضوء وذلك بافتراض أن الضوء هو عبارة عن موجة، لكن في ذلك الوقت، لم تلق النظرية الموجية للضوء قبولاً فورياً من العلماء إذ كانت حججهم: إذا كان الضوء على شكل موجة؛ فإنه سيلتف حول أي حاجز؛ وبالتالي يجب أن نكون قادرين على الرؤية حول الزوايا. لاحقاً أصبح معروفاً أنَّ الضوء يلتف حول أحرف الجسم وأن هذه الظاهرة تعرف بالانعراج، وأن هذه الظاهرة ليس من السهل ملاحظتها لأن الأمواج الضوئية تملك أطوالاً موجية قصيرة. فبالرغم من تقديم العالم فرانسيسكو غرمالدي (Francesco Grimaldi) دليلاً تجريبياً يبرهن فيه حدوث الانعراج، إلا أنَّ معظم العلماء رفضوا النظرية الموجية للضوء واعتمدوا النظرية الجسيمية لنيوتن لأكثر من قرن من الزمن.

في عام 1801 قدم تومس يونغ (Thomas Young) شواهد واضحة لطبيعة الضوء الموجية. وأثبت العالم يونغ أنه تحت شروط مناسبة يمكن أن تتداخل الحزمة الضوئية مع بعضها مع الآخر. في ذلك الوقت عجزت النظرية الجسيمية عن تفسير ظاهرة الانعراج بسبب عدم وجود طريقة إقناع بأن تداخل جسيمين أو أكثر تكون نتيجته اجتماع الجسيمين معاً، أو أن يلغي أحدهما الآخر، وهذا أعطى دعماً إضافياً للنظرية الموجية للضوء. بعد عدة سنوات أجرى الفيزيائي الفرنسي Augustin Fresnel عدداً من التجارب لها علاقة بالتداخل والانعراج، وفي عام 1850 قدم العالم Jean Foucault أدلة أخرى على عدم كفاية النظرية الجسيمية لتفسير بعض خواص الضوء.

حدثت في القرن التاسع عشر خطوات أخرى، أدت إلى قبول عام بالنظرية الموجية للضوء؛ وأهم نتيجة تم الحصول عليها كانت من عمل مكسويل 1873 الذي أثبت بأن الضوء هو شكل من الموجة الكهرومغناطيسية ذات التواتر العالي. إن توقعات مكسويل للإشعاع الكهرومغناطيسي أظهرت أن سعة كل من الحقل الكهربائي والحقل المغناطيسي في الموجة الكهرومغناطيسية (انظر الشكل (1.1)) ترتبط مع بعضها بالعلاقة $E = cB$ ؛ حيث c سرعة الضوء و E سعة الحقل الكهربائي و B سعة الحقل المغناطيسي.



الشكل (1.1): موجة كهرومغناطيسية تنتشر بسرعة الضوء.

ومن بعده قام العالم هرتز عام 1887 بإثبات تجريبي لنظرية مكسويل بوساطة إرسال الأمواج الكهرومغناطيسية والتقاطها، ووصل إلى نتيجة بأن الضوء هو بالتأكيد أمواج كهرومغناطيسية. بالإضافة إلى ذلك؛ بين هرتز وعلماء آخرون، أنَّ هذه الأمواج تخضع للانعكاس وللانكسار وتظهر كل الخواص الأخرى المميزة للأمواج.

وعلى الرغم من أن النموذج الموجي والنظرية الحديثة (الكلاسيكية) للكهرباء والمغناطيسية كانت قادرة على توضيح معظم الخواص المعروفة للضوء؛ لكنهم لم يكونوا قادرين على توضيح بعض النتائج التجريبية، وأهمها الأثر الكهروضوئي. إذ إن مفهوم الأثر الكهروضوئي اكتشف لأول مرة من قبل العالم هرتز وخلص بما يأتي: عندما يسقط الضوء على بعض المعادن، تصدر الإلكترونات. ففي بدايات القرن الثاني عشر، عاد العالم ماكس بلانك إلى النظرية الجسيمية للضوء لتوضيح الأثر الكهروضوئي. من بعده استخدم العالم أينشتاين أيضاً النظرية الجسيمية للضوء لتوضيح الأثر الكهروضوئي، ووضع العالم أينشتاين عام 1905 نظرية استخدم فيها مفهوم الكم. ففهم الكم يفترض بأن طاقة موجة الضوء تكون موجودة في جسيمات تدعى الفوتونات؛ بالنتيجة يمكن القول أنَّ الطاقة قد كملت. تبعاً لنظرية أينشتاين؛ فإن طاقة الفوتون E_f تكون متناسبة مع التواتر f للموجة الكهرومغناطيسية $E_f = hf$ ؛ حيث h هو ثابت التناسب ويساوي $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ Js}$ ، ويدعى ثابت بلانك. ويكون بالتالي التأثير الكهروضوئي كنتيجة تحول الطاقة من فوتون واحد إلى إلكترون واحد في المعدن مما يسبب اقتلاع الإلكترون من سطح المعدن.

1.2- قياس سرعة الضوء

تبلغ سرعة الضوء ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$) وهذه القيمة لسرعة الضوء تستخدم حالياً. وكانت هناك محاولات كثيرة لقياس سرعة الضوء إذ قام العالم الفرنسي فيزو Fizeau عام 1849 بقياس سرعة الضوء ولم تكن قياسات فيزو ذات دقة عالية. ومن ثم أجريت تجارب أخرى بتعديل طريقة فيزو بقياس سرعة الضوء فنتج عنها قياس سرعة الضوء بدقة أكبر وقد تم التوصل إلى سرعة ضوء: $2.997929 \times 10^8 \text{ m/s}$ وهذه القيمة قريبة للقيمة التي نستخدمها في وقتنا الحاضر لسرعة الضوء.

1.3 - مصادر الضوء

تضاء كل المواد ذاتياً إذا تم تسخينها إلى درجات حرارة عالية بشكل كاف. هناك مصادر ضوئية أخرى، مثال على ذلك شعلة الشمعة، الفحم الساخن المتوهج؛ السخان الكهربائي؛ سلك الللمبة الكهربائية الخ. كذلك يُعدُّ الليزر والإنفراغ الكهربائي باستخدام غاز متشرد (مصباح النيون) مصادر ضوئية.

1.4- وسطاء الموجة الضوئية

فيما يلي تذكرة بأهم العلاقات التي تصف الموجة والتي سوف تساعدنا في توصيف موجة الضوء. فوسطاء الموجة هم الدور T والتواتر f وطول الموجة λ وسرعة الانتشار v . نُعرّف طول الموجة (λ) بأنها المسافة التي يقطعها الضوء خلال زمن قدره دور T (ويمكن تعريف طول الموجة أيضاً بأنها المسافة بين نقطتين

متعاقبتين لهما نفس الحالة الاهتزازية). إذ يرتبط وسطاء الموجة فيما بينهم بالعلاقات التالية:

$$f = \frac{1}{T}$$
$$\lambda = vT = \frac{v}{f}$$

وفي حال كون الوسط هو الخلاء بالتالي نرسم لسرعة انتشار الضوء في الخلاء بالرمز c تكتب عندها المعادلة الأخيرة بالشكل:

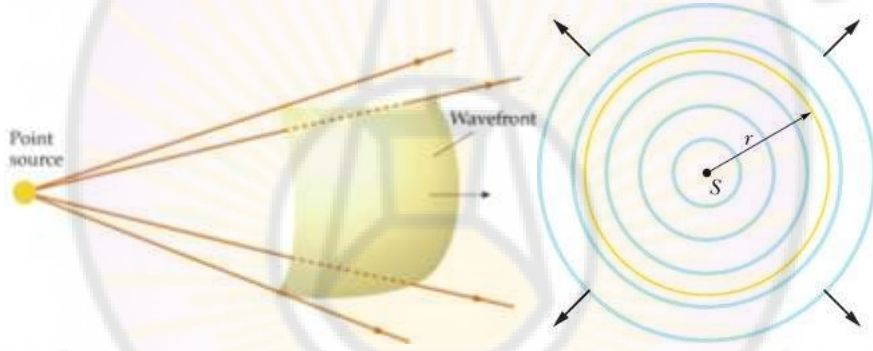
$$\lambda = cT = \frac{c}{f} \Rightarrow c = \lambda f$$

1.5- مجال الأمواج الضوئية

يعرف المجال المرئي من الأطوال الموجية للضوء بأنه المجال الذي تتحسس له العين البشرية فهو يمتد من اللون البنفسجي (طول موجته $\lambda = 0.4 \mu m$) إلى اللون الأحمر (طول موجته $\lambda = 0.7 \mu m$). وهناك الأمواج ماتحت الأحمر التي يكون فيها الطول الموجي أكبر من طول الموجة الحمراء. وكذلك هناك أمواج ما فوق البنفسجي التي يكون فيها الطول الموجي أصغر من طول الموجة البنفسجية. الضوء الأبيض أو المركب أو متعدد الألوان (مثال ضوء الشمس ومعظم المنابع الضوئية) يتكون من أطوال موجية مختلفة. الضوء البسيط أو وحيد اللون هو ضوء يمتلك طولاً موجياً وحيداً.

1.6 - صدر الموجة والشعاع الضوئي

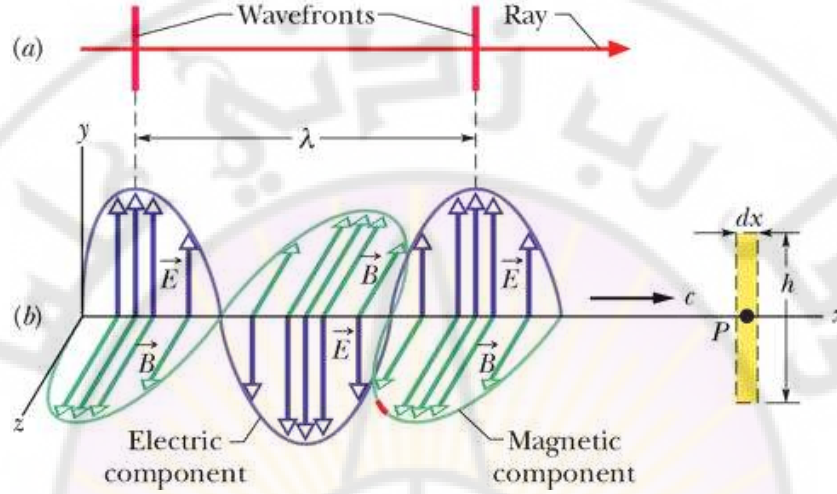
في الضوء الهندسي يُوصف انتشار الضوء بأوساط مختلفة بالطبيعة الموجية للضوء، وسوف نستخدم تحديداً مفهوم صدر الموجة (wavefront) لوصف انتشار الأمواج في أوساط مختلفة حيث يعرف صدر الموجة بأنه المحل الهندسي للنقاط التي تقع في طور واحد. فإذا كان المنبع نقطياً (Point source) فإنه يصدر أمواجاً في الهواء، بعد فترة زمنية t تصل موجة هذا الضوء إلى سطح كرة نصف قطرها $r = ct$ حيث c سرعة الضوء في الهواء (أو الخلاء)، وبالتالي يكون صدر الموجة في هذه الحالة كروياً (انظر إلى الشكل (1.2))، وبالطريقة نفسها إذا كان المنبع مستقيماً كان صدر الموجة أسطوانياً.



الشكل (1.2): منبع نقطي يصدر أمواجاً ضوئية كروية بشكل منتظم في كل الاتجاهات (يمين) ومقطع من صدر الموجة الكروي لمنبع نقطي (يسار)

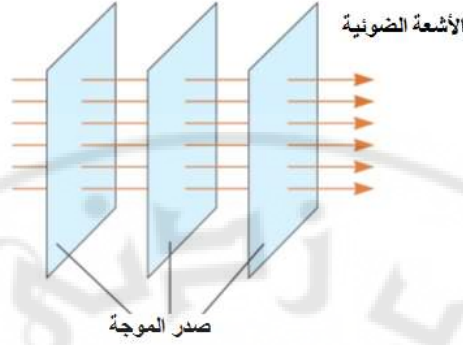
ولكن في الكثير من الحالات نمثل موجة الضوء بأشعة بدلاً من صدور الموجة وذلك عند وصف جهة انتشار الضوء. فالشعاع الضوئي المار من نقطة هو خط وهمي يعبر عن اتجاه انتشار الضوء ويكون دوماً عمودياً على صدر الموجة في

تلك النقطة. الشكل (1.3) يوضح كيفية تمثيل صدر موجة كهريطيسية طول موجتها λ بشعاع حيث تنتقل صدور الموجات بالسرعة c .



الشكل (1.3): تمثيل موجة كهريطيسية طول موجتها λ بشعاع

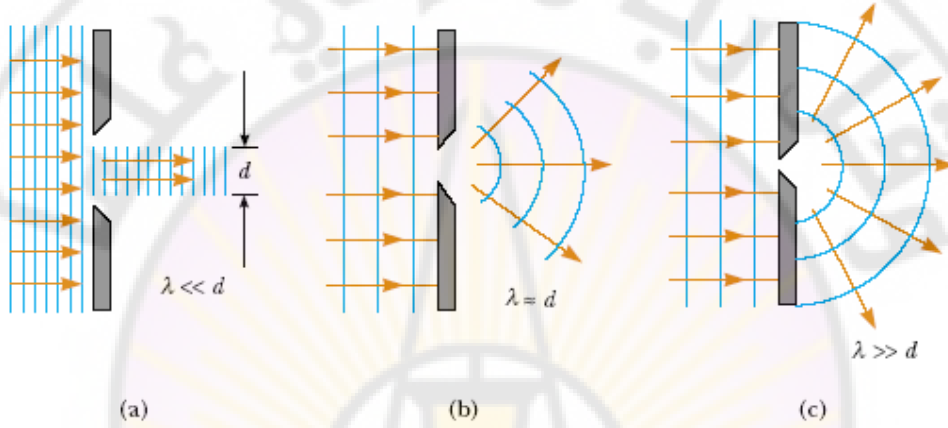
كلما ابتعدنا عن المنبع النقطي وفي حال أصبح نصف قطر صدر الموجة كبيراً جداً عندها يمكننا بالتقريب عدّ صدور الأمواج مستوية وعندها تكون الأشعة الضوئية أشعة متوازية فيما بينها كما في الشكل (1.4)؛ مثال على ذلك الأمواج التي تصل إلى الأرض من الشمس.



الشكل (1.4): موجة مستوية تنتشر إلى اليمين. لاحظ أن الأشعة الضوئية هي خطوط مستقيمة متوازية عمودية على صدور الأمواج

في الضوء الهندسي يُدرس انتشار الضوء في أوساط مختلفة (المرايا؛ العدسات؛ المواشير والأدوات الضوئية الأخرى كالمناظير؛ المجهر الخ)، وبالتالي يجب أن نستخدم حزمة أشعة ضوئية متوازية فيما بينها ونحقق ذلك باستخدام فتحة دائرية كما في الشكل (1.5). نلاحظ من هذا الشكل أنَّ هناك بعض الحالات يمكننا فيها استخدام مفهوم الشعاع الضوئي في الضوء الهندسي وحالات أخرى لا نستطيع استخدامه. فيما يلي بعض الحالات، فمثلاً نلاحظ من الشكل (1.5a) أن طول موجة الضوء أصغر بكثير من قطر الفتحة الدائرية (d) أي ($d \gg \lambda$)، عندها نلاحظ أنَّ الأشعة الضوئية متوازية فيما بينها، ويمكن استخدام هذه الحالة في الضوء الهندسي. أما في الشكل (1.5b) فيكون فيه طول موجة الضوء مساوياً قطر الفتحة (d) أي ($\lambda = d$) نلاحظ أن الأشعة الضوئية الصادرة من الفتحة غير متوازية فيما بينها، وبالتالي هذه الحالة لا يمكن استخدامها بالضوء الهندسي وهي تصف ظاهرة انعراج الأمواج الضوئية عند الحواف، وسوف تدرس بالتفصيل في مقرر الضوء الفيزيائي. الحالة الأخيرة يكون فيها طول موجة الضوء أكبر بكثير

من قطر الفتحة (d) أي ($\lambda \gg d$) (الشكل (1.5c)). نلاحظ أن الأشعة الضوئية الصادرة من الفتحة غير متوازية ومتباعدة أكثر من الحالة السابقة، وهنا تسلك الفتحة سلوك منبع نقطي يصدر أمواجاً كروية، بالتالي هذه الحالة لا يمكن استخدامها بالضوء الهندسي، كذلك تصف هذه الحالة انعراج الأمواج الضوئية وسوف تدرس بالتفصيل في مقرر الضوء الفيزيائي.



الشكل (1.5): موجة مستوية بطول موجة λ واردة على حاجز يحتوي فتحة قطرها d . (a) عندما $\lambda \ll d$ ، الأشعة تتابع سيرها من خلال الفتحة وفق خط مستقيم، ويكون في هذه الحال مفهوم الشعاع ساري المفعول. (b) عندما $\lambda \approx d$ ، الأشعة تنتشر خارجاً من الفتحة في كل الاتجاهات. (c) عندما $\lambda \gg d$ ، تسلك الفتحة سلوك منبع نقطي يصدر أمواجاً كروية.

خلاصة: نستنتج أنه لدراسة سير الأشعة في الأدوات البصرية نحتاج إلى حزمة ضوئية ضيقة نحصل عليها باستخدام فتحة ضيقة في حاجز بحيث يتحقق $\lambda \ll d$ حيث في هذه الحالة تكون الأشعة البارزة متوازية فيما بينها.



الفصل الثاني: تعريفات ومبادئ وقوانين أساسية في الضوء الهندسي

- 2.1 - قرينة الانكسار المطلقة والنسبية
- 2.2 - علاقة قرينة الانكسار بتواتر موجة الضوء وطولها
- 2.3 - علاقة قرينة الانكسار المطلقة بكثافة المادة
- 2.4 - المسار الضوئي في الأوساط متماثلة المنحي وغير متماثلة المنحي
- 2.5 - قوانين الانعكاس والانكسار
- 2.6 - مبدأ عكسية الضوء
- 2.7 - مبدأ هيغنز (Huygens principle)
- 2.8 - مبدأ فيرما (Fermat's Principle)
- 2.9 - شدة الانعكاس R و شدة النفاذ T



الفصل الثاني: تعريفات ومبادئ وقوانين أساسية في

الضوء الهندسي

يعرض هذا الفصل أهم المبادئ والتعريفات والقوانين الأساسية في الضوء الهندسي. إنَّ أهم ظاهرتين تصف انتشار الضوء هما الانعكاس والانكسار، وسوف نستخدم مفهوم الشعاع الضوئي لدراسة هاتين الظاهرتين.

2.1 – قرينة الانكسار المطلقة والنسبية

تتغير سرعة الضوء بالانتقال من وسط شفاف إلى آخر فتكون سرعته عظمى في الهواء أو الخلاء حيث سرعة الضوء في الخلاء ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$). تتصف كل مادة شفافة بقرينة انكسار مطلقة تميزها عن باقي المواد، وتعرف قرينة الانكسار المطلقة لمادة شفافة ما n بأنها نسبة سرعة انتشار الضوء في الخلاء c على سرعته في هذه المادة v أي

$$n = \frac{c}{v} \geq 1 \quad (2.1)$$

فقرينة الانكسار المطلقة لا واحدة لها وهي تساوي الواحد من أجل الهواء أو الخلاء، وتكون أكبر من الواحد في بقية الأوساط وذلك بسبب كون سرعة الضوء في الخلاء أكبر من سرعته في بقية المواد الشفافة ($c > v$). يبين الجدول (2.1) بعض قيم قرائن الانكسار المطلقة لعدد من المواد.

أما قرينة الانكسار النسبية للوسط الثاني بالنسبة للوسط الأول (n_{21}) فهي تعرف على أنها نسبة سرعة الضوء في الوسط الأول (v_1) على سرعته في الوسط الثاني (v_2) أي:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{c/v_2}{c/v_1} = \frac{v_1}{v_2} \quad (2.2)$$

Indices of Refraction			
Substance	Index of Refraction	Substance	Index of Refraction
<i>Solids at 20°C</i>		<i>Liquids at 20°C</i>	
Cubic zirconia	2.20	Benzene	1.501
Diamond (C)	2.419	Carbon disulfide	1.628
Fluorite (CaF ₂)	1.434	Carbon tetrachloride	1.461
Fused quartz (SiO ₂)	1.458	Ethyl alcohol	1.361
Gallium phosphide	3.50	Glycerin	1.473
Glass, crown	1.52	Water	1.333
Glass, flint	1.66	<i>Gases at 0°C, 1 atm</i>	
Ice (H ₂ O)	1.309	Air	1.000 293
Polystyrene	1.49	Carbon dioxide	1.000 45
Sodium chloride (NaCl)	1.544		

Note: All values are for light having a wavelength of 589 nm in vacuum.

الجدول (2.1): قيم قرينة الانكسار لبعض المواد

ومن هنا نستطيع بناء على قرينة الانكسار تصنيف الأوساط الشفافة إلى وسط متمائل المنحني ووسط متباين المنحني. إذ يوصف الوسط بأنه متمائل المنحني إذا كان له قرينة انكسار واحدة كيفما كان منحى انتشار الضوء وحيد اللون فيه. أما الوسط متباين المنحني فتختلف قرينة انكساره باختلاف منحى انتشار الضوء فيه. ويُعرّف الوسط المتجانس بالوسط الذي لا يتغير تركيبه وشروطه الفيزيائية من نقطة إلى أخرى. سوف تقتصر دراستنا في الضوء الهندسي على الأوساط متمائلة المنحني والمتجانسة أي الأوساط التي لها قرينة انكسار ثابتة في كل منحي انتشار الضوء من خلالها.

2.2 – علاقة قرينة الانكسار بتواتر موجة الضوء وطولها

إن تواتر الاهتزاز للضوء وحيد اللون f لا يتغير عندما ينتشر هذا الضوء عبر أوساط شفافة مختلفة وبالتالي دور الاهتزاز T يكون ثابتاً. أما طول موجة الضوء فهي تتغير بتغير قرينة انكسار الوسط ونستطيع استنتاج ذلك من حقيقة أن العلاقة $v = f\lambda$ قابلة للتطبيق في الأوساط الشفافة كافة. وبالتالي يمكننا الكتابة من أجل وسطين شفافين:

$$v_1 = f \lambda_1, \quad v_2 = f \lambda_2 \quad (2.3)$$

حيث v_1 و v_2 هما سرعة الضوء في الوسط الأول وسرعته في الوسط الثاني على التوالي وأن λ_1 و λ_2 طول موجة الضوء في الوسط الأول والوسط الثاني على التوالي. نلاحظ من العلاقة (2.3) أن التواتر ثابت، وبما أن سرعة الضوء مختلفة بكل وسط بالتالي نستنتج رياضياً اختلافاً بطول الموجة للضوء في كل وسط، أي بما أن الوسطين مختلفان بقرينة الانكسار فيكون $v_1 \neq v_2$ و منه وبحسب العلاقة (2.3) نستنتج أن $\lambda_1 \neq \lambda_2$. ومنه نستطيع استنتاج تابعة طول الموجة بقرينة الانكسار كما يلي.

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.4)$$

ومنه:

$$\lambda_1 n_1 = \lambda_2 n_2 \quad (2.5)$$

حيث إن n_1 و n_2 هما على التوالي قرينة انكسار الوسط الأول والوسط الثاني.

مثال (1):

ليكن ضوء ليزر ينتشر في الهواء طول موجة 780 nm. و المطلوب:

(أ)- أوجد سرعة انتشار هذا الضوء عندما يدخل وسطاً ثانياً من مادة

البلاستيك قرينتها $n = 1.55$.

(ب)- أوجد طول موجة ذلك الضوء في مادة البلاستيك.

الحل: تحسب سرعة الضوء كما يلي:

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3 \times 10^8}{1.55} = 1.97 \times 10^8 \text{ m/s}$$

وباستخدام العلاقة (2.5) تكون طول موجة الضوء في مادة البلاستيك:

$$\lambda_2 = \frac{n_1 \lambda_1}{n_2} = \frac{1 \times 780}{1.55} = 503 \text{ nm}$$

2.3 – علاقة قرينة الانكسار المطلقة بكثافة المادة

تتعلق قرينة الانكسار المطلقة بالإضافة إلى طول الموجة بعوامل فيزيائية أخرى

مثل الكثافة والبنية البلورية والتركيب الكيميائي للمادة. حيث تعطى علاقة قرينة

الانكسار بدلالة الكثافة بالعلاقة التالية:

$$n = \rho k + 1 \quad (2.6)$$

حيث إن k مقدار ثابت يتعلق بالوسط، ونلاحظ أن العلاقة خطية بين قرينة

الانكسار المطلقة n وكثافة المادة ρ . وكذلك هناك علاقة لتابعة قرينة الانكسار

n_T بدرجة الحرارة T التي تعطى بالمعادلة التالية:

$$n_T = \frac{\rho_0 k}{1 + \gamma T} + 1 \quad (2.7)$$

حيث T درجة الحرارة و γ عامل التمدد الحجمي للمادة و ρ_0 هي كثافة المادة في درجة الحرارة صفر مئوية. نلاحظ من هذه العلاقة أن قرينة الانكسار المطلقة تتناسب عكساً مع درجة الحرارة للمادة.

2.4 – المسار الضوئي في الأوساط متماثلة المناحي وغير متماثلة المناحي

عند انتقال الضوء من نقطة A الواقعة على صدر موجة ما إلى نقطة B الواقعة على صدر موجة لاحقة وذلك من خلال أوساط مختلفة متماثلة المناحي مسافات هندسية D_1 ، D_2 ، D_3 ، الخ يعطى الزمن اللازم لوصول الضوء من A إلى B ضمن هذه الأوساط بالعلاقة التالية:

$$t = \frac{D_1}{v_1} + \frac{D_2}{v_2} + \frac{D_3}{v_3} + \dots \dots \quad (2.8)$$

حيث إن v_1 و v_2 و v_3 و ... هي على التوالي سرعة الضوء في تلك الأوساط. ومن المعلوم أن المسافة الهندسية D التي يقطعها الضوء في وسط ما خلال الزمن t تعطى بالعلاقة: $D = vt$ حيث v سرعة انتشار الضوء في الوسط المعبر، و t زمن الانتشار، وفي حال كان وسط الانتشار هو الخلاء فتكون عندها هذه المسافة $D = ct$ حيث c سرعة الضوء في الخلاء. بضرب طرفي العلاقة (2.8) بسرعة الضوء في الخلاء، يمكننا إعادة كتابة هذه العلاقة بالشكل:

$$ct = c \frac{D_1}{v_1} + c \frac{D_2}{v_2} + c \frac{D_3}{v_3} + \dots \dots \quad (2.9)$$

نعوض بالعلاقة (2.9) $n = c/v$ نجد:

$$ct = n_1 D_1 + n_2 D_2 + n_3 D_3 + \dots = \sum_i n_i D_i = \Delta \quad (2.10)$$

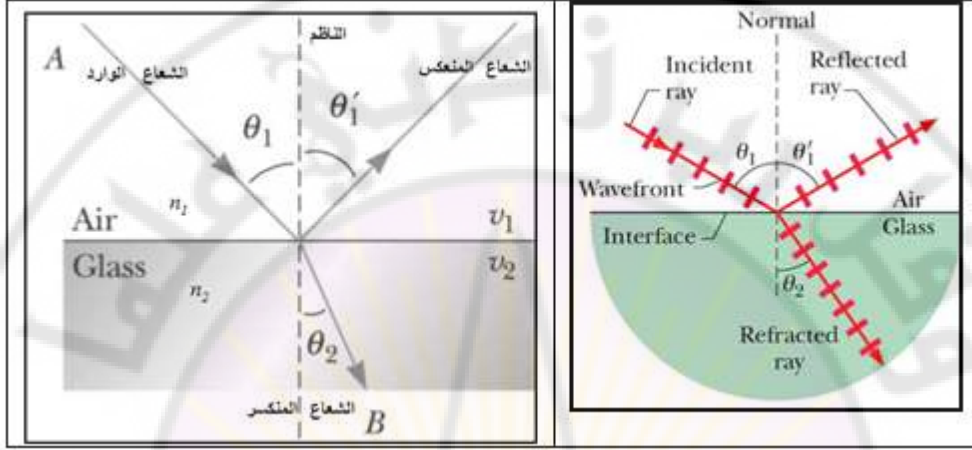
من العلاقة (2.10) نستنتج أن المسار الضوئي Δ بين صدري الموجتين الموافقتين للنقطتين A و B يساوي إلى المسافة الهندسية التي يقطعها الضوء في الخلاء خلال الفترة الزمنية t نفسها التي يقطع فيها الضوء في تلك الأوساط المسافات الهندسية $\sum_i D_i$.
لكن في الأوساط غير متماثلة المنحي التي تكون فيها قرينة الانكسار تابعة للإحداثيات في كل نقطة فإن المسار الضوئي بين نقطتين منه A و B يعطى بالعلاقة:

$$\Delta = \int_A^B n(x, y, z) dD$$

2.5 - قوانين الانعكاس والانكسار

كما ذكرنا سابقاً سوف نستخدم مفهوم الشعاع الضوئي لدراسة انتشار الضوء في أوساط مختلفة. فعند ورود الضوء على سطح صقيل يفصل بين وسطين شفافين مختلفين بقرينة الانكسار (مثال هواء- زجاج أو هواء- ماء الخ) فإن الضوء ينعكس على هذا السطح وينفذ للوسط الثاني حيث ينكسر كما في الشكل (2.1). من الشكل (2.1) نستطيع تعريف زاوية الورود θ_1 بأنها الزاوية الكائنة بين الشعاع الوارد والناظم على السطح. وتعرف زاوية الانعكاس θ'_1 بأنها الزاوية الكائنة بين الشعاع المنعكس والناظم على السطح. وتعرف زاوية الانكسار θ_2 بأنها الزاوية الكائنة بين الشعاع المنكسر والناظم. ويعرف مستوي الورود بأنه المستوي الذي يحوي الناظم والشعاع الوارد. ويعرف مستوي الانعكاس بأنه المستوي الذي يحوي الناظم

والشعاع المنعكس. ويعرف مستوى الانكسار بأنه المستوي الذي يحوي الناظم والشعاع المنكسر. بفرض قرينة انكسار الوسط الأول n_1 وقرينة انكسار الوسط الثاني n_2 .

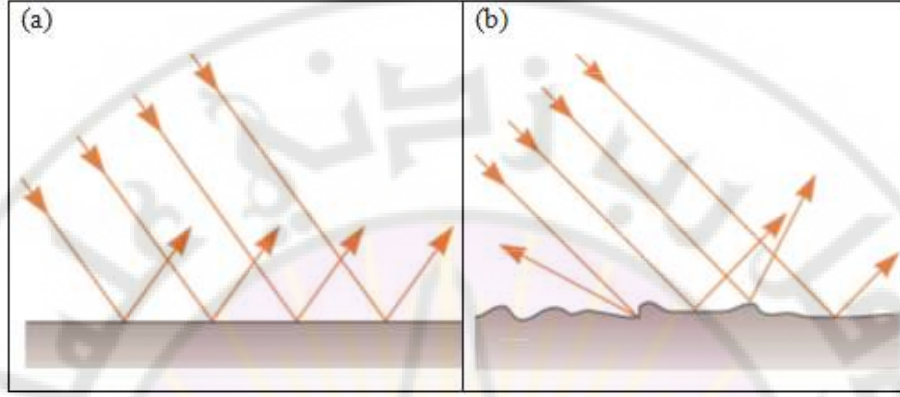


الشكل (2.1): ظاهرتا الانعكاس والانكسار

قانونا الانعكاس

هناك نوعان من الانعكاس يدعى النوع الأول الانعكاس المرآتي (أو المنتظم) والنوع الثاني يدعى الانعكاس المنتثر (أو المشتت). الانعكاس المرآتي يحدث عندما يكون السطح العاكس صقيلاً جداً وتضاريسه صغيرة بالمقارنة مع طول موجة الضوء المنعكس حيث تكون فيه جهة الأشعة المنعكسة متوازية فيما بينها كما في الشكل (2.2) (a). أما الانعكاس المنتثر فيحدث عندما يكون السطح العاكس خشناً (غير مصقول) ويمكن عده ناجماً عن عدد كبير من الانعكاسات المرآتية عن سطوح صغيرة التضاريس مختلفة الاتجاه التي يتكون منها السطح الخشن. حيث تنعكس الأشعة في

هذه الحال وفق اتجاهات عشوائية تحددها طبيعة السطح العاكس كما في الشكل (2.2) (b).



الشكل (2.2): الانعكاس المرآتي (a) والانعكاس المنتثر (b)

في كلاً الحالتين السابقتين يخضع الانعكاس لقانونين وهما: زاوية الانعكاس تساوي زاوية الورود ($\theta_1 = \theta'_1$) والشعاع المنعكس يقع في مستوي الورود (الشعاعان الوارد والمنعكس في مستوي واحد). وتجدد الإشارة هنا إلى أن الأشعة الواردة وفق الناظم تنعكس على نفسها.

قوانين الانكسار ومناقشتها

ينص القانون الأول في الانكسار والذي يدعى أيضاً بقانون سنل على أن النسبة بين جيب زاوية الورود وجيب زاوية الانكسار هي نسبة ثابتة أي:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \text{constant}$$

حيث إن v_1 و v_2 سرعة انتشار الضوء في كل من الوسيطين الأول والثاني. وبما أن $v_1 = c/n_1$ و $v_2 = c/n_2$ حيث إن n_1 قرينة انكسار الوسط الأول و n_2 قرينة انكسار الوسط الثاني نستطيع كتابة المعادلة السابقة بصيغة قانون سنل النهائية كما يلي:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.11)$$

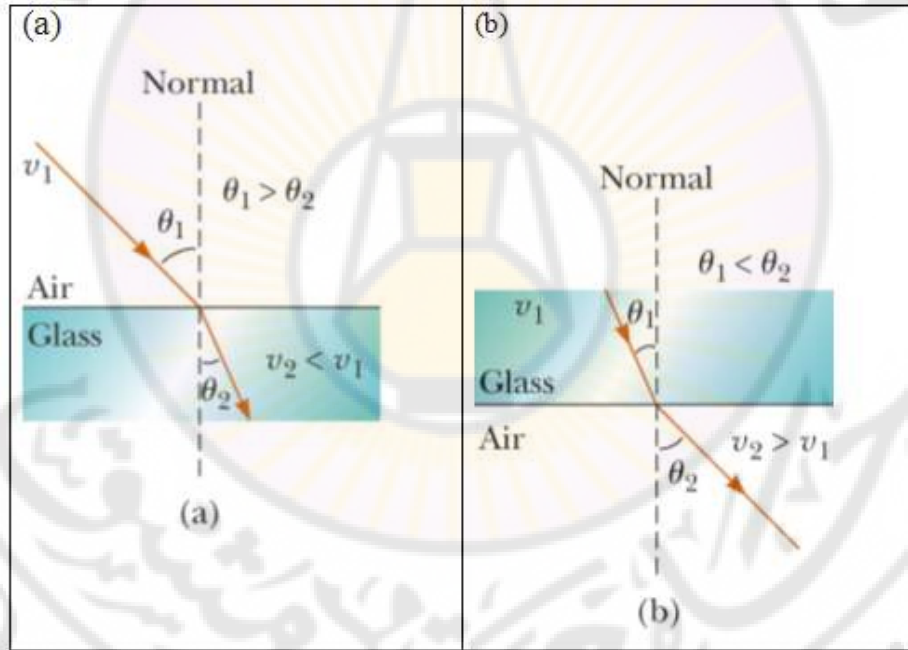
ويكتب قانون سنل في حال الزوايا الصغيرة بحيث يمكن الباس جيبى زاويتي الورود والانكسار بالزاويتين نفسيهما عندها نستطيع إعادة كتابة المعادلة (2.11) لتصبح كما يلي:

$$n_1 \theta_1 = n_2 \theta_2 \quad (2.12)$$

تدعى العلاقة (2.12) بقانون كبلر من أجل الزوايا الصغيرة ويجب أن تقدر الزوايا بالراديان عند استخدام هذه العلاقة.

مناقشة قانون الانكسار: من المعادلة (2.11) يمكن تفسير اقتراب الشعاع المنكسر (الشكل (2.3) a) من الناظم وابتعاد الشعاع المنكسر عن الناظم (الشكل (2.3) b). فالشعاع الضوئي المنكسر يكون مقرباً من الناظم (الشكل (2.3) a) إذا انتقل الضوء من وسط قرينة انكساره n_1 إلى وسط قرينة انكساره n_2 بحيث يكون $n_2 > n_1$. يمكن تفسير ذلك بالاعتماد على قانون سنل كما يلي: من قانون سنل نكتب $\sin \theta_2 = \frac{n_2}{n_1} \sin \theta_1$ وبما أن $\frac{n_2}{n_1} > 1$ تكون زاوية الانكسار أصغر θ_2 من زاوية الورود θ_1 أي إن الشعاع الضوئي المنكسر يكون مقرباً من الناظم في هذه الحالة، وهذه الحالة تفسر لنا سبب رؤية قلم رصاص ملتبس تحت الماء الشكل (2.4).

ويكون الشعاع الضوئي المنكسر مبتعداً عن الناطم (الشكل (2.3) (b) إذا انتقل الضوء من وسط قرينة انكساره n_1 إلى وسط قرينة انكساره n_2 بحيث يكون $n_2 < n_1$. يمكن تفسير ذلك بالاعتماد على قانون سنل كما يلي: من قانون سنل نكتب $\sin \theta_2 = \frac{n_2}{n_1} \sin \theta_1$ وبما أن $\frac{n_2}{n_1} < 1$ فتكون زاوية الانكسار θ_2 أكبر من زاوية الورود θ_1 أي إن الشعاع الضوئي المنكسر يكون مبتعداً عن الناطم في هذه الحالة. وتجدر الإشارة هنا إلى أن الأشعة الواردة وفق الناطم لا تنكسر (تنفذ إلى الوسط الثاني بالاستقامة نفسها).



الشكل (2.3): مناقشة قانون الانكسار. (a) عندما ينتقل الضوء من وسط أقل قرينة انكسار إلى وسط أكبر قرينة انكسار و (b) عندما ينتقل الضوء من وسط أكثر قرينة انكسار إلى وسط أقل قرينة انكسار.



الشكل (2.4): قلم رصاص يبدو كأنه ملتوٍ تحت الماء.

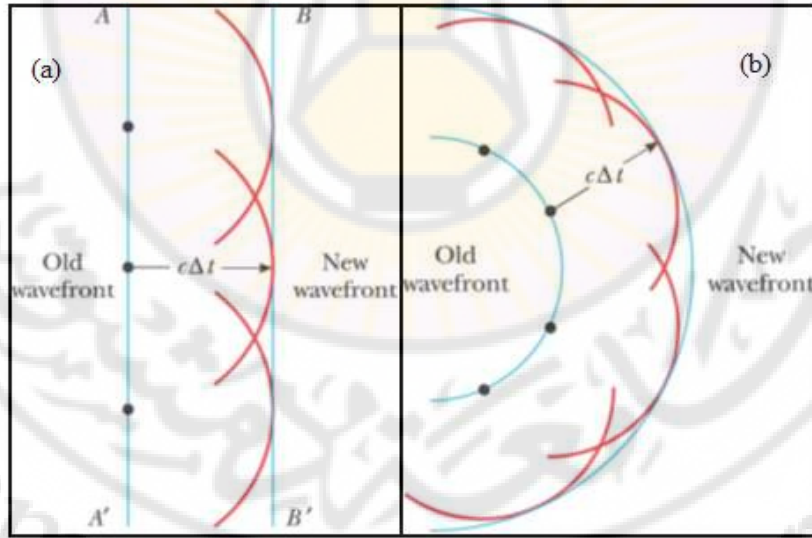
2.6 - مبدأ عكسية الضوء

إن الطريق الذي يسلكه الضوء لا يعتمد على جهة الانتشار أي إنه في حالة انعكاس الضوء إذا عكسنا سير الشعاع الضوئي بحيث يصبح الشعاع المنعكس شعاعاً وارداً بالتالي يصبح الشعاع الوارد شعاعاً منعكساً. وكذلك الحال في ظاهرة انكسار الضوء فإذا عكسنا سير الشعاع الضوئي بحيث يصبح الشعاع المنكسر هو شعاع وارد ينتج عن ذلك بأن الشعاع الوارد يصبح شعاع منكسر، والتناظر بقانون سنل $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ وقانون الانعكاس ($\theta_1 = \theta'_1$) يبرهنا صحة هذا المبدأ. (انظر الشكل (2.1)). إن تطبيق هذا المبدأ يسهل كما سنرى معالجة كثير من القضايا في علم الضوء.

2.7 - مبدأ هيغنز (Huygens principle)

كما ذكرنا في مقدمة الكتاب بأنه في عام 1678 برهن هيغنز أن للضوء طبيعة موجية وبناء على ذلك وضع مبدأ استخدم فيه مفهوم صدر الموجة الذي ينص على

ما يلي: عدّ كل النقاط المتوضعة على صدر الموجة (صدر موجة قديم) أنها مصادر ضوئية نقطية تولد أمواجاً كروية ثانوية تدعى موجات وتنتشر للخارج من خلال الوسط بسرعة الضوء الذي يتميز بها ذلك الوسط. فبعد زمن ما (t) يكون الموقع الجديد لصدر الموجة (صدر موجة جديد) هو السطح المماسي للأمواج الكروية الثانوية. وهكذا يتم الانتقال من صدر موجة قديم إلى صدر موجة جديد في أزمنة متتالية. فإذا كان صدر الموجة القديم مستقيماً فإن صدر الموجة الجديد يكون مستقيماً أيضاً كما في الشكل (2.5 (a)). وإذا كان صدر الموجة القديم دائرياً يكون صدر الموجة الجديد دائرياً أيضاً كما في الشكل (2.5 (b)). من أهم تطبيقات مبدأ هيغنز والتي أثبتت صحة طبيعة الضوء الموجية التي افترضها هي بإمكانية اشتقاق قوانين الانعكاس ($\theta_1 = \theta'_1$) والانكسار للضوء ($n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$) بالاعتماد على مبدأ هيغنز. حيث لانرى هنا ضرورة لعرض كيفية إجراء هذا الاشتقاق ويمكن العودة إليه في المراجع.



الشكل (2.5): مبدأ هيغنز من أجل موجة مستوية تنتشر باتجاه اليمين (a) ومبدأ هيغنز من أجل موجة كروية تنتشر باتجاه اليمين (b).

2.8 - مبدأ فيرما (Fermat's Principle)

ينص مبدأ فيرما (1601-1665) على أنه عندما ينتشر الشعاع الضوئي من نقطة إلى أخرى فإنه يسلك المسار الذي يتطلب أقصر فترة زمنية، أي إن المسار الذي تسلكه الأشعة الضوئية في وسط متجانس هي خطوط مستقيمة لأن الخط المستقيم هو أقصر مسافة بين نقطتين.

وقد تم باستخدام هذا المبدأ اشتقاق قانون الانعكاس (زاوية الانعكاس تساوي زاوية الورد) وقانون الانكسار ($n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$)، حيث لا نرى ضرورة لعرض كيفية إجراء هذا الاشتقاق ويمكن العودة إليه في المراجع.

2.9 - شدة الانعكاس R وشدة النفوذ T

في هذه الفقرة سوف نعرف كلاً من شدة الانعكاس R وشدة النفوذ T للضوء في أوساط مختلفة. تُعرّف شدة الانعكاس R على أنها نسبة طاقة الحزمة المنعكسة إلى طاقة الحزمة الواردة أما شدة النفوذ T فيه نسبة طاقة الحزمة المنكسرة إلى نسبة طاقة الحزمة الواردة. بإهمال ضياعات الضوء بالانتثار والامتصاص تعطى العلاقة بين شدة الانعكاس وشدة النفوذ بالعلاقة

$$R + T = 1 \quad (2.13)$$

أثبتت التجارب بأن قيمة R تتوقف على طبيعة الوسيطين الشفافين وتتغير بتغير زاوية الورد وتكون تقريباً ثابتة من أجل زوايا الورد الصغيرة بالتالي تعطى R_N من أجل الورد شبه الناظمي، أي من أجل زوايا الورد الصغيرة بالعلاقة التالية:

$$R_N = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \quad (2.14)$$

تطبيق: احسب شدة الانعكاس الناظمي من الهواء على وسط قرينته 2.5.

مسائل

2.1- الطول الموجي لضوء الليزر الأحمر (هليوم – نيون) في الهواء 632nm والمطلوب: (1)- احسب تواتره؟ (2)- احسب طول موجته في زجاج قرينة انكساره تساوي 1.5؟ (3)- احسب سرعته في الزجاج؟

2.2- أوجد سرعة الضوء في: (أ)- الماء (water)، (ب)- الزجاج الصواني (flint glass). (ج)- الماس (Diamond). علماً بأن قرائن انكسار هذه المواد معطاة في الجدول (2.1).

2.3- شعاع ضوئي ينتشر في الهواء بطول موجة 689nm، يرد هذا الشعاع على سطح صفيحة ملساء ومصقولة من مادة الزجاج التاجي قرينة انكساره 1.52 والمطلوب:

أ- أوجد سرعة الضوء في مادة الزجاج التاجي.

ب- أوجد الطول الموجي للضوء في مادة الزجاج التاجي.

2.4- تصنع حزمة ضوئية متوازية زاوية قدرها 30° مع سطح لوح زجاجي قرينة انكساره 1.5 والمطلوب: (أ)- أوجد الزاوية بين الحزمة المنكسرة وسطح الزجاج. (ب)- كم يجب أن تكون زاوية الورود θ حتى تكون زاوية الانكسار مساوية $\theta/2$ ؟

2.5- يرد ضوء على لوح زجاجي بزاوية ورود مقدارها 60° ، فينعكس بعض الحزمة، وينكسر بعضها الآخر. ولاحظ أن الزاوية بين الجزء المنعكس والجزء المنكسر تساوي 90° ، ما هي قرينة انكسار الزجاج؟

الفصل الثالث: الانعكاس الكلي الداخلي وأهم تطبيقاته وظاهرة تبدد الضوء

3.1 - الانعكاس الكلي الداخلي

3.2 - تطبيقات الانعكاس الكلي الداخلي

3.3 - ظاهرة التبدد اللوني

3.4 - قوس قزح



الفصل الثالث: الانعكاس الكلي الداخلي وأهم تطبيقاته وظاهرة تبدد الضوء

3.1 - الانعكاس الكلي الداخلي

ظاهرة الانعكاس الكلي الداخلي للضوء لها طيف واسع من التطبيقات من بينها تطبيقات في الاتصالات وفي الطب وبعض القياسات الفيزيائية لبعض الثوابت الفيزيائية من بينها قرينة انكسار مادة مجهولة؛ في الفقرات التالية سوف نعرض بعض هذه التطبيقات.

تعريف ظاهرة الانعكاس الكلي الداخلي: يلخص الشكل (3.1) حالة الانعكاس الكلي الداخلي إذ نلاحظ من هذا الشكل أنه من أجل زاوية ورود معينة فإن الشعاع الضوئي لا يبرز للوسط الثاني وإنما ينكسر مماسياً للسطح من أجل زاوية ورود تساوي زاوية حرجة θ_c ومن ثم من أجل زوايا ورود أكبر من الزاوية الحرجة θ_c تنعكس الأشعة الضوئية كلياً في الوسط الذي ترد منه الأشعة الضوئية. بالتالي فإن شروط الانعكاس الكلي الداخلي هي كما يلي:

1- أن تكون قرينة انكسار المادة التي ترد منها الأشعة الضوئية n_1

أكبر من قرينة انكسار الوسط الثاني n_2 أي إن $n_1 > n_2$.

2- أن تكون زاوية الورد أكبر أو تساوي زاوية تدعى بالزاوية

الحرجة θ_c أي $\theta_1 \geq \theta_c$. فعندما تكون زاوية الورد تساوي

الزاوية الحرجة يكون الشعاع المنكسر موازياً لسطح المادة الأشد

كسراً للضوء أي إن زاوية الانكسار $\theta_2 = 90^\circ$. أما من أجل

زوايا ورود أكبر من θ_c فتنعكس الحزمة الضوئية كلياً على

السطح الفاصل بين الوسطين وفقاً لقانون الانعكاس، أي إن زاوية
الورود تساوي زاوية الانعكاس.

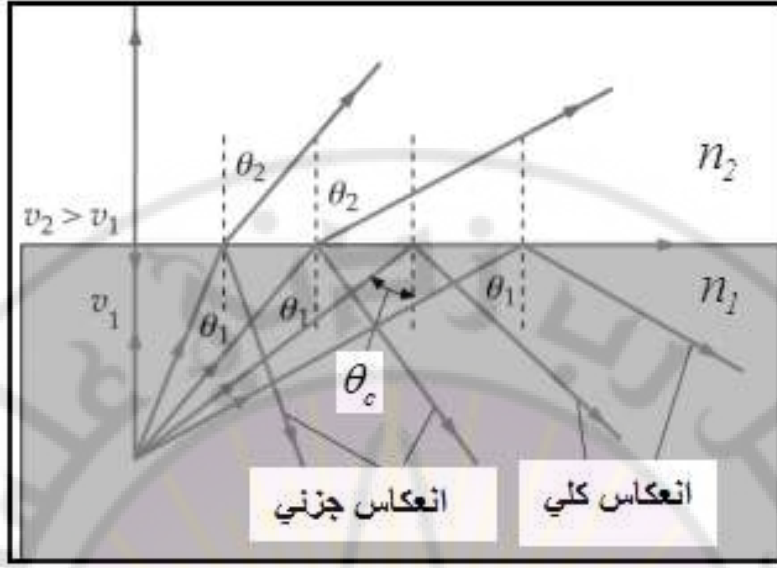
حيث يمكن إيجاد قيمة الزاوية الحرجة باستخدام قانون سنل في الانكسار وذلك في
حالة $\theta_1 = \theta_c$ و $\theta_2 = 90$ ، ومنه نكتب:

$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin \theta_2 = n_2 \sin 90 = n_2$$

ومن هذه العلاقة يمكن استنتاج قيمة الزاوية الحرجة (من أجل $n_1 > n_2$) كما
يلي:

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (n_1 > n_2) \quad (3.1)$$

نقرأ هذه المعادلة فيزيائياً كما يلي: جيب الزاوية الحرجة يساوي إلى قرينة انكسار
الوسط الثاني مقسومة على قرينة انكسار الوسط الأول (وسط ورود الضوء)
والموجود فيه المنبع الضوئي. هنا نركز على ملاحظة مهمة وهي أنه يمكن
استخدام هذه المعادلة فقط عندما تكون $n_1 > n_2$. أما في حالة $n_1 < n_2$ فإن
قيمة $\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} > 1$ وهذا مستحيل رياضياً لأن قيمة الجيب تتراوح بين
 ± 1 .



الشكل (3.1): ظاهرة الانعكاس الداخلي الكلي

تطبيق عددي: احسب الزاوية الحرجة (الزاوية التي يحدث عندها انعكاس كلي داخلي) في الحالتين التاليتين: (أ)- هواء وزجاج قرينته 2، (ب) ماء قرينته 1.34 وزجاج قرينته 1.5.

3.2 – تطبيقات الانعكاس الكلي الداخلي

فيما يلي بعض تطبيقات ظاهرة الانعكاس الكلي الداخلي:

1- الألياف الضوئية (Optical Fibres):

مبدأ الليف الضوئي يعتمد على ظاهرة الانعكاس الكلي الداخلي؛ إذ تتحقق شروط الانعكاس الكلي الداخلي وبالتالي فإن الضوء يمر من أحد طرفي الليف الضوئي وبعد حصول انعكاسات كلية متتالية ضمن الليف يخرج الضوء من الطرف الثاني للليف الضوئي. أي يكون الليف الضوئي كناقل للضوء من مكان إلى آخر، وعادة

تتكون منظومة نقل الضوء عبر الليف الضوئي من التجهيزات التالية: (1)- ليف زجاجي أسطواني قرينة انكساره عالية. (2)- غلاف يحيط بالليف الزجاجي، ويتكون من طبقة رقيقة من زجاج قرينة انكساره منخفضة بحيث تتحقق شروط الانعكاس الكلي الداخلي على السطح الفاصل بين هذين الوسطين (الليف و غلافه). من أهم تطبيقات الليف الضوئي ما يلي:

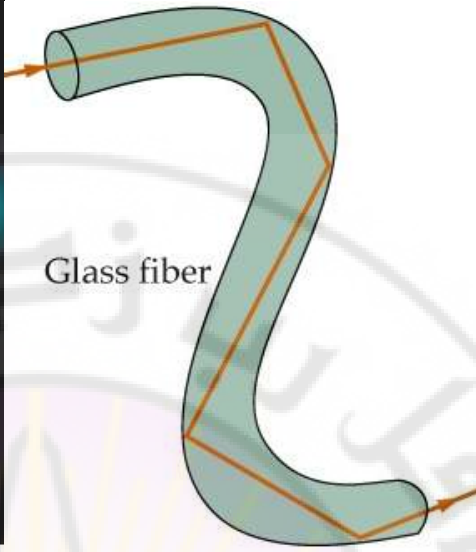
أ- يستخدم كوسيلة لنقل الطاقة الضوئية من طرف إلى آخر مثلاً ينقل الماء انظر الشكل (3.2).

ب- يمكن نقل صورة جسم ما؛ في هذه الحال يجب أن تكون الخيوط مرتبة ترتيباً دقيقاً بحيث ينقل كل خيط صورة الجزء المقابل له من الجسم إلى موضعه الصحيح في الطرف الآخر، الشكل (3.3).

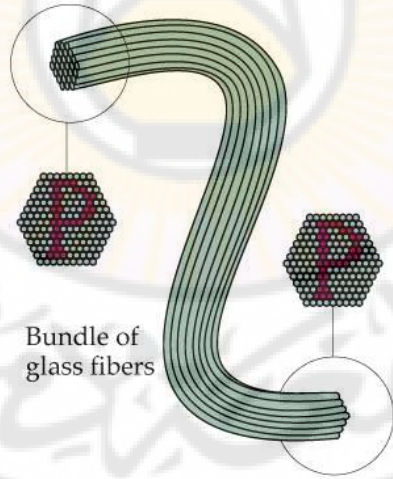
ت- يستخدم الليف الضوئي في الطب لفحص أعضاء الجسم الداخلية كالمعدة مثلاً؛ حيث يجهز لهذا الغرض في كل من طرفيه بجملعة عدسات مقربة بحيث يعمل الليف الضوئي كمجهر؛ ويكون للمنطقة المفحوصة خيال مكبر تراه عين الفاحص.

ث- وسيلة مثالية في الاتصالات الحديثة.

ج- أداة توصيل الحزمة الليزرية في الأجهزة الطبية.



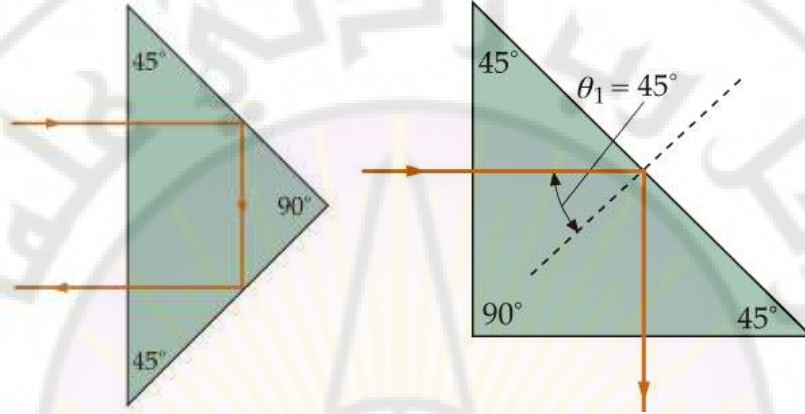
الشكل (3.2): استخدام الألياف الضوئية في نقل الطاقة الضوئية عبر الليف الضوئي (يسار) وجزء من الليف الضوئي يوضح فيه سير الشعاع الضوئي (يمين).



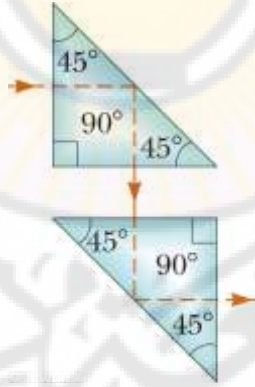
الشكل (3.3): مجموعة من الألياف الضوئية تستخدم لنقل صورة ما.

2- الموشور كلي الانعكاس:

هو موشور زجاجي إحدى زواياه قائمة، والزائتان الأخريان متساويتان وتساوي كل منهما 45 درجة. الشكلان (3.4) و (3.5) توضح ظاهرة الانعكاس الكلي في الموشور.



الشكل (3.4): موشور يظهر ظاهرة الانعكاس الكلي الداخلي على أحد وجوهه (يمين) وظاهرة الانعكاس الكلي الداخلي على وجهين من وجوه الموشور (يسار).



الشكل (3.5): هذا التركيب يستخدم في منظار الغواصة، ويعتمد مبدأ الانعكاس الكلي الداخلي.

3- النافورة الضوئية:

نشاهد في بعض الساحات العامة أحواضاً تحوي في وسطها شلالات من الماء؛ وعند وضع إنارة في أسفل الشلال فإننا نرى الشلال مضاء ليلاً وذلك نتيجة لظاهرة الانعكاس الكلي التي تحدث في الماء حيث ينتقل الضوء من أسفل الشلال إلى أعلاه وفق انعكاسات كلية داخلية متتالية.

4- قياس قرائن انكسار السوائل:

تقاس قرينة انكسار السوائل بمقياس آبي (Abbe) إذ إنَّ مبدأ هذا الجهاز يعتمد على ظاهرة الانعكاس الكلي الداخلي وتحديدًا على قياس الزاوية الحرجة θ_c (انظر الشكل (3.6)). حيث يتكون هذا المقياس من موشور زجاجي قائم الزاوية (الشكل (3.6)) نضع على وجهه الأعلى عند النقطة O انبوباً زجاجياً اسطوانياً صغيراً يحتوي على سائل قرينة انكساره n' مجهولة بحيث تكون قرينة انكسار السائل n' أصغر من قرينة انكسار الزجاج الموشور n أي ($n > n'$). نلاحظ من الشكل (3.6) أننا رسمنا شعاعاً ضوئياً وحيد اللون مماسياً لوجه الموشور عند النقطة O، هذا الشعاع سوف يعاني انعكاساً كلياً داخلياً ضمن السائل مجهول قرينة الانكسار بالتالي ينكسر هذا الشعاع وفق الشعاع OD بزاوية انكسار مساوية للزاوية الحرجة θ_c (حيث استخدمنا مبدأ عكسية الضوء). ومن ثم ينكسر الشعاع OD مرة أخرى عند النقطة D المتوضعة على الوجه الشاقولي للموشور وفق الشعاع DE وذلك وفق قانون الانكسار. إذ إنَّ المنحى يفصل بين الظلام والضياء ونترك للطلاب تفسير ذلك وفقاً لظاهرة الانعكاس الكلي الداخلي ومبدأ عكسية الضوء. يمكن حساب الزاوية الحرجة θ_c هندسياً من الشكل (3.6) حيث يمكن استنتاج $\theta_c = \frac{\pi}{2} - \theta_1$ من هذا الشكل؛ بتطبيق قانون سنل في الانكسار عند

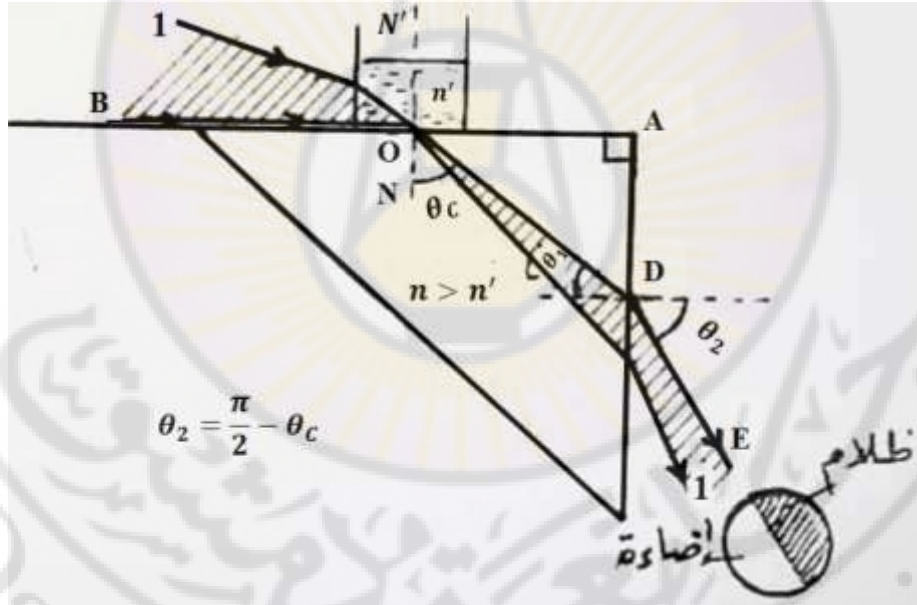
النقطة O وفق العلاقة التالية: $n' \sin 90 = n \sin \theta_c$ ومن هذه العلاقة نستطيع كتابة العلاقة التالية:

$$\sin \theta_c = \frac{n'}{n} \quad (3.2)$$

ويمكن تطبيق قانون سنل في الانكسار أيضاً عند النقطة D فنحصل على العلاقة التالية:

$$n \sin \theta_1 = \sin \theta_2 \quad (3.3)$$

وذلك بفرض أن الوسط المحيط بالموشر هو الهواء وقرينة انكساره مساوية للواحد. باستخدام العلاقة (3.2) والعلاقة (3.3) و $\theta_c = \frac{\pi}{2} - \theta_1$ يمكن حساب قرينة انكسار السائل المجهول n' .



الشكل (3.6): مبدأ مقياس الانكسار لآبي.

تطبيق 1: احسب قرينة انكسار المائع n' ، إذا علمت أن قرينة زجاج الموشور قائم الزاوية $\hat{A} = 90^\circ$ تساوي $\sqrt{3}$ ، وأن الحد الفاصل بين الضياء والظلام في الاتجاه DE يصنع زاوية مقدارها 60 مع الناظم على الوجه الذي تبرز الأشعة منه، أي:

$$\theta_2 = 60^\circ$$

الحل: باستخدام العلاقة (3.2) والعلاقة (3.3) و $\theta_c = \frac{\pi}{2} - \theta_1$ نحسب قيمة n' كما يلي:

$$n \sin \theta_1 = \sin \theta_2$$

بالتعويض:

$$\sqrt{3} \sin \theta_1 = \sin 60 = \sqrt{3}/2$$

ومنه

$$\sin \theta_1 = 0.5 \Rightarrow \theta_1 = 30^\circ$$

وبالتالي نجد:

$$\theta_c = 90 - 30 = 60^\circ$$

وعليه:

$$\sin \theta_c = \sin 60 = \sqrt{3}/2$$

و لكن: $\sin \theta_c = n'/n$ إذن:

$$\frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{n'}{\sqrt{3}} \Rightarrow n' = 1.5$$

تطبيق 2: يطلب من الطالب باستخدام الشكل (3.6) إيجاد علاقة رياضية لقرينة السائل المجهولة قرينته n' بدلالة من n و θ_2 .

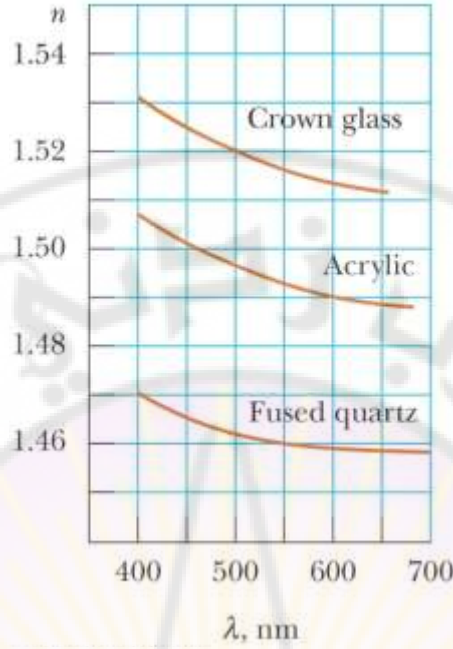
للإجابة على هذا التطبيق يمكن الانطلاق من الحقائق التالية: $\theta_1 = \frac{\pi}{2} - \theta_c$ وبالتالي $\sin\theta_1 = \cos\theta_c$ وكذلك $\sin\theta_c = n'/n$ ومنه باستخدام قانون رياضي $\sin^2\theta_c + \cos^2\theta_c = 1$ نستطيع استنتاج العلاقة التالية:

$$n' = \sqrt{n^2 - \sin^2\theta_2}$$

نلاحظ من هذه العلاقة أن أصغر قيمة لـ n' من أجل قيمة معينة لـ n توافق من أجل $\theta_2 = 90^\circ$.

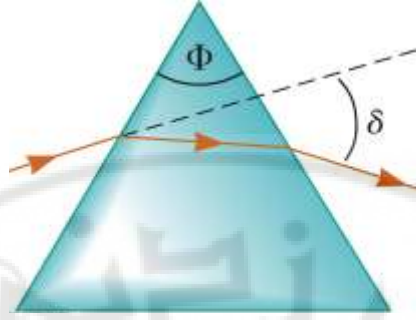
3.3 – ظاهرة التبدد اللوني

ذكرنا سابقاً أن قرينة الانكسار تتغير بتغير الطول الموجي للضوء المار من خلال المادة. الشكل (3.7) يلخص تابعة قرينة الانكسار للطول الموجي لبعض المواد؛ إنَّ هذا السلوك يفسر ظاهرة تبدد الضوء الأبيض عند مروره بأوساط شفافة لها قرينة انكسار n ، فالضوء الأبيض يحتوي على أطوال موجية مختلفة. فوفق قانون سنل في الانكسار وبما أن قرينة انكسار المادة n تابعة للطول الموجي فإن هذا الضوء ينكسر بزوايا انكسار مختلفة عندما يرد هذا الضوء المركب على مادة كاسرة للضوء.



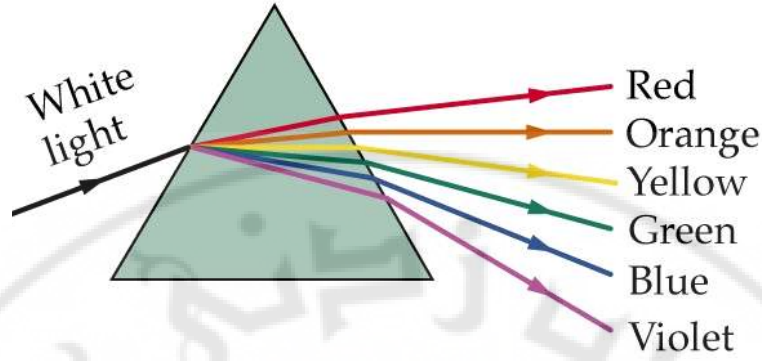
الشكل (3.7): تغير قرينة الانكسار لثلاثة مواد هي الزجاج التاجي والإكرليك والكوارتز النقي المنصهر بتغير الطول الموجي للضوء المار من خلالهم.

بفرض لدينا موشور قرينة انكسار مادته n كما في الشكل (3.8) والوسط المحيط به هو الهواء قرينته مساوية للواحد. يرد على الوجه الأول للموشور ضوء وحيد اللون (طول موجي وحيد) من اليسار نلاحظ أن هذا الضوء يبرز من الوجه الثاني للموشور منحرفاً عن اتجاهه الأصلي الذي ورد به على الوجه الأول بزاوية δ تدعى زاوية الانحراف. لا نرى في هذه الحالة أي تبدد للضوء لأن هناك طولاً موجياً وحيداً.



الشكل (3.8): مسار ضوء وحيد اللون عندما يسقط على أحد وجوه الموشور.

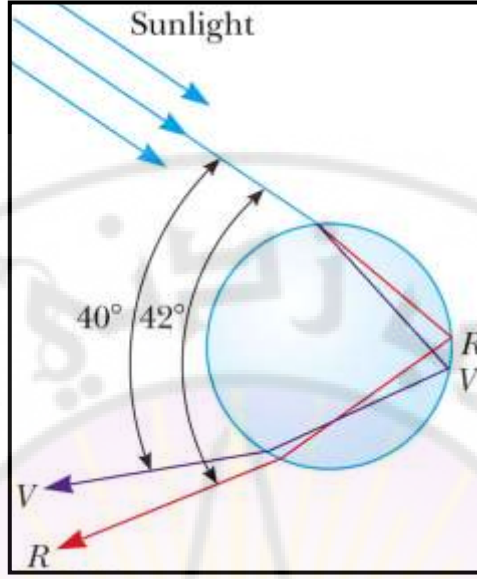
أما إذا كان الضوء الوارد للوجه الأول للموشور هو ضوء أبيض أو مركب (يتألف من كل الأطوال الموجية المرئية) كما في الشكل (3.9) فنلاحظ أن الضوء يبرز من الوجه الثاني للموشور في سلسلة من الألوان تعرف **بالطيف المرئي** وتكون هذه الألوان مرتبة بحسب تناقص الأطوال الموجية وهي الأحمر؛ والبرتقالي؛ والأصفر؛ والأخضر؛ والأزرق والبنفسجي. يتضح من هذا الشكل أن زاوية الانحراف تعتمد على الطول الموجي. فالضوء البنفسجي ينحرف أكثر من كل الألوان، والضوء الأحمر ينحرف أقل من كل الألوان؛ أما بقية الألوان فتتنحرف وفقاً لطول موجتها لتتوضع بين اللون البنفسجي والأحمر. فالموشور يكشف لنا فيما إذا كان الضوء وحيد لون (طول موجة وحيد) أو ضوءاً مركباً (مكون من عدة أطوال موجية) من خلال ظاهرة تبديد الضوء التي تحدث من خلاله.



الشكل (3.9): مسار ضوء مركب (أبيض) عندما يسقط على أحد وجوه الموشور.

3.4 – قوس قزح

يتشكل قوس قزح نتيجة تساقط زخات مطر مترافقة بسطوع أشعة الشمس ويمكن تفسيره فيزيائياً بأنه نتيجة لظاهرتي تبدد الضوء والانعكاس الكلي الداخلي الذي يحدث في كل قطرة مطر ساقطة من السماء. الشكل (3.10) يظهر أهم الظواهر الضوئية التي تحدث في قطرة المطر الواحدة، بالتالي نرى قوس قزح في السماء نتيجة حدوث هذه الظواهر في قطرات المطر مجتمعة. إذ إن شعاع الشمس (الذي هو ضوء أبيض) الوارد من الأعلى يسقط على السطح الأمامي لقطرة الماء المعلقة في الجو فيتبدد الضوء (حيث اللون البنفسجي V ينحرف أكثر من كل الألوان واللون الأحمر R ينحرف أقلها) ومن ثم ينعكس انعكاساً كلياً داخلياً عند الوجه الخلفي للقطرة (نتيجة تحقق شروط الانعكاس الكلي الداخلي) ومن ثم ينكسر ثانية عند السطح الأمامي للقطرة عندما ينتقل الضوء من الماء إلى الهواء وفق قانون سنل في الانكسار قبل أن نراه.



الشكل (3.10): الانعكاس الكلي ضمن قطرة المطر، ملاحظة R هي اختصار لـ Red أي الأحمر و V هي اختصار لـ Violet أي البنفسجي.

مسائل

3.1- يقع منبع ضوئي نقطي تحت سطح الماء، وعلى بعد 20 cm منه. احسب قطر أكبر دائرة واقعة على سطح الماء يستطيع الضوء أن ينفذ من خلالها خارج الماء.

3.2- يرد شعاع ضوئي من الهواء بزاوية θ_1 على السطح الأفقي العلوي a لمكعب شفاف قرينة انكساره n ، والمطلوب:

(أ)- من أجل أي قيمة لـ θ_1 يحدث للشعاع المنكسر انعكاس كلي داخلي على الوجه الجانبي b للمكعب؟ (ب)- ما أعظم قيمة لـ n التي من أجلها يمكن للشعاع الوارد مماسياً على الوجه a أن يبرز من الوجه b ؟

3.3- قيسـت قرينة انكسار زيت الزيتون n_2 بدلالة قرينة انكسار موشور زجاجي قائـم الزاوية n_1 ، فما هو شرط الحصول على أصغر قيمة لـ n_2 تمكننا من رؤية الحزمة الضوئية الواردة وروداً مماسياً على الوجه الأفقي الأعلى للموشور عند الوجه الجانبي العمودي عليه، علما بأن قرينة انكسار مادة الموشور (1.5).





الفصل الرابع: الانعكاس والانكسار على سطوح مستوية

4.1 – أولاً: الانعكاس على سطوح مستوية والأخيلة المتشكلة
بوساطة المرايا المستوية

4.2 – ثانياً: الانكسار على سطوح مستوية والأخيلة المتشكلة
بوساطة الكاسر المستوي

4.3 – سير الأشعة الضوئية من خلال صفيحة (شريحة) شفافة
متوازية الوجهين

4.4 – الانكسار في الموشور

4.4.1 – قوانين الموشور الأساسية

4.4.2 – شرط بروز الأشعة من الموشور

4.4.3 – حالة الانحراف الأصغر

4.4.4 – الموشور الرقيق

4.4.5 – استطاعة الموشور

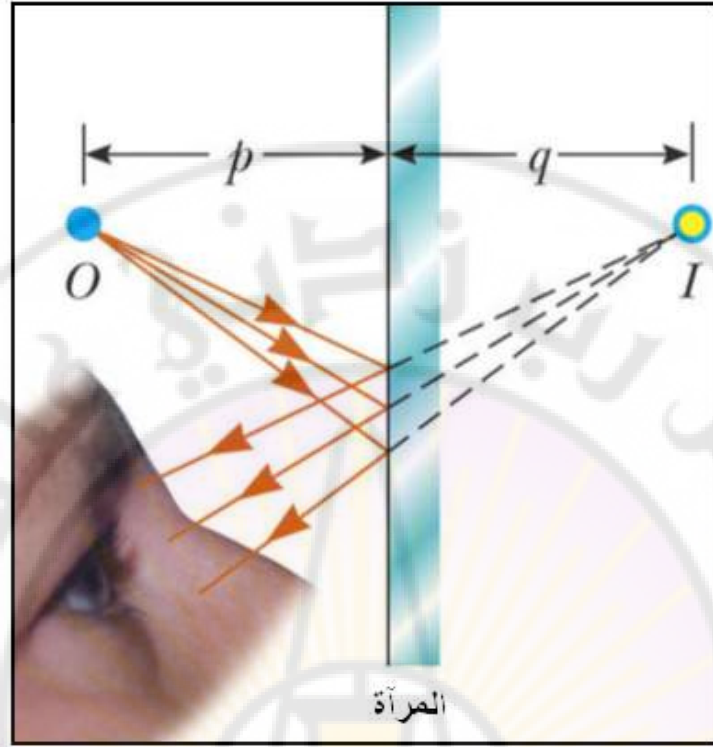
4.4.6 - المطياف ذو الموشور



الفصل الرابع: الانعكاس والانكسار على سطوح مستوية

4.1 – أولاً: الانعكاس على سطوح مستوية والأخيلة المتشكلة بواسطة المرايا المستوية

ليكن لدينا منبع ضوئي نقطي (جسم نقطي) O يقع أمام مرآة مستوية ويبعد عنها مسافة p (p يرمز لبعد الجسم) لتحديد خياله بالرسم الهندسي (كما في الشكل (4.1)) نقوم برسم ثلاثة أشعة صادرة من الجسم O لترد على سطح المرآة بزوايا ورود مختلفة فتنعكس هذه الأشعة على سطح المرآة بزوايا انعكاس مساوية لزوايا الورد (وفقاً لقانون الانعكاس). نلاحظ من الشكل (4.1) أن الأشعة المنعكسة متباعدة وممدداتها تلتقي بنقطة خلف المرآة I هذه النقطة تدعى خيال الجسم O ؛ حيث تبدو الأشعة المنعكسة كأنها قادمة من النقطة I . المسافة بين نقطة الخيال I والمرآة المستوية تدعى بعد الخيال ويرمز لها q . فتحدد الخيال يتم بشكل عام من نقطة تلاقي الأشعة المنعكسة أو من نقطة تلاقي ممدداتها. نقول عن الخيال إنه وهمي إذا وقع خلف المرآة ونقول عنه حقيقي إذا وقع أمام المرآة. بعبارة أخرى نقول عن خيال إنه حقيقي إذا تلاقت الأشعة الضوئية المنعكسة في نقطة تدعى نقطة الخيال، أما إذا تلاقت ممددات الأشعة في نقطة الخيال عندها نقول عن الخيال بأنه وهمي. فالخيال بالشكل (4.1) هو خيال وهمي لأن ممددات الأشعة المنعكسة تلاقت في نقطة الخيال خلف المرآة. بالنتيجة خيال المرايا المستوية دوماً وهمي. (نستدل عن وجود الخيال الحقيقي تجريبياً بإمكانية إظهاره على شاشة أما الأخيلة الوهمية فلا يمكن إظهارها على الشاشة لأنها تقع خلف المرآة).



الشكل (4.1): الخيال المتشكل من مرآة مستوية. الخيال النقطي I متوضع خلف المرآة يبعد مسافة عمودية q عن سطح المرآة (بعد الخيال)، أما p فهو بعد الجسم O عن سطح المرآة.

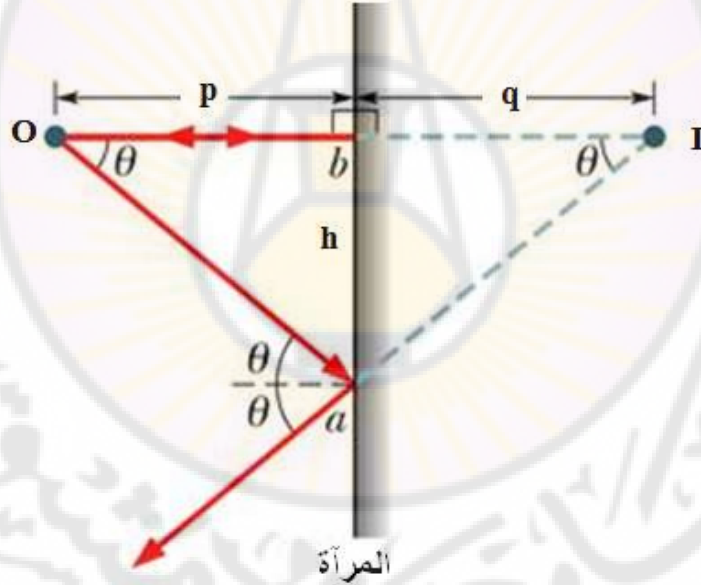
فيما يلي قوانين المرايا المستوية وهي: القانون الأول للمرآة المستوية هو أن بعد الجسم p يساوي بعد الخيال q بالقيمة المطلقة ويخالفه بالإشارة، أي إنهما من طبيعتين مختلفتين (جسم حقيقي وخيال وهمي) $p = -q$. أما القانون الثاني للمرآة المستوية فهو أن التكبير الخطي العرضاني يساوي الواحد وموجب دوماً، أي إن الخيال صحيح وبالتالي يكون دوماً طول الخيال h' مساوياً لطول الجسم h أي:

$$m_t = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} = +1 \Rightarrow h' = h$$

سنقوم الآن باستخراج قانوني المرايا المستوية بمساعدة الشكل (4.2) والشكل (4.3). من الشكل (4.2) نستطيع كتابة العلاقة التالية:

$$\tan \theta = \frac{h}{p} = \frac{h}{q} \quad (4.1)$$

من هذه العلاقة نستنتج أن $p = -q$ وهو القانون الأول للمراة المستوية. وضعنا إشارة السالب أمام q لأن الخيال وهمي ويقع خلف المراة فيكون بعده q سالباً أما الجسم فهو حقيقي ويقع أمام المراة. أي إن الجسم وخياله من طبيعتين مختلفتين في المرايا المستوية (جسم حقيقي وخيال وهمي).



الشكل (4.2): الخيال المتشكل من مرآة مستوية.

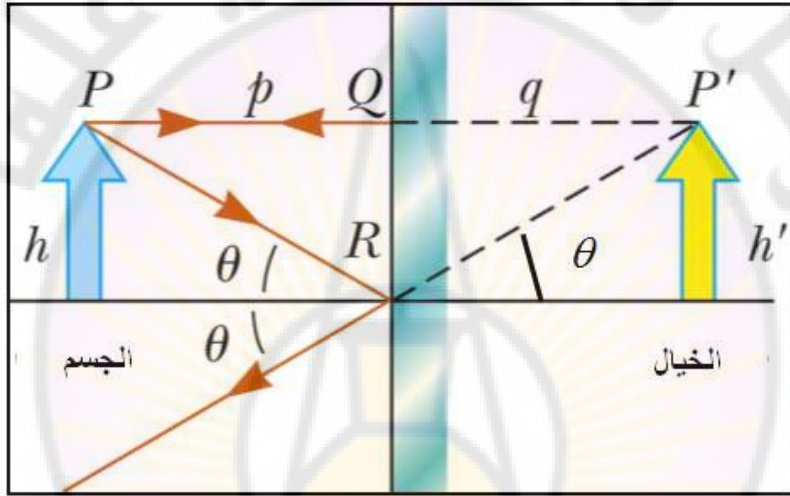
لقد استخدمنا في استخراج القانون الأول للمرأة جسماً نقطياً. أما لاستخراج قانون التكبير الخطي العرضاني للمرأة المستوية وعلاقة طول الخيال h' بطول الجسم h (أو ارتفاع الخيال h' وارتفاع الجسم h) فسوف نستخدم جسماً ذا أبعاد ونرمز له بسهم للأعلى وارتفاعه h كما في الشكل (4.3). لتحديد موقع الخيال في الشكل (4.3) قمنا برسم شعاع وارد من أعلى الجسم (النقطة P) بحيث يرد سطح المرأة عمودياً على سطحها لينعكس مرتداً على نفسه. ونرسم شعاعاً آخر يرد سطح المرأة بزاوية ورود θ لينعكس بزاوية انعكاس مساوية لزاوية ورود (وفقاً لقانون انعكاس الضوء). نلاحظ أن الأشعة المنعكسة متباعدة وممددات هذه الأشعة تلتقي في نقطة P' تقع خلف المرأة. نقول عن النقطة P' إنها خيال النقطة P . بالطريقة نفسها نرسم أخيلة بقية النقاط من الجسم ليتشكل لدينا خيال للجسم ارتفاعه h' كما هو موضح بالشكل (4.3). الخيال هنا وهمي لأنه يقع خلف المرأة وصحيح لأنه من جهة الجسم (السهم للأعلى بحالة الجسم وخياله). بطريقة الاستنتاج السابق نفسها نلاحظ إن $p = -q$ أي إن بعد الجسم يساوي بعد الخيال وإشارة الناقص وضعت لأن الخيال وهمي بالتالي بعده سالب أما الجسم فهو أمام المرأة فبعده حقيقي وموجب (أي إن الجسم وخياله من طبيعتين مختلفتين). من الشكل (4.3) يمكن كتابة:

$$\tan \theta = \frac{h}{p} = \frac{h'}{-q} \Rightarrow \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} \quad (4.2)$$

فبما أن $p = -q$ ، فإنه ينتج من العلاقة (4.2) أن $h = h'$ أي إن ارتفاع الجسم h يساوي ارتفاع الخيال h' . ومنه نعرف التكبير الخطي العرضاني للمرأة المستوية وغير المستوية بالعلاقة التالية:

$$m_t = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} \quad (4.3)$$

نلاحظ من العلاقة الأخيرة أنه من أجل مرآة مستوية يكون التكبير الخطي العرضاني لها مساوياً إلى الواحد أي $m_t = 1$ من أجل أي خيال وذلك لأن $h = h'$ وكذلك $|p| = |q|$.



الشكل (4.3): الرسم الهندسي لتحديد موقع الخيال لجسم موضوع أمام مرآة مستوية.

4.2 – ثانياً: الانكسار على سطوح مستوية والأخيلة المتشكلة

بوساطة الكاسر المستوي

يعرف الكاسر المستوي على أنه سطح مستو شفاف يفصل بين وسطين شفافين مختلفين بقرينة الانكسار. وسوف نميز بين حالتين هما كالتالي:

الحالة الأولى: بفرض $n' > n$ كما في الشكل (4.4) حيث يظهر كاسر مستوي OR يفصل بين وسطين؛ قرينة انكسار الوسط الأول (وسط ورود الضوء) n وقرينة انكسار الوسط الثاني n' . نلاحظ من الشكل (4.4) أن الكاسر المستوي يشكل خيلاً P' لمنبع نقطي P . لتحديد موقع هذا الخيال نرسم شعاعين واردين من الجسم P فنلاحظ أن هذين الشعاعين ينكسران على سطح الكاسر المستوي وفقاً لقانون الانكسار لسنل ونلاحظ أن الأشعة المنكسرة متباعدة بالتالي تتقاطع ممدداتها في نقطة P' تقع أمام الكاسر والتي تشكل خيال المنبع النقطي P . من الشكل (4.4) نلاحظ أننا رمزنا لبعد الجسم عن سطح الكاسر المستوي p وبعد الخيال عن سطح الكاسر المستوي q والجهة التي يقع فيها الجسم تسمى بالجهة الأمامية والجهة الأخرى تسمى بالجهة الخلفية للكاسر المستوي. من المثلثين POA و $P'O A$ يمكن كتابة:

$$\tan \phi = \frac{h}{p}, \quad \tan \phi' = \frac{h}{q} \quad (4.4)$$

حيث إن $h = OA$ ومنه يمكن استنتاج العلاقة التالية:

$$q = p \frac{\tan \phi}{\tan \phi'} \quad (4.5)$$

والتي يمكن كتابتها بطريقة أخرى كما يلي:

$$q = p \frac{\sin \phi \cos \phi'}{\cos \phi \sin \phi'} \quad (4.6)$$

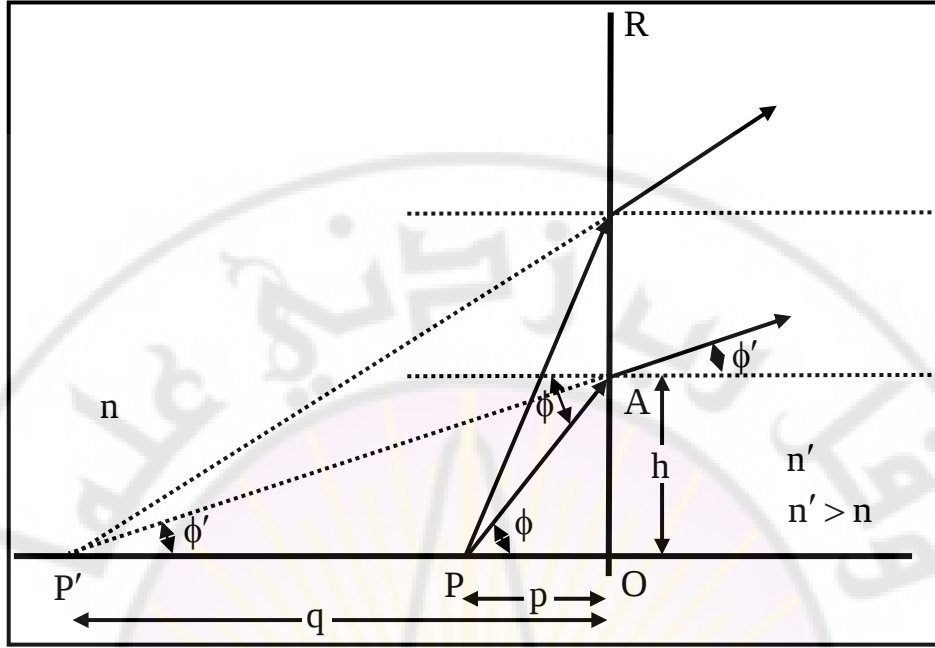
وبالتعويض بقانون سنل ($n \sin \phi = n' \sin \phi'$) تكتب المعادلة (4.6) كما يلي:

$$q = p \frac{n' \cos \phi'}{n \cos \phi} \quad (4.7)$$

نلاحظ من العلاقة (4.7) أن بعد الخيال q يتوقف على زاوية الورود ϕ ، بالتالي لا تكون الحزمة المنكسرة نقطية بوجه عام وتكون نقطية في حال كون زوايا الورود صغيرة أي في حال الأشعة المحورية، عندها يكون كل من $\cos \phi$ و $\cos \phi'$ مساوياً الواحد تقريباً ومنه تصبح المعادلة (4.7) في هذه الحالة كما يلي:

$$q = p \frac{n'}{n} \quad (4.8)$$

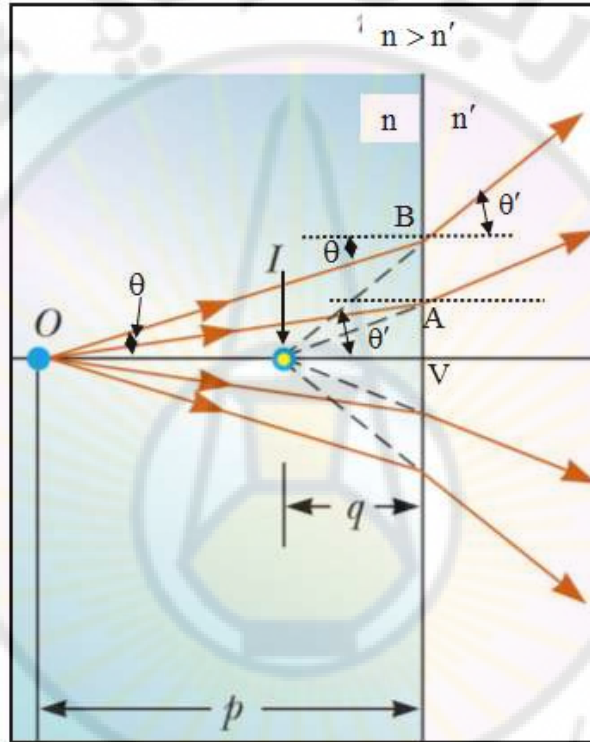
نقرأ هذه العلاقة فيزيائياً كما يلي: بعد الخيال يساوي بعد الجسم مضروباً بنسبة قرينة انكسار الوسط الثاني على قرينة انكسار الوسط الأول الذي يرد منه الضوء (وسط ورود الضوء). مع مراعاة اصطلاح الإشارة للخيال المتشكل فيكون الخيال وهمياً (إشارته سالبة) إذا وقع أمام الكاسر المستوي أي بجهة ورود الضوء ويكون حقيقياً (إشارته موجبة) إذا وقع خلف الكاسر المستوي. نلاحظ هنا أن اصطلاح الإشارة معاكس لحالة المرايا المستوية.



الشكل (4.4): سير الأشعة في الكاسر المستوي $n' > n$.

الحالة الثانية: بفرض أن $n' < n$ كما في الشكل (4.5) حيث نلاحظ من هذا الشكل أنه إذا وضعنا قطعة نقود (نفترض أنها جسم نقطي O) في وسط شفاف ونظرنا إلى السطح الفاصل بين الوسطين (من اليمين شكل (4.5)) فإننا نلاحظ أن قطعة النقود أقرب إلى الناظر من بعدها الحقيقي وذلك نتيجة لظاهرة الانكسار على السطح الفاصل بين الوسطين. نفرض أن الجسم O (قطعة النقود) الذي يبعد بمقدار p عن السطح الفاصل وخاله I الذي يبعد بمقدار q عن السطح الفاصل كما في الشكل (4.5). بفرض أن قرينة انكسار الوسط الأول (وسط ورود الضوء) هي n وقرينة انكسار الوسط الثاني (بفرض الهواء مثلاً) n' علماً بأن $n' < n$. لتحديد موقع الخيال نرسم الشعاعين OA و OB الصادرين عن الجسم الغاطس (قطعة النقود) في الوسط الأول كما في الشكل (4.5) فينكسران مبتعدين عن الناظر

(انتقال الشعاع من وسط أشد كسراً إلى وسط أقل كسراً للضوء). وبالنسبة ترى العين الضوء كأنه صادر من نقطة التقاء ممددات الأشعة البارزة. بالتالي تعدّ I خيال الجسم O (قطعة النقود). نستنتج من هذا الشكل أن البعد الظاهري (q) أصغر من البعد الحقيقي لقطعة النقود (p). ويمكن استخدام المعادلتين (4.7) و (4.8) لتحديد كل من p و q .



الشكل (4.5): الخيال المتشكل بواسطة كاسر مستو، الخيال في هذه الحال وهمي ويقع بجهة الجسم $n' < n$. افترضنا أن كل الأشعة محورية (أي تصنع زوايا صغيرة مع المحور الأصلي).

تطبيق عددي بمساعدة الشكل (4.5) نترك للطالب حل التطبيق التالي: إذا كان ارتفاع الماء في حوض ما 40 cm، احسب العمق الظاهري للماء الذي قرينته 1.33 في الحالات التالية:

- 1- الأشعة المحورية.
- 2- زاوية الانكسار $\theta' = 60^\circ$.
- 3- زاوية الانكسار $\theta' = 90^\circ$. ماذا تستنتج من ذلك؟

4.3 – سير الأشعة الضوئية من خلال صفيحة (شريحة) شفافة متوازية الوجهين

سوف ندرس في هذه الفقرة مسار الأشعة الضوئية من خلال صفيحة شفافة متوازية الوجهين ثخانتها t وقرينة انكسار مادتها n_2 وقرينة انكسار الوسط المحيط بها من الأعلى والأسفل n_1 . عند سقوط شعاع وحيد اللون على السطح الأعلى للصفيحة فإنه يعاني من انكسار وفقاً لقانون سنل في الانكسار

$$(n_2 \sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_1)$$

وعند وصوله للوجه السفلي للصفيحة فإنه يعاني من إنكسار آخر وفقاً لقانون سنل أيضاً $(n_1 \sin \theta_3 = n_2 \sin \theta_2)$. بدمج قانوني سنل عند الوجه الأعلى والوجه الأسفل للصفيحة يمكن كتابة المعادلة التالية:

$$\sin \theta_3 = \frac{n_2}{n_1} \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_2 \right) = \sin \theta_1 \quad (4.9)$$

نستنتج من المعادلة (4.9) أن $\theta_3 = \theta_1$ ، أي إن الصفيحة (الشريحة) متوازية الوجهين لا تغير جهة الحزمة الضوئية الواردة، ولكنها تجعل الحزمة البارزة موازية للحزمة الواردة ولكن بانزياح قدره d كما في الشكل (4.6). من المثلث ABC القائم في B (الشكل (4.6)) نرى:

$$a = \frac{t}{\cos \theta_2} \quad (4.10)$$

و من المثلث ADC القائم في D (الشكل (4.6)) نكتب:

$$d = a \sin \gamma = a \sin (\theta_1 - \theta_2) \quad (4.11)$$

من المعادلتين (4.10) و (4.11) نجد أن انزياح الشعاع الضوئي يكتب بالشكل:

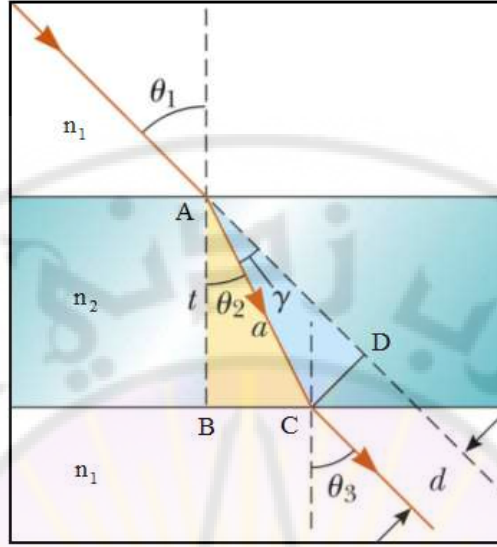
$$d = \frac{t}{\cos \theta_2} \sin (\theta_1 - \theta_2) \quad (4.12)$$

نلاحظ من المعادلة (4.12) أن المسافة d تتناسب طردياً مع t (ثخانة الصفيحة).

أما في حالة الأشعة المحورية أي في حالة الزوايا الصغيرة فيكون $\sin(\theta_1 - \theta_2) = (\theta_1 - \theta_2)$ وتكون $\cos \theta_2 \approx 1$ تكتب العلاقة (4.12) بالشكل:

$$d = t (\theta_1 - \theta_2) \quad (4.13)$$

على أن تقدّر الزوايا بالراديان. ويتبين من هذه العلاقة أن الانزياح d أصغر كثيراً من ثخن الصفيحة t. نقرأ العلاقة فزيائياً كما يلي: مقدار انزياح الشعاع البارز من الوجه الثاني عن ممدد الشعاع الوارد للوجه الأول من الصفيحة يساوي جداء ثخانة الصفيحة بالفرق بين زاوية ورود الضوء وزاوية الانكسار للوجه الأول للصفيحة.



الشكل (4.6): مسار الأشعة الضوئية المارة من خلال صفيحة متوازية الوجهين.

4.4 – الانكسار في الموشور

تعريف الموشور هو وسط شفاف متجانس يحدده سطحان كاسران مستويان متقاطعان يدعى كل منهما وجه الموشور. والزاوية الكائنة بين الوجهين تدعى زاوية الموشور α (زاوية رأس الموشور).

4.4.1 – قوانين الموشور الأساسية

نفرض أن قرينة انكسار مادة الموشور n' وقرينة انكسار الوسط المحيط بالموشور n هي $n' > n$. الشكل (4.7) يظهر سير شعاع ضوئي وحيد اللون من خلال مادة الموشور حيث يعاني هذا الشعاع الضوئي من انكسار أول عند الوجه الأول للموشور (عند النقطة A) وفق قانون سنل ($n \sin \phi_1 = n' \sin \phi'_1$)

ويعاني من انكسار ثانٍ عند الوجه الثاني للموشور (عند النقطة B) وفق قانون سنل أيضاً $(n' \sin \phi'_2 = n \sin \phi_2)$. من قانوني سنل عند النقطة A والنقطة B يمكننا استنتاج العلاقة التالية:

$$\frac{\sin \phi_1}{\sin \phi'_1} = \frac{n'}{n} = \frac{\sin \phi_2}{\sin \phi'_2} \quad (4.14)$$

حيث ϕ_1 زاوية ورود الضوء على الوجه الأول، ϕ'_1 هي زاوية الانكسار عند الوجه الأول للموشور، ϕ'_2 زاوية الورود على الوجه الثاني للموشور، ϕ_2 زاوية الانكسار عند الوجه الثاني للموشور. ومن الشكل (4.7) يمكن هندسياً استنتاج مايلي: $\beta = \phi_1 - \phi'_1$ و $\gamma = \phi_2 - \phi'_2$ ومنه يمكن استنتاج أن $\delta = \beta + \gamma$ ومن المثلث ABN' نلاحظ أن $\pi = (\pi - \alpha) + \phi'_1 + \phi'_2$ ومنه

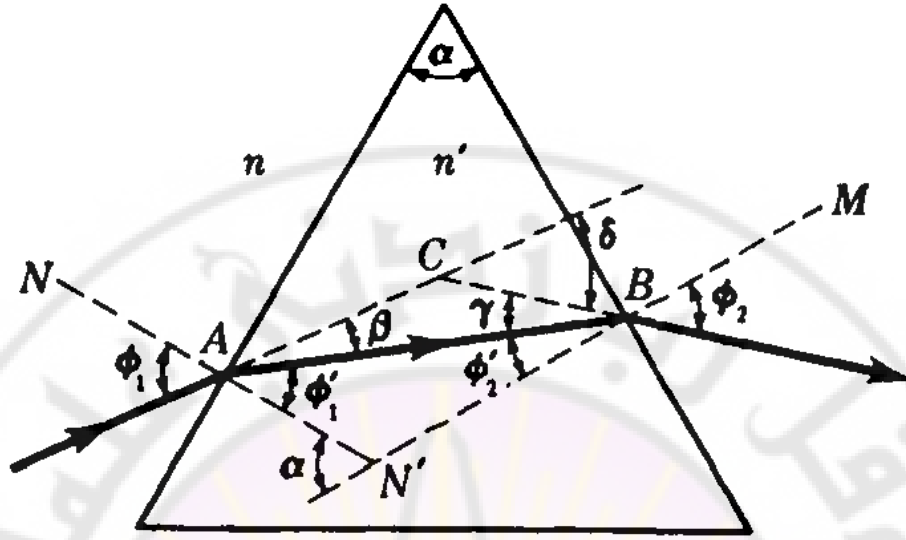
$$\alpha = \phi'_1 + \phi'_2 \quad (4.15)$$

وبالتالي نستطيع كتابة:

$$\delta = \phi_1 + \phi_2 - \alpha \quad (4.16)$$

حيث δ هي زاوية الانحراف في الموشور وتعرف على أنها الزاوية بين ممد الشعاع الوارد على الوجه الأول للموشور والشعاع البارز من الوجه الثاني للموشور. أخيراً يمكن تلخيص قوانين الموشور بالعلاقات التالية:

$$\left\{ \begin{array}{l} n \sin \phi_1 = n' \sin \phi'_1 \\ n \sin \phi_2 = n' \sin \phi'_2 \\ \alpha = \phi'_1 + \phi'_2 \\ \delta = \phi_1 + \phi_2 - \alpha \end{array} \right. \quad (4.17)$$



الشكل (4.7): سير الأشعة في الموشور.

4.4.2 – شرط بروز الأشعة من الموشور

إن شرط بروز الشعاع الضوئي من الوجه الثاني للموشور هو أن تتحقق المتراجحة التالية $\phi_2' \leq \phi_c$ ، حيث ϕ_c هي الزاوية الحدية الخاصة بالموشور المدروس. من مبدأ عكسية الضوء يمكننا أيضاً كتابة $\phi_1' \leq \phi_c$ ومنه نستنتج شرط البروز الأول الذي يعطى بالمعادلة التالية:

$$\alpha = \phi_1' + \phi_2' \leq 2\phi_c \quad (4.18)$$

كل الأشعة الضوئية الواردة التي لا تحقق هذا الشرط تعاني انعكاساً كلياً على الوجه الثاني للموشور. وبضرب طرفي المتراجحة $\phi_2' \leq \phi_c$ بإشارة – وطرح طرفيها من عدد ثابت يمكن إعادة كتابتها على الشكل التالي:

$$\phi_1' = \alpha - \phi_2' \geq \alpha - \phi_c \quad (4.19)$$

أو يمكن كتابتها بشكل آخر

$$\phi'_1 \geq \alpha - \phi_c \quad (4.20)$$

وبتطبيق قانون سنل على الوجه الأول للموشور

$n \sin \phi_1 = n' \sin \phi'_1 \geq n' \sin(\alpha - \phi_c)$ وإذا فرضنا الوسط المحيط بالموشور هو الهواء ($n=1$) فإن أصغر زاوية يحصل عندها البروز هي الزاوية ϕ_0 التي تحقق العلاقة التالية:

$$\sin \phi_0 = n' \sin (\alpha - \phi_c) \quad (4.21)$$

أي ينبغي أن تكون زاوية الورود محققة للشرط $\phi_1 \geq \phi_0$ بالإضافة إلى الشرط الأول $\alpha \leq 2\phi_c$. ومنه نلخص شرطي بروز الضوء من الوجه الثاني للموشور كما يلي:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha \leq 2\phi_c \\ n \sin \phi_1 \geq n' \sin (\alpha - \phi_c) \end{array} \right\} \quad (4.22)$$

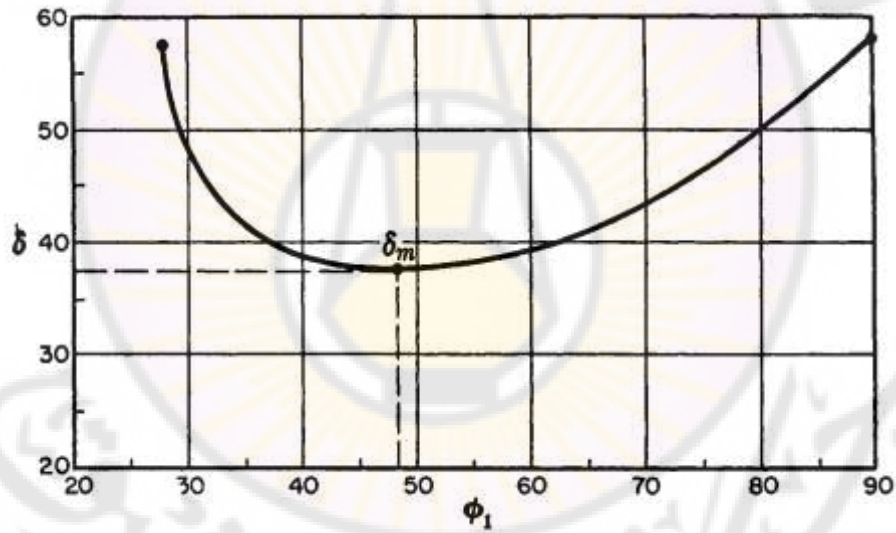
تطبيق عددي: ليكن لدينا موشور زجاجي قرينة انكساره $n=1.5$ موجود في الهواء تبلغ الزاوية الحدية ϕ_c نحو 42. فإذا تحقق شرط البروز الأساسي $\alpha \leq 2\phi_c$ أي كان $\alpha \leq 84^\circ$ بفرض أن $\alpha = 60^\circ$ مثلاً، فإن الأشعة التي تبرز من الموشور هي تلك الأشعة التي ترد بزاوية أكبر من الزاوية ϕ_0 المعطاة بالعلاقة (24) أي إن: $\sin \phi_0 = 1.5 \sin(60 - 42)$ ، ومنه $\phi_0 \approx 27^\circ$. أوجد ϕ_0 في الحالات التالية:

- (1) $\alpha = 2\phi_c$ (يجب أخذ عدة أرقام بعد الفاصلة لتجنب قيم $\sin$ أكبر من الواحد)؛ (2) $\alpha = \phi_c$ ؛ (3) $\alpha = 15^\circ$ ؛ (4) $\alpha = 45^\circ$.

4.4.3 – حالة الانحراف الأصغر

الشكل (4.8) يظهر نتائج قياس زاوية الانحراف بالموشور δ بدلالة زاوية الورود ϕ_1 . نلاحظ من هذا المنحني أن زاوية الانحراف بالموشور تمر بنهاية صغرى δ_{min} التي تكون من أجلها زاويتا الورود والبروز متساويتين وبالتالي نستطيع أن نكتب بالاستعانة بالشكل (4.9) مايلي:

$$\begin{cases} \phi_1 = \phi_2 \\ \phi'_1 = \phi'_2 \\ \beta = \gamma \end{cases} \quad (4.23)$$



الشكل (4.8): المنحني التجريبي لتغير زاوية الانحراف δ بدلالة زاوية الورود ϕ_1 في موشور قرينة انكساره 1.5 وزاوية الرأس فيه تساوي 60 درجة.

بالاستعانة هندسياً بالشكل (4.9) يمكن كتابة $\delta_{min} = \beta + \gamma$ و
 $\alpha = \phi'_1 + \phi'_2$ ومنه يمكن استنتاج العلاقتين التاليتين: $\alpha = 2\phi'_1$ و
 $\delta_{min} = 2\beta$. وكذلك يمكن استنتاج من الشكل (4.9) العلاقة التالية
 $\phi_1 = \phi'_1 + \beta$ ومنه $\phi'_1 = \alpha/2$. وباستخدام هذه العلاقات والشكل (4.9)
 نستطيع كتابة:

$$\phi_1 = \phi'_1 + \beta = \frac{1}{2}(\alpha + \delta_{min})$$

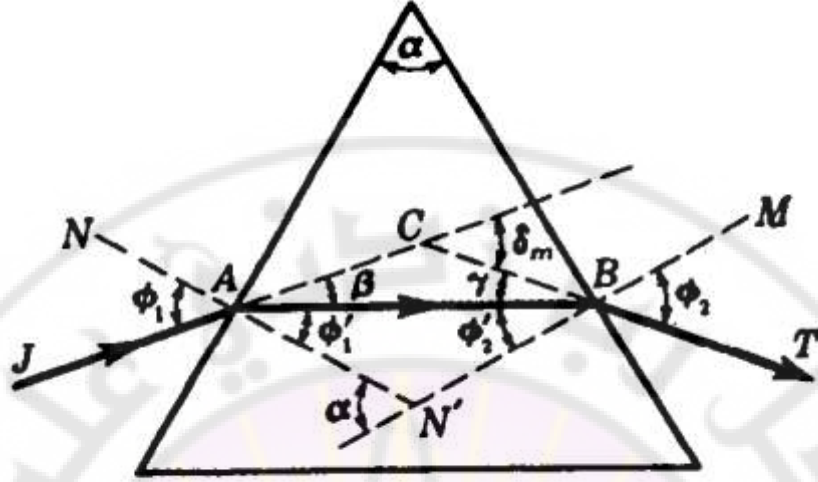
وباستخدام قانون سنل عند الوجه الأول للموشور نجد: $n \sin \phi_1 = n' \sin \phi'_1$
 ومنه نكتب: $n \sin \frac{1}{2}(\alpha + \delta_{min}) = n' \sin \left(\frac{\alpha}{2}\right)$:

$$\frac{n'}{n} = \frac{\sin \frac{1}{2}(\alpha + \delta_{min})}{\sin \left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (4.24)$$

وإذا كان الوسط المحيط بالموشور الهواء ($n=1$) فتصبح العلاقة بالشكل:

$$n' = \frac{\sin \frac{1}{2}(\alpha + \delta_{min})}{\sin \left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (4.25)$$

حيث إن δ_{min} تمثل زاوية الانحراف الأصغر في الموشور، α زاوية رأس
 الموشور، n' قرينة انكسار مادة الموشور. تستخدم العلاقة (4.24) أو العلاقة
 (4.25) في تعيين قرينة انكسار مادة مجهولة بأن نضع من المادة موشوراً بزاوية
 رأسية معلومة ثم نقوم بقياس زاوية الانحراف الأصغر δ_{min} باستخدام ضوء
 وحيد اللون.



الشكل (4.9): زاوية الانحراف الأصغر δ_{min} في الموشور.

4.4.4 – الموشور الرقيق

نقول عن موشور أنه رقيق إذا كانت زاوية رأسه α صغيرة بحيث يمكن إلباس جيوب الزاوية بالزاوية نفسها مقيسة بالراديان. ومنه يمكن كتابة المعادلة (4.24) بالشكل التالي:

$$\frac{n'}{n} = \frac{\alpha + \delta_{min}}{\alpha} \quad (4.26)$$

ويمكن عزل δ_{min} من هذه العلاقة لتكتب بالشكل:

$$\delta_{min} = \left(\frac{n'}{n} - 1 \right) \alpha \quad (4.27)$$

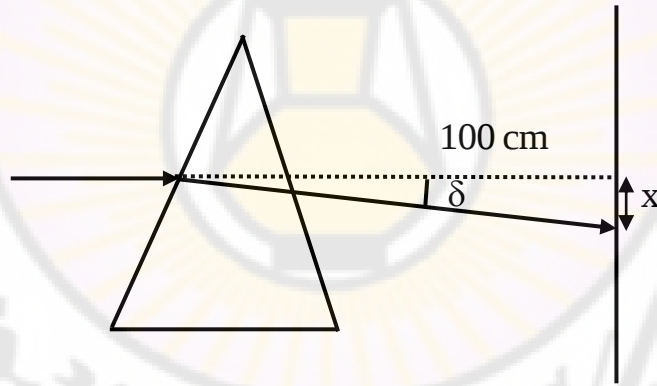
وفي حال الوسط المحيط بالموشور هو الهواء ($n=1$) تصبح العلاقة (4.27) بالشكل:

$$\delta_{min} = (n' - 1) \alpha \quad (4.28)$$

4.4.5 – استطاعة الموشور

تعريف استطاعة الموشور، كما هو موضح بالشكل (4.10)، هي مقدار انحراف المسار الأصلي للأشعة الضوئية الواردة والمارة من خلال موشور رقيق على جاجز يبعد متراً واحداً من الموشور. حيث إن واحدة استطاعة الموشور هي الكسيرة وتعرف الكسيرة بأنها انزياح الشعاع الوارد على الموشور بمقدار 1 cm على شاشة تبعد متراً واحداً عن الموشور. من الشكل (4.10) نلاحظ أن الانزياح على الشاشة $x\text{ cm}$ وهذا يساوي عددياً استطاعة الموشور. أما استطاعة الموشور (مقدرة بكسيرة الموشور) من أجل قيم صغيرة للانحراف δ هي زاوية الانحراف δ مقدرة بوحدة 0.01 راديان أو 0.573 درجة حيث حصلنا عليها من العلاقة التالية:

$$\tan \delta = \delta = \frac{1 \times 10^{-2}}{100 \times 10^{-2}} = 0.01 \text{ Rd.}$$

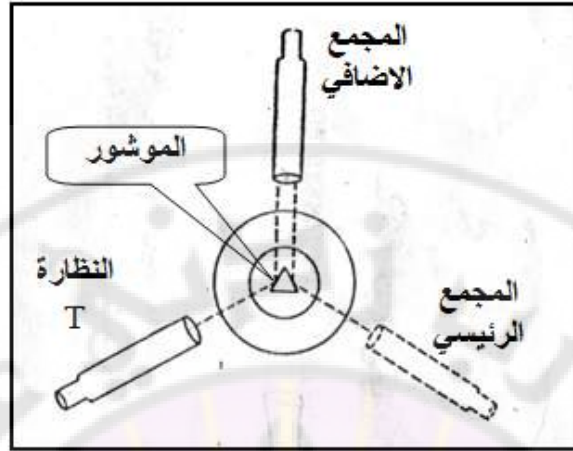


الشكل (4.10): موشور رقيق استطاعته x كسيرة موشور.

4.4.6 - المطياف ذو الموشور

المطياف ذو الموشور هو عنوان تجربة بالفيزياء العملية إذ يتم عادة في المخبر استخدام المطياف ذي الموشور في قياس قرينة انكسار مادة الموشور بدلالة طول موجة الضوء. بالتالي سوف نشرح آلية عمله باختصار دون الدخول بتوصيف مكونات التجربة. (يمكن للطلاب أن يراجع الكتاب العملي لمزيد من التفاصيل أو يمكنه البحث عن التفاصيل بالننت). يعتمد مبدأ المطياف ذي الموشور على ظاهرة تبديد الضوء إذ إنّ الموشور يبدد الضوء الأبيض ليظهر طيف متصل ممتد بين الأحمر (Red) R و البنفسجي (Violet) V. يتألف مقياس الطيف من الأجزاء الرئيسية التالية انظر الشكل (4.11):

- 3- الموشور ويرتكز على قاعدة أفقية بحيث يكون حرفه الكاسر شاقولياً.
- 4- المجمع الرئيسي ويتألف من شق ضيق S يُجعل في المستوي المحرقي لعدسة مقربة؛ بحيث تصدر منها أشعة متوازية تسقط على الموشور.
- 5- المجمع الإضافي ويتألف من مسطرة صغيرة مدرجة تدريجاً دقيقاً جداً، ويمكن زلقها داخل أنبوب المجمع لجعلها تقع في المستوي المحرقي لعدسة؛ بحيث تصدر منها أشعة متوازية لدى إضاءة المسطرة الدقيقة بمصباح خارجي.
- 6- النظارة وتتألف من عدسة جسمية ومن عينية، ونرى من خلالها طيف المنبع الضوئي الموجود أمام الشق، وكذلك خيال تدريجات المسطرة الدقيقة التي تفيد في تحديد مواقع خطوط الطيف.



الشكل (4.11): العناصر الرئيسية في المطياف ذي الموشور.

يستخدم المطياف ذو الموشور للكشف عن نوعية المادة وطبيعتها وذلك من خلال مقارنة الطيف الناتج مع طيف أخرى لمواد معروفة الطيف. ويستخدم المطياف ذو الموشور كذلك في قياس قرائن انكسار مادة ما وذلك بتصنيع موشور من تلك المادة ثم يوضع في مقياس الطيف ويضاء المطياف بضوء وحيد اللون وتحسب قرينة انكسار تلك المادة باستخدام المعادلة (4.25). كما ذكرنا سابقاً يعتمد مبدأ المطياف ذو الموشور على ظاهرة تبدد الضوء والتي تنتج عن تابعة قرينة الانكسار للطول الموجي إذ وجد أن قرينة الانكسار ترتبط مع الطول الموجي للضوء بعلاقة «كوشي» التي تكتب بالشكل التالي:

$$n_{\lambda} = A + \frac{B}{\lambda^2} \quad (4.29)$$

حيث إن B ثابت كوشي الأول وأن A ثابت كوشي الثاني. وتعرف قدرة التبدد لمادة ما بالعلاقة التالية:

$$\omega = \frac{n_B - n_R}{n_Y - 1} \quad (4.30)$$

حيث n_B تمثل قرينة انكسار الضوء الأزرق و n_R تمثل قرينة انكسار الضوء الأحمر و n_Y تمثل قرينة انكسار الضوء الأصفر.

مسائل

4.1- يرد شعاع ضوئي وحيد اللون بزاوية ورود قدرها 45° على صفيحة شفافة متوازية الوجهين ثخنها 4 cm و قرينة انكسارها 1.5. احسب انزياح الشعاع البارز عن الشعاع الوارد. قارن هذا الانزياح بالانزياح عندما تكون زاوية الورود صغيرة وتساوي 3° .

4.2- موشور زجاجي قرينة انكساره بالنسبة للخط الأصفر من طيف الصوديوم تساوي 1.523 وزاوية الرأس فيه تساوي 50° . إذا وردت حزمة من الضوء الأصفر آنف الذكر على وجهه الأول بزاوية قدرها 45° ، أوجد: (أ)- زاوية الانحراف β عند الوجه الأول، (ب)- زاوية الانحراف γ عند الوجه الثاني، (ج)- زاوية الانحراف الكلية للموشور.

4.3- تتوضع قطعة معدنية في قعر حوض مليء بالماء حتى ارتفاع قدره 36 cm فإذا كانت قرينة انكسار الماء مساوية 1.333، أوجد البعد الظاهري للقطعة عند النظر إليها من الأعلى بشكل عمودي، مفترضين أن الزاوية صغيرة، أي يمكن إلباس الجيوب بالزوايا مقدرة بالراديان.

4.4- موشور رقيق زاويته درجتان وقرينة انكساره بالنسبة للشعاع الوارد إليه تساوي 1.58. احسب استطاعة هذا الموشور.

الفصل الخامس: الانعكاس والانكسار على سطوح كروية

5.1 – أولاً: الأخيلة المتشكلة بالانعكاس على المرايا الكروية

(المرايا المقعرة والمحدبة)

5.1.1 - العناصر الأساسية في المرايا الكروية

5.1.2 - المرايا المقعرة

5.1.3 - المرايا المحدبة

5.1.4 – دساتير المرآة الكروية

5.1.5 - البعد المحرقي لمرآة كروية

5.1.6 – المستوي المحرقي للمرآة الكروية:

5.1.7 – المرآة المستوية كحالة خاصة للمرآة الكروية

5.1.8 – اصطلاحات الإشارة للمرايا الكروية

5.1.9 - سير الأشعة في المرايا

5.2 - ثانياً: الأخيلة المتشكلة بالانكسار على السطوح

الكروية (الكاسر الكروي)

5.2.1 – قوانين الكاسر الكروي

5.2.2 – محرقا الكاسر الكروي

5.2.3 – المستوي المحرقى الجسمي والمستوي المحرقى

الخيالى للكاسر الكروي:

5.2.4 – السطوح الكاسرة المستوية كحالة خاصة للكاسر

الكروي

5.2.5 – التكبير الخطى العرضانى للكاسر الكروي

5.2.6 – التكبير الخطى الطولانى للكاسر الكروي

5.2.7 – اصطلاحات الإشارة للكاسر الكروي

5.2.8 - تحديد الخيال بالرسم الهندسى

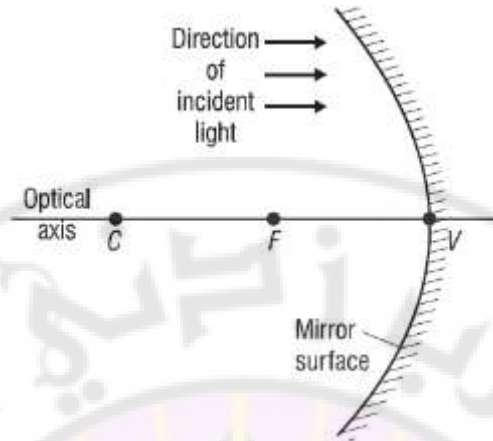
الفصل الخامس: الانعكاس والانكسار على سطوح كروية

5.1 – أولاً: الأخيلة المتشكلة بالانعكاس على المرايا الكروية (المرايا المقعرة والمحدبة)

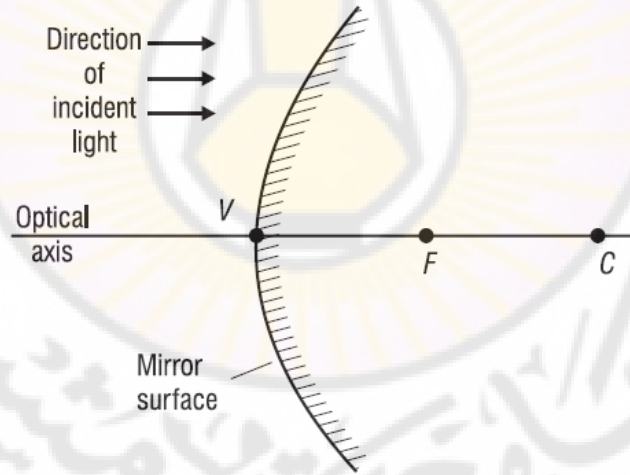
تعريف المرايا الكروية: هي سطح كروي عاكس للضوء، وهذا السطح هو جزء من كرة، بالتالي نصف قطر انحناء المرآة R هو نصف قطر الكرة المقطوعة منها، و مركز المرآة C هو مركز هذه الكرة. انظر الشكل (5.1). وتكون المرايا الكروية محدبة (الشكل (5.2)) أو مقعرة (الشكل (5.1)) عند النظر إلى سطحها العاكس.

5.1.1 - العناصر الأساسية في المرايا الكروية

الشكل (5.1) والشكل (5.2) يظهران العناصر الأساسية للمرآة الكروية المقعرة والمحدبة على التوالي وهي: مركز الانحناء C ، والرأس (الذروة) V ، المحور الأصلي CV والمحور الثانوي (أي محور يمر من C ولا يمر من خلال V) وهناك المحرق الأصلي F الذي يقع في منتصف المسافة بين C و V كما سنرى لاحقاً. تجدر الإشارة هنا إلى أن النقطة C تقع أمام المرآة المقعرة كما هو مبين في الشكل (5.1) أما في حالة المرآة المحدبة فتكون النقطة C خلف المرآة (الشكل (5.2)).



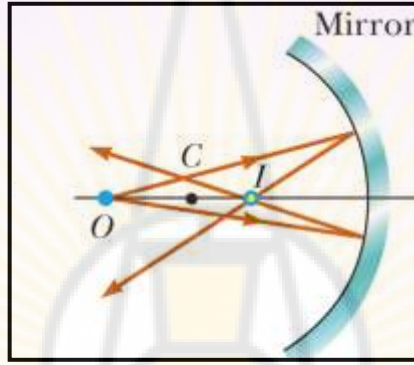
الشكل (5.1): العناصر الأساسية في المرايا الكروية المقعرة.



الشكل (5.2): العناصر الأساسية في المرايا الكروية المحدبة.

5.1.2 - المرايا المقعرة

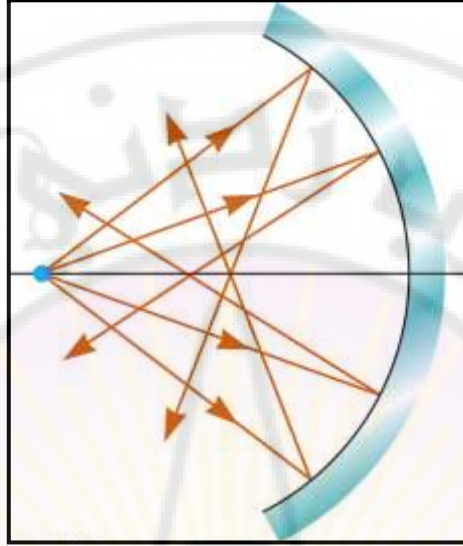
الشكل (5.3) يظهر مقطعاً عرضياً لمرآة كروية مقعرة بنصف قطر R ومركز الانحناء C متوضع على المحور الأصلي. حيث مثلت المرآة بشكل خط منحن عريض مظل (الخط العريض يمثل الزجاج على شكل قوس ووجهه الأمامي مفضض). سُميت بالمرآة المقعرة لأن الضوء ينعكس عن السطح المقعر الداخلي. يظهر الشكل (5.3) تشكل خيال I بواسطة المرآة المقعرة لجسم نقطي O متوضع على المحور الأصلي.



الشكل (5.3): خيال جسم نقطي متوضع في النقطة O أمام المرآة الكروية المقعرة (حالة الزوايا المحورية).

عند تحديد موقع الخيال بالرسم الهندسي يجب علينا رسم الأشعة الصادرة من الجسم التي تصنع زوايا صغيرة مع المحور الأصلي، هذه الأشعة تدعى بالأشعة المحورية. إن كل الأشعة المحورية الصادرة عن نقطة واحدة تنعكس مرة من خلال نقطة خيال واحدة I فالخيال في هذه الحالة حقيقي، كما في الشكل (5.3). أما إذا وردت الأشعة لسطح المرآة بزوايا ورود كبيرة مع المحور الأصلي انظر الشكل (5.4)، فإنها تلتقي بعد الانعكاس في نقاط مختلفة على المحور الأصلي

منتجة خيالاً مشوهاً (أي يكون خيال النقطة مجموعة من النقاط). يدعى التشوه في الخيال بالزيغ الكروي الذي سنبحثه في الفصول القادمة.

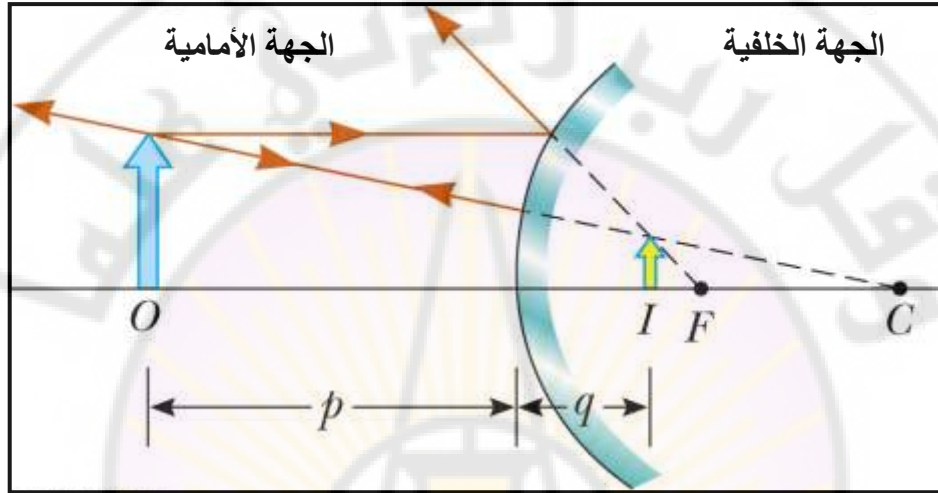


الشكل (5.4): الأشعة الصادرة عن جسم نقطي بزوايا ورود كبيرة مع المحور الأصلي (الزيغ الكروي).

5.1.3 - المرايا المحدبة

تعريف المرآة المحدبة: هي عبارة عن سطح كروي محدب عاكس للضوء؛ حيث الجزء المفضض هو السطح الداخلي بالتالي ينعكس الضوء على الجزء المحدب الخارجي (الشكل (5.5)). يظهر الشكل (5.5) تشكل خيال جسم لمرآة محدبة وإن الأشعة الصادرة من أي نقطة من الجسم تكون بعد الانعكاس متباعدة لتظهر كأنها قادمة من نقطة تقع خلف المرآة، لذلك فالمرآة المحدبة تدعى أحياناً بالمرآة المبعدة. ونلاحظ من الشكل (5.5) أن الخيال في هذه الحالة وهمي لأنه يقع خلف المرآة، ونلاحظ أيضاً أن الخيال متجه للأعلى (أي صحيح) وأصغر من الجسم. هذا النوع

من المرايا يستخدم عادة في الحوائيت الكبيرة لتعقب اللصوص، إذ باستخدام مرآة وحيدة يمكن مسح حقل رؤية كبير لأنها تشكل خيلاً مصغراً لداخل الحانوت.
(ملاحظة: سوف نشرح طريقة تحديد الخيال بالرسم الهندسي في فقرة لاحقة)



الشكل (5.5): تشكل خيال بواسطة مرآة كروية محدبة. الخيال المتشكل وهمي وصحيح وأصغر من الجسم.

5.1.4 – دساتير المرآة الكروية

فيما يلي قوانين المرايا الكروية (مقعرة ومحدبة) وهي: القانون الأول للمرآة الكروية يعطى بالعلاقة التالية والتي تدعى بقانون المرآة (أو قانون ديكرات):

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R}$$

حيث R يمثل نصف قطر المرآة و p يمثل بعد الجسم و q بعد الخيال. هذا القانون يطبق في حالة المرآة المقعرة والمحدبة مع الأخذ بالحسبان إصطلاح الإشارة إذ

يعدّ R سالباً إذا وقع خلف المرآة (مرآة محدبة) وموجباً إذا وقع أمام المرآة (مرآة مقعرة) وكذلك الأمر بالنسبة لبعد الجسم. فعندما تكون قيمة q موجبة يكون الخيال حقيقياً (يقع أمام المرآة) وعندما تكون قيمة q سالبة يكون الخيال وهمياً (يقع خلف المرآة). أما القانون الثاني للمرآة الكروية فهو أن التكبير الخطي العرضاني يعطى بالعلاقة التالية:

$$m_t = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p}$$

حيث h' يمثل طول الخيال و h يمثل طول الجسم. ويطبق هذا القانون في حالة المرايا الكروية المحدبة والمقعرة. فعندما تكون قيمة m_t موجبة يكون الخيال صحيحاً وعندما تكون قيمة m_t سالبة يكون الخيال مقلوباً.

سنقوم الآن باستخراج قانوني المرايا الكروية بمساعدة الشكل (5.6). إذ إنّ الشكل (5.6) يظهر أنّ جسم O يقع على بعد p من ذروة المرآة V وتم تحديد الخيال I بالرسم الهندسي باستخدام قانوني الانعكاس (زاوية الورود تساوي زاوية الانعكاس) وباستخدام قاعدة أن كل شعاع يرد ماراً من مركز انحناء المرآة C ينعكس على نفسه، حيث تم على الشكل (5.6) تحديد كل من بعد الخيال q وبعد الجسم p ونصف قطر الانحناء للمرآة R . يُصطلح بأن تقاس هذه المسافات من النقطة V (نقطة الذروة للمرآة). حيث تم تحديد موقع الخيال I من نقطة تلاقي الأشعة المنعكسة كما هو موضح بالشكل (5.6). نلاحظ من هذا الشكل أن الخيال مقلوب، كذلك يمكن ملاحظة مايلي من الشكل (5.6): نلاحظ أن $\tan \theta = h/p$ من المثلث قائم الزاوية VOA ومن المثلث قائم الزاوية VIB نجد أن

$\tan \theta = -h'/q$ حيث وضعنا الإشارة السالبة بسبب أن الخيال مقلوب، بالتالي h' سالبة. ومنه نستنتج علاقة التكبير العرضاني:

$$m_t = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} \quad (5.1)$$

ومن المثلثين القائمين CBI و CAO في الشكل (5.6) نلاحظ أن الزاوية α مشتركة بالتالي يمكن كتابة

$$\tan \alpha = \frac{h}{p-R} \quad , \quad \tan \alpha = -\frac{h'}{R-q}$$

ومنها نجد أن

$$\frac{h'}{h} = -\frac{R-q}{p-R} \quad (5.2)$$

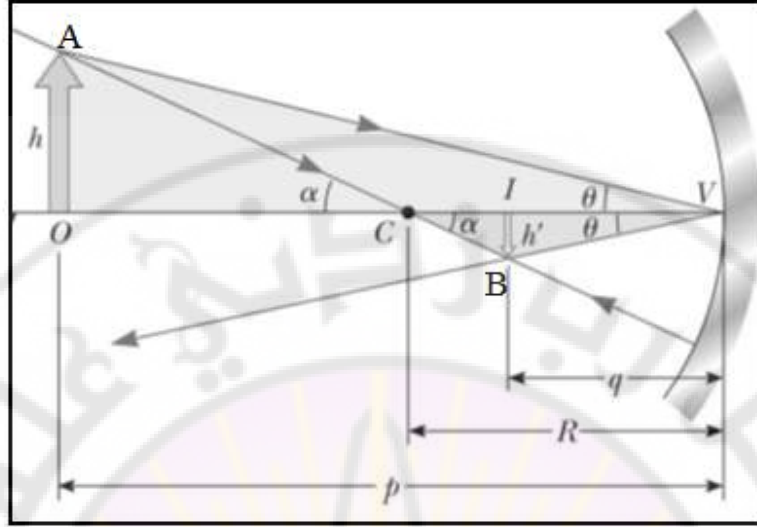
بمقارنة المعادلتين (5.1) و (5.2) نرى أن

$$\frac{R-q}{p-R} = \frac{q}{p}$$

والتي يمكن إعادة كتابتها بالشكل

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R} \quad (5.3)$$

هذه المعادلة تدعى بقانون المرأة (أو قانون ديكارت).



الشكل (5.6): الخيال المتشكل بواسطة مرآة كروية مقعرة لجسم O متوضع خارج مركز الانحناء.

5.1.5 - البعد المحرقي لمرآة كروية

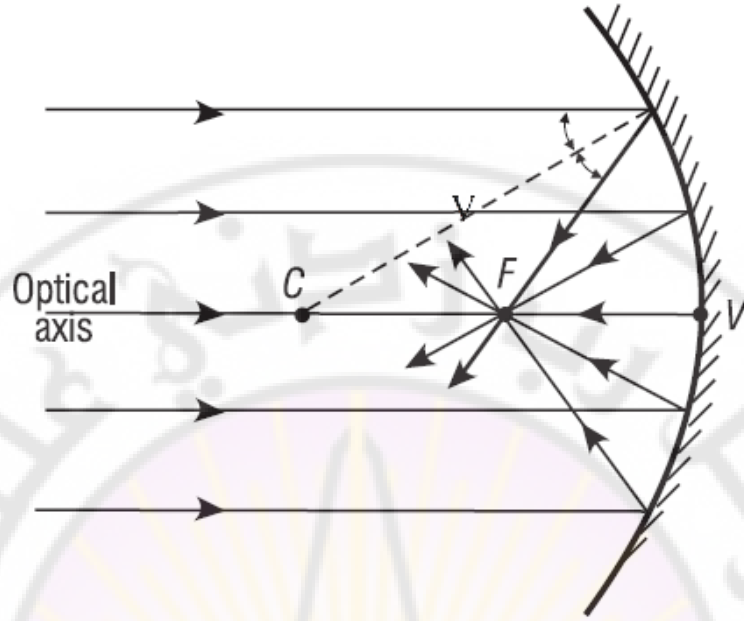
لايجاد البعد المحرقي لمرآة نجعل الجسم بعيداً جداً عن المرآة (الجسم في اللانهاية) إذا كان الجسم بعيداً جداً عن المرآة، أي إذا كان p أكبر بكثير من R حيث يمكن القول إن الجسم واقع في اللانهاية عندها $1/p = 0$ ، و بالتالي تصبح المعادلة (5.3) بالشكل $q = R/2$ عندئذ نستطيع القول: عندما يكون الجسم بعيداً جداً عن المرآة، فإن الخيال يقع في منتصف المسافة بين مركز الانحناء C و رأس (ذروة) المرآة V . كما هو مبين في الشكل (5.7) نلاحظ أن الأشعة الواردة من الجسم متوازية فيما بينها ولأننا فرضنا أن المنبع بعيد جداً عن المرآة، فسوف تنعكس عن المرآة وتلتقي في نقطة واحدة تدعى بالنقطة المحرقة F وبعدها عن رأس المرآة يدعى بالبعد المحرقي f أي

$$f = \frac{R}{2} \quad (5.4)$$

فالبعد المحرقي هو خاصية تتميز بها كل مرآة ويتعلق بنصف قطر انحنائها ولا يعتمد على المادة المصنوعة منها. ومنه يمكن كتابة معادلة المرآة (5.3) بدلالة البعد المحرقي بالشكل:

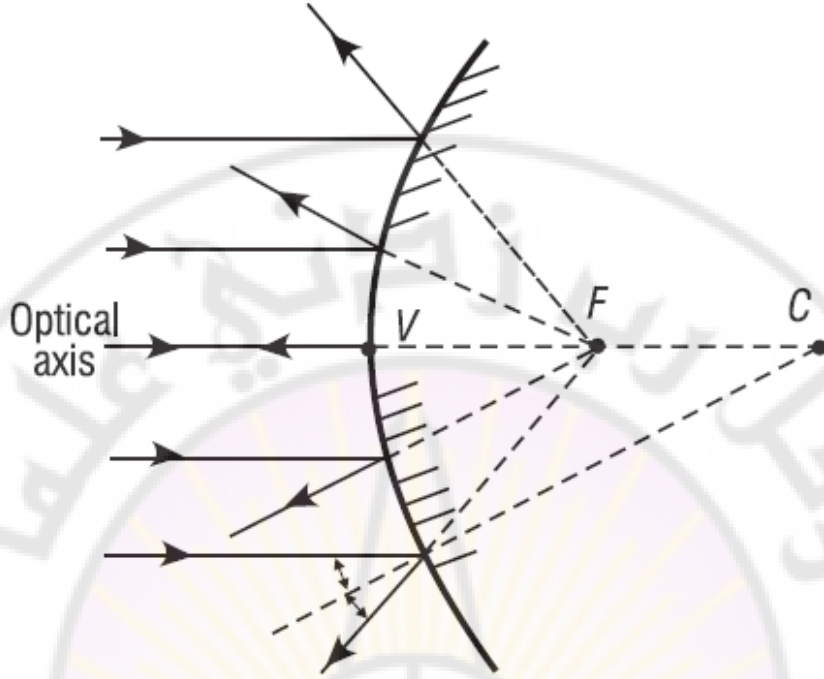
$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \quad (5.5)$$

ومن الشكل (5.7) نلاحظ أن الأشعة الواردة إلى سطح المرآة المقعرة موازية لمحورها الأصلي تنعكس متلاقية في نقطة تدعى بالمحرق F، حيث تدعى المسافة FV بالبعد المحرقي، ويرمز له f . وبحسب مبدأ رجوع الضوء فإن كل شعاع ضوئي يرد المرآة ماراً بمحرقها الأصلي ينعكس موازياً لمحورها الأصلي. من العلاقة (5.4) يمكننا استنتاج اصطلاح الإشارة للبعد المحرقي للمرآة فإذا كان f سالباً كانت المرآة محدبة وإذا كان f موجباً كانت المرآة مقعرة فإشارة f تتبع إشارة R .



الشكل (5.7): الأشعة الضوئية الصادرة من جسم يقع في اللانهاية ($p \rightarrow \infty$) تنعكس من مرآة مقعرة مارة بنقطة المحرق F . في هذه الحال يكون بعد الخيال $q = R/2 = f$ ، حيث f البعد المحرقي للمرآة.

أما الشكل (5.8) فيوضح الأشعة الضوئية الصادرة من جسم يقع في اللانهاية ($p \rightarrow \infty$) والتي تنعكس عن سطح مرآة محدبة ممدداتها تمر بنقطة المحرق F . في هذه الحال يكون بعد الخيال $q = R/2 = f$ ، حيث f البعد المحرقي للمرآة.

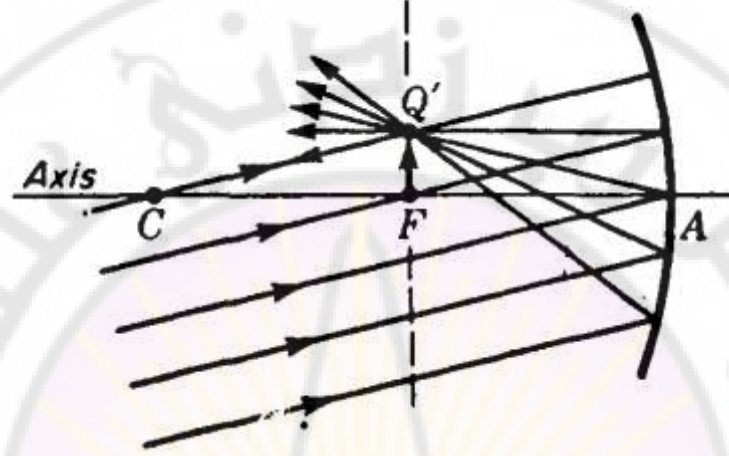


الشكل (5.8): الأشعة الضوئية الصادرة من جسم يقع في اللانهاية ($p \rightarrow \infty$) تنعكس من مرآة محدبة ممدداتها تمر بنقطة المحرق F . في هذه الحال يكون بعد الخيال $q = R/2 = f$ ، حيث f البعد المحراقي للمرآة.

5.1.6 – المستوي المحراقي للمرآة الكروية:

نعرف المستوي المحراقي للمرآة بأنه المستوي العمودي على المحور الأصلي والذي يمر بالنقطة المحرقية F كما هو موضح في الشكل (5.9) في حالة المرآة المقعرة. نلاحظ من هذا الشكل أن الأشعة الضوئية الواردة المتوازية فيما بينها وغير موازية للمحور الأصلي للمرآة تنحرف بعد الانعكاس عن سطح المرآة في النقطة Q' مثلاً والتي تقع في المستوي المحراقي للمرآة، وفي حال الأشعة الضوئية الواردة الموازية للمحور الأصلي تنطبق عندها النقطة Q' على النقطة المحرقية F

ويمكن تعميم ذلك على المرآة المحدبة مع الأخذ بالحسبان كون ممددات الأشعة المنعكسة هي التي تتمحرق في المستوي المحرقى للمرآة في حال كون الأشعة الواردة متوازية فيما بينها ونترك للطالب تحديد المستوي المحرقى للمرآة المحدبة.



الشكل (5.9): المستوي المحرقى للمرآة المقعرة.

5.1.7 – المرآة المستوية كحالة خاصة للمرآة الكروية

إذا كان نصف قطر المرآة المقعرة R مساوياً إلى اللانهاية عندها يمكن عدّها مرآة مستوية وتصبح المعادلة (5.3) كما يلي

$$p = -q$$

بتعويض $p = -q$ في علاقة التكبير الخطي العرضاني المعادلة (5.1) نحصل على العلاقة التالية:

$$m_t = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{-q} = 1 \Rightarrow h = h' \quad (5.6)$$

وهي النتيجة نفسها التي حصلنا عليها سابقاً من أجل المرايا المستوية.

5.1.8 – اصطلاحات الإشارة للمرايا الكروية

نلاحظ أننا استخدمنا مرآة مقعرة عند استخراج المعادلات السابقة، و لكن هذه العلاقات يمكن تطبيقها في حالة المرايا المحدبة بشرط أن نأخذ بالحسبان اصطلاحات الإشارة كما يلي: الشكل (5.10) يشير إلى الجهة الأمامية أو الجهة الحقيقية وهي المنطقة التي ترد منها الأشعة الضوئية على سطح المرآة وإلى الجهة الخلفية أو الجهة الوهمية للمرآة. يبين هذا الشكل اصطلاحات الإشارة لبعد الجسم وبعده الخيال والبعد المحرقي f ونصف قطر المرآة الكروية R (المقعرة أو المحدبة). نلاحظ من الشكل (5.10) أن أبعاد كل من الجسم p والخيال q ونصف القطر R والبعد المحرقي f من إشارة موجبة إذا وقعوا أمام المرآة ومن إشارة سالبة إذا وقعوا خلف المرآة. ونقول عن جسم إنه حقيقي إذا كان بعده p موجباً ويكون جسماً وهمياً إذا كان بعده p سالباً وكذلك نقول عن خيال أنه حقيقي إذا كان بعده q موجباً ويكون خيلاً وهمياً إذا كان بعده q سالباً. نلاحظ من الشكل (5.10) أنه تم تسمية الجهة الأمامية بالجهة الحقيقية لأن كل مقدار (p أو q) يقع أمام المرآة فهو حقيقي وتم تسمية الجهة الخلفية بالجهة الوهمية لأن كل مقدار يقع خلف المرآة فهو وهمي. بالإضافة إلى ذلك إذا كان نصف قطر المرآة R أوبعدها المحرقي f موجباً فإن المرآة مقعرة وإذا كان نصف قطر المرآة R أوبعدها المحرقي f سالباً فإن المرآة محدبة. أما إشارة التكبير الخطي العرضاني أو طول الخيال h' فتصف أي منها فيما إذا كان الخيال صحيحاً أو مقلوباً، فإذا كان m_t أو h' موجباً فالخيال صحيح وإذا كان m_t أو h' سالباً فالخيال مقلوب. أما القيمة المطلقة للتكبير الخطي العرضاني $m_t = \frac{h'}{h}$ تشير إلى مايلي: إذا كانت $|m_t| > 1$ فإن طول الخيال أكبر من طول الجسم ($h' > h$). وإذا كانت

$|m_t| < 1$ فإن طول الخيال أصغر من طول الجسم ($h' < h$). وإذا كانت $|m_t| = 1$ فإن طول الخيال يساوي طول الجسم ($h' = h$).



الشكل (5.10): الإشارة لـ p و q و R و f من أجل المرايا المقعرة والمحدبة والمستوية.

5.1.9 - سير الأشعة في المرايا

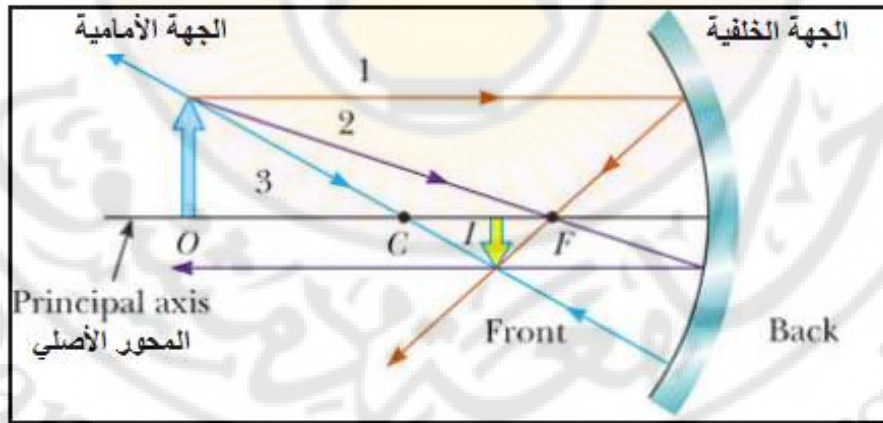
فيما يلي أهم القواعد المتبعة لتحديد موقع الخيال وطبيعته بالرسم الهندسي لكن لابد من الإشارة إلى أن استخدام هذه الطريقة يحتاج إلى دقة بالرسم واختيار مقاييس رسم مناسبة. إذ إن استخدام هذه الطريقة يساعدنا في التأكد من النتائج التي حصلنا عليها بالحساب.

أ- المرآة المقعرة:

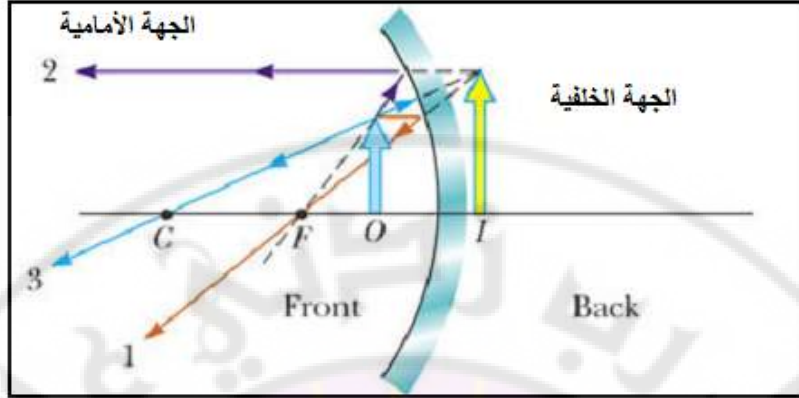
الشكل (5.11) والشكل (5.12) يوضحان كيفية تحديد موقع الخيال وطبيعته بالرسم الهندسي لمرآة مقعرة من أجل موقعين مختلفين لبعـد الجسم. رسمنا ثلاثة أشعة تمر من أعلى نقطة بالجسم حيث اتبعنا القواعد التالية عند الرسم:

- أي شعاع يرد موازياً للمحور الأصلي (الشعاع 1) ينعكس ماراً من خلال نقطة المحرق F.
- أي شعاع يرد ماراً من خلال نقطة المحرق (الشعاع 2) ينعكس موازياً للمحور الأصلي.
- أي شعاع يرد ماراً من خلال مركز الانحناء C (الشعاع 3) ينعكس للخلف منطبقاً على نفسه.

يتم تحديد موقع الخيال من نقطة تلاقي الأشعة المنعكسة، إن بعد الخيال يجب أن يكون دائماً موافقاً للقيمة المحسوبة وفق قانون ديكارت أو قانون المرايا.



الشكل (5.11): سير الأشعة لمرآة مقعرة وذلك عندما يُوضع الجسم على مسافة تزيد عن نصف قطر المرآة R فالخيال يكون حقيقياً ومقلوباً وأصغر من الجسم.



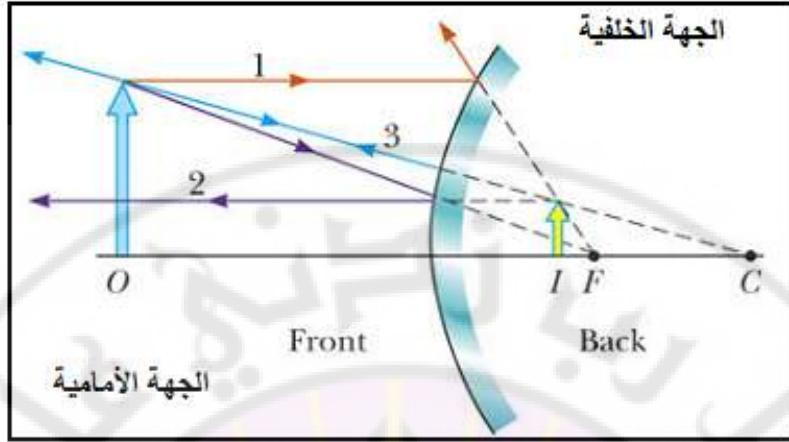
الشكل (5.12): سير الأشعة لمرآة مقعرة وذلك عندما يُوضع الجسم بين نقطة المحرق وسطح المرآة فالخيال يكون وهمياً وصحيحاً وأكبر من الجسم.

ب- المرآة المحدبة:

ويتم تحديد موقع الخيال وطبيعته لمرآة محدبة بالرسم الهندسي (انظر إلى الشكل (5.13)) باتباع الطرائق التالية:

- أي شعاع يرد موازياً للمحور الأصلي (الشعاع 1) ينعكس مبتعداً كأنه قادماً من نقطة المحرق F.
- أي شعاع يرد بحيث يكون ممدّه يمر من نقطة المحرق (الشعاع 2) ينعكس موازياً للمحور الأصلي.
- أي شعاع يرد بحيث يكون ممدّه يمر من مركز الانحناء C ينعكس للخلف منطبقاً على نفسه.

نلاحظ من الشكل (5.13) أن الخيال في المرآة المحدبة هو وهمي وأصغر من الجسم وصحيح. يجب على الطالب إعادة رسم الشكل (5.13) من أجل أبعاد للجسم مختلفة واستنتاج ماهو تأثير زيادة بعد الجسم على بعد الخيال.



الشكل (5.13): سير الأشعة لمرآة محدبة وذلك عندما يُوضع الجسم أمامها فالخيال يكون وهمياً وصحيحاً وأصغر من الجسم.

تطبيقات

مثال (1):

مرآة كروية مقعرة ببعد محراقي مساو إلى $f = +10 \text{ cm}$. المطلوب حدد موقع الخيال وطبيعته لجسم يعطى بعده كما يلي: (أ) -25 cm . (ب) -10 cm . (ج) -5 cm . ثم احسب التكبير الخطي العرضاني في كل حالة.

الحل:

(أ) - بتطبيق قانون المرآة نكتب:

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

$$\frac{1}{25} + \frac{1}{q} = \frac{1}{10} \Rightarrow q = 16.7 \text{ cm}$$

نلاحظ أن q موجبة فالخيال حقيقي. من أجل حساب التكبير الخطي العرضاني نكتب:

$$m_t = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{q} = -\frac{16.7}{25} = -0.668$$

نجد أن m_t سالبة فالخيال مقلوب وهي أصغر من الواحد بالتالي فإن طول الخيال أصغر من طول الجسم.

(ب)-

$$\frac{1}{10} + \frac{1}{q} = \frac{1}{10} \Rightarrow q = \infty$$

الخيال في اللانهاية
ويكون

$$m_t = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{q} = -\frac{\infty}{10} = -\infty$$

(ج)-

$$\frac{1}{5} + \frac{1}{q} = \frac{1}{10} \Rightarrow q = -10 \text{ cm}$$

(الخيال وهمي)، والتكبير الخطي العرضاني في هذه الحالة يكون:

$$m_t = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{q} = -\frac{-10}{5} = 2$$

إن m_t موجبة فالخيال صحيح وطول الخيال أكبر من طول الجسم بمرتين.
إذا كان طول الجسم $h=5 \text{ mm}$ ، ما هو طول الخيال h' في كل حالة من الحالات السابقة؟

مثال (2):

مرآة كروية محدبة ببعد محراقي مساو إلى $f = -0.25 \text{ m}$. وضع جسم على بعد 3 m عن سطح المرآة والمطلوب (أ)- حدد موقع الخيال وطبيعته. (ب)- أوجد التكبير الخطي العرضاني للخيال.

الحل: (أ)- بتطبيق قانون المرآة نكتب:

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

$$\frac{1}{3} + \frac{1}{q} = \frac{1}{-0.25} \Rightarrow q = -0.23 \text{ cm}$$

نلاحظ أن q سالبة فالخيال وهمي. ولحساب التكبير الخطي العرضاني نكتب:

$$m_t = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} = -\frac{-0.23}{3} = 0.077$$

نلاحظ أن m_t موجبة فالخيال صحيح وأصغر من الجسم.

مثال (3) يطلب من الطالب حل هذا المثال

يبعد جسم عن مرآة مقعرة مسافة $p = R = 10 \text{ cm}$ (الجسم في c) والمطلوب:

- 1- ارسم سير الأشعة.
- 2- احسب بعد الخيال وحدد طبيعته واحسب التكبير الخطي العرضاني.
- 3- بفرض $h = 5 \text{ mm}$ احسب h' .
- 4- أعد حل المسألة بفرض أن الجسم يقع في المحرق.

5.2 – ثانياً: الأخيلة المتشكلة بالانكسار على

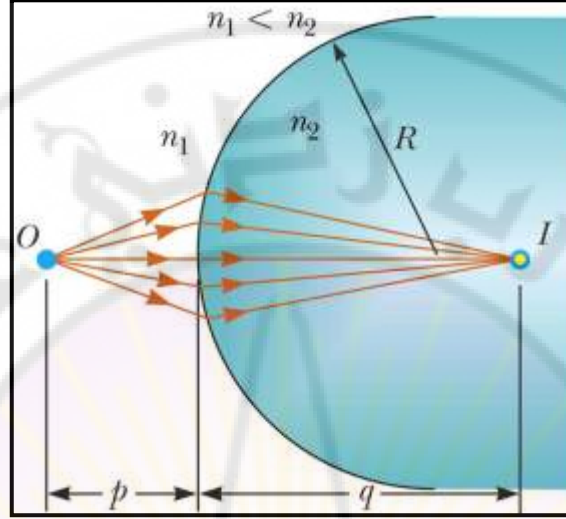
السطوح الكروية (الكاسر الكروي)

تعريف الكاسر الكروي: هو سطح كروي (جزء من كرة) نصف قطر انحنائه R يفصل بين وسطين شفافين قرينة انكسارهما n_1 و n_2 ، حيث n_1 قرينة انكسار الوسط الذي ترد منه الأشعة الضوئية على سطح الكاسر انظر الشكل (5.14) والشكل (5.15). ويعرف المحور الأصلي للكاسر الكروي بأنه المستقيم المار من مركز انحناء الكاسر وذروة الكاسر (رأس الكاسر). ستساعدنا قوانين الكاسر الكروي لاحقاً في فهم واستخراج قوانين العدسات الرقيقة والثخينة.

5.2.1 – قوانين الكاسر الكروي

سوف نقوم في هذه الفقرة باستخراج قوانين الكاسر الكروي. إذ يعتمد استخراج هذه القوانين على قانون سنل في الانكسار، وكذلك يعتمد على نسب مثلثية لها علاقة بالشكل الهندسي والتي أخذها الطالب في المرحلة الإعدادية أو الثانوية. نفرض أن لدينا جسم نقطي O واقع في الوسط الذي قرينة انكساره n_1 حيث إن $n_1 < n_2$ انظر الشكل (5.14) والشكل (5.15). كما في حالة المرايا لتحديد الخيال بالرسم الهندسي سوف نأخذ أشعة محورية (تصنع زوايا صغيرة مع المحور الأصلي) صادرة من الجسم النقطي، بالتالي هذه الأشعة تعاني من انكسار على السطح الكروي الفاصل بين الوسطين الشفافين وفقاً لقانون سنل في الانكسار، وهذه الأشعة تتلاقى بعد الانكسار في نقطة واحدة I والتي تسمى نقطة الخيال للجسم النقطي O . عند رسم سير الأشعة يجب أن نتذكر أن أي شعاع يرد ناظماً على

السطح لا ينكسر (لا ينحرف) عن مساره الأصلي، بالتالي فإن أي شعاع يرد ماراً بمركز انحناء الكاسر الكروي لا ينكسر.



الشكل (5.14): خيال متشكل بالانكسار على سطح كروي. الأشعة التي تصنع زوايا صغيرة مع المحور الأصلي الصادرة من جسم نقطي O والتي تنكسر مرة من خلال نقطة الخيال I .

من الشكل (5.15) نلاحظ أننا حددنا موقع الخيال I بنقطة تقاطع شعاعين منكسرين أحدهما الشعاع وفق PI ، و الثاني من المفترض أن يكون منطبق على المحور الأصلي وفق OC ؛ نقطة تقاطع هذين الشعاعين يحدد موقع الخيال I . يمكن تطبيق قانون سنل في الانكسار عند نقطة تلاقي الشعاع الوارد مع سطح الكاسر الكروي في النقطة P حيث θ_1 تمثل زاوية الورود و θ_2 تمثل زاوية الانكسار، ومنه نكتب قانون سنل وفق العلاقة التالية:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

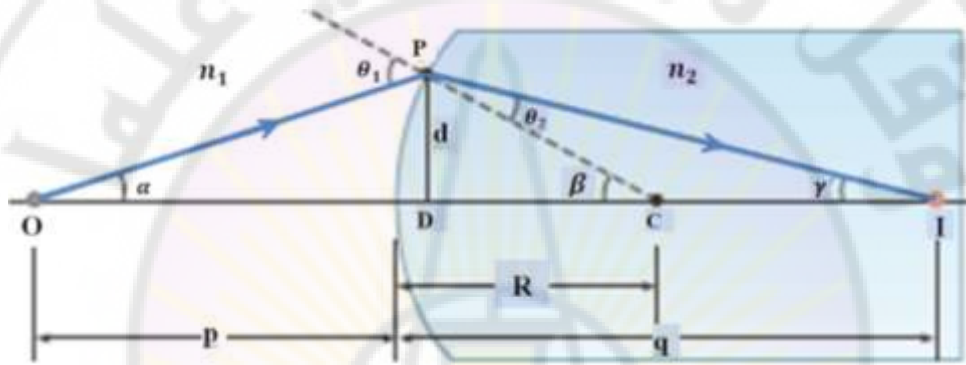
وفي حال كانت قيم θ_1 و θ_2 صغيرة بالتالي يمكن استخدام التقريب $\sin \theta \approx \theta$ (حيث تقدر الزوايا بالراديان) و بالتالي يمكن كتابة العلاقة السابقة بالشكل

$$n_1 \theta_1 = n_2 \theta_2$$

من المثلثين OPC و PIC في الشكل (5.15) يمكننا هندسياً استنتاج مايلي:

$$\theta_1 = \alpha + \beta$$

$$\beta = \theta_2 + \gamma$$



الشكل (5.15): تشكل الخيال بوساطة الكاسر الكروي بفرض أن $n_1 < n_2$.

من العلاقات الثلاثة الأخيرة يمكننا الحصول على العلاقة التالية:

$$n_1 \alpha + n_2 \gamma = (n_2 - n_1) \beta \quad (5.7)$$

نرمز لبعـد الجسم O عن ذروة الكاسر الكروي بـ p، و نرمز لبعـد الخيال عن الذروة بـ q (انظر الشكل (5.15)). من الشكل (5.15) نلاحظ من المثلثات القائمة OPD و PDI و PDC ومن أجل الأشعة المحورية يمكن استخدام تقريب الزوايا الصغيرة كما يلي $\tan \theta \approx \theta$ ومنه باعتبار النقطة D تقريباً منطبقة على ذروة الكاسر يمكن الاستنتاج من المثلثات OPD و PDC و PDI العلاقات التالية:

$$\tan \alpha \approx \alpha \approx \frac{d}{p}, \quad \tan \beta \approx \beta \approx \frac{d}{R}, \quad \tan \gamma \approx \gamma \approx \frac{d}{q}$$

بتعويض هذه العلاقات بالمعادلة (5.7) وبعد اختصارها بتقسيم الطرفين على d نحصل على العلاقة التالية:

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{R} \quad (5.8)$$

تعبر العلاقة (5.8) عن القانون الأول للكاسر الكروي. تطبق العلاقة (5.8) في حالتين الكاسر الكروي المقعر (R موجبة) والكاسر الكروي المحدب (R سالبة) طبعاً بعد الأخذ بالحسبان اصطلاحات الإشارة التي سوف ندرسها بالتفصيل في فقرة لاحقة. ويمكن قراءة العلاقة (5.8) فيزيائياً كما يلي: قرينة انكسار وسط ورود الضوء (الوسط الأمامي للكاسر) مقسومة على بعد الجسم مجموع لها قرينة انكسار الوسط الثاني (الوسط الخلفي للكاسر) مقسومة على بعد الخيال هذا المجموع يساوي الفرق بين قرينة انكسار الوسط الخلفي للكاسر ناقص قرينة انكسار الوسط الأمامي للكاسر هذا الفرق مقسوم على نصف قطر انحناء الكاسر الكروي.

5.2.2 – محرقاً الكاسر الكروي

يمكن تحديد محرق الكاسر الكروي الجسمي والخيالي كما يلي:

1- الحالة الأولى: النقطة المحرقة الجسمية F والبعد المحرق الجسمي f

للكاسر الكروي:

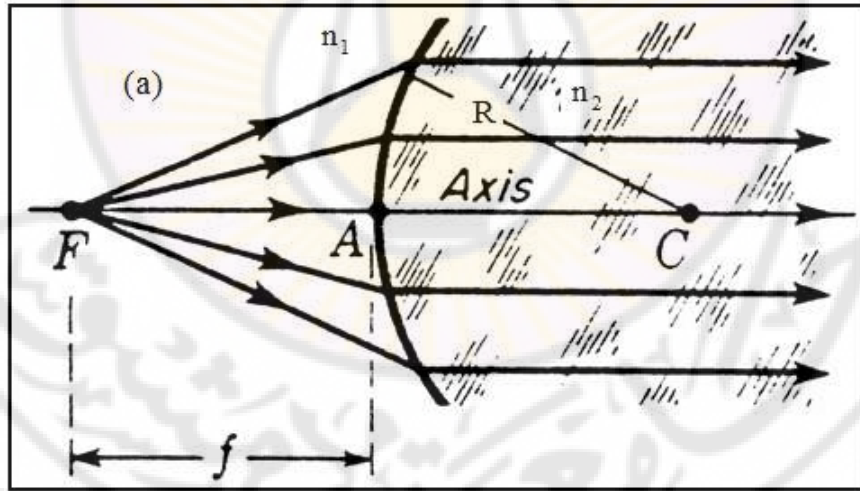
بفرض أن الخيال في اللانهاية $q = \infty$ أي إن الأشعة المنكسرة متوازية فيما بينها وموازية للمحور الأصلي (انظر الشكل 5.15) وبالتالي تصبح المعادلة (5.8) كما يلي:

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{\infty} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

في هذه الحال يكون الجسم في النقطة المحرقة الجسمية F ، ونرمز لبعده عن رأس الكاسر بـ f ويسمى بالبعد المحرقي الجسمي، بالتالي يمكن كتابة العلاقة الأخيرة كما يلي:

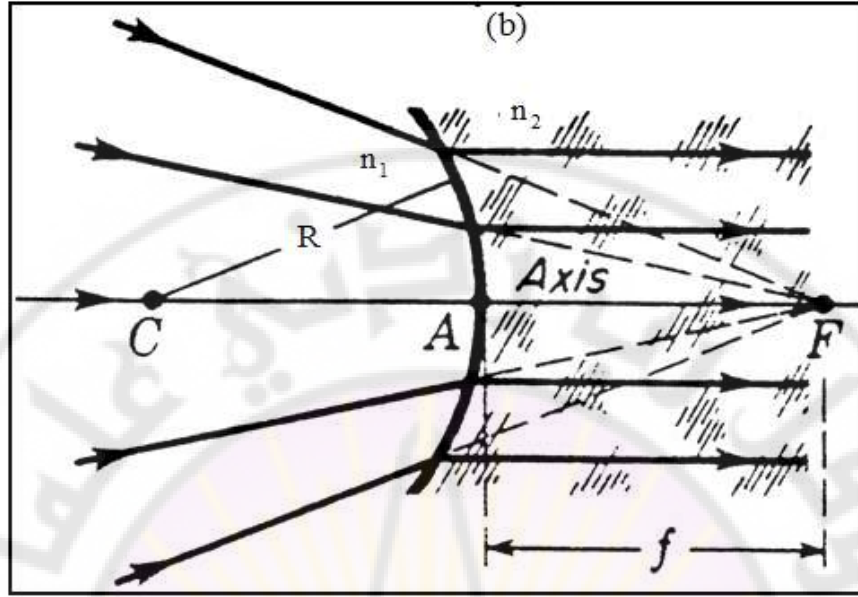
$$\frac{n_1}{f} = \frac{n_1}{p} = \frac{n_2 - n_1}{R} \quad (5.9)$$

النقطة المحرقة الجسمية F والبعد المحرقي الجسمي f لسطح كاسر كروي محدب موضح في الشكل (5.16a)، ولسطح كاسر كروي مقعر موضح في الشكل (5.16b) حيث نصف قطر انحناء الكاسر الكروي R ويفصل بين وسطين شفافين أمامي (وسط ورود الضوء) وخلفي لهما قرائن انكسار n_1 و n_2 على التوالي (حيث $n_1 > n_2$).



الشكل (5.16a): النقطة المحرقة الجسمية F والبعد المحرقي الجسمي f الموافق لسطح كاسر كروي محدب يفصل بين وسطين لهما قرائن انكسار n_1 و

n_2 .



الشكل (5.16b): النقطة المحرقة الجسمية F و البعد المحرقي الجسمي f الموافقة لسطح كاسر كروي مقعر الذي يفصل بين وسطين لهما قرانن انكسار n_2 و n_1 .

2- الحالة الثانية: النقطة المحرقة الخيالية F' والبعد المحرقي الخيالي f' للكاسر الكروي:

بفرض أن الجسم يقع في اللانهاية أي $p = \infty$ ، بالتالي تكون الأشعة الواردة للكاسر الكروي متوازية فيما بينها وموازية للمحور الأصلي كما في الشكل (5.17c). ومنه تصبح معادلة الكاسر الكروي (العلاقة (5.8)) كما يلي:

$$\frac{n_1}{\infty} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

في هذه الحالة نقول إنَّ الخيال يقع في النقطة المحرقة الخيالية F' ، وتمثل f' ، بالتالي البعد المحرقي الخيالي وهي المسافة بين رأس الكاسر الكروي والنقطة المحرقة الخيالية. ومنه نستطيع كتابة العلاقة الأخيرة بالشكل التالي:

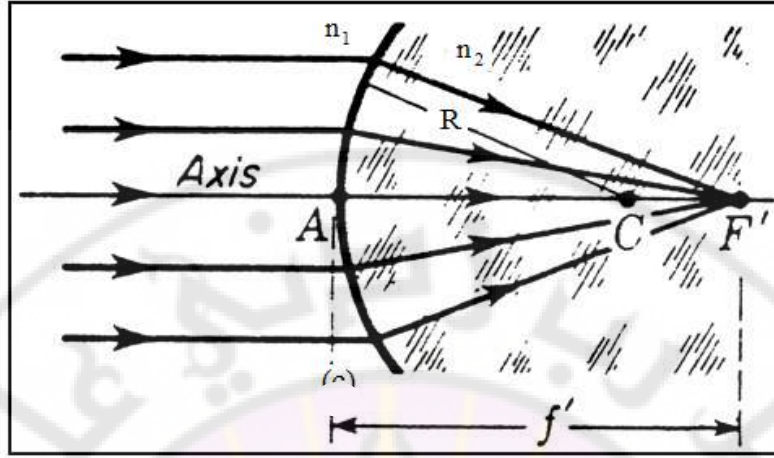
$$\frac{n_2}{f'} = \frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{R} \quad (5.10)$$

نستنتج من المعادلتين (5.9) و (5.10) أنه إذا كانت $n_1 > n_2$ فإن f من f' سالبان. وإذا كانت $n_1 < n_2$ فإن f من f' موجبان. ومنه يمكن الاستنتاج من المعادلتين (5.9) و (5.10) العلاقة التالية:

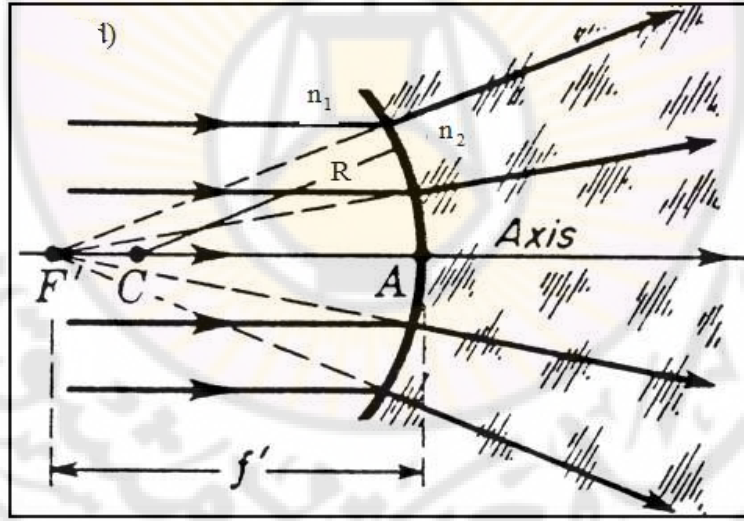
$$\frac{f'}{f} = \frac{n_2}{n_1} \quad (5.11)$$

نستنتج من هذه العلاقة أن f من f' من إشارة واحدة أي إنهما يقعان دائماً على جانبي الكاسر الكروي أو بعبارة أخرى نستطيع القول إنَّ f من f' إما كلاهما حقيقي أو كلاهما وهمي وهذا موضح بالتفصيل لاحقاً في فقرة اصطلاحات الإشارة.

الشكل (5.17a) والشكل (5.17b) يوضح كيفية تحديد النقطة المحرقة الخيالية F' والبعد المحرقي الخيالي f' الموافقة لسطح كاسر كروي محدب ومقعر على التوالي.



الشكل (5.17a): النقطة المحرقة الخيالية F' والبعد المحرقي الخيالي f'
الموافقة لسطح كاسر كروي محدب يفصل بين وسطين لهما قرانن انكسار n_1 و n_2 .

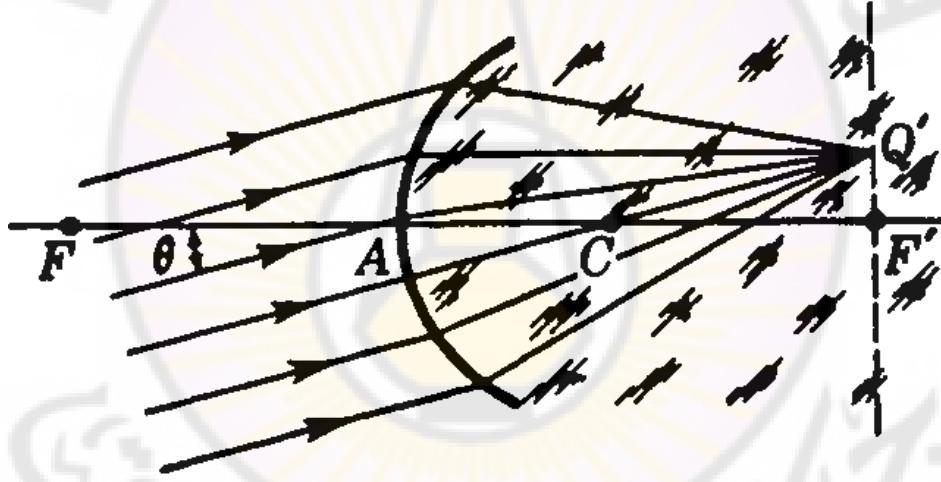


الشكل (5.17b): النقطة المحرقة الخيالية F' والبعد المحرقي الخيالي f'
الموافقة لسطح كاسر كروي مقعر يفصل بين وسطين لهما قرانن انكسار n_1 و n_2 .

5.2.3 – المستوي المحرقى الجسمى والمستوى المحرقى

الخيالى للكاسر الكروى:

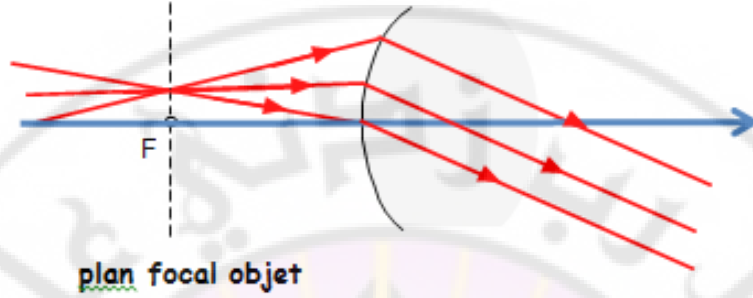
1- يعرف المستوى المحرقى الخيالى للكاسر الكروى بأنه المستوى العمودى على المحور الأصيلى والمار من النقطة المحرقية الخيالية F' كما هو موضح فى الشكل (5.18). نلاحظ من هذا الشكل أن الأشعة المتوازية فيما بينها وغير الموازية للمحور الأصيلى تتمحرق بعد الانكسار فى نقطة Q' مثلاً والتي تقع فى المستوى المحرقى الخيالى.



الشكل (5.18): المستوى المحرقى الخيالى للكاسر الكروى.

2- بالطريقة السابقة نفسها يمكننا تعريف المستوى المحرقى الجسمى للكاسر الكروى (الشكل (5.19)) بأنه المستوى العمودى على المحور الأصيلى والمار من النقطة المحرقية الجسمية F بالتالى فإن كل الأشعة الصادرة

من نقطة ما من هذا المستوي والتي ترد على السطح الكاسر الكروي
تنكسر بشكل متوازٍ فيما بينها.



الشكل (5.19): المستوي المحرقى الجسمي للكاسر الكروي.

5.2.4 – السطوح الكاسرة المستوية كحالة خاصة للكاسر الكروي

عندما يكون نصف قطر انحناء الكاسر الكروي $R = \infty$ فهذا هندسياً يكافئ كاسراً مستوياً وبتعويض $R = \infty$ في معادلة الكسر الكروي (5.8) نحصل على العلاقة التالية من أجل الكاسر المستوي:

$$\frac{n_1}{p} = -\frac{n_2}{q}$$

ومنه

$$q = -\frac{n_2}{n_1}p \quad (5.12)$$

وهذه العلاقة مشابهة لعلاقة الكاسر المستوي التي قمنا باستنتاجها في الفصل السابق باستثناء وجود إشارة الناقص والتي تدل على أن الخيال في الكاسر المستوي يخالف الجسم في طبيعته فهو وهمي إذا كان الجسم حقيقياً وهو حقيقي إذا

كان الجسم وهمياً وهذا ما يتوافق مع اصطلاحات الإشارة التي سوف نعرضها لاحقاً.

5.2.5 – التكبير الخطي العرضاني للكاسر الكروي

التكبير الخطي العرضاني هو بالتعريف نسبة طول الخيال h' إلى طول الجسم h . يمكن استخراج معادلة التكبير العرضاني للكاسر الكروي بمساعدة الشكل (5.20) وباستخدام قانون سنل في الانكسار كما يلي: نلاحظ من الشكل (5.20) أن المثلثين MQC و $M'Q'C$ متشابهان ومنه نستطيع أن نكتب

$$\frac{M'Q'}{MQ} = \frac{CM'}{CM}$$

ويمكن كتابة العلاقة الأخيرة بمساعدة الشكل (5.20) أيضاً بالشكل التالي:

$$-\frac{h'}{h} = \frac{q - R}{p + R}$$

علماً أن $M'Q' = -h'$ و $MQ = h$ ، ومنه نستطيع كتابة علاقة التكبير الخطي العرضاني بالعلاقة:

$$m_t = \frac{h'}{h} = -\frac{q - R}{p + R} \quad (5.13)$$

وعند تطبيق قانون سنل عند النقطة A الواقعة على سطح الكاسر الكروي وذلك في حالة الأشعة المحورية يمكننا كتابة:

$$n_1 \sin \phi = n_2 \sin \phi'$$

حيث إن ϕ زاوية الورود و ϕ' زاوية الانكسار، وفي حالة الأشعة المحورية ($\sin \phi \approx \tan \phi \approx \phi$) تصبح هذه العلاقة بالشكل:

$$n_1 \tan \phi = n_2 \tan \phi'$$

ولكن من الشكل (5.20) نلاحظ أن:

$$\tan \phi = \frac{h}{p}, \quad \tan \phi' = \frac{-h'}{q}$$

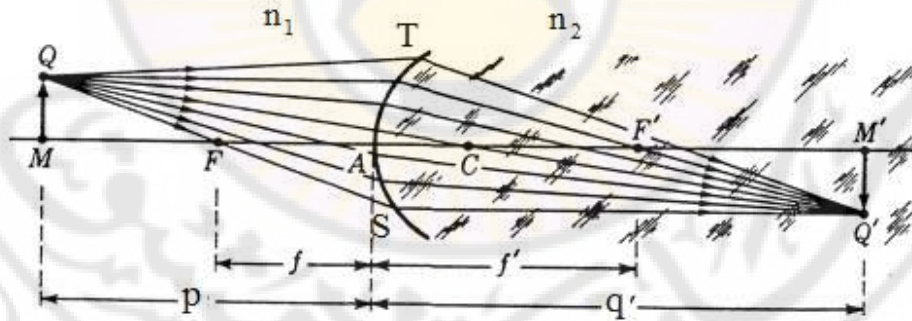
وبالتالي يصبح قانون سنل كما يلي:

$$n_1 \frac{h}{p} = -n_2 \frac{h'}{q}$$

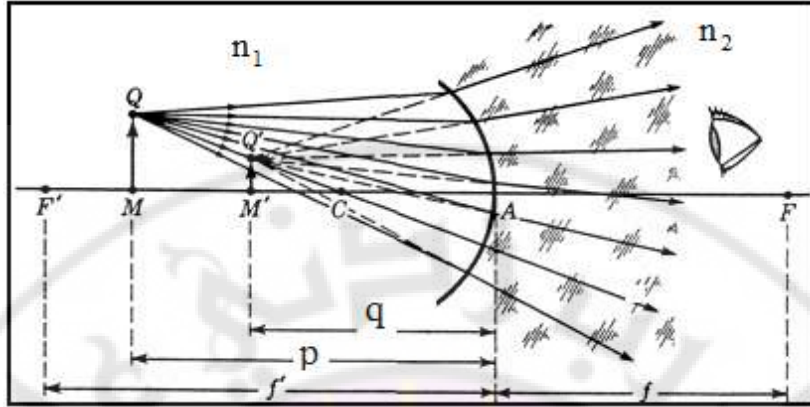
بإعادة كتابة هذه العلاقة يمكن استنتاج العلاقة النهائية للتكبير الخطي العرضي للكاسر الكروي:

$$m_t = \frac{h'}{h} = -\frac{n_1 q}{n_2 p} \quad (5.14)$$

تطبق هذه العلاقة للكاسر الكروي المحدب والمقعّر (الشكل (5.21)) بعد الأخذ بالحسبان اصطلاحات الإشارة للكاسر الكروي المحدب أو المقعّر التي سوف نشرحها في فقرة لاحقة.



الشكل (5.20): كل الأشعة المغادرة نقطة الجسم Q والتي تبرز من خلال السطح الكاسر، تنكسر لتتمحرك في نقطة الخيال Q'.



الشكل (5.21): كل الأشعة المغادرة نقطة الجسم Q والتي تمر من خلال السطح الكاسر، تظهر وكأنها قادمة من نقطة الخيال الوهمي Q' .

5.2.6 – التكبير الخطي الطولاني للكاسر الكروي

التكبير الخطي الطولاني m_l هو نسبة انزياح الجسم وفق المحور الأصلي (dp) على نسبة انزياح الخيال الموافق لانزياح الجسم وفق المحور الأصلي (dq) أي dq/dp . إذ يمكننا باشتقاق العلاقة (5.8) الحصول على العلاقة التالية:

$$-\frac{n_1 dp}{p^2} - \frac{n_2 dq}{q^2} = 0$$

وبإعادة كتابة هذه العلاقة نحصل على العلاقة التالية:

$$m_l = \frac{dq}{dp} = -\frac{n_1}{n_2} \left(\frac{q}{p}\right)^2$$

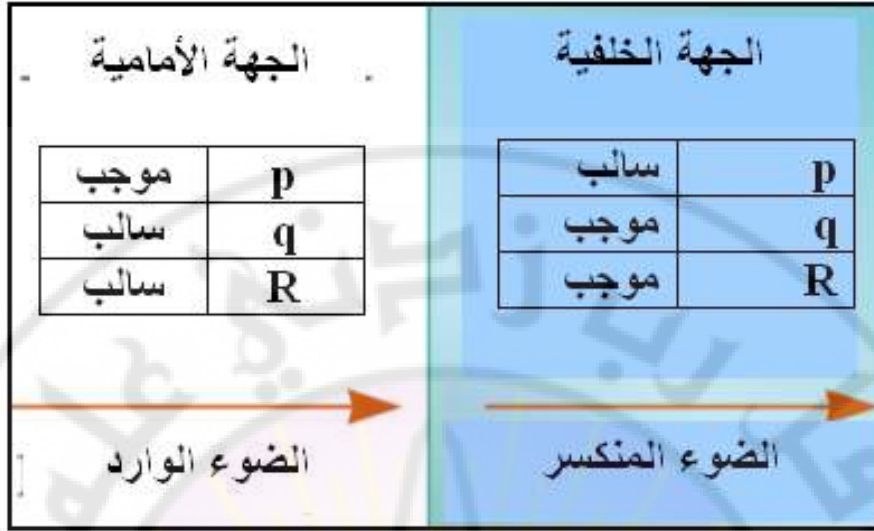
وباستخدام المعادلة (5.14) يمكننا كتابة علاقة التكبير الخطي الطولاني للكاسر الكروي بالشكل التالي:

$$m_l = -\frac{n_2}{n_1} \left(\frac{n_1 q}{n_2 p} \right)^2 = -\frac{n_2}{n_1} m_t^2 \quad (5.15)$$

من هذه العلاقة نستنتج أن التكبير الخطي الطولاني m_l سالب دوماً، أي إن الجسم و خياله ينتقلان دوماً في الاتجاه نفسه، فإذا اقترب الجسم من الكاسر الكروي فإنَّ الخيال يبتعد منه والعكس صحيح إذا ابتعد الجسم عن الكاسر الكروي اقترب الخيال منه، وإذا اقترب ابتعد الخيال ولا يلتقيان إلا في المركز C أو عند رأس الكاسر A.

5.2.7 – اصطلاحات الإشارة للكاسر الكروي

تطبق قوانين الكاسر الكروي (العلاقة (5.8) والعلاقة (5.14) والعلاقة (5.15)) من أجل الكاسر الكروي المحدب والكاسر الكروي المقعر بشرط الأخذ بالحسبان اصطلاحات الإشارة التي سنوضحها فيما يلي. نعرف الجهة الأمامية للكاسر الكروي بأنها جهة ورود الضوء على سطح الكاسر (أي جهة وجود الجسم) والجهة الأخرى تكون الجهة الخلفية كما في الشكل (5.22) الذي يلخص إشارة كل من بعد الجسم وبعد الخيال ونصف قطر انحناء الكاسر الكروي.



الشكل (5.22): اصطلاحات الإشارة للسطوح الكاسرة أما طول الخيال h' فهو موجب إذا كان صحيحاً وسالب إذا كان مقلوباً.

يمكن تلخيص اصطلاحات الإشارة للسطوح الكاسرة كما يلي: نلاحظ من الشكل (5.22) أن بعد الجسم p موجب إذا وقع الجسم أمام الكاسر وسالب إذا وقع خلف الكاسر، أما بعد كل من الخيال q و نصف القطر R يكونا من إشارة موجبة إذا وقعا خلف الكاسر ومن إشارة سالبة إذا وقعا أمام الكاسر. ونقول عن جسم إنه حقيقي إذا كان بعده p موجباً ويكون جسماً وهمياً إذا كان بعده p سالباً وكذلك نقول عن خيال إنه حقيقي إذا كان بعده q موجباً ويكون خيالياً وهمياً إذا كان بعده q سالباً. أما التكبير الخطي العرضاني أو طول الخيال h' فيصف ايأ منها فيما إذا الخيال صحيحاً أو مقلوباً، فإذا كان m_t أو h' موجب فالخيال صحيح وإذا كان m_t أو h' سالباً فالخيال مقلوب. أما القيمة المطلقة للتكبير الخطي العرضاني $m_t = \frac{h'}{h}$ تشير إلى مايلي: إذا كانت $|m_t| > 1$ فإن طول الخيال أكبر من طول

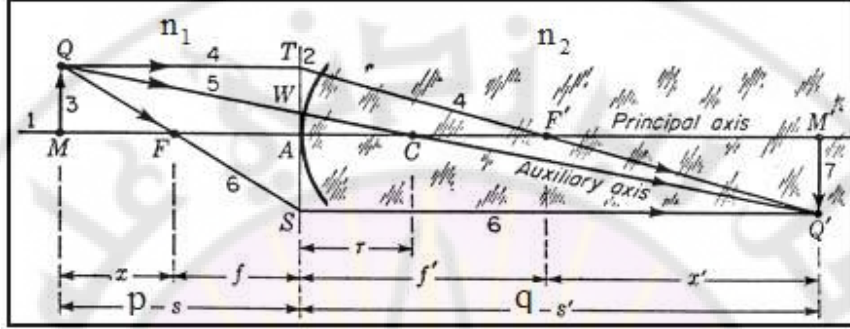
الجسم ($h' > h$). وإذا كانت $|m_t| < 1$ فإن طول الخيال أصغر من طول الجسم ($h' < h$). وإذا كانت $|m_t| = 1$ فإن طول الخيال يساوي طول الجسم ($h' = h$).

نترك للطلاب مقارنة اصطلاحات الإشارة للكاسر الكروي مع اصطلاحات الإشارة للمرايا الكروية، وكذلك مقارنة اصطلاحات الإشارة للكاسر المستوي مع اصطلاحات الإشارة للمرآة المستوية مع كتابة الاستنتاجات.

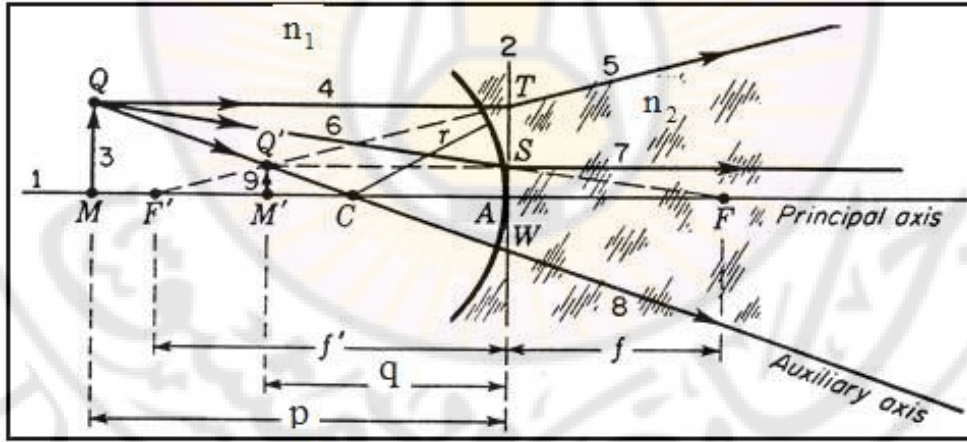
5.2.8 - تحديد الخيال بالرسم الهندسي

الشكل (5.23) والشكل (5.24) يوضحان كيفية تحديد موقع الخيال وطبيعته لجسم MQ الذي له أبعاد (غير نقطي) وذلك لكاسرين كرويين محدب ومقعر على التوالي، حيث افترضنا أن $n_2 > n_1$. نلاحظ من الشكل (5.23) في حالة كاسر كروي محدب أننا رسمنا ثلاثة أشعة لتحديد موقع الخيال؛ الشعاع الأول يرد ماراً من مركز انحناء الكاسر C ونلاحظ أنه لا ينكسر. الشعاع الثاني يرد ماراً من النقطة المحرقة الجسمية للكاسر الكروي ونلاحظ أنه ينكسر موازياً للمحور الأصلي للكاسر الكروي. أما الشعاع الثالث فهو يرد موازياً للمحور الأصلي للكاسر الكروي ونلاحظ أنه ينكسر ماراً من النقطة المحرقة الخيالية. من نقطة تقاطع الأشعة المنكسرة نحدد موقع الخيال وطبيعته. نلاحظ أن الخيال $M'Q'$ حقيقي ومقلوب. ونلاحظ من الشكل (5.24) في حالة الكاسر المقعر أننا رسمنا أيضاً ثلاثة أشعة لتحديد طبيعة الخيال وموقعه. الشعاع الأول يرد ماراً من مركز انحناء الكاسر C ونلاحظ أنه لا ينكسر. الشعاع الثاني يرد ممدده ويمر من النقطة المحرقة الجسمية للكاسر الكروي ونلاحظ أنه ينكسر موازياً للمحور

الأصلي للكاسر الكروي. أما الشعاع الثالث فهو يرد موازياً للمحور الأصلي للكاسر الكروي ونلاحظ أنه ينكسر وممدده يمر من النقطة المحرقة الخيالية. نؤكد بالرسم الهندسي ضرورة رسم الأشعة المحورية فقط.



الشكل (5.23): طريقة الشعاع الموازي لتحديد الخيال المتشكل بوساطة سطح كاسر كروي محدب وحيد هندسياً.



الشكل (5.24): طريقة الشعاع الموازي لتحديد الخيال المتشكل بوساطة سطح كاسر كروي مقعر وحيد هندسياً.

مسائل

أولاً: مسائل المرايا الكروية:

5.1- مرآة كروية مقعرة بعدها المحرقي مجهول. وضع جسم مضيء في نقطة ما Q_1 من محورها الأصلي فكانت له خيلاً وهمياً أكبر منه ثلاثين مرة، وحين يُزاح الجسم بعيداً عن المرآة بمقدار 10 cm إلى النقطة Q_2 ، يتكون له خيال حقيقي على بعد 16 m من المرآة. احسب البعد المحرقي للمرآة، وعيّن موضع محرقيها F بين Q_1 و Q_2 .

5.2- مرأتان مقعرتان محوراهما الأصليان منطبقان على بعضهما، و وجهاهما العاكسان متقابلان والبعد بين رأسيهما، أربعة أمتار. في أي نقطة من محوره الأصلي ينبغي وضع جسم حتى يكون طول خياليهما الحقيقيين المتشكّلين بالمرأتين متساويين، علماً أن نصف قطر انحناء إحدى المرأتين 1 m، ونصف قطر انحناء الآخر 2 m.

5.3- يبلغ البعد المحرقي لمرآة كروية مقعرة 25 cm. بين أن هنالك وضعين لجسم يكون معهما البعد الفاصل بين الجسم وخیاله في المرآة المقعرة مساوياً 2 m، ثم عين هذين الوضعين.

5.4- مرآة كروية محدبة ببعد محرقي مساو إلى $f = -10$ cm. المطلوب حدد موقع الخيال وطبيعته لجسم بعده، يعطى كما يلي: (أ) - 25 cm. (ب) - 10 cm. (ج) - 5 cm. ثم احسب التكبير الخطي العرضاني في كل حالة. إذا كان طول الجسم $h = 5$ mm، أوجد طول الخيال h' في كل حالة من الحالات السابقة.

5.5- مرآة كروية محدبة نصف قطرها متر واحد وجسم طوله 8 cm عمودي على محورها الأصلي وموجود على مسافة 75 cm منها. عيّن مكان الخيال وطبيعته وطوله في الحالتين:

أ- الجسم حقيقي.

ب- الجسم وهمي.

5.6- يوضع جسم أمام مرآة مقعرة نصف قطرها R وعلى بعد 1.5R من ذروة المرأة، فإذا كان طول الجسم 5mm والمطلوب:

أ- عيّن مكان الخيال بالرسم الهندسي.

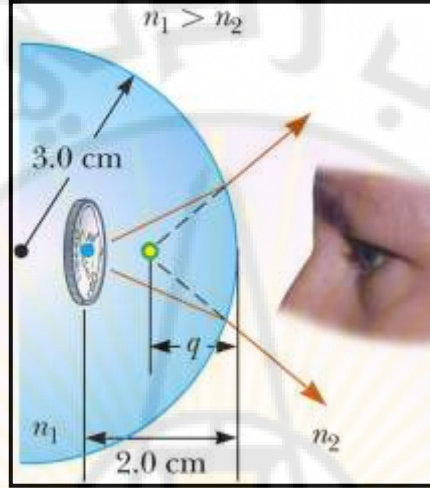
ب- أوجد بعد هذا الخيال.

ج- احسب طول هذا الخيال.

ثانياً: مسائل الكاسر الكروي:

5.7- يُقطع قضيب زجاجي شفاف طوله 40 cm، فتُجعل إحدى نهايتيه مستوية، وتُجعل النهاية الأخرى على شكل نصف كرة ذات نصف قطر يساوي 12 cm. يُوضع جسم على محور القضيب الزجاجي وعلى بعد 10 cm من النهاية نصف الكروية. (أ)- ما هو موضع الخيال الأخير؟ (ب)- ما هو تكبيره. افرض أن قرينة الانكسار تساوي 1.5.

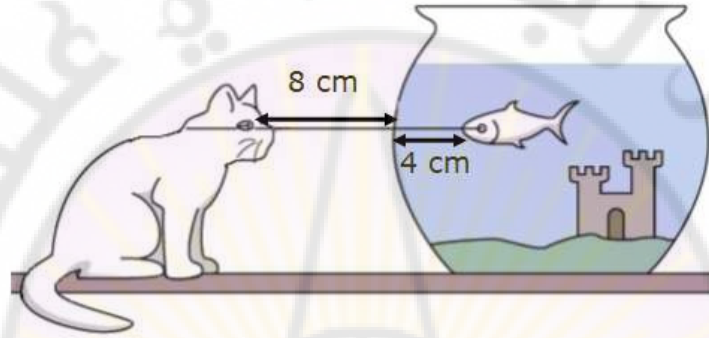
5.8- غمست قطعة نقود في كرة بلاستيك كما في الشكل التالي. إذا علمت أن قرينة انكسار مادة البلاستيك $n_1 = 1.5$ ، و أن قطعة النقود وضعت على مسافة 2 cm من حافة الكرة، و أن نصف قطر الكرة 3 cm وقرينة انكسار الهواء المحيط بها $n_2 = 1$. أوجد بعد خيال قطعة النقود.



5.9- قضيب زجاجي قرينة انكساره $n=1.5$ إحدى نهايته محدبة بنصف قطر انحناء 6 cm. وضع جسم في الهواء على المحور الأصلي للقضيب وبجهة النهاية المحدبة للقضيب. أوجد مواقع الخيال الموافقة لأبعاد الجسم التالية: (أ)- 20 cm (ب)- 10 cm (ج)- 3 cm من نهاية القضيب.

5.10- قضيب زجاجي طوله 2 cm و قرينة انكساره 1.5. صُقلت نهايته على شكل كاسر كروي محدب نصف قطر انحنائه 2 cm. وضع جسم طوله 2 mm عمودياً على محور القضيب وعلى بعد 5 cm من إحدى نهايتيه والمطلوب: (أ)- أوجد بعد الخيال النهائي وطبيعته. (ب)- طول هذا الخيال.

5.11- سمكة بداخل وعاء جداره الجانبي جزء من كرة نصف قطرها 10 cm كما في الشكل التالي، علماً بأن الأرقام على هذا الشكل تشير إلى الأبعاد الحقيقية. قطة تنظر من الخارج إلى هذه السمكة، المطلوب أوجد البعد الظاهري للسمكة كما تراه القطة، ومن ثم أوجد البعد الظاهري للقطعة كما تراها السمكة علماً بأن قرينة انكسار الماء 1.33.



الفصل السادس: قوانين العدسات الرقيقة ودراسة تشكل الأحيلة فيها

6.1 – أنواع العدسات الرقيقة

6.2 – قوانين العدسات الرقيقة

6.2.1 – الحالة الأولى: نفرض أن العدسة ثخينة وبالتالي ثخن العدسة t غير مهم

6.2.2 – الحالة الثانية: نفرض أن العدسة رقيقة وبالتالي ثخن العدسة t يكون مهم

6.3 – البعد المحرقي لعدسة رقيقة

6.4 – المستوي المحرقي للعدسة الرقيقة:

6.5 – اصطلاحات الإشارة عند تطبيق قوانين العدسات

6.6 – استطاعة العدسة

6.7 – تحديد طبيعة الخيال بالرسم الهندسي في العدسات الرقيقة

6.8 - جمع العدسات الرقيقة



الفصل السادس: قوانين العدسات الرقيقة ودراسة تشكل الأخيلة فيها

تعرف العدسة الرقيقة بأنها عبارة عن كاسرين كرويين محوراها الأصليان متطابقان والبعد بين ذروتيهما صغير جداً بالنسبة لنصفي قطري انحنايهما R_1 و R_2 ، بالتالي يمكن أن يعدّا منطبقين عند المركز الهندسي (البصري) للعدسة. هناك حالات أخرى تكون العدسة الرقيقة عبارة عن كاسر كروي وكاسر مستوي. في هذا الفصل سوف ندرس قوانين العدسة بحالتين، الحالة الأولى المسافة بين الكاسرين كبيرة بحيث تُعدُّ العدسة ثخينة والحالة الثانية المسافة بين الكاسرين صغيرة بحيث يمكن إهمالها. تستخدم العدسات التي تشكل أخيلة بالانكسار بشكل شائع في الأجهزة البصرية، مثل الكاميرا، التلسكوب (النظارة الفلكية) والمجهر الخ.

6.1 – أنواع العدسات الرقيقة

يبين الشكل (6.1) والشكل (6.2) أشكال مختلفة للعدسات الرقيقة. يطلق أسماء لهذه العدسات وفقاً لتقعر أو تحدب وجوها كما هو موضح بالشكل (6.1) والشكل (6.2). الشكل (6.1) يعرض بعض العدسات المقربة الرقيقة وهي عدسة مستوية محدبة، عدسة محدبة مقعرة وعدسة محدبة الوجهين. والشكل (6.2) يعرض بعض العدسات المبعدة وهي عدسة مستوية مقعرة، عدسة مقعرة محدبة، وعدسة مقعرة الوجهين. تصنع العدسات عادةً من الزجاج الضوئي المتجانس أقصى التجانس والخالي من الشوائب قدر الإمكان، وفي بعض الأحيان تستعمل مواد شفافة أخرى كالكوارتز والفلوريت والملح الصخري والمواد اللدنة.

سوف ندرس في الفقرات اللاحقة قوانين العدسات الرقيقة وطريقة تحديد طبيعة خيالها بالرسم الهندسي.



الشكل (6.1): عدسات مقربة بأشكال مختلفة ولها بعد محرق موجب والthickness منها تقع في الوسط.



الشكل (6.2): عدسات مبعدة بأشكال مختلفة ولها بعد محرق سالب والthickness منها تقع على الأطراف.

6.2 – قوانين العدسات الرقيقة

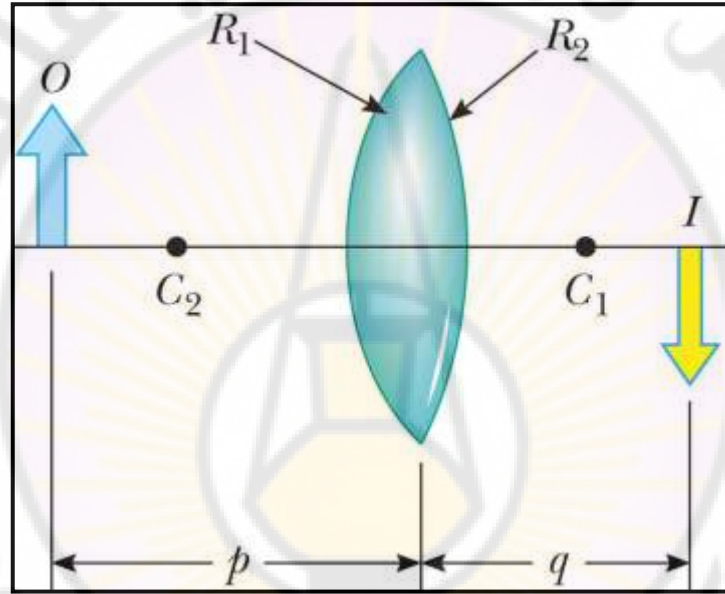
سوف نستخدم قوانين الكاسر الكروي في تحديد موقع الخيال المتشكل بواسطة العدسة. فالعدسة بشكل عام هي عبارة عن كاسرين كرويين تفصل بينهما مسافة t ، بالتالي الضوء المار من خلال العدسة يعاني من انكسارين عند كل سطح كروي للعدسة وبتطبيق قانون الكاسر الكروي عند كل سطح للعدسة، يمكننا إيجاد الخيال النهائي لجملة الكاسرين. في البداية نطبق قانون الكاسر الكروي عند السطح الأول للعدسة بإهمال وجود السطح الثاني ونوجد خيال الكاسر الأول، ومن ثم نطبق قانون الكاسر الأول مرة أخرى على الوجه الثاني للعدسة ونعدّ خيال الكاسر الأول هو بمثابة جسم بالنسبة للكاسر الثاني. هنا نؤكد عند تطبيق قانون الكاسر الكروي عند السطحين يجب الأخذ بالحسبان اصطلاحات الإشارة للكاسر الكروي عند كل سطح. وهنا يجب التمييز بين حالتين: الحالة الأولى المسافة بين الكاسرين الكرويين t (ثخن العدسة) ليس صغيراً بالنسبة لنصفي قطري انحنائهما R_1 و R_2 فإننا ندعو جملة الكاسرين بالعدسة الثخينة. أما إذا كان ثخن العدسة t صغيراً بالنسبة إلى R_1 و R_2 فتسمى الجملة حينئذ بالعدسة الرقيقة، وبالتالي تهمل قيمة t ونعدّ العدسة الرقيقة عندها كجملة مستقلة لها قوانينها الخاصة.

6.2.1 – الحالة الأولى: نفرض أن العدسة ثخينة وبالتالي ثخن

العدسة t غير مهملة

بفرض أنه لدينا عدسة محدبة الوجهين ثخانتها t غير مهملة وقرينة انكسارها n وأنصاف أقطار انحناء كل من وجهيها الكرويين R_1 و R_2 على التوالي، حيث إن R_1 هو نصف قطر الانحناء لسطح العدسة الأول الذي يرد إليه الضوء من الجسم

و R_2 هو نصف قطر الانحناء للسطح الآخر للعدسة. الشكل (6.3) يعرض تمثيلاً هندسياً بسيطاً للعدسة الرقيقة ويبرز فيه مركز انحناء السطح الأول R_1 ومركز انحناء السطح الثاني للعدسة R_2 وبعد الجسم p وبعد الخيال q ، علماً بأن قرينة انكسار الوسط الأمامي للعدسة (الوسط الذي يقع فيه الجسم O) هي n_1 وقرينة انكسار الوسط الخلفي للعدسة (الوسط الذي يقع فيه الخيال I) هي n_2 .



الشكل (6.3): شكل هندسي بسيط للعدسة الرقيقة يبرز مركز انحناء السطح الأول والثاني للعدسة وبعد الجسم وبعد الخيال علماً بأن قرينة انكسار الوسط الأمامي للعدسة (الوسط الذي يقع فيه الجسم O) هي n_1 وقرينة انكسار الوسط الخلفي للعدسة (الوسط الذي يقع فيه الخيال I) هي n_2 .

بفرض أن الجسم غير نقطي (أي ذو أبعاد ونمثلة بسهم للأعلى) ويقع على مسافة p_1 من السطح الأول (الكاسر الكروي الأول)، بالتالي سيتشكل لهذا الجسم خيال

عبر السطح الأول للعدسة يمكن تحديد موقعه باستخدام معادلة الكاسر الكروي نجد:

$$\frac{n_1}{p_1} + \frac{n}{q_1} = \frac{n - n_1}{R_1} \quad (6.1)$$

حيث q_1 هو بعد الخيال الناتج عن ذروة السطح الأول للعدسة. إذا كانت q_1 سالبة كان خيال الجسم الناتج عن السطح الأول وهمياً، أما إذا كانت q_1 موجبة كان الخيال حقيقياً. وكما ذكرنا سابقاً إن هذا الخيال هو جسم بالنسبة لسطح العدسة الثاني (الكاسر الكروي الثاني)، بالتالي سطح العدسة الثاني سوف يشكل خيلاً لهذا الجسم، يمكن تحديد موقعه باستخدام معادلة الكاسر الكروي. فعند تطبيق هذه المعادلة عند سطح العدسة الثاني سوف نعدُّ p_2 (حيث $p_2 = -q_1 + t$) بعد الجسم عن ذروة هذا السطح و q_2 بعد الخيال عن ذروة هذا السطح، ومنه بتطبيق معادلة الكاسر الكروي نجد العلاقة التي تربط بين بعد الجسم وبعد الخيال:

$$\frac{n}{p_2} + \frac{n_2}{q_2} = \frac{n_2 - n}{R_2} \quad (6.2)$$

عند تطبيق المعادلة (6.2) يجب الأخذ بالحسبان إشارة بعد الجسم p_2 فإذا كان خيال الكاسر الأول يقع خلف الكاسر الثاني فإن بعد الجسم p_2 يكون سالباً وإذا كان خيال الكاسر الأول يقع أمام الكاسر الثاني فإن بعد الجسم p_2 يكون موجباً.

التكبير الخطي العرضاني لعدسة (t غير مهمل)

في هذه الحالة نعدُّ أن العدسة مكونة من كاسرين كرويين، بالتالي يجب إيجاد التكبير الخطي العرضاني لكل كاسر. فيكون التكبير الخطي العرضاني للكاسر الأول m_{t1} والتكبير الخطي العرضاني للوجه الثاني m_{t2} ومنه يكون التكبير الخطي العرضاني الكلي للعدسة

$$m_t = m_{t1} \times m_{t2}$$

يمكن كتابة التكبير الخطي العرضاني للكاسر الأول m_{t1} والتكبير الخطي العرضاني للوجه الثاني m_{t2} كما يلي:

$$m_{t1} = -\frac{n_1 q_1}{n p_1}, \quad m_{t2} = -\frac{n q_2}{n_2 p_2}$$

حيث إن n تمثل قرينة انكسار مادة العدسة و n_1 و n_2 هما قرينة انكسار الوسط الأمامي للعدسة والوسط الخلفي للعدسة على التوالي. ومنه نجد أن التكبير الخطي العرضاني لجملة الكاسرين (العدسة الثخينة) يساوي:

$$m_t = m_{t1} \times m_{t2} = \frac{n_1 q_1 q_2}{n_2 p_1 p_2} \quad (6.3)$$

حيث إن $p_2 = -q_1 + t$

6.2.2 – الحالة الثانية: نفرض أن العدسة رقيقة بالتالي ثخن

العدسة t يكون مهمل

بفرض أنه لدينا عدسة محدبة الوجهين ثخانتها t مهملة (العدسات التي ثخانتها صغيرة مقارنة مع أنصاف أقطار الانحناء) وقرينة انكسارها n وأنصاف أقطار انحناء كل من وجهيها الكرويين R_1 و R_2 على التوالي، حيث إن R_1 هو نصف قطر الانحناء لسطح العدسة الأول الذي يرد إليه الضوء من الجسم و R_2 هو نصف قطر الانحناء لسطح العدسة الآخر للعدسة. وبالتالي سيكون بعد الجسم عن السطح الثاني للعدسة مساوياً لـ $p_2 = -q_1$ سواء أكان الخيال المتشكل من السطح الأول حقيقياً أم وهمياً. بالنتيجة تصبح المعادلة (6.2):

$$-\frac{n}{q_1} + \frac{n_2}{q_2} = \frac{n_2 - n}{R_2} \quad (6.4)$$

بجمع المعادلتين (6.1) و (6.4) نحصل على المعادلة العامة للعدسة الرقيقة عندما تكون محاطة بوسطين مختلفين:

$$\frac{n_1}{p_1} + \frac{n_2}{q_2} = \frac{n - n_1}{R_1} + \frac{n_2 - n}{R_2} \quad (6.5)$$

تطبق هذه العلاقة عندما يكون الوسطان المحيطان بالعدسة الرقيقة مختلفين في القرينة. أما عندما يكون الوسط المحيط بالعدسة الهواء أي $n_1 = n_2 = 1$ تصبح المعادلة:

$$\frac{1}{p_1} + \frac{1}{q_2} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (6.6)$$

بغرض التبسيط من أجل العدسة الرقيقة، سوف ندعو بعد الجسم عن العدسة p بدلاً من p_1 ، و بعد الخيال عن العدسة q بدلاً من q_2 كما في الشكل (6.3). بالتالي تصبح المعادلة (6.5) كما يلي:

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n - n_1}{R_1} + \frac{n_2 - n}{R_2} \quad (6.7)$$

وتصبح المعادلة (6.6) كما يلي:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (6.8)$$

نلاحظ أن كلتا المعادلتين (6.7) أو (6.8) تربط بين كل من بعد الخيال q المتشكل بواسطة العدسة الرقيقة وبعد الجسم p و خواص العدسة (قرينة الانكسار وأنصاف أقطار الانحناء) وقرائن انكسار الوسط المحيط بالعدسة. يمكن تطبيق هاتين المعادلتين فقط عندما تكون الأشعة محورية وعندما تكون ثخانة العدسة هي أصغر

بكثير من R_1 و R_2 . ملاحظة أخيرة عند قياس كل من p و q ، فإنهما يقاسان بدءاً من مركز العدسة كما هو موضح في الشكل (6.3).

التكبير الخطي العرضاني لعدسة رقيقة (t مهمل)

إذا كانت العدسة رقيقة (t مهملة) عندها يجب التعويض بالمعادلة (6.3) $p_2 = -q_1$ فتصبح هذه المعادلة كالتالي:

$$m_t = m_{t1} \times m_{t2} = -\frac{n_1 q_2}{n_2 p_1} \quad (6.9)$$

وإذا كانت العدسة الرقيقة محاطة بوسطين متماثلين $n_1 = n_2$ فإن العلاقة (6.9) تصبح كما يلي:

$$m_t = m_{t1} \times m_{t2} = -\frac{q}{p} \quad (6.10)$$

حيث بعد الجسم عن جملة الكاسرين $p = p_1$ ، و أن بعد الخيال النهائي عن جملة الكاسرين $q = q_2$. و بما أن $m_t = h'/h$ حيث h يمثل طول الجسم و أن h' طول الخيال، عندئذ تكتب المعادلة (6.10) بالشكل التالي:

$$m_t = m_{t1} \times m_{t2} = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} \quad (6.11)$$

من المعادلة (6.11)، إذا كان m_t موجباً تكون جهة الخيال للأعلى (خيال صحيح) وبجهة الجسم نفسها بالنسبة للمحور الأصلي للعدسة، و عندما يكون m_t سالباً يكون الخيال مقلوباً وبعكس جهة الجسم بالنسبة للمحور الأصلي للعدسة.

6.3 – البعد المحرقي لعدسة رقيقة

البعد المحرقي f لعدسة رقيقة يمثل بعد الخيال لجسم يقع في اللانهاية. أي بالتعويض بالمعادلة (6.7) ببعد الجسم $p = \infty$ عندها يكون $f = q$ أي إنَّ الخيال يقع في نقطة المحرق للعدسة F ومنه تصبح المعادلة (6.7) بالشكل التالي:

$$\frac{n_2}{f} = \frac{n_2}{q} = \frac{n - n_1}{R_1} + \frac{n_2 - n}{R_2} \quad (6.12)$$

أو بتعويض ذلك ($f = q$ و $p = \infty$) في المعادلة (6.8) نجد أن مقلوب البعد المحرقي لعدسة مغمورة في الهواء ($n_1 = n_2 = 1$) هو:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{q} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (6.13)$$

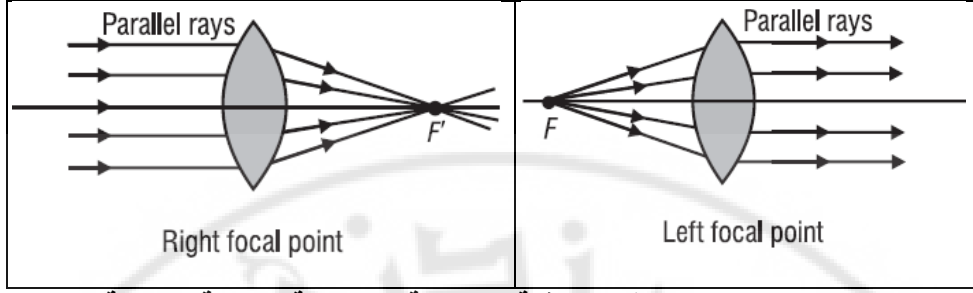
المعادلة (6.12) تمثل الحالة العامة (الوسط المحيط بالعدسة يختلف بقرائن الانكسار أي $n_1 \neq n_2$)، أما المعادلة (6.13) (الوسط المحيط بالعدسة هو الهواء أي $n_1 = n_2 = 1$) **معادلة صانعي العدسات** لأنها يمكن أن تستخدم لتحديد قيم R_1 و R_2 التي نحتاجها من أجل قيمة معطاة لقرينة الانكسار والبعد المحرقي المطلوب. أما إذا كانت قرينة الانكسار وقيم R_1 و R_2 معلومة، فإن هذه المعادلة تمكننا من حساب البعد المحرقي. بمساواة المعادلتين (6.7) و (6.12) يمكن ان نكتب:

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2}{f} \quad (6.14)$$

وبمساواة المعادلتين (6.8) و (6.13) يمكننا أن نكتب:

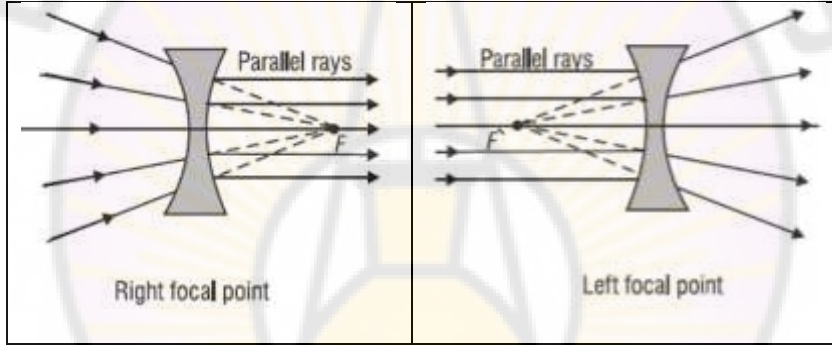
$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \quad (6.15)$$

ونحصل على هذه المعادلة نفسها بتعويض قرينة انكسار الهواء ($n_1 = n_2 = 1$) بالمعادلة (6.14). هذه المعادلة، تدعى **معادلة العدسة الرقيقة**، والتي يمكن استخدامها لربط كل من بعد الخيال وبعد الجسم والبعد المحرقي لعدسة رقيقة. الشكل (6.4) يبين موضع النقاط المحرقة للعدسة المقربة، حيث F و F' النقاط المحرقة الجسمية والخيالية على الترتيب (علماً بأن أي شعاع ضوئي وارد (أو ممدده) يمر بالنقطة المحرقة الجسمية يبرز من العدسة موازياً للمحور الأصلي بالإضافة إلى ذلك فإن أي شعاع ضوئي بارز يمر (أو ممدده) من النقطة المحرقة الخيالية يوافق شعاعاً وارداً على العدسة موازياً للمحور الأصلي انظر الشكل (6.4) والشكل (6.5)). نلاحظ أن لكل عدسة مقربة نقطتين محرقتين وذلك بحسب جهة ورود الضوء. النقطة المحرقة الأولى F تقع على يسار العدسة المقربة فتُحدد من خلال وضع الجسم في نقطة المحرق ($p = f$) ويكون بالتالي الخيال في اللانهاية ($q = \infty$) (انظر الشكل (6.4)). أما النقطة المحرقة الثانية F' تقع على يمين العدسة المقربة فتُحدد من خلال وضع الجسم في اللانهاية ($p = \infty$) وإلى يسار العدسة ويكون بالتالي الخيال في نقطة المحرق ($q = f$) (انظر الشكل (6.4)). أما في حالة العدسة المبعدة (انظر الشكل (6.5)) فتكون F على يمين العدسة المبعدة و F' على يسار العدسة المبعدة. وفي حال كون العدسة محاطة بنفس الوسط يكون بعد كل من F و F' عن مركز العدسة متساو ويساوي البعد المحرقي للعدسة f .



الشكل (6.4): موضع النقاط المحرقة الجسمية والخيالية للعدسة المقربة، حيث

F' و F النقاط المحرقة الجسمية والخيالية على التوالي، لاحظ أن F' و F يبعدان المسافة نفسها عن مركز العدسة.

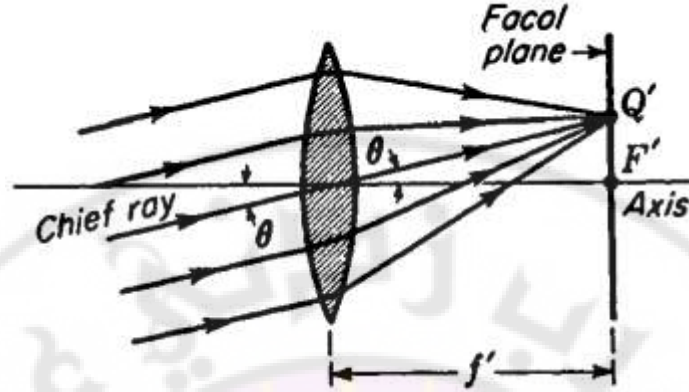


الشكل (6.5): موضع النقاط المحرقة الجسمية والخيالية للعدسة المبعدة، حيث

F' و F النقاط المحرقة الجسمية والخيالية على التوالي، لاحظ أن F' و F يبعدان المسافة نفسها عن مركز العدسة.

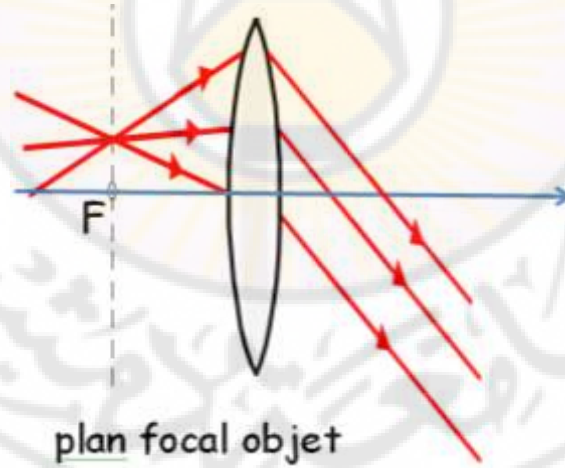
6.4 – المستوي المحرق للعدسة الرقيقة:

المستوي المحرق الخيالي للعدسة المقربة هو المستوي العمودي على المحور الأصلي ويمر من النقطة المحرقة F' انظر الشكل (6.6). نلاحظ من هذا الشكل أن الأشعة الواردة المتوازية فيما بينها وغير موازية للمحور الأصلي تتمحرق بعد النفاذ من العدسة في نقطة Q' مثلاً والتي تقع في المستوي المحرق.



الشكل (6.6): المستوي المحرقى للعدسة الرقيقة المقربة.

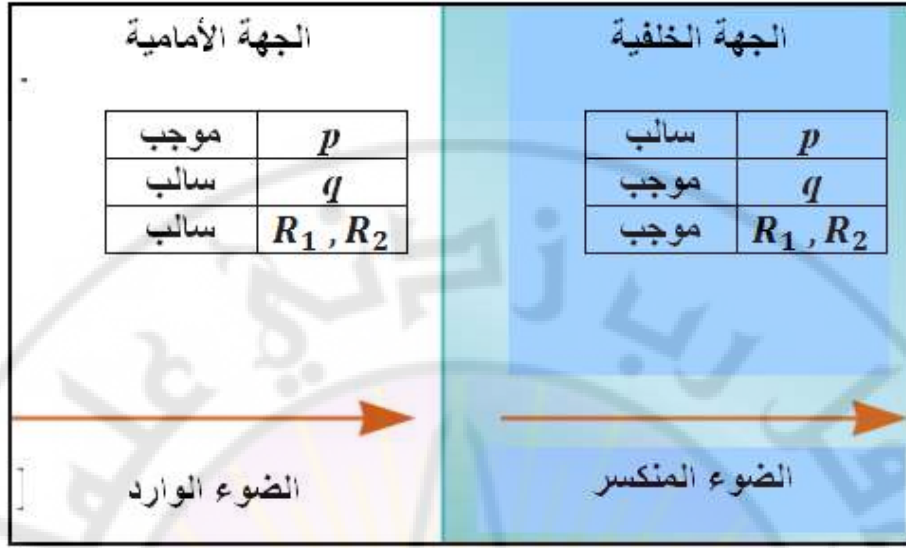
كما يمكننا تعريف المستوي المحرقى الجسمي للعدسة المقربة بأنه المستوي العمودي على المحور الأصلي والمار من النقطة المحرقة F' ، كما هو موضح في الشكل (6.7)، ففي هذه الحالة كل الأشعة التي ترد من نقطة ما من هذا المستوي تنفذ من العدسة متوازية فيما بينها. بنفس الطريقة نستطيع تحديد المستوي المحرقى الخيالي والجسمي للعدسة المبعدة.



الشكل (6.7): المستوي المحرقى للعدسة الرقيقة المقربة.

6.5 – اصطلاحات الإشارة عند تطبيق قوانين العدسات

تطبق قوانين العدسات السابقة في حالتي العدسات المقربة والعدسات المبعدة بشرط الأخذ بالحسبان اصطلاحات الإشارة التي سنعرضها لاحقاً. الشكل (6.8) يبين أن جهة ورود الضوء تمثل الجهة الأمامية للعدسة والجهة الأخرى تدعى بالجهة الخلفية. نلاحظ من الشكل (6.8) أن بعد الجسم p موجب إذا وقع أمام العدسة وسالب إذا وقع خلف العدسة، أما بعد كل من الخيال q ونصف القطر (R_1 أو R_2) يكون من إشارة موجبة إذا وقعا خلف العدسة (مركز الانحناء خلف العدسة) ومن إشارة سالبة إذا وقعا أمام العدسة (مركز الانحناء يكون أمام العدسة). ونقول عن جسم أنه حقيقي إذا كان بعده p موجباً ويكون جسماً وهمياً إذا كان بعده p سالباً، وكذلك نقول عن خيال أنه حقيقي إذا كان بعده q موجباً ويكون خيالياً وهمياً إذا كان بعده q سالباً. أما التكبير الخطي العرضاني أو طول الخيال h' فيصف أي منها فيما إذا الخيال صحيح أو مقلوب، فإذا كان m_t أو h' موجباً فالخيال صحيح وإذا كان m_t أو h' سالباً فالخيال مقلوب. وكذلك تكون العدسة مقربة إذا كان بعدها المحرقي موجباً وتكون مبعدة إذا كان بعدها المحرقي سالباً. أما القيمة المطلقة للتكبير الخطي العرضاني $m_t = \frac{h'}{h}$ تشير إلى مايلي: إذا كانت $|m_t| > 1$ فإن طول الخيال أكبر من طول الجسم ($h' > h$). وإذا كانت $|m_t| < 1$ فإن طول الخيال أصغر من طول الجسم ($h' < h$). وإذا كانت $|m_t| = 1$ فإن طول الخيال يساوي طول الجسم ($h' = h$).



الشكل (6.8): يبين الشكل اصطلاحات الإشارة للعدسات الرقيقة.

نترك للطلاب مقارنة اصطلاحات الإشارة للعدسات مع اصطلاحات الإشارة للسطوح الكاسرة والعاكسة الكروية، هل يوجد أي فروق؟

6.6 – استطاعة العدسة

يتميز أطباء العيون العدسات باستطاعتها وليس ببعدھا المحرقی. وتعرف استطاعة العدسة P بأنها مقلوب البعد المحرقی مقدراً بالمتر وواحدة الاستطاعة هي الكسيرة (Diopetre) ويرمز لها بـ D . أي إن: (كسيرة=1/متر)

$$P = \frac{1}{f} \quad (6.16)$$

فاستطاعة عدسة بعدها المحرقي 50cm يساوي 2 كسيرة ($P = 2D$) في حين أن العدسة ذات البعد المحرقي 20cm- تكون استطاعتها 5- كسيرة ($P = -5D$).

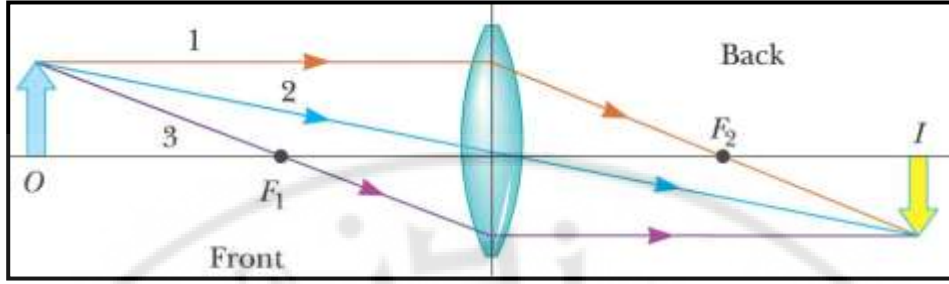
6.7 – تحديد طبيعة الخيال بالرسم الهندسي في العدسات الرقيقة

يساعد رسم سير الأشعة في العدسات الرقيقة في تحديد موقع الأخيلا المتشكلة فيها وطبيعتها أو أية جملة من العدسات. ملاحظة: هذا الرسم الهندسي يكون صحيحاً بشكل مقبول فقط إذا كانت الأشعة محورية. يلخص الشكلان (6.9) و (6.10) طريقة تحديد موقع الخيال وطبيعته بالرسم الهندسي لعدسة رقيقة مقربة (موجبة). نلاحظ من هذين الشكلين (6.9) و (6.10) مايلي:

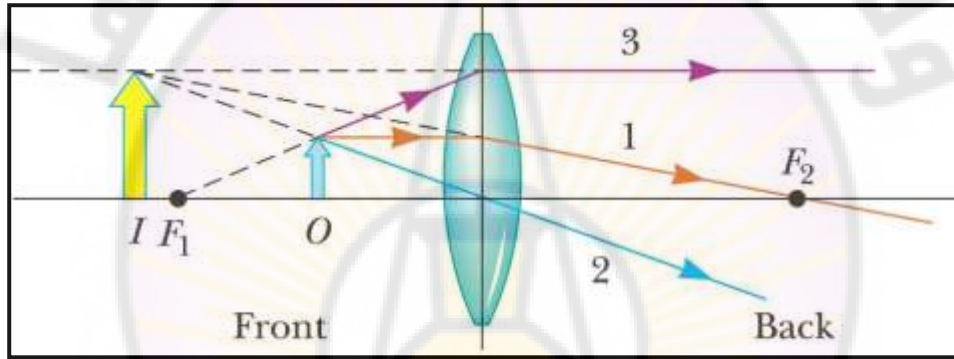
1- كل شعاع يرد موازياً للمحور الأصلي ينكسر من خلال مادة العدسة المقربة ماراً من خلال النقطة المحرقة لها.
2- كل شعاع يمر من خلال مركز العدسة المقربة يتابع مسيره دون أن ينكسر.

3- كل شعاع يرد ماراً من محرق العدسة المقربة (أو كأنه قادم من نقطة المحرق الشكل (6.10)) ينكسر من خلال مادة العدسة موازياً لمحورها الأصلي.

من الشكل (6.9) نجد أنه عندما يقع الجسم على يسار النقطة المحرقة ($p > f$) لعدسة مقربة، يكون الخيال حقيقياً ومقلوباً. أما عندما يكون الجسم بين النقطة المحرقة والعدسة ($p < f$)، كما في الشكل (6.10)، فإن الخيال يكون وهمياً ومتجهاً للأعلى (صحيح).



الشكل (6.9): مخطط الأشعة لتحديد الخيال المتشكل بواسطة عدسة رقيقة مقربة وذلك عندما يقع الجسم أمام وخارج نقطة المحرق للعدسة، نلاحظ أن الخيال حقيقي ومقلوب ويقع في الجهة الخلفية للعدسة.



الشكل (6.10): مخطط الأشعة لتحديد الخيال المتشكل بواسطة عدسة رقيقة مقربة وذلك عندما يقع الجسم بين نقطة المحرق والعدسة، نلاحظ أن الخيال وهمي وصحيح وأكبر من الجسم ويقع في الجهة الأمامية للعدسة.

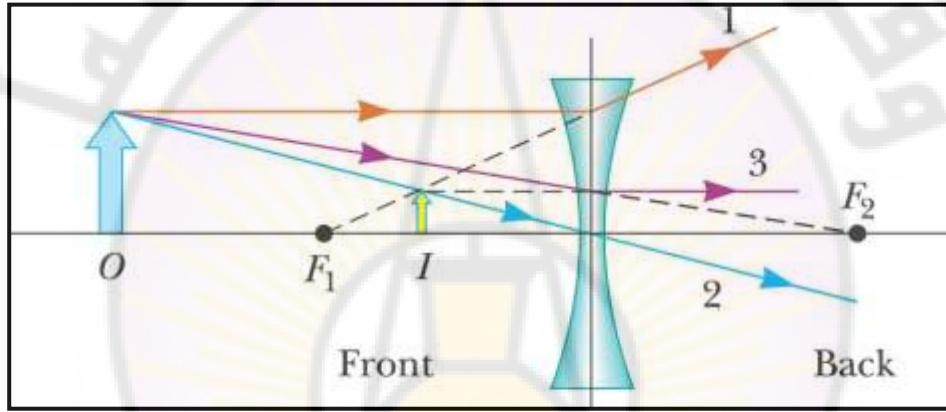
أما الشكل (6.11) فيبين كيفية تحديد موقع الخيال وطبيعته بالرسم الهندسي لعدسة رقيقة مبعدة (سالبة). نلاحظ من الشكل أننا رسمنا ثلاثة أشعة من نقطة تقع في قمة الجسم O وهذه الأشعة هي:

- 1- أي شعاع يرد موازياً للمحور الأصلي للعدسة المبعدة (الشعاع 1) ينكسر من خلال مادة هذه العدسة وكأنه قادم من محرقها في الجهة الأمامية F_1 .

2- كل شعاع يمر من خلال مركز العدسة المبعدة (الشعاع 2) يتابع مسيره دون أن ينكسر.

3- أي شعاع يرد للعدسة المبعدة (الشعاع 3) بحيث يكون ممدده يمر من خلال النقطة المحرقة الثانية F_2 للعدسة المبعدة فإنه ينكسر من خلال مادة هذه العدسة موازياً للمحور الأصلي.

من الشكل (6.11) نلاحظ أنه من أجل العدسة المبعدة، يكون الخيال دائماً وهمياً ومتجهاً نحو الأعلى (صحيح)، بغض النظر عن موقع الجسم.



الشكل (6.11): مخطط الأشعة لتحديد الخيال المتشكل بواسطة عدسة رقيقة مبعدة وذلك عندما يقع الجسم في مكان أمام العدسة المبعدة، الخيال وهمي وصحيح وأصغر من الجسم ويقع في الجهة الأمامية للعدسة.

6.8 - جمع العدسات الرقيقة

إذا كان لدينا عدستان رقيقتان لتشكيل خيال فإن الخيال المتشكل بوساطة العدسة الأولى هو جسم بالنسبة للعدسة الثانية. وبالتالي يكون الخيال الثاني المتشكل هو خيال نهائي لجملة العدستين. إذا كان الخيال المتشكل بوساطة العدسة الأولى واقعاً خلف العدسة الثانية، عندها يعامل الخيال كجسم وهمي للعدسة الثانية (بالتالي نعوض في معادلة العدسة الرقيقة، p يكون سالباً). بالطريقة نفسها يمكننا تعميم ذلك من أجل جملة مكونة من ثلاث عدسات أو أكثر. بما أن التكبير الخطي العرضاني للعدسة الثانية ناتج عن الخيال المكبر للعدسة الأولى، فالتكبير الكلي للخيال لمجموعة العدستين هو جداء ضرب التكبير الخطي لكلا العدستين. دعنا نتأمل حالة خاصة لجملة مكونة من عدستين مقربتين متلاصقتين ذات أبعاد محرقية f_1 و f_2 . إذا كان بعد الجسم عن جملة العدستين $p_1 = p$ عندئذ بتطبيق قانون العدسة (المعادلة (6.15)) من أجل العدسة الأولى نجد:

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

حيث q_1 هو بعد الخيال للعدسة الأولى. بفرض أن خيال العدسة الأولى هو جسم بالنسبة للعدسة الثانية؛ نرى أن بعد الجسم للعدسة الثانية $p_2 = -q_1$ (الإشارة السالبة تشير إلى أن الجسم وهمي بالنسبة للعدسة الثانية). بالنتيجة يمكن كتابة قانون العدسة من أجل العدسة الثانية كما يلي:

$$\frac{1}{p_2} + \frac{1}{q_2} = \frac{1}{f_2} \Rightarrow -\frac{1}{q_1} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f_2}$$

حيث إن $q = q_2$ هو بعد الخيال النهائي من العدسة الثانية والذي هو بالنتيجة بعد الخيال النهائي لجملة العدستين. بجمع المعادلات للعدستين نحذف q_1 وينتج لدينا:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \quad (6.17)$$

وعند استبدال جملة العدستين بعدسة واحدة التي تشكل خيلاً بالمكان نفسه، نرى أن بعدها المحرقي يعطى بالعلاقة:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \quad (6.18)$$

حيث إن f البعد المحرقي لجملة العدستين. من هذه العلاقة نلاحظ أنه بمعرفة البعد المحرقي لجملة العدستين والبعد المحرقي لإحدى العدستين يمكننا حساب البعد المحرقي للعدسة الثانية. بالنتيجة، فإن أي عدستين رقيقتين متلاصقتين تكافئان عدسة رقيقة وحيدة لها بعد محرقي يعطى بالمعادلة (6.18) (مجموع البعد المحرقي للعدسة المكافئة يساوي مجموع مقاليب الأبعاد المحرقة للعدسات المنفصلة). و باستخدام المعادلة (6.16) تكون استطاعة جملة العدستين:

$$P = P_1 + P_2$$

تطبيقات

مثال 1: حالة كاسرين كرويين (العدسة الثخينة):

لننظر في عدسة ثخينة محدبة الوجهين ثخنها A_1A_2 يساوي $t=2$ cm وأن نصف قطر انحناء وجهها الأول 3 cm ونصف قطر انحناء وجهها الثاني 4 cm، وأنها مصنوعة من زجاج قرينة انكساره 1.5. وُضع جسم نقطي M في الهواء على المحور الأصلي للعدسة على بعد 8 cm من رأسها الأول A_1 . أوجد موضع خيال الجسم علماً بأن الوسط الذي يقع خلف وجه العدسة الثاني ذو قرينة انكسار تساوي 1.4 و قرينة انكسار الهواء 1. ثم أوجد التكبير الخطي العرضاني لجملة الكاسرين (العدسة).

الحل: نطبق قانون الكاسر الكروي من أجل وجه العدسة الأول، وبإهمال الوجه الثاني للعدسة فنجد:

$$\frac{n_1}{p_1} + \frac{n}{q_1} = \frac{n - n_1}{R_1}$$

$$\frac{1}{8} + \frac{1.5}{q_1} = \frac{1.5 - 1}{3} \Rightarrow q_1 = 36 \text{ cm}$$

أي إن الوجه الأول للعدسة يكون للجسم خيالياً حقيقياً يقع على يمينه وعلى بعد 36cm منه. إن هذا الخيال الحقيقي الذي لا يتكون بالفعل بسبب وجود الوجه الثاني للعدسة، يمكن أن يعد جسماً وهمياً بالنسبة لهذا الوجه ويقع على يمينه على بعد منه قدره $p_2 = q_1 - t = 36 - 2 = 34 \text{ cm}$ بالتالي يكون له خيالياً بعده عن رأس الكاسر الثاني q_2 الذي يحسب بتطبيق قانون الكاسر الكروي على الوجه الثاني فنجد:

$$\frac{n}{-p_2} + \frac{n_2}{q_2} = \frac{n_2 - n}{R_2}$$

$$\frac{1.5}{-34} + \frac{1.4}{q_2} = \frac{1.4 - 1.5}{-4} \Rightarrow q_2 = 19 \text{ cm}$$

فخيال الجسم في العدسة الثخينة يتكون في الوسط الثاني وعلى بعد مقداره 19cm من الوجه الثاني للعدسة، وهو خيال حقيقي. (لاحظ أنه إذا كان بعد الجسم سالباً فهو وهمي، وإذا كان موجباً فهو حقيقي والشيء نفسه ينطبق على بعد الخيال، أما نصف قطر الانحناء R فهو موجب إذا وقع خلف السطح وسالب إذا وقع أمام السطح، راجع اصطلاح الإشارة للكاسر الكروي).

لإيجاد التكبير الخطي العرضاني للعدسة الثخينة نطبق قانون التكبير الخطي العرضاني مرتين، فنحسب التكبير للوجه الأول m_{t1} ونحسبه للوجه الثاني، وليكن m_{t2} ، فيكون التكبير الخطي العرضاني للعدسة الثخينة يساوي:

$$m_t = m_{t1} \times m_{t2}$$

حيث إن:

$$m_{t1} = -\frac{n_1 q_1}{n p_1}, \quad m_{t2} = -\frac{n q_2}{n_2 p_2}$$

كما أن $p_2 = -q_1 + t$ بالتعويض في هذه المعادلات نجد:

$$m_{t1} = -\frac{1}{1.5} \frac{36}{8} = -3$$

$$m_{t2} = -\frac{1.5}{1.4} \frac{19}{(-34)} \approx 0.6$$

وتدل إشارة الناقص لـ m_{t1} على أن الخيال مقلوب والإشارة الموجبة لـ m_{t2} على أن الخيال صحيح، ومنه نجد أن التكبير الخطي العرضاني لجملة الكاسرين (العدسة الثخينة) يساوي:

$$m_t = m_{t1} \times m_{t2} = -1.8$$

وتدل إشارة الناقص على أن الخيال مقلوب.

أعد حل التمرين السابق في كل من الحالات التالية:

أ- إذا كان الوسط المحيط بالكاسرين هو الهواء أي $n_1 = n_2 = 1$ و

$$t = 2 \text{ cm}$$

ب- إذا كان t صغير بقدر كاف بالتالي يمكن إهماله (حالة عدسة رقيقة) و

$$n_1 = 1 \text{ و } n_2 = 1.4$$

مثال 2: عدسة رقيقة مقربة (محدبة الوجهين) مصنوعة من زجاج قرينة انكساره 1.52، وبعدها المحرقي 40cm، والوسط المحيط بها هو الهواء الذي قرينة انكساره 1. والمطلوب: أوجد بعدها المحرقي عندما تُغطس هذه العدسة في الماء علماً بأن قرينة انكسار الماء 1.333.

الحل: يجب ملاحظة أن أنصاف أقطار وجهي العدسة R_1 للوجه الأول و R_2 للوجه الثاني لا يتغيران عند وضع العدسة في الماء. باستخدام المعادلة (6.12)

$$\frac{n_2}{f} = \frac{n - n_1}{R_1} + \frac{n_2 - n}{R_2}$$

يمكن كتابتها عندما تكون العدسة في الهواء ($n_1 = n_2 = 1$):

$$\frac{1}{f_{air}} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

وعندما تكون العدسة في الماء ($n_1 = n_2 = 1.33$):

$$\frac{1.33}{f_{water}} = (n - 1.33) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

حيث إن $n = 1.52$ هي قرينة انكسار الزجاج، بتقسيم المعادلة الأولى على المعادلة الثانية نحصل على مايلي:

$$\frac{1}{f_{air}} \times \frac{f_{water}}{1.33} = \frac{n - 1}{n - 1.33}$$

وبالتعويض

$$\frac{1}{40} \times \frac{f_{water}}{1.33} = \frac{1.52 - 1}{1.52 - 1.33}$$

ونحصل على

$$f_{water} = 148 \text{ cm}$$

وبالتالي يمكن حساب البعد المحرقي للعدسة في أي وسط بالنسبة لوسط آخر وذلك إذا علمنا البعد المحرقي للعدسة في أحد هذه الأوساط وقرائن الانكسار تلك الأوساط.

مثال 3: عدسة مقربة رقيقة لها بعد محراقي $f=10\text{cm}$ تشكل أخیلة لأجسام وضعت في الأماكن التالية: (أ) - 30cm . (ب) - 10cm . (ج) - 5cm من العدسة. والمطلوب: أوجد بعد الخيال في كل حالة، والتكبير الخطي العرضاني الموافق لكل حالة، ثم ناقش طبيعة الخيال في كل حالة. احسب استطاعة العدسة. أعد نفس هذا المثال نفسه وذلك باستبدال العدسة المقربة الرقيقة بعدسة رقيقة مبعدة ببعد محراقي قيمته المطلقة 10 cm .
الحل: أولاً في حالة العدسة الرقيقة المقربة: نجد بعد الخيال لكل حالة بالعلاقة التالية:

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

(أ) -

$$\frac{1}{30} + \frac{1}{q} = \frac{1}{10} \Rightarrow q = +15\text{cm}$$

(خيال حقيقي) ويكون التكبير الخطي العرضاني في هذه الحالة مساوياً لـ

$$m_t = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} = -\frac{15}{30} = -0.5$$

(خيال مقلوب وأصغر من الجسم)

(ب)-

$$\frac{1}{10} + \frac{1}{q} = \frac{1}{10} \Rightarrow q = \infty$$

(خيال في اللانهاية) و يكون التكبير الخطي العرضاني في هذه الحالة مساوياً لـ

$$m_t = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} = -\frac{\infty}{10} = \infty$$

(خيال في اللانهاية)

(ج)-

$$\frac{1}{5} + \frac{1}{q} = \frac{1}{10} \Rightarrow q = -10cm$$

(خيال وهمي) و يكون التكبير الخطي العرضاني في هذه الحالة مساوياً لـ

$$m_t = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} = -\frac{-10}{5} = +2$$

(خيال صحيح وأكبر من الجسم)

استطاعة العدسة المقربة تحسب بالعلاقة التالية:

$$P = \frac{1}{f} = \frac{1}{0.1} = 10 D$$

ثانياً: في حالة العدسة الرقيقة المبعدة:

(أ)-

$$\frac{1}{30} + \frac{1}{q} = \frac{1}{-10} \Rightarrow q = -7.5cm$$

(خيال وهمي) و يكون التكبير الخطي العرضاني في هذه الحالة مساوياً لـ

$$m_t = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} = -\frac{-7.5}{30} = +0.25$$

(خيال صحيح وأصغر من الجسم)

(ب)-

$$\frac{1}{10} + \frac{1}{q} = \frac{1}{-10} \Rightarrow q = -5cm$$

(خيال وهمي) ويكون التكبير الخطي العرضاني في هذه الحالة مساوياً لـ

$$m_t = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} = -\frac{-5}{10} = +0.5$$

(خيال صحيح وأصغر من الجسم)

(ج)-

$$\frac{1}{5} + \frac{1}{q} = \frac{1}{-10} \Rightarrow q = -3.33cm$$

(خيال وهمي) ويكون التكبير الخطي العرضاني في هذه الحالة مساوياً لـ

$$m_t = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} = -\frac{-3.33}{5} = +0.667$$

(خيال صحيح وأصغر من الجسم)

استطاعة العدسة المبعدة تحسب بالعلاقة التالية:

$$P = \frac{1}{f} = \frac{1}{-0.1} = -10 D$$

مثال 4:

عدستان رقيقتان تفصل بينهما مسافة 20cm وأبعادها المحرقة $f_1 = +10cm$ و $f_2 = +20cm$ على التوالي. نضع جسمًا على مسافة 30cm إلى يسار العدسة الأولى (كما هو موضح في الشكل (12)) والمطلوب:

أ- أوجد الموقع والتكبير الخطي العرضاني للخيال النهائي لجملة العدستين، ثم ناقش طبيعة الخيال لكل عدسة وطبيعة الخيال النهائي.

الحل: موقع الخيال المتشكل بالعدسة الأولى:

$$\frac{1}{p_1} + \frac{1}{q_1} = \frac{1}{f_1} \Rightarrow \frac{1}{30} + \frac{1}{q_1} = \frac{1}{10}$$
$$\Rightarrow q_1 = +15cm$$

بما أن q_1 موجبة فإن الخيال المتشكل حقيقي. والتكبير الخطي العرضاني لهذه العدسة يحسب كما يلي:

$$m_{t1} = -\frac{q_1}{p_1} = -\frac{15}{30} = -0.5$$

بما أن m_{t1} سالبة فإن الخيال المتشكل مقلوب.

كما ذكرنا سابقاً أن الخيال المتشكل بوساطة العدسة الأولى هو جسم بالنسبة للعدسة الثانية، بالتالي فإن بعد الجسم عن العدسة الثانية هو $20-15=5cm$ ومنه يمكن إيجاد موقع الخيال النهائي كما يلي:

$$\frac{1}{p_2} + \frac{1}{q_2} = \frac{1}{f_2} \Rightarrow \frac{1}{5} + \frac{1}{q_2} = \frac{1}{20}$$
$$\Rightarrow q_2 = -6.67 cm$$

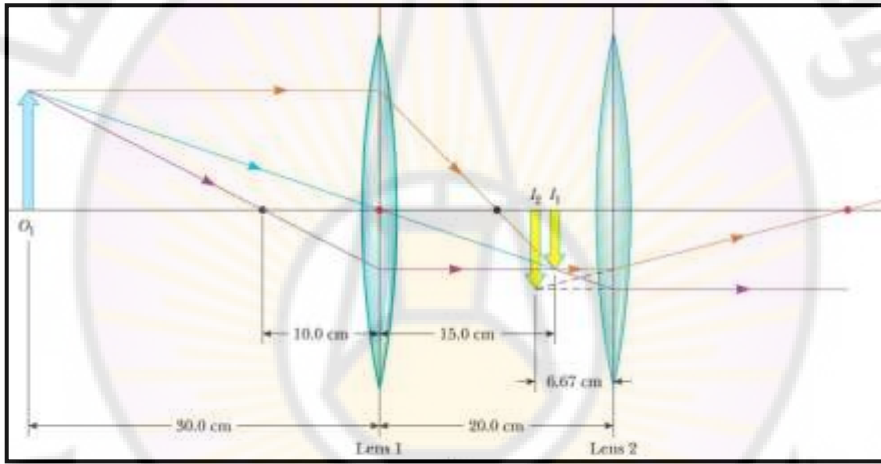
بما أن q_2 سالبة فإن الخيال المتشكل وهمي. والتكبير الخطي العرضاني لهذه العدسة يحسب كما يلي:

$$m_{t2} = -\frac{q_2}{p_2} = -\frac{(-6.67)}{30} = +1.33$$

بما أن m_{t2} موجب فإن الخيال المتشكل صحيح بالنسبة للخيال الأول.
أخيراً فإن التكبير الخطي العرضاني لجملة العدستين يساوي إلى:

$$m_t = m_{t1} \times m_{t2} = (-0.5)(1.33) = -0.667$$

ومنه فالخيال النهائي مقلوب بالنسبة للجسم الأول والخيال أصغر من هذا الجسم.



الشكل (6.12) الخيال المتشكل نتيجة عدستين رقيقتين.

أعد حل هذه المسألة بفرض أن البعد بين العدستين 8 cm ثم أعد حل هذه المسألة بفرض أن البعد المحرقي للعدسة الثانية $f_2 = -20\text{ cm}$.

مسائل

6.1- عدسة مقربة بعدها المحرقي $+10\text{cm}$. إذا كانت الأبعاد الجسمية مساوية 4cm ، 10cm ، 25cm ، 50cm أوجد ما يلي:

(أ)- موقع الخيال في كل حالة. (ب)- التكبير المقابل، هل الخيال حقيقي أم وهمي في كل حالة؟ هل الخيال صحيح أم مقلوب في كل حالة؟ (ج)- إذا كان ارتفاع الجسم 5mm أوجد ارتفاع الخيال في كل حالة.

6.2- يوضع جسم على بعد 18cm من شاشة. والمطلوب: (أ) عند أي نقاط واقعة بين الجسم والشاشة يمكن وضع عدسة بعدها المحرقي 4cm للحصول على خيال واقع على الشاشة. (ب)- ما هو تكبير الخيال المقابل لأوضاع العدسة هذه؟

6.3- توضع ثلاث عدسات رقيقة، لكل منها بعد محرقي يساوي 20cm على محور مشترك، وتفصل بين الواحدة والتالية مسافة تساوي 20cm . أوجد موضع الخيال النهائي لجسم صغير واقع على المحور الأصلي، وعلى بعد 60cm إلى يسار العدسة الأولى.

6.4- نصف قطري انحناء وجهي عدسة رقيقة هما $R_1 = +10\text{ cm}$ و $R_2 = -25\text{ cm}$ وقرينة انكسار زجاجها $n=1.6$ والمطلوب: (أ)- البعد المحرقي للعدسة. (ب)- استطاعة العدسة.

أعد حل هذه المسألة إذا كان الوسط المحيط بالعدسة هو الماء وقرينة انكساره 1.333 .

6.5- عدستان بعدهما المحرقيان $f_1 = +20\text{cm}$ و $f_2 = -30\text{cm}$. جعلتا على بعد 20cm إحداهما عن الأخرى. فإذا وضع جسم طوله 5mm على بعد

50cm من العدسة الأولى، أوجد: (أ)- موضع الخيال النهائي. (ب)- طول هذا الخيال.

6.6- عدسة مبعدة القيمة المطلقة لبعدها المحرقي 10cm. إذا كانت الأبعاد الجسمية مساوية 50cm، 25cm، 10cm، 4cm أوجد ما يلي:

(أ)- موقع الخيال في كل حالة. (ب)- التكبير الخطي العرضاني المقابل، هل الخيال حقيقي أم وهمي في كل حالة؟ هل الخيال صحيح أم مقلوب في كل حالة؟ (ج)- إذا كان ارتفاع الجسم 5mm أوجد ارتفاع الخيال في كل حالة.

6.7- عدسة نصف قطر وجهها الأول $R_1 = 6cm$ ونصف قطر وجهها الثاني $R_2 = 4cm$ وقرينة انكسار مادتها 1.5. احسب بعدها المحرقي عندما تكون محاطة بوسط واحد هو:

(أ)- الهواء، (ب)- وسط قرينته 1.4، (ج)- وسط قرينته 1.6.



الفصل السابع: قوانين العدسات الثخينة ودراسة تشكل الأخيلة فيها

- 7.1 – إيجاد مواضع المحرقين الأصليين والنقطتين الأصليتين للعدسة الثخينة
- 7.2 – العلاقات المترافقة
- 7.3 – قوانين العدسات الثخينة
- 7.4 – النقطتان العقديتان والمركز البصري في العدسة الثخينة
- 7.5 – العدسة الثخينة المؤلفة من عدستين رقيقتين
- 7.6 - مجموعة العدسات الثخينة



الفصل السابع: قوانين العدسات التخينة ودراسة تشكل

الأخيلة فيها

درسنا في الفصل السابق العدسات في حالتين: الحالة الأولى عندما تكون ثخانة العدسة t غير مهمة عندها عدنا أن العدسة عبارة عن كاسرين كرويين ودرسنا تشكل الخيال النهائي للكاسرين. أما الحالة الثانية عندما تكون ثخانة العدسة t مهمة عندها استنتجنا قوانين هذه العدسة وعدنا جملة الكاسرين وحدة قائمة بذاتها. في هذا الفصل سوف ندرس العدسة غير مهمة الثخانة كوحدة قائمة بذاتها ولها قوانينها الخاصة وليس كما درسناها سابقاً ككاسرين كرويين. وسنعرف النقاط الأساسية في العدسة التخينة وهي المحرقان الأصليان والنقطتان الأصليتان والنقطتان العقديتان وأخيراً سوف نستخدم هذه النقاط الأساسية في استنتاج قوانين العدسات التخينة.

7.1 – إيجاد مواضع المحرقين الأصليين والنقطتين الأصليتين للعدسة التخينة

كما ذكرنا سابقاً نتعامل في هذا الفصل مع العدسة التخينة كجملة قائمة بذاتها وليس كجملة كاسرين كرويين. ويتم تحديد المحرقين الأصليين الجسمي والخيالي من خلال الأشعة الواردة. نلاحظ من الشكل (7.1) أن الأشعة الواردة للعدسة التخينة والمارة بالمحرق الأصلي الجسمي F تبرز من العدسة التخينة موازية لمحورها الأصلي. ونلاحظ من الشكل (7.2) أن الأشعة الواردة للعدسة التخينة والموازية لمحورها الأصلي تبرز من العدسة التخينة مارة بالمحرق الأصلي الخيالي F'' .

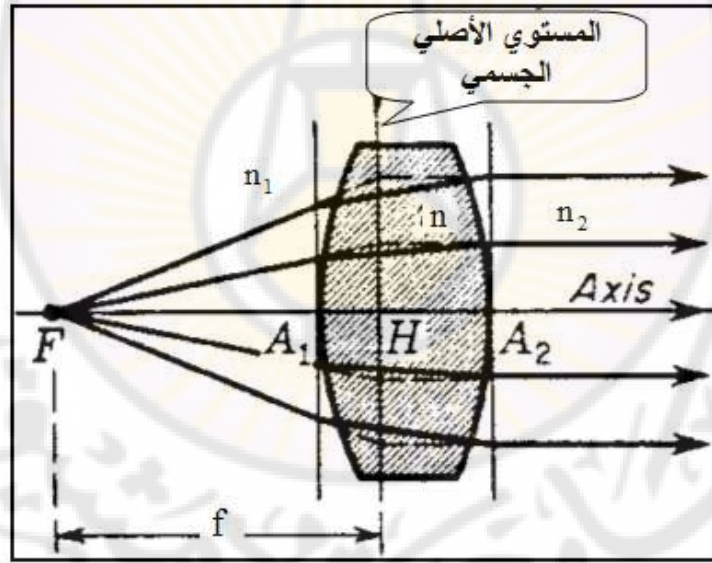
ومن الشكل (7.1) أيضاً يمكننا تعريف المستوي الأصلي الجسمي والنقطة الأصلية الجسمية كما يلي: إن ممددات الأشعة الواردة إلى العدسة الثخينة والبارزة منها تتقاطع في نقاط ضمن العدسة الثخينة وإنَّ المستوي العمودي على المحور الأصلي والمار من خلال نقاط التقاطع المذكورة أنفاً يدعى بالمستوي الأصلي الجسمي، وإن هذا المستوي الأصلي الجسمي يقطع المحور الأصلي في نقطة تدعى النقطة الأصلية الجسمية H . ومنه نعرّف المستوي الأصلي الجسمي، بأنه المحل الهندسي لنقاط تقاطع ممددات الأشعة البارزة الموازية للمحور الأصلي مع ممددات الأشعة الواردة الموافقة لها.

ومن الشكل (7.2) بالطريقة نفسها نستطيع تعريف المستوي الأصلي الخيالي والنقطة الأصلية الخيالية كما يلي: أن ممددات الأشعة الواردة إلى العدسة الثخينة والبارزة منها تتقاطع في نقاط ضمن العدسة الثخينة وأن المستوي العمودي على المحور الأصلي والمار من خلال نقاط التقاطع المذكورة أنفاً يدعى بالمستوي الأصلي الخيالي وإن هذا المستوي الأصلي الخيالي يقطع المحور الأصلي في نقطة تدعى النقطة الأصلية الخيالية H'' . ومنه نعرّف المستوي الأصلي الخيالي بأنه المحل الهندسي لنقاط تقاطع الأشعة الواردة الموازية للمحور الأصلي مع الأشعة البارزة الموافقة لها.

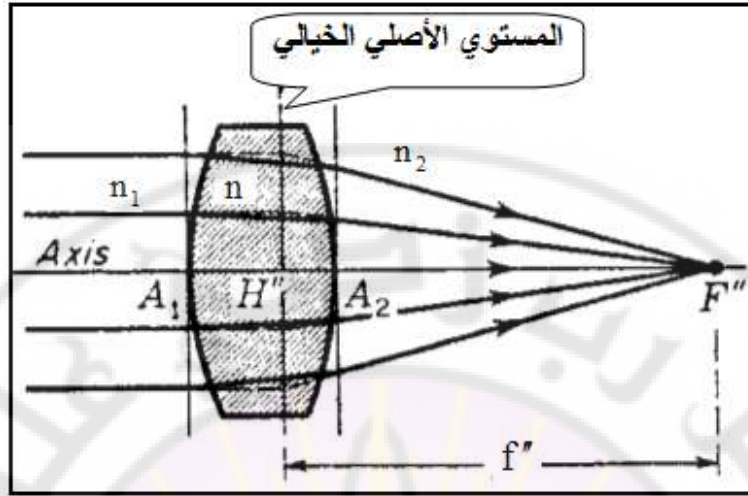
نلاحظ من الشكل (7.1) والشكل (7.2) أن البعد المحرقي الجسمي f هو المسافة بين النقطة المحرقة الجسمية F والنقطة الأصلية الجسمية H أو المستوي الأصلي الجسمي. ونلاحظ من الشكل (7.2) أن البعد المحرقي الخيالي f'' هو المسافة بين النقطة المحرقة الخيالية F'' والنقطة الأصلية الخيالية H'' أو المستوي الأصلي الخيالي.

ومن أهم خواص المستوي الأصلي الجسمي والمستوي الخيالي هي: أولاً: إنَّ كل نقطة من المستوي الأصلي الخيالي هي بمثابة خيال صحيح وبالأبعاد نفسها لنقطة موافقة من المستوي الأصلي الجسمي، أي إنَّ التكبير الخطي العرضاني لهما يكون موجباً و يساوي الواحد ($m_t = 1$). ثانياً: يتساوى البعدان المحرقيان للعدسة الثخينة f و f'' ($f = f''$) إذا كان الوسط على جانبي العدسة واحد أي $n_1 = n_2$. أما إذا كان الوسطان على جانبي العدسة مختلفين في قرينة انكسارهما أي $n_1 \neq n_2$ يكون عندها $f \neq f''$ وتكون العلاقة بين f و f'' وقرينتي انكسار الوسطين المحيطين بالعدسة بالشكل التالي:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{f''}{f} \quad (7.1)$$

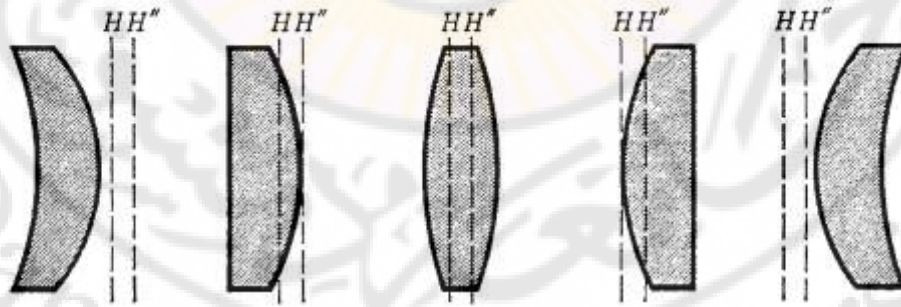


الشكل (7.1): سير الأشعة في العدسة الثخينة تبين موضع المستوي الأصلي الجسمي.



الشكل (7.2): سير الأشعة في العدسة الثخينة تبين موضع المستوي الأصلي الخيالي.

الشكل (7.3) يبين أن موضعي النقطتين الأصليتين والمستويين الأصليين يتوقف على شكل العدسة الثخينة، وبالتالي ليس من الضروري أن تكون النقاط المحرقة F و F'' أو النقاط الأصلية H و H'' متناظرة بالنسبة للعدسة الثخينة حتى ولو كان الوسط على جانبي العدسة واحداً؛ أي $n_1 = n_2$ ، بل يمكن أن تكون واقعة على مسافتين مختلفتين من رأس الكاسر الكروي لكل وجه من وجوها.



الشكل (7.3): اختلاف مواقع المستويات الأصلية والجسمية والخيالية باختلاف شكل العدسة الثخينة.

7.2 – العلاقات المترافقة

الشكل (7.4) يظهر تحديد خيال جسم MQ لعدسة ثخينة بالرسم الهندسي. نلاحظ من هذا الشكل أن أي شعاع وارد مواز للمحور الأصلي يبرز من العدسة الثخينة ماراً من النقطة المحرقة الخيالية، F'' وأن أي شعاع وارد يمر من النقطة المحرقة الجسمية F يبرز من العدسة موازياً للمحور الأصلي، بالتالي يمكن تحديد خيال الجسم $M''Q''$ برسم العمود المقام من نقطة تقاطع الأشعة البارزة من العدسة الثخينة على المحور الأصلي لهذه العدسة. ونلاحظ أيضاً من هذا الشكل أن الأشعة الضوئية الواصلة بين المستويين الأصليين للعدسة الثخينة متوازية فيما بينها وموازية للمحور الأصلي، وهذا ناتج عن أن التكبير الخطي العرضاني للمستويين الأصليين يساوي الواحد ($m_t = 1$) بالتالي فإن أي شعاع يرد على نقطة من أحد هذين المستويين يجب أن يظهر بعد برونه كأنه يصدر من نقطة من المستوي الثاني تقع على البعد نفسه من المحور الأصلي للعدسة الثخينة. بفرض أن العدسة الثخينة محاطة بوسطين مختلفين في قرينة انكسارهما $n_1 \neq n_2$ نستطيع استنتاج علاقات للعدسات الثخينة مشابهة لقوانين العدسات الرقيقة تعطى كما يلي:

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q''} = \frac{n_1}{f} = \frac{n_2}{f''} \quad (7.2)$$

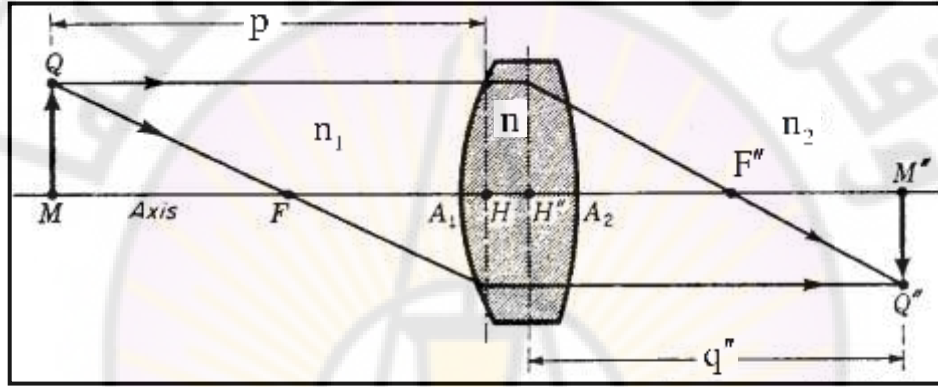
وعندما تكون العدسة محاطة بالهواء ($n_1 = n_2 = 1$) تصبح هذه العلاقة السابقة بالشكل:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q''} = \frac{1}{f} = \frac{1}{f''} \quad (7.3)$$

تطبق العلاقات (7.2) و (7.3) في العدسات الثخينة بالشروط التالية:

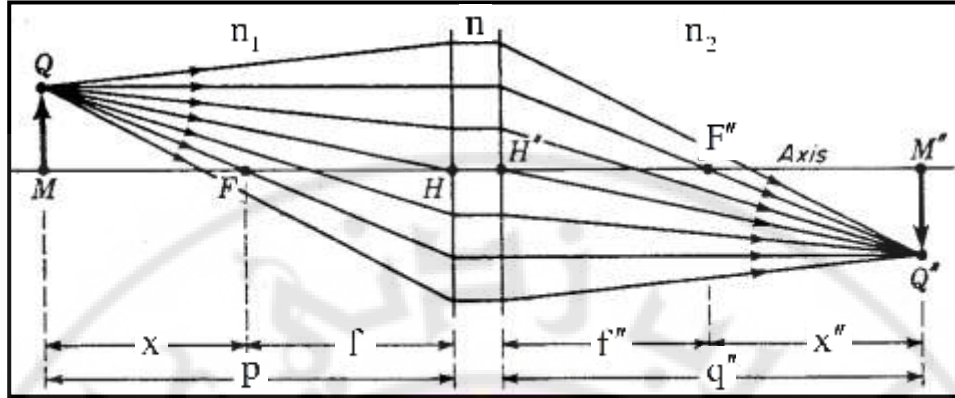
1- يجب قياس كل من بعد الجسم p وبعد الخيال q'' بدءاً من النقطتين الأصليتين H و H'' كما هو مبين في الشكل (7.4). أي إن $p = MH$ وإن $q'' = H''M''$.

2- يجب قياس الأبعاد المحرقة f و f'' بدءاً من النقطتين الأصليتين H و H'' كما هو مبين في الشكل (7.4). أي إن $f = FH$ وإن $f'' = H''F''$.



الشكل (7.4): طريقة الشعاع الموازي لتحديد موقع خيال جسم لعدسة ثخينة.

أما الشكل (7.5) فهو تمثيل مختصر للشكل (7.4) إذ يُلغى السطحين المنحنيين للعدسة ويبقى على المستويين الأصليين للعدسة الثخينة، أي إنه تم تمثيل العدسة الثخينة بمستوييها الأصليين، ويستخدم هذا التمثيل غالباً في حالة الرسم الهندسي لسير الأشعة في العدسات الثخينة.



الشكل (7.5): تمثيل العدسة الثخينة بمستوييها الأصليين، وبيان كيفية تحديد الخيال بالرسم الهندسي.

7.3 – قوانين العدسات الثخينة

لتكن لدينا عدسة ثخينة قرينة انكسار مادتها n محاطة بوسطين قرينة انكسارهما n_1 و n_2 كما في الشكل (7.4) وثخانة هذه العدسة غير مهملة $A_1A_2 = t$ وبعدها المحرقي الجسمي f وبعدها المحرقي الخيالي f'' . وإذا فرضنا هذه العدسة مكونة من جملة كاسرين متتاليين يكون فيه:

f_1 و f_1' البعد المحرقي الجسمي والبعد المحرقي الخيالي لوجه العدسة الأول على التوالي (الكاسر الكروي الأمامي للعدسة).

f_2' و f_2'' البعد المحرقي الجسمي والبعد المحرقي الخيالي لوجه العدسة الثاني على التوالي (الكاسر الكروي الخلفي للعدسة).

سوف نذكر في هذه الفقرة قوانين العدسات الثخينة، وبعض هذه القوانين سوف نكتبه بدلالة الاستطاعة واستخراج بعض هذه القوانين سيكون بملحق لهذا الفصل، وسنقوم بحل بعض المسائل كتطبيق لهذا القوانين.

1- القانون الأول:

$$\frac{n_1}{f} = \frac{n}{f_1'} + \frac{n_2}{f_2''} - \frac{t n_2}{f_1' f_2''} = \frac{n_2}{f''} \quad (7.4)$$

ويكتب بدلالة الاستطاعة بالشكل التالي:

$$P = P_1 + P_2 - \frac{t}{n} P_1 P_2 \quad (7.5)$$

حيث إنَّ

$$P_1 = \frac{n_1}{f_1} = \frac{n}{f_1'}$$

$$P_2 = \frac{n_2}{f_2''} = \frac{n}{f_2'}$$

2- القانون الثاني:

$$A_1 F = -f \left(1 - \frac{1}{f_2'} \right) \quad (7.6)$$

وتكتب هذه المعادلة بدلالة الاستطاعة بالشكل التالي

$$A_1 F = -\frac{n_1}{P} \left(1 - \frac{t}{n} P_2 \right) \quad (7.7)$$

حيث إنَّ

$$P = \frac{n_1}{f} = \frac{n_2}{f''}$$

3- القانون الثالث:

$$A_1 H = +f \frac{t}{f_2'} \quad (7.8)$$

وتكتب هذه المعادلة بدلالة الاستطاعة بالشكل التالي

$$A_1 H = + \frac{n_1}{P} \frac{t}{n} P_2 \quad (7.9)$$

4- القانون الرابع:

$$A_2 F'' = f'' \left(1 - \frac{1}{f_1'} \right) \quad (7.10)$$

وتكتب هذه المعادلة بدلالة الاستطاعة بالشكل التالي

$$A_2 F'' = \frac{n_2}{P} \left(1 - \frac{t}{n} P_1 \right) \quad (7.11)$$

5- القانون الخامس:

$$A_2 H'' = -f'' \frac{t}{f_1'} \quad (7.12)$$

وتكتب هذه المعادلة بدلالة الاستطاعة بالشكل التالي

$$A_2 H'' = - \frac{n_2}{P} \frac{t}{n} P_1 \quad (7.13)$$

مثال (1): ليكن لدينا عدسة ثخينة تتميز بالموصفات التالية. $R_1 = 1.5 \text{ cm}$ ، $R_2 = 1.5 \text{ cm}$ ، $t = 2 \text{ cm}$ ، $n_1 = 1$ ، $n = 1.6$ ، $n_2 = 1.3$. والمطلوب:
(أ)- أوجد البعدين المحرقين لكل من وجهي العدسة كلاً على حدة. (ب)- أوجد البعدين المحرقين للعدسة الثخينة. (ج)- أوجد مواضع النقاط الأصلية H و H'' للعدسة الثخينة.

الحل:

ب- لإيجاد الأبعاد المحرقية لوجهي العدسة، نطبق قوانين الكاسر الكروي، فنكتب قانون الكاسر الكروي بالنسبة للوجه الأول فنجد:

$$\frac{n_1}{f_1} = \frac{n}{f'_1} = \frac{n - n_1}{R_1} = \frac{1.6 - 1}{1.5} = 0.4$$

$$\Rightarrow f_1 = \frac{1}{0.4} = 2.5 \text{ cm} , \quad f'_1 = \frac{1.6}{0.4} = 4 \text{ cm}$$

أما بالنسبة للوجه الثاني نجد الأبعاد المحرّقية الموافقة كما يلي:

$$\frac{n}{f'_2} = \frac{n_2}{f''_2} = \frac{n_2 - n}{R_2} = \frac{1.3 - 1.6}{1.5} = -0.2$$

$$\Rightarrow f'_2 = \frac{1}{-0.2} = -8 \text{ cm} , \quad f''_2 = \frac{1.3}{-0.2} = -6.5 \text{ cm}$$

ت- نجد البعدين المحرّقين للعدسة الثخينة كما يلي:

$$\frac{n_1}{f} = \frac{n_2}{f''} = \frac{n}{f'_1} + \frac{n_2}{f'_2} - \frac{t n_2}{f'_1 f'_2} = \frac{1.6}{4} + \frac{1.3}{-6.5} - \frac{2(1.3)}{4(-6.5)} = 0.3$$

$$\Rightarrow f = \frac{1}{0.3} = 3.333 \text{ cm} , \quad f'' = \frac{1.3}{0.3} = 4.333 \text{ cm}$$

ت- نجد مواضع النقاط الأصلية H و H'' للعدسة الثخينة كما يلي:

$$A_1 F = -f \left(1 - \frac{t}{f'_2} \right) = -3.333 \left(1 - \frac{2}{-8} \right) = -4.166 \text{ cm}$$

$$A_2 F'' = f'' \left(1 - \frac{t}{f'_1} \right) = 4.33 \left(1 - \frac{2}{4} \right) = 2.166 \text{ cm}$$

$$A_1 H = f \frac{t}{f'_2} = 3.333 \left(\frac{2}{-8} \right) = -0.833 \text{ cm}$$

$$A_2 H'' = -f'' \frac{t}{f'_1} = -4.33 \left(\frac{2}{4} \right) = -2.167 \text{ cm}$$

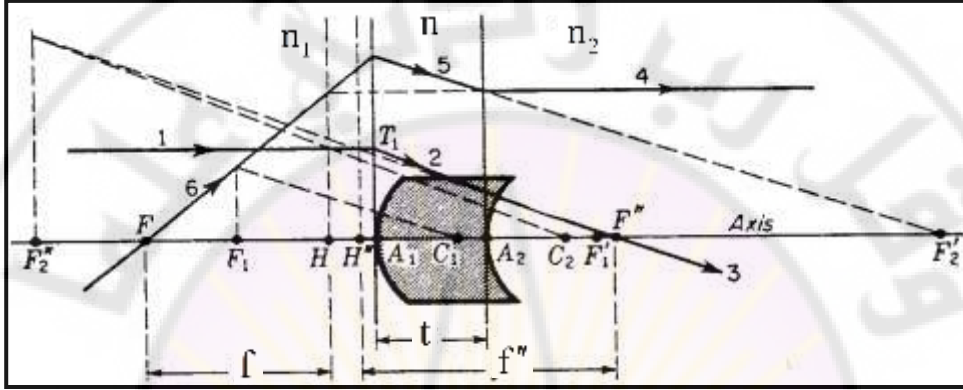
الإشارة الموجبة تمثل المسافة المقاسة إلى يمين نقطة الذروة، والإشارة السالبة للمسافة التي على يسار الذروة. وبالتالي يمكننا التأكد من أجوبتنا السابقة كما يلي:

$$FH = A_1F - A_1H = 4.166 - 0.833 = 3.333 \text{ cm}$$

$$F''H'' = A_2F'' - A_2H'' = 2.167 + 2.167 = 4.334 \text{ cm}$$

إن الحل الهندسي لهذا التمرين ممثل بالشكل (7.6) إذ يبين مكان توضع كل من

النقاط المحرقة F_2'', F_2', F_1', F_1

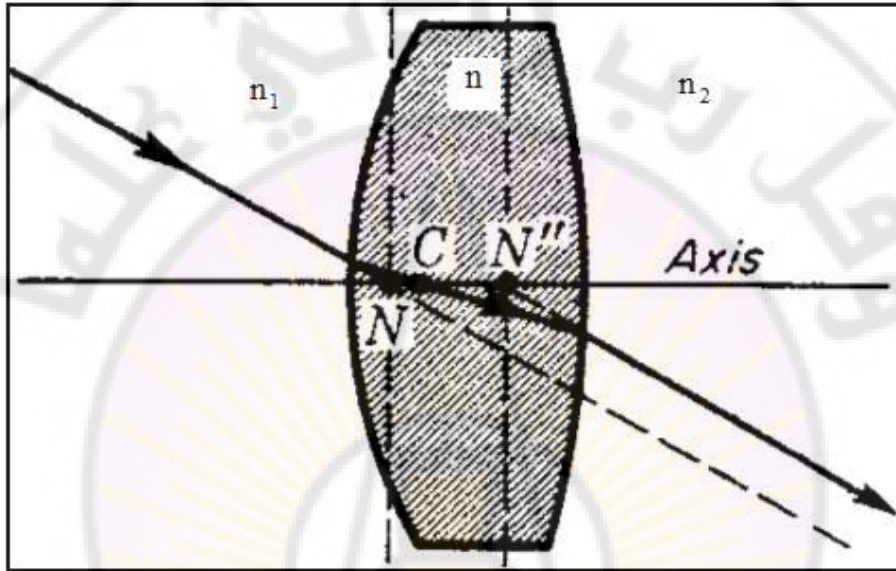


الشكل (7.6): تحديد النقاط المحرقة والنقاط الأصلية هندسياً لعدسة ثخينة.

7.4 – النقطتان العقديتان والمركز البصري في العدسة الثخينة

إذا نظرنا للشكل (7.7) فإننا نلاحظ أن هناك شعاعاً واحداً غير واقع على المحور الأصلي يكون له الاتجاه نفسه في مجال الجسم وفي مجال الخيال، أي إن جزأي هذا الشعاع قبل سقوطه على العدسة وبعد بروزه منها يكونان متوازيين. عند تمديد هذين الجزأين فإنهما يقطعان المحور الأصلي في نقطتين تسميان النقطتين العقديتين (N و N'' حيث N تدعى النقطة العقدية الجسمية و N'' تدعى النقطة العقدية الخيالية) ويسمى المستويان العرضيان الماراً من هاتين النقطتين العقديتين المستويين العقديين. ويتم تحديد المركز البصري للعدسة الثخينة عن طريق رسم مستقيم يصل بين نقطة الورود ونقطة البروز ويقطع هذا المستقيم المحور الأصلي في نقطة تمثل المركز البصري. إذ إن أي شعاع يمر من المركز البصري للعدسة

لا ينحرف وهناك خاصة أخرى للمركز البصري هي أن موضعه يتوقف فقط على انحناء كل من وجهي العدسة وعلى ثخن هذه العدسة ولا يتغير بتغير لون الضوء المستعمل.



الشكل (7.7): النقاط العقدية والمستويات العقدية والمركز البصري لعدسة ثخينة.

الشكل (7.8) يظهر أماكن النقطتين العقديتين N و N'' والنقطتين الأصليتين H و H'' للعدسة الثخينة، وبما إن $n_1 \neq n_2$ بالتالي فالنقطتان العقديتان والنقطتان الأصليتان غير منطبقتين على بعضهما بعضاً. من هذا الشكل نلاحظ مايلي:

1- إن المسافة بين المستويات العقدية تساوي تماماً المسافة بين المستويات الأصلية. أي إن:

$$NN'' = HH'' \quad (7.14)$$

2- إن البعدين المحرقين للعدسة غير متساويين وذلك بسبب أن قرينتي

الانكسار المحيطتين بالعدسة مختلفتان $n_1 \neq n_2$ وبالتالي من الشكل

(7.8) يمكننا استنتاج مايلي:

$$f = FH = N''F'', \quad f'' = H''F'' = FN \quad (7.15)$$

ومن جهة أخرى نجد أن:

$$H''N'' = HN = FN - HF = f'' - f \quad (7.16)$$

أي إن المسافة الفاصلة بين كل نقطة عقدية والنقطة الأصلية الموافقة لها تساوي الفرق بين البعدين المحرقين الجسمي والخيالي للعدسة.

أما إذا كان الوسط نفسه على وجهي العدسة الثخينة، أي إن $n_1 = n_2$ بالتالي تكون $f = f''$ ومنه تصبح العلاقة (7.14) كما يلي: $H''N'' = HN = 0$ أي إن النقطتين العقديتين N و N'' تنطبقان عندئذ على النقطتين الأصليتين H و H'' للعدسة.

ومن ناحية أخرى يمكننا باستخدام الشكل (7.8) إيجاد كتابة علاقة التكبير الخطي العرضاني كما يلي:

$$m_t = \frac{h''}{h} = -\frac{q'' - HN}{p + HN} \quad (17)$$

وفي حال إذا كان الوسط نفسه على وجهي العدسة الثخينة، أي إن $n_1 = n_2$ بالتالي يكون $HN = 0$ ومنه تصبح العلاقة (7.17) كما يلي:

$$m_t = \frac{h''}{h} = -\frac{q''}{p} \quad (7.18)$$

وكذلك باستخدام المعادلة (7.1) والمعادلة (7.16) يمكن كتابة العلاقة التالية:

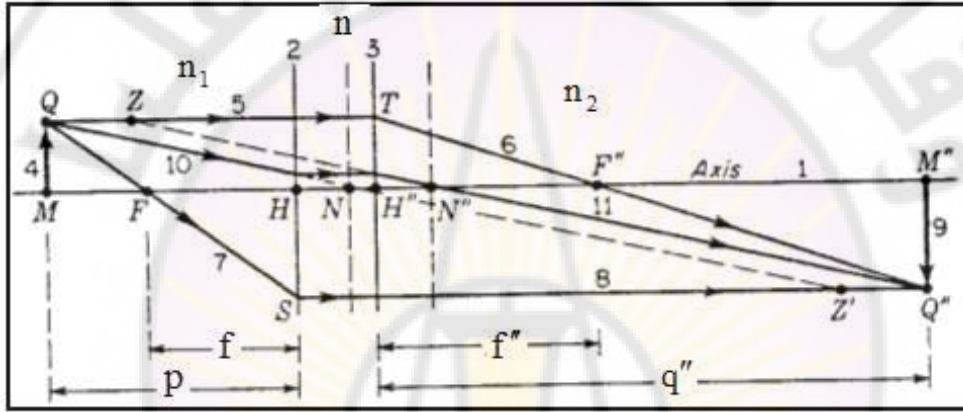
$$HN = f'' \frac{n_2 - n_1}{n_2} \quad (7.19)$$

من الشكل (7.8) ومن المعادلة (7.1) والمعادلة (7.17) يمكن استنتاج المسافة الفاصلة بين الذروة A_1 والنقطة العقدية الجسمية كما يلي:

$$A_1N = A_1H + HN$$

ومنه

$$A_1N = HN + f = f \left(\frac{t}{f'_2} + \frac{n_2 - n_1}{n_1} \right) \quad (7.20)$$



الشكل (7.8): تحديد النقاط والمستويات الأصلية هندسياً لعدسة ثخينة.

مثال (2): أوجد النقاط العقدية لعدسة ثخينة المعطاة في التطبيق العددي السابق.

الحل: لتحديد النقطة العقدية الجسمية N ، نستخدم المعادلة (7.19) و ذلك بالتعويض بالقيم $n_1 = 1$ و $n_2 = 1.3$ والقيمة المحسوبة في التطبيق العددي السابق $f'' = +4.333 \text{ cm}$ فنجد:

$$HN = f'' \frac{n_2 - n_1}{n_2} = 4.333 \left(\frac{1.3 - 1}{1.3} \right) = 1 \text{ cm}$$

وبالتالي فإن كلاً من N و N'' تكونان على بعد 1 cm إلى اليمين من نقطتهما الأصلية الموافقة لكل منهما H و H'' على التوالي.

7.5 – العدسة الثخينة المولفة من عدستين رقيقتين

بفرض لدينا مجموعة عدستين رقيقتين مقربتين متحدة المحور الأصلي L_1 و L_2 والمسافة بينهما t كما في الشكل (7.9). يمكن عدّ جملة العدستين عدسة ثخينة بالتالي لهما المحرقين الخيالي والجسمي F' و F على التوالي والنقطتان الأصليتان H و H'' وبما أن الوسط يحيط بالعدسة نفسه أي $n_1 = n_2$ بالتالي تنطبق النقطتان العقديتان على النقطتين الأصليتين، حيث نرسم للمركزين الهندسيين للعدستين في هذا الشكل بالحرفين A_1 و A_2 . أما في الشكل (7.10) لدينا عدستان إحداها مقربة والأخرى مبعدة. ولكن نلاحظ في هذه الحال أن النقطتين الأصليتين H و H'' تقعان خارج العدستين الرقيقتين، وكذلك نلاحظ أن البعدين المحرقين f و f'' المقاسين بدءاً من النقطتين الأصليتين متساويان بسبب وجود العدستين في وسط واحد هو الهواء.

استناداً إلى قوانين العدسات الثخينة وتطبيقها على العدسات الرقيقة يمكننا حساب إيجاد مواضع النقاط الأساسية لمجموعة العدستين الرقيقتين في الهواء، حيث نعدّ A_1 و A_2 مركزي العدستين الهندسيين وأن f_1 و f_2 بعداهما المحرقين على الترتيب وبالتالي تعطى الاستطاعة كما يلي:

$$P_1 = \frac{n_{L1} - n_1}{R_1} + \frac{n - n_{L1}}{R'_1} = \frac{n_1}{f_1} \quad (7.21)$$

$$P_2 = \frac{n_{L2} - n}{R_2} + \frac{n_2 - n_{L2}}{R'_2} = \frac{n}{f_2} \quad (7.22)$$

حيث R_1 و R'_1 أنصاف أقطار وجهي العدسة الأولى التي لها قرينة انكسار n_{L1} و R_2 و R'_2 أنصاف أقطار وجهي العدسة الثانية التي لها قرينة انكسار n_{L2} ، وأن n_1 و n و n_2 تمثل قرائن انكسار الأوساط المحيطة بالعدستين، كما هو موضح على الشكل (7.9). وفي حالة وجود العدستين الرقيقتين في الهواء، يكون

بالتالي تصبح قوانين العدسات الثخينة في هذه الحالة كما يلي حيث إن $f = f''$. وكذلك تنطبق النقطتان العقديتان على النقطتين الأصليتين. ويتم تعيين البعد المحرقي لجملة العدستين f ومواضع المحرقيين F و F'' والنقطتين الأصليتين H و H'' بالعلاقات التالية:

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

$$\Rightarrow f = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - t}$$

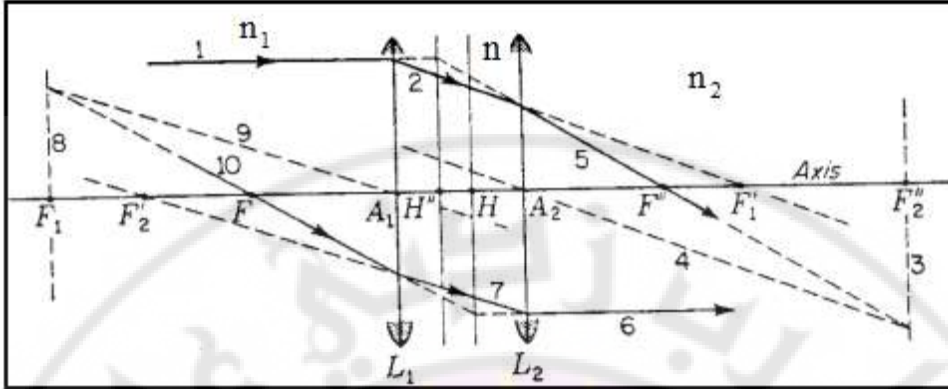
$$A_1 H = \frac{t f_1}{f_1 + f_2 - t}$$

$$A_2 H'' = -\frac{t f_2}{f_1 + f_2 - t}$$

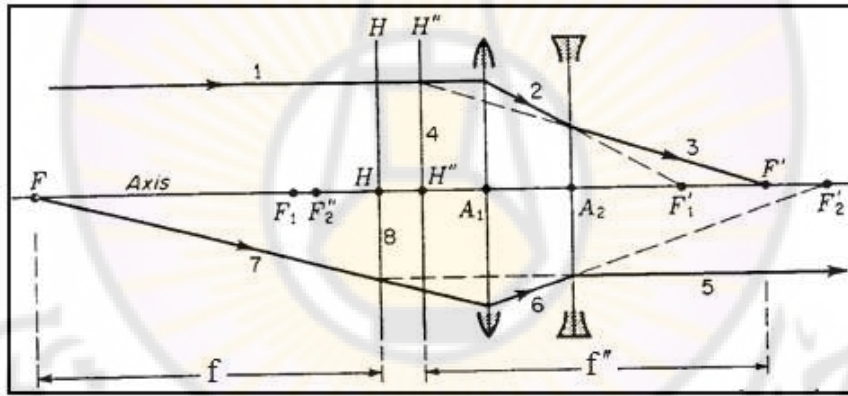
$$A_1 F = -\left(\frac{f_1 f_2 - t f_1}{f_1 + f_2 - t}\right)$$

$$A_2 F'' = \frac{f_1 f_2 - t f_2}{f_1 + f_2 - t}$$

وينتج من هذه العلاقات أن: $H'' A_2 + A_2 F'' = H'' F'' = f''$.



الشكل (7.9): النقاط المحرقة والنقاط الأصلية لجملة مكونة من عدستين رقيقتين.



الشكل (7.10): تطبيق طريقة الشعاع المائل لجملة مكونة من عدسة مقربة وعدسة مبعدة.

مثال 3: فيما يلي تطبيق عددي يوضح كيفية استخدام قوانين العدسة الثخينة من أجل جملة عدستين كما هو موضح في الشكل (7.10). عدسة رقيقة محدبة الوجهين ذات نصف قطر متساويين كل منهما يساوي 4 cm وقرينة انكسارها

مساوية 1.5، توضع هذه العدسة على مسافة 2 cm من عدسة رقيقة مقعرة الوجهين ذات نصفي قطرين متساويين كل منهما يساوي 6 cm وقرينة انكسارها مساوية 1.6. علماً بأن قرائن انكسار الأوساط المحيطة بالعدستين هي على التوالي: $n_1 = 1$ و $n = 1.33$ و $n_2 = 1$. والمطلوب إيجاد مايلي:

أ- الاستطاعة. ب- الأبعاد المحرقة. ج- مواضع النقاط المحرقة. د- مواضع النقاط الأصلية للجملة.

الحل:

أ- باستخدام المعادلتين (7.21) و (7.22) نجد استطاعة كل عدسة كما يلي:

$$P_1 = \frac{1.5 - 1}{0.04} + \frac{1.33 - 1.5}{-0.04} = 12.5 + 4.17 = 16.67 D$$

$$P_2 = \frac{1.6 - 1.33}{-0.06} + \frac{1 - 1.6}{0.06} = -4.45 - 10 = -14.45 D$$

وباستخدام المعادلة (7.5) نجد الاستطاعة الكلية لجملة العدستين:

$$P = 16.67 - 14.45 + 0.015 \times 16.67 \times 14.45 = 5.84 D$$

ب- باستخدام المعادلات $P_1 = \frac{n_1}{f_1} = \frac{n}{f_1'}$ و $P_2 = \frac{n_2}{f_2} = \frac{n}{f_2'}$ نجد الأبعاد

المحرقة لجملة العدستين كما يلي:

$$f = \frac{n_1}{P} = \frac{1}{5.84} = 0.171 m = 17.1 cm$$

$$f'' = \frac{n_2}{P} = \frac{1}{5.84} = 0.171 m = 17.1 cm$$

ج و د- باستخدام قوانين العدسة الثخينة نجد مواضع النقاط المحرقة ومواضع النقاط الأصلية للجملة كما يلي:

$$A_1F = -\frac{1}{5.84}(1 + 0.015 \times 14.45) = -20.8 \text{ cm}$$

$$A_1H = \frac{1}{5.84}(0.015) \times (-14.45) = -3.7 \text{ cm}$$

$$A_2F'' = \frac{1}{5.84}(1 - 0.015 \times 16.67) = 12.8 \text{ cm}$$

$$A_2H'' = -\frac{1}{5.84}(0.015 \times 16.67) = -4.3 \text{ cm}$$

وللتحقق من صحة هذه النتائج نلاحظ أن الفرق بين المقدارين A_1H و A_1F يعطي البعد المحرقي الجسمي $FH = 17.1 \text{ cm}$ ، وبالطريقة نفسها فإن مجموع كل من A_2H'' و A_2F'' يعطي البعد المحرقي الخيالي أي $H''F'' = 17.1 \text{ cm}$.

7.6 - مجموعة العدسات الثخينة

ليس من السهولة دراسة جملة مكونة من مجموعة عدستين ثخينتين إلا أنه يمكن حلها باستخدام المبادئ السابقة نفسها وهي أن كل عدسة ينبغي تمثيلها بزواج من المستويات الأصلية أي H_1 و H_1'' للعدسة الأولى و H_2 و H_2'' للعدسة الثانية. ومن ثم يجب دمج هذين الزوجين لإيجاد زوج وحيد H و H'' لمجموعة العدستين وحساب البعدين المحرقين. بشكل مشابه للشكل (7.9) والشكل (7.10) يمكن إيجاد مواضع F و F'' و H و H'' لجملة العدستين مع الأخذ بالحسبان أن التكبير ما بين المستويين الأصليين موجب ويساوي الواحد.

أسئلة

- 1- عرّف العدسة الثخينة ونقاطها الأساسية التالية: النقطتان المحرقتان والنقطتان الأصليتان والنقطتان العقديتان.
- 2 - عرّف المستويين الأصليين لعدسة ثخينة وبين خواصهما.
- 3- عرّف النقطتين العقديتين لعدسة ثخينة وبين كيف يمكن إيجاد موضعيهما بالرسم.
- 4- ماهو الشرط اللازم حتى تنطبق النقطتان العقديتان لعدسة ثخينة على نقطتيها الأصليتين؟ اشرح هذا الشرط.
- 5- ما هو الشرط اللازم حتى يتساوى البعدان المحرقيان لعدسة ثخينة ؟ اشرح الشرط اللازم.

المسائل

- 7.1- عدسة متساوية تحدب الوجهين، نصف قطر انحناء كلٍ منهما 4 cm، وثخنها 3.6 cm وهي مصنوعة من زجاج قرينة انكساره 1.8 وبفرض أن هذه العدسة مغمورة بالهواء أي إن $n_1 = n_2 = 1$ احسب: أ- بعدها المحرقي، ب- استطاعتها، ج - الأبعاد بين رأسيها وما يوافقهما من المحرقين والنقطتين الأصليتين.
- 7.2- حل المسألة السابقة برسم سير الأشعة وإيجاد مواضع المحرقين F و F'' والنقطتين الأصليتين H و H'' .
- 7.3- عدسة ثخينة نصف قطر انحناء أحد وجهيها $R_1 = -8 \text{ cm}$ ونصف قطر انحناء الوجه الثاني $R_2 = -4 \text{ cm}$ وثخنها 3.23 cm وقرينة انكسارها 1.615.

احسب: آ- بعدها المحرقي. ب- استطاعتها ج- الأبعاد بين رأسيها وما يوافقهما من المحرقين والنقطتين الأصليتين.

7.4- عدسة زجاجية ثخنها 4.8 cm وقرينة انكسارها 1.6 ونصفا قطري انحناء وجهيها $R_1 = +6 \text{ cm}$ و $R_2 = +5 \text{ cm}$ يُجعل الوجه الأول (R_1) على تماس مع سائل قرينته 1.2 والوجه الثاني (R_2) على تماس مع سائل آخر قرينته 2. احسب:

آ- البعدين المحرقيين f و f'' للعدسة.

ب- استطاعة العدسة.

ج- أبعاد رأسي العدسة عما يوافقهما من المحرقين والنقطتين الأصليتين والنقطتين العقديتين.

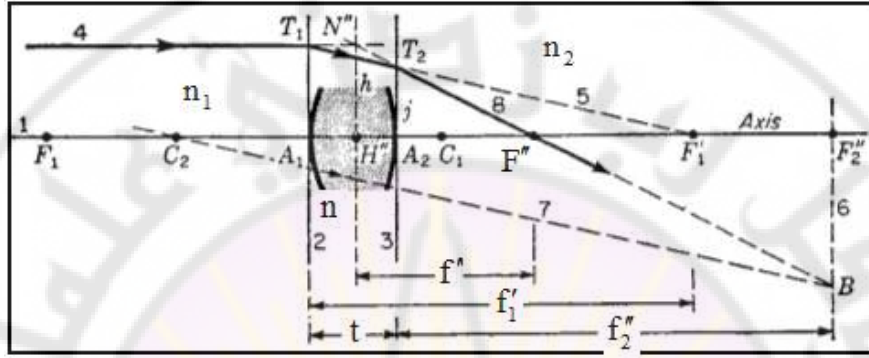
7.5- عدستان رقيقتان $f_1 = 10 \text{ cm}$ و $f_2 = -10 \text{ cm}$ جُعلتا في الهواء بحيث تفصل بينهما مسافة 5 cm. احسب: آ- البعد المحرقي لمجموعة العدستين. ب- استطاعة جملة العدستين. ج- أبعاد محرقها ونقطتيها الأصليتين عن كل من مركزي العدستين.

7.6- عدستان رقيقتان مقربتان مغمورتان في الهواء لهما المحور نفسه. البعد المحرقي للأولى f_1 يساوي 20 cm، والبعد المحرقي للثانية f_2 يساوي 10 cm، تفصل بينهما مسافة 5 cm، وضع جسم على بعد 24 cm من الأولى. أ- استخدم قوانين العدسة الرقيقة لإيجاد الخيال الذي تكوّنه جملة العدستين للجسم المذكور وكذلك التكبير الخطي العرضاني. ب- بفرض أن جملة العدستين عبارة عن عدسة ثخينة، استخدم قوانين العدسة الثخينة للإجابة عن الطلب (أ).



ملحق للفصل السابع استخراج بعض قوانين العدسة الثخينة

سوف نستخدم الشكل (7.16) لاستخراج قوانين العدسة الثخينة الآتية الذكر.



الشكل (7.16): سير الأشعة في عدسة ثخينة بطريقة الشعاع المائل

فلإيجاد عبارة A_2H'' و عبارة A_2F'' نتبع ما يلي:

من المثلثين قائمي الزاوية $T_2A_2F_1'$ و $T_1A_1F_1'$ (الشكل (7.16)) يمكننا كتابة ما يلي:

$$\frac{A_1F_1'}{A_1T_1} = \frac{A_2F_1'}{A_2T_2}$$

أو:

$$\frac{f_1'}{h} = \frac{f_1' - t}{j} \quad (7.23)$$

ومن المثلثين قائمي الزاوية و المتشابهين $N''H''F''$ و $T_2A_2F_1'$ ، نستطيع كتابة العلاقة التالية:

$$\frac{H''F''}{H''N''} = \frac{A_2F''}{A_2T_2}$$

أو:

$$\frac{f''}{h} = \frac{f'' - H''A_2}{j} \quad (7.24)$$

وبحل جملة المعادلتين (7.23) و (7.24) نحصل على ما يلي:

$$\frac{f'_1 - t}{f'} = \frac{f'' - H''A_2}{f''}$$

أو:

$$H''A_2 = f'' \frac{t}{f'_1}$$

$$H''A_2 = f'' \frac{t}{f'_1}$$

ومنه نحصل على العلاقة نفسها (7.12) كما يلي:

$$A_2H'' = -f'' \frac{t}{f'_1} \quad (7.25)$$

ويمكن أن نكتب العلاقة (7.25) بدلالة استطاعة العدسة باستخدام العلاقات التالية:

$$P_1 = \frac{n_1}{f_1} = \frac{n}{f'_1} , \quad P_2 = \frac{n_2}{f''_2} = \frac{n}{f'_2} , \quad P = \frac{n_1}{f} = \frac{n_2}{f''} \quad (7.26)$$

ومنه نصل إلى العلاقة نفسها (7.13) التالية:

$$A_2H'' = -\frac{n_2}{P} \frac{t}{n} P_1$$

للحصول على عبارة A_2F'' نتبع ما يلي: من الشكل (7.16) يمكن ملاحظة أن:
 $A_2F'' = f' + A_2H''$ فبتعويض المعادلة (7.25) في هذه المعادلة نحصل
 على العلاقة نفسها (7.10) كما يلي:

$$A_2F'' = f'' - f'' \frac{t}{f_1'} \quad (7.27)$$

ويمكن كتابة هذه العلاقة بدلالة الاستطاعة بالشكل:

$$A_2F'' = + \frac{n_2}{P} \left(1 - \frac{t}{n} P_1 \right) \quad (7.28)$$

من المناسب في بعض التطبيقات استخدام مصطلح يدعى بالاستطاعة الفعالة P_V
 للعدسة الثخينة والتي تعطى بالعلاقة التالية:

$$P_V = \frac{1}{A_2F''} \quad (7.29)$$

وبتعويض العلاقة (7.28) في العلاقة (7.29) وبفرض أن العدسة محاطة بالهواء
 (أي $n_1 = n_2 = 1$) نحصل على ما يلي:

$$P_V = \frac{P}{1 - t \frac{P_1}{n}} \quad (7.30)$$

وبالطريقة نفسها نعرّف الاستطاعة المحايدة بالعلاقة:

$$P_n = \frac{1}{A_1F} \quad (7.31)$$

و باستخدام المعادلة (7.6) وبفرض أن العدسة محاطة بالهواء (أي $n_1 = n_2 = 1$)
 تصبح هذه العلاقة بالشكل:

$$P_n = \frac{P}{1 - t \frac{P_2}{n}} \quad (7.32)$$

وبالطريقة نفسها يمكننا استخراج كل من عبارة A_1H وعبارة A_1F المعطاة بالعلاقات (7.6) و (7.8) أو (7.7) و (7.9) إذ يجب علينا في هذه الحالة أن نرسم شكلاً آخر ونتبع الخطوات نفسها، التي قمنا بها عند رسم الشكل (7.16) وذلك بعد القيام بتدوير العدسة، وبالتالي نستطيع أن نحدد عليه المحرق الأصلي الجسمي F و النقطة الأساسية H .

إيجاد صيغة كل من f و f'' نتبع ما يلي

لإيجاد العلاقة المعبرة عن البعد المحرقي الجسمي f نطبق قانون الكاسر الكروي على الكاسر الكروي الثاني، بعد أن نعد الخيال الذي يشكله الكاسر الأول هو جسم للكاسر الثاني ومن الشكل (7.16) نجد:

بعد الجسم عن الكاسر الكروي الثاني: $p = -A_2F'_1 = -(f'_1 - t)$ وضعنا إشارة السالب لأن الجسم يقع على يمين الكاسر الكروي الثاني فهو جسم وهمي.

بعد الخيال عن الكاسر الكروي الثاني: $q = A_2F'' = f'' \left(1 - \frac{t}{f'_1}\right)$

نطبق الآن قانون الكاسر الكروي

$$\frac{n}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2}{f_2''}$$

$$\frac{n}{-(f'_1 - t)} + \frac{n_2}{f'' \left(1 - \frac{t}{f'_1}\right)} = \frac{n_2}{f_2''}$$

أو:

$$\frac{n}{f_1' - t} = n_2 \left(\frac{f_1'}{f_2''(f_1' - t)} - \frac{1}{f_2''} \right)$$

وبالتالي

$$n = n_2 \left(\frac{f_1'}{f_2''} - \frac{f_1'}{f_2''} + \frac{t}{f_2''} \right)$$

بالقسمة على f_1' نجد

$$\frac{n}{f_1'} = \frac{n_2}{f_2''} - \frac{n_2}{f_2''} + \frac{n_2 t}{f_1' f_2''}$$

ومنه

$$\frac{n_2}{f_2''} = \frac{n}{f_1'} + \frac{n_2}{f_2''} - \frac{n_2 t}{f_1' f_2''}$$

ولكن لدينا من قانون الكاسر الكروي عند تطبيقه على كل كاسر على حده:

$$\frac{n_1}{f_1} = \frac{n_2}{f_2''} , \quad \frac{n}{f_2'} = \frac{n_2}{f_2''} , \quad \frac{n_1}{f_1} = \frac{n}{f_1'}$$

و بالتالي نحصل على العلاقة نفسها (7.4) التالية:

$$\frac{n_1}{f} = \frac{n}{f_1'} + \frac{n_2}{f_2''} - \frac{t n_2}{f_1' f_2''} = \frac{n_2}{f_2''}$$



الفصل الثامن: اصطلاحات الإشارة وفقاً لمفهوم المنظومة

الضوئية

8.1 - تعريف المنظومة الضوئية:

8.2 - تعريف فضاء الجسم الحقيقي والجسم الوهمي وفضاء

الخيال الحقيقي والخيال الوهمي للمنظومة الضوئية:

8.3 - تحديد طبيعة الجسم والخيال في الأوساط الكاسرة

للضوء (أو المنظومات الضوئية الكاسرة للضوء):

8.4 - تحديد طبيعة الجسم والخيال في الأوساط العاكسة

للضوء (أو المنظومات الضوئية العاكسة للضوء):



الفصل الثامن: اصطلاحات الإشارة وفقاً لمفهوم المنظومة

الضوئية

لقد درسنا سابقاً تشكل الأخيلة بالانعكاس في المرايا المستوية والمرايا الكروية (مقعرة – محدبة) وتشكل الأخيلة بالانكسار في الأوساط الكاسرة للضوء (الكاسر المستوي والكاسر الكروي (محدب – مقعر) وفي العدسات الرقيقة والثخينة). وحددنا اصطلاحات الإشارة لدراسة طبيعة الخيال وطبيعة الجسم. في هذه الفقرة سوف نعرض طريقة أخرى معتمدة ببعض المراجع في تحديد طبيعة الأجسام والأخيلة من حيث كونها حقيقة أو وهمية وفقاً لمفهوم المنظومة الضوئية. حيث سنقوم بالبداية بتعريف المنظومة الضوئية ومن ثم سوف نعرف فضاء الجسم الحقيقي وفضاء الجسم الوهمي وفضاء الخيال الحقيقي وفضاء الخيال الوهمي وكيفية تحديد طبيعة الجسم والخيال في الأوساط الكاسرة للضوء (المنظومات الضوئية الكاسرة للضوء) والأوساط العاكسة للضوء (المنظومات الضوئية العاكسة للضوء).

8.1 - تعريف المنظومة الضوئية:

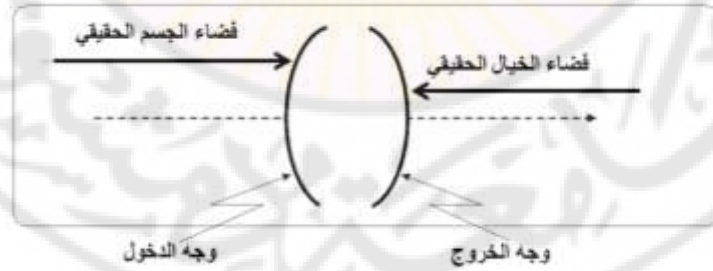
تعرف المنظومة الضوئية بأنها مجموعة من الأوساط المتجانسة والمتماثلة المناحي والشفافة، محددة بسطوح شفاقة (كواسر مستوية، كروية، اسطوانية ...) أو سطوح عاكسة (مرايا مستوية، كروية ...) والتي تشكل أخيلة (حقيقية أو وهمية) لأجسام (حقيقية أو وهمية). تمتلك أغلب المنظومات الضوئية (عدسات، كواسر كروية ومرايا كروية) وكذلك المنظومات الضوئية الموجودة في الطبيعة كالعين مثلاً أو المصنعة كالتلسكوب محور تناظر دوراني والتي سوف ندرسها لاحقاً في هذا

المقرر، ونعرف المحور الضوئي للمنظومة الضوئية بالمحور المنطبق على محور التناظر الدوراني (تم تسميته سابقاً بالمحور الأصلي)، حيث نستخدم الجبهة الموجبة للمحور الضوئي باتجاه انتشار الأشعة الضوئية. كما ذكرنا سابقاً فإن أي شعاع ضوئي يرد منطبقاً على المحور الضوئي لا يغير مساره فإما أن ينعكس على نفسه كما في حالة المرايا أو أنه لا ينكسر في حالة الأوساط الكاسرة للضوء.

8.2 - تعريف فضاء الجسم الحقيقي والفضاء الوهمي وفضاء

الخيال الحقيقي والخيال الوهمي للمنظومة الضوئية:

نعرف فضاء الجسم الحقيقي بأنه الجزء من الفضاء الذي يقع أمام وجه الدخول (الجهة الأمامية أو جهة ورود الضوء) للمنظومة الضوئية (انظر الشكل (8.1))، وبالتالي يعتبر الجسم حقيقياً بالنسبة للمنظومة الضوئية إذا تواجد في فضاء الجسم الحقيقي وإلا يعتبر جسماً وهمياً. كما نعرف فضاء الخيال الحقيقي (الشكل (8.1)) بأنه الجزء من الفضاء الذي يقع بعد وجه الخروج (الجهة الخلفية) للمنظومة الضوئية. وبالتالي نعتبر الخيال حقيقياً بالنسبة للمنظومة الضوئية إذا تواجد في فضاء الخيال الحقيقي وإلا يعتبر خيالياً وهمياً.

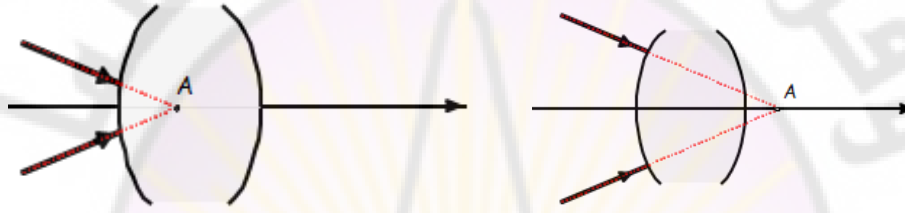


الشكل (8.1) فضاء الجسم الحقيقي وفضاء الخيال الحقيقي

8.3 - تحديد طبيعة الجسم والخيال في الأوساط الكاسرة

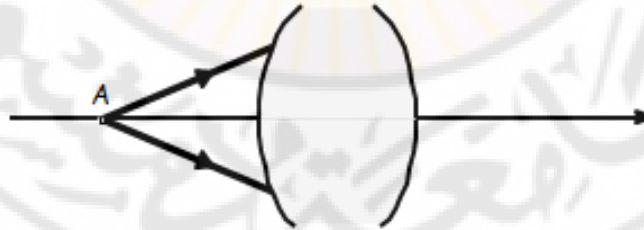
للضوء (أو المنظومات الضوئية الكاسرة للضوء):

الشكل (8.2) يوضح بعض الحالات التي يعتبر فيها الجسم وهمياً في الأوساط الكاسرة للضوء. فالنقطة الجسمية A التي تتشكل من تقاطع ممددات الأشعة الضوئية المتقاربة والواردة على سطح الجهة الأمامية للمنظومة لا تقع في فضاء الجسم الحقيقي وبالتالي تعتبر A نقطة جسمية وهمية (جسم وهمي).



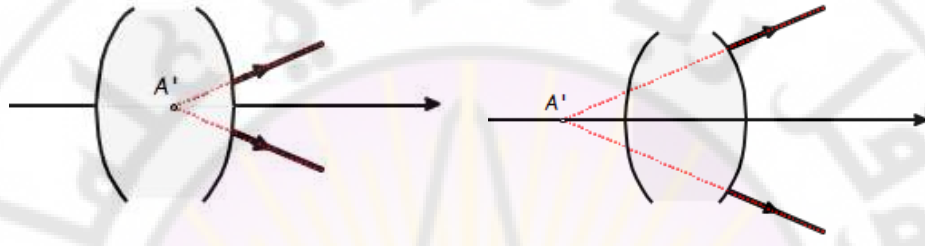
الشكل (8.2) بعض حالات التي يكون فيها الجسم وهمياً

وتكون النقطة A نقطة جسمية حقيقية (جسم حقيقي) إذا وقعت في فضاء الجسم الحقيقي (الجهة الأمامية أو جهة ورود الضوء) انظر الشكل (8.3) حيث أن أشعة الضوء تتبثق منها واردة على سطح المنظومة الضوئية الأمامي.



الشكل (8.3) النقطة A نقطة جسمية حقيقية (جسم حقيقي)

أما الشكل (8.4) يوضح بعض الحالات التي يعتبر فيها الخيال وهمياً في الأوساط الكاسرة للضوء. فالنقطة الخيالية A' التي تتشكل من تقاطع ممددات الأشعة الضوئية المتباعدة النافذة من سطح الجهة الخلفية للمنظومة لا تقع في فضاء الخيال الحقيقي وبالتالي تعتبر A' نقطة خيالية وهمية (خيال وهمي).



الشكل (8.4) بعض الحالات التي يكون فيها الخيال وهمياً

وتكون النقطة A' نقطة خيال حقيقية (خيال حقيقي) إذا وقعت في فضاء الخيال الحقيقي (الجهة الخلفية للمنظومة الضوئية) (انظر الشكل (8.5)) وبالتالي فإن الأشعة الضوء النافذة تلتقي في هذه النقطة.



الشكل (8.5) نقطة خيال حقيقية (خيال حقيقي)

8.4 - تحديد طبيعة الجسم والخيال في الأوساط العاكسة

للضوء (أو المنظومات الضوئية العاكسة للضوء):

تجدر الإشارة هنا إلى أنه في حالة المرايا ينطبق فضاء الجسم الحقيقي وفضاء الخيال الحقيقي على بعضهما ويقعان أمام المرآة بالإضافة إلى ذلك يكون وجه الدخول للمنظومة الضوئية منطبق على وجه الخروج. إذا وقع الجسم A أمام المرآة (المشار إليه في الشكل (8.3)) أي أنه يقع في فضاء الجسم الحقيقي فيكون الجسم A حقيقي. وإذا وقع الخيال A' أمام المرآة (المشار إليه في الشكل (8.5)) أي أنه يقع في فضاء الخيال الحقيقي فيكون الخيال A' عندها خيال حقيقي. أما إذا وقع الجسم A خلف المرآة (كما هو مشار إليه في الشكل (8.2)) أي أنه يقع في فضاء الجسم الوهمي فيكون عندها الجسم A وهمي. وإذا وقع الخيال A' خلف المرآة (كما هو مشار إليه في الشكل (8.4)) أي أنه يقع في فضاء الخيال الوهمي فيكون عندها الخيال A' وهمي. بالنتيجة نستطيع تلخيص ما سبق بأن الجسم والخيال حقيقيان إذا وقعا أمام المرآة ويكونان وهميان إذا وقعا خلف المرآة.



الفصل التاسع: الحظارات

9.1 - حظار الحقل وحظار المنفذ:

9.2 - بؤبؤ الدخول وبؤبؤ الخروج:

9.3 - الحظار الأمامي:

9.4 - الحظار بين عدستين:

9.5 - عدستان من دون حظار:

9.6 - حقل الرؤية:

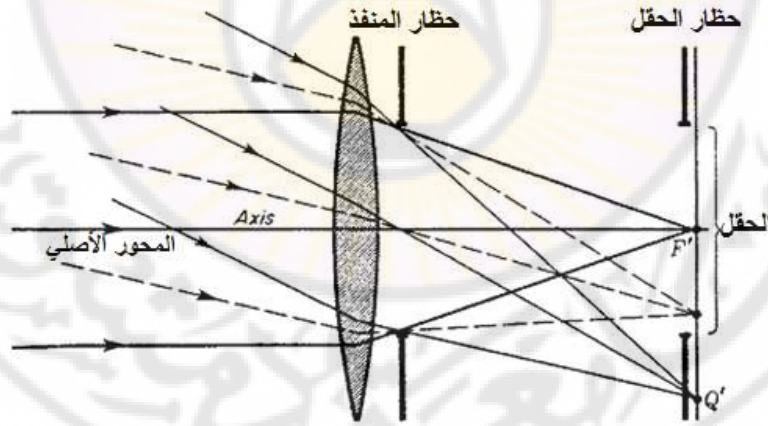


الفصل التاسع: الحظارات

يُعرف الحظار بأنه حاجز ذو فتحة. وكثيراً ما يهمل تأثير الحظار في الضوء الهندسي بالرغم من أهميته خصوصاً عند تحديد أبعاد الخيال ووضوحه. وسنعرّف موضوعاً مهماً جداً من الناحية العملية هو حقل الرؤية الذي يحدد المقدار من سطح الجسم الواسع الذي يمكن رؤيته من خلال جملة بصرية.

9.1 - حظار الحقل وحظار المنفذ:

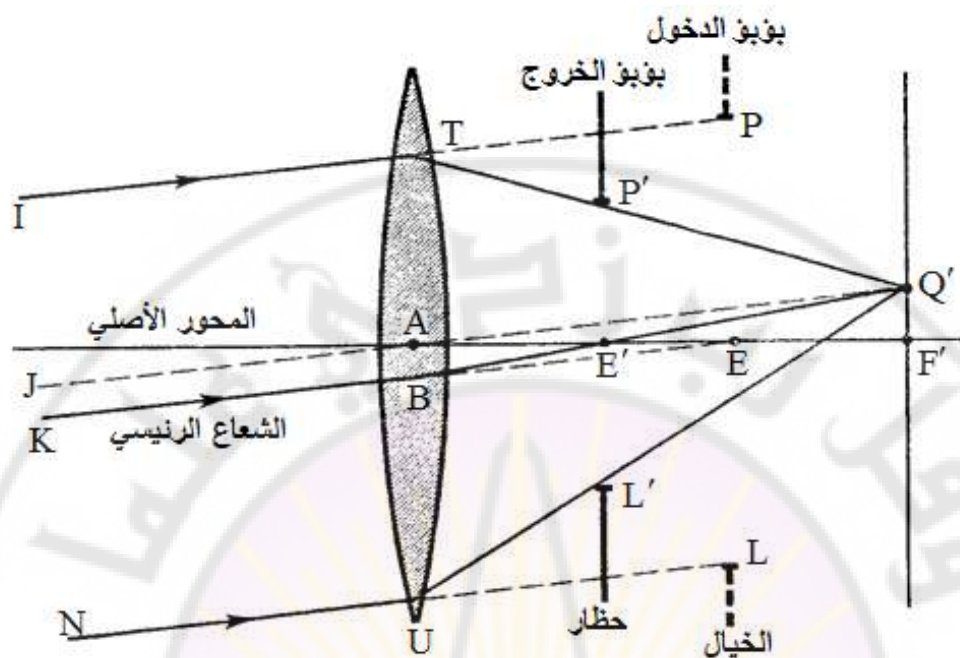
نلاحظ من الشكل (9.1) أنه يحتوي على عدسة وحيدة يليها حظاران، الحظار القريب من العدسة يدعى حظار المنفذ (أو حظار الفتحة) والبعيد يدعى حظار الحقل. نلاحظ أن حظار المنفذ الغاية منه تحديد حجم الحزمة الضوئية (كمية الضوء) التي يمكن أن تصل إلى أي نقطة من الخيال. في حيت يقع حظار الحقل في المستوي المحرقي للعدسة ويحدد حجم الخيال.



الشكل (9.1): حظار الحقل وحظار المنفذ.

9.2 - بؤبؤ الدخول وبؤبؤ الخروج:

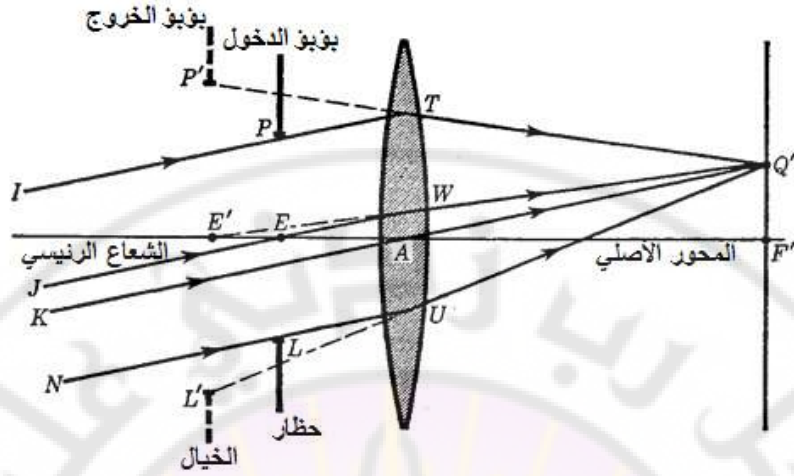
يوضح الشكل (9.2) بؤبؤ الدخول (الخطار PEL) وبؤبؤ الخروج (الخطار $P'E'L'$) لعدسة رقيقة مقربة. نلاحظ من هذا الشكل أن الخطار $P'E'L'$ يحدد أشعة الخيال. ونلاحظ أيضاً من هذا الشكل أن خيال الخطار $P'E'L'$ يقع عند الموضع PEL (مرسوم بخط منقط في الشكل). وبما أن $P'E'L'$ يقع ضمن المستوي المحرق فإن خياله PEL يقع في منطقة الجسم وهو وهمي وصحيح. من الشكل (9.2) يمكن تعريف الشعاع الرئيسي بأنه أي شعاع يرد من منطقة الجسم ماراً من مركز بؤبؤ الدخول، وبعد أن ينكسر هذا الشعاع يمر أيضاً من مركز بؤبؤ الخروج، ونادراً ما يمر الشعاع الرئيسي في أية آلة بصرية من مركز أية عدسة فيها. إن النقطتين E و E' اللتين يقطع الشعاع الرئيس عندهما محور الآلة البصرية تسميان على التوالي نقطة بؤبؤ الدخول ونقطة بؤبؤ الخروج على التوالي، والنقطة الأولى كما سنرى ذات أهمية خاصة في تحديد حقل الرؤية.



الشكل (9.2): بؤبؤ الدخول (الحظار PEL) وبؤبؤ الخروج (الحظار $P'E'L'$)
لعنسة رقيقة مقربة.

9.3 - الحظار الأمامي:

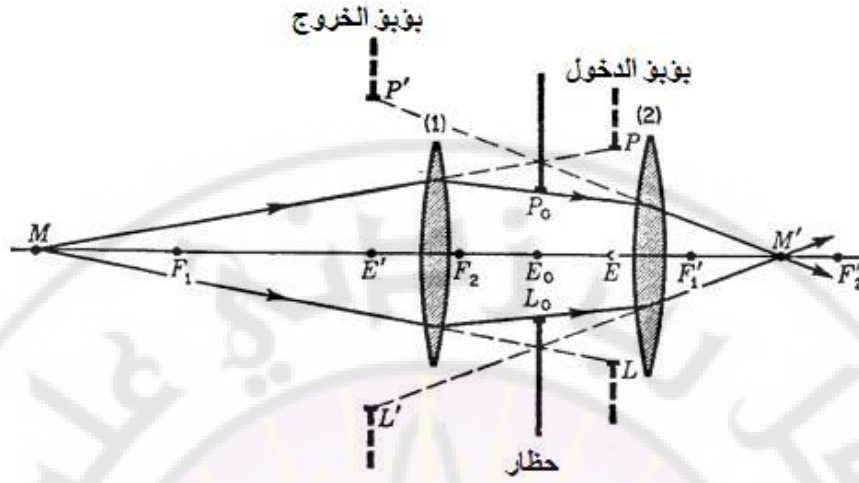
في بعض الحالات (آلات التصوير مثلاً) يوضع حظار أمام العدسة ويدعى بالحظار الأمامي، وفي حال وضعه خلف العدسة عندها يدعى بالحظار الخلفي. فالغاية من الحظار الأمامي في آلات التصوير تحسين الصورة المتشكلة على فلم التصوير. نلاحظ من الشكل (9.3) أن الحجم الصغير للحظار الأمامي PEL وموقعه في منطقة الجسم يجعلانه بمثابة بؤبؤ الدخول، وأن خيال هذا الحظار يقع في منطقة الخيال، حيث يشكل بؤبؤ الخروج.



الشكل (9.3): الحظار الأمامي للعدسة.

9.4 - الحظار بين عدستين:

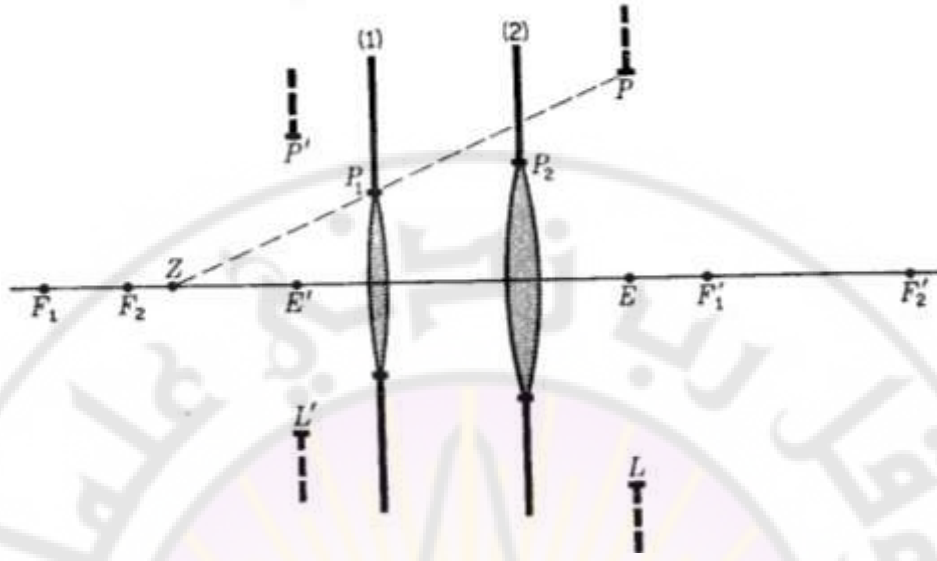
الشكل (9.4) يوضح حالة عدستين رقيقتين يفصل بينهما حظار ($P_0E_0L_0$) والذي يدعى أحياناً حظار الحدقة. إن بؤبؤ الدخول لهذه الجملة هو بالتعريف خيال الحظار الذي تشكله العدسة (1) وهذا الخيال وهمي وصحيح ويقع عند PEL . وبالمثل فإن بؤبؤ الخروج للجملة كاملة هو بالتعريف خيال الحظار الذي تشكله العدسة (2)، وهذا الخيال الواقع عند $P'E'L'$ هو أيضاً وهمي وصحيح. إن بؤبؤ الدخول PEL يقع في منطقة الجسم بالنسبة للعدسة في حين يقع الحظار $P_0E_0L_0$ في منطقة الخيال بالنسبة للعدسة (1) وفي منطقة الجسم بالنسبة للعدسة (2). أما بؤبؤ الخروج فيقع في منطقة الخيال بالنسبة للعدسة (2).



الشكل (9.4): الحظار بين عدستين.

9.5 - عدستان من دون حظار:

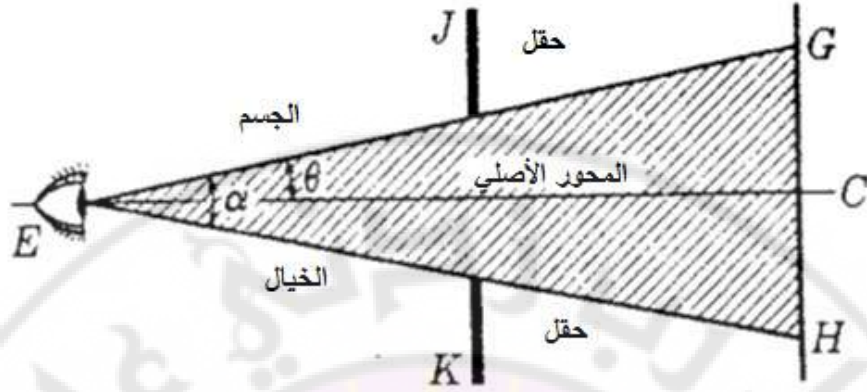
الشكل (9.5) يبين أن إطار أية عدسة في الجملة يقوم مقام الحظار، وهذا الشكل يتضمن عدستين (1) و (2) مع خياليهما المتبادلين اللذين يشكلان حظارين ممكنين. بفرض أن P_1 حظار في منطقة الجسم فيكون خياله في العدسة (2) يقع في منطقة الخيال الأخير. وإذا نظرنا إلى P_2 على أنها حظار في منطقة الخيال فإن خيالها P في العدسة (1) يقع في منطقة الجسم الأول، وبالتالي يوجد لدينا بؤبؤا دخول ممكنان P_1 و P في منطقة الجسم لجملة العدستين، وبؤبؤا خروج ممكنان P_2 و P' في منطقة الخيال للجملة. فمن أجل أي نقطة M واقعة على محور الجملة على يسار Z يصبح الحظار P_1 هو الحظار الذي يحدد الأشعة فهو إذن بؤبؤ الدخول للجملة وخياله P' يصبح بؤبؤ الخروج.



الشكل (9.5): إطار أي عدسة يمكن أن يكون حظار الفتحة للجملة.

9.6 - حقل الرؤية:

الشكل (9.6) يمثل حقل الرؤية عندما ننظر إلى منظر بعيد من خلال نافذة إذ إنَّ حقل رؤية ما في الخارج يتحدد بأبعاد النافذة وبموضع الناظر، تمثل E من هذا الشكل موضع عين الناظر وتمثل JK النافذة في حين نرى المنظر عند GH . في هذا التمثيل البسيط تُولف النافذة حظار الحقل، وعندما يقترب الناظر من النافذة يزداد الحقل الزاوي α ويضيق عندما يبتعد الناظر. ومن المؤلف عملياً في الأدوات البصرية أن يتعين حقل الرؤية بدلالة الزاوية α مقدرة بالدرجات. إن الزاوية θ التي تصنعها الأشعة الطرفية المخترقة للجملة مع محورها الأصلي تدعى زاوية نصف الحقل، وهي تحدد عرض ما يمكن أن يرى من الجسم. إن حقل الجسم هذا يقع ضمن الزاوية 2θ ، وهو بهذا المعنى شأنه شأن حقل الخيال الذي عرضه الزاوي α .



الشكل (9.6): حقل الرؤية.

أسئلة من الفصل الثامن:

- 1- عرّف حظار الحقل وحظار المنفذ وبين وظيفة كل منهما.
- 2- عرّف بؤبؤ الدخول وبؤبؤ الخروج وبين العلاقة بينهما.
- 3- عرّف الشعاع الرئيسي ونقطة بؤبؤ الدخول.
- 4- عرّف حقل الرؤية لأداة ضوئية.



الفصل العاشر: الزيوغ

10.1 - تعريف الزيوغ في العدسات والمرآيا بحالة ضوء وحيد اللون وطرائق إصلاحها:

10.2 - حالات النقطة الكاملة (اللازيغية) في الأدوات الضوئية ذات الفتحات الكبيرة

10.3 - أنواع الزيوغ

10.3.1 - أولاً: الزيوغ الهندسية

10.3.1.1 - زيوغ الفتحة

10.3.1.2 - زيوغ الميل:

10.4 - ثانياً: الزيوغ اللونية

10.4.1 - أنواع الزيوغ اللونية في العدسات:

10.4.2 - إصلاح الزيوغ اللونية:

10.4.3 - شرط اللونية في حالة عدستين رقيقتين متلاصقتين:

10.4.4 - شرط اللونية في حالة عدستين رقيقتين مصنوعتين من مادة واحدة ومنفصلتين:



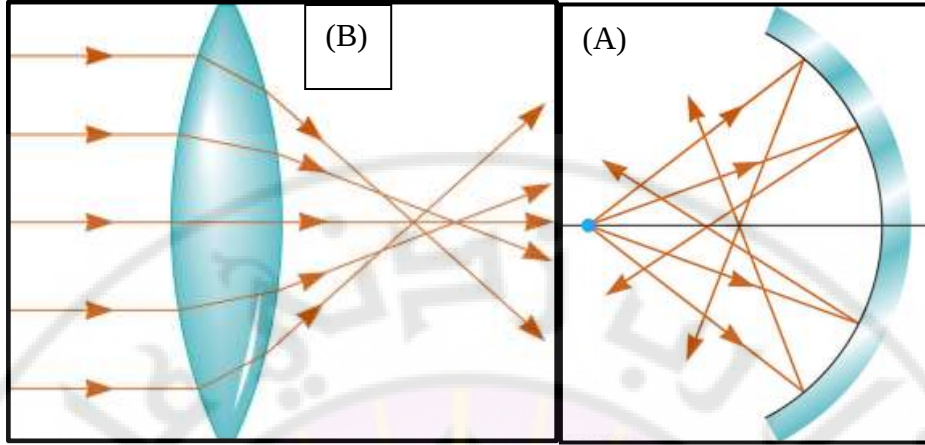
الفصل العاشر: الزيوغ

10.1 - تعريف الزيوغ في العدسات والمرايا بحالة ضوء وحيد

اللون وطرائق إصلاحها:

كما ذكرنا سابقاً تحدث الزيوغ في العدسات والمرايا عندما تكون الأشعة غير محورية (أي تصنع زوايا كبيرة مع المحور الأصلي) بالتالي لا تتلاقى الأشعة الضوئية الصادرة من نقطة ما من الجسم بعد انعكاسها أو انكسارها في نقطة وحيدة بل في عدة نقاط وبالتالي تتشكل أخيلة مشوهة. هذا التشوه في الخيال يدعى بالزيوغ الكروي انظر إلى الشكل (10.1). أو بعبارة أخرى تحدث الزيوغ عندما تكون **النقاط المحرقة** للأشعة البعيدة عن المحور الأصلي **مختلفة** عن النقاط المحرقة للأشعة ذات الطول الموجي نفسه والمارة قريباً من المحور الأصلي كما الشكل (10.1). يظهر الشكل (10.1B) كيفية تشكل الزيغ للأشعة الموازية المارة من خلال عدسة مقربة، إذ نلاحظ من هذا الشكل أن الأشعة المارة من خلال النقاط القريبة من المحور الأصلي للعدسة يتشكل لها خيال أبعد من الأشعة المارة من خلال النقاط القريبة من الحواف. أما الشكل (10.1A) فيظهر حالة مماثلة في المرايا الكروية، إذ نلاحظ من هذا الشكل أن الأشعة الصادرة من الجسم بزوايا كبيرة مع المحور الأصلي تنعكس عن مرآة كروية مقعرة لتتلاقى مع المحور الأصلي بنقاط مختلفة منتجة خيلاً مشوهاً.

أما إذا كانت الأشعة الواردة محورية (أي تصنع زوايا صغيرة مع المحور الأصلي) ففي هذه الحال تكون كل الأشعة الصادرة عن نقطة ما من الجسم تنحرق بعد انكسارها أو انعكاسها في نقطة وحيدة منتجة خيلاً واضحاً (حاد الحواف).



الشكل (10.1): الزيغ الكروي لمرآة مقعرة (يمين) والزيغ الكروي لعدسة مقربة (يسار).

الزيغ أو تشوه الخيال ظاهرة غير مرغوب فيها ودوما يسعى مصممو الأدوات البصرية (عدسات ومرايا) إلى تخفيض الزيغ فيها وبالتالي الحصول على خيال متشكل بأوضح ما يمكن. فمثلاً في حالة المرايا يتم خفض الزيغ من خلال استخدام سطح عاكس بشكل قطع ناقص بدلاً من استخدام سطح كروي. فالأشعة المتوازية الواردة على سطح القطع الناقص تتمحرق في نقطة شائعة بغض النظر عن مسافتها من المحور الأصلي، ولكن سطوح القطع الناقص لم تستخدم غالباً بسبب الكلفة العالية لتصنيع قطوع ذات نوعية جيدة. إن هذه السطوح القطعية تستخدم عادة في مناظير فلكية عدة لزيادة جودة الخيال.

أما في حالة العدسات فيتم خفض الزيغ عادة باستخدام فتحة محورها ينبثق على المحور الأصلي للعدسة وتوضع أمام العدسة، وهذه الفتحة يمكن تعديل قطرها بحيث تمكنا من التحكم بشدة الضوء وجعل قطر حزمة الضوء صغيراً بشكل كاف لتمكنا من الحصول على أشعة محورية وبالتالي تخفيض الزيغ. أما عندما يكون

قطر الفتحة كبيراً فيكون لدينا نسبة كبيرة من الأشعة غير محورية ويكون بالتالي عندها الخيال مشوهاً.

في الفقرات اللاحقة سوف نقوم بشرح مفصل للزيوغ وأنواعها وكيفية التخلص منها.

10.2 - حالات النقطية الكاملة (اللازيغية) في الأدوات الضوئية

ذات الفتحات الكبيرة

فيما يلي نماذج لبعض الأجهزة البصرية (عدسات ومرايا) التي تتصف بالنقطية الكاملة (أي خيال كل نقطة من الجسم هو نقطة) وذلك في حالتها الأشعة المحورية والأشعة غير المحورية.

1- إن أي أداة ضوئية تشكل لنقطة واقعة على سطحها المصقول سواءً أكان عاكساً للضوء أم كاسراً له خيلاً نقطياً ويكون فيها الجسم وخیاله متطابقين.

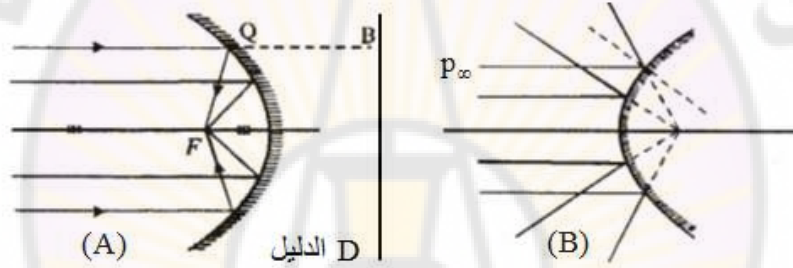
2- المرايا المستوية تحقق النقطية الكاملة من أجل جميع النقاط، وهي الأداة الضوئية الوحيدة التي تتمتع بالنقطية الكاملة بصورة مطلقة.

3- الكاسر المستوي والموشور يحققان النقطية الكاملة من أجل جميع النقاط الواقعة في اللانهاية.

4- المرآة الكروية والكاسر الكروي يحققان النقطية الكاملة من أجل مركز انحناء كل منهما حيث يتطابق الجسم وخیاله.

5- المرآة المصنوعة على شكل مجسم قطع مكافئ دوراني تتصف بالنقطية الكاملة من أجل نقطتين هما محرقها ونقطة في اللانهاية (انظر الشكل (10.2)) ونلاحظ من هذا الشكل أنه في حالة المرآة المقعرة (الشكل

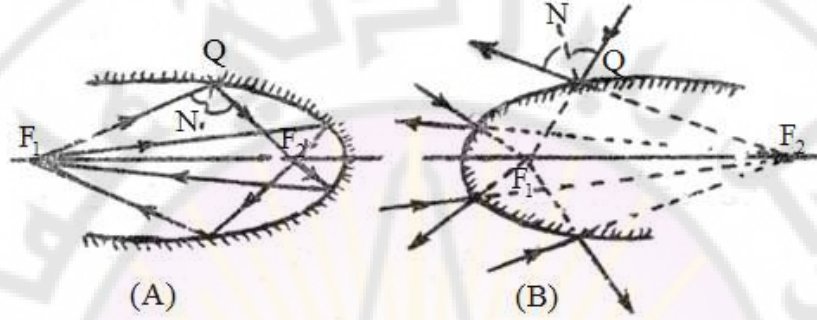
(10.2A)) أن كل الأشعة الواردة الموازية للمحور الأصلي تنعكس مارة من نقطة المحرق F ويكون المحرق في هذه الحالة حقيقياً، أما الشكل (10.2B) فيكون فيه نقطة المحرق F وهمية لأن الأشعة الواردة الموازية للمحور الأصلي تنعكس كأنها قادمة من نقطة خلف المرآة. ومن أهم تطبيقات مرآة القطع المكافئ المقعر هو تحويل الأشعة الصادرة من منبع موضوع في محرقها F إلى أشعة متوازية تقريباً كما في جهاز العرض (Projector)، وكذلك تستخدم في تجميع الطاقة الشمسية في المحرق بغية التسخين.



الشكل (10.2): النقطية الكاملة في مجسم القطع المكافئ.

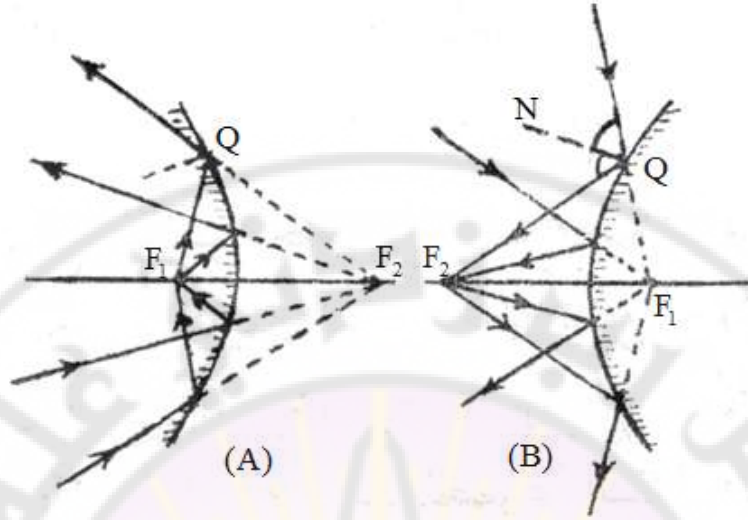
6- المرآة المصنوعة على شكل قطع ناقص تتصف بالنقطية الكاملة في نقطتي المحرقين F_1 و F_2 ، فكل جسم نقطي واقع في أحد المحرقين خيال نقطي في المحرق الثاني مهما كانت زاوية ورود الأشعة الضوئية وذلك في حالتي المرآة المقعرة والمرآة المحدبة. ففي الشكل (10.3A) مرآة القطع الناقص مقعرة نلاحظ أن الأشعة الواردة من أحد المحرقين تنعكس مارة من المحرق الآخر بغض النظر عن زاوية الورد (سواء أشعة

محورية أو غير محورية) وهنا يكون الجسم وخياله حقيقيين. أما الشكل (10.3B) فيظهر مرآة قطع ناقص محدب. نلاحظ من هذا الشكل أن الأشعة الواردة عليها والتي تتلاقى ممدداتها في أحد المحرقين تنعكس كأنها قادمة من المحرق الثاني وهنا يكون الجسم وخياله وهميين.



الشكل (10.3): النقطية الكاملة في مجسم القطع الناقص القعر والمحدب.

7- مرآة القطع الزائد (سطحها جزء من مجسم قطع زائد دوراني) تنصف بالنقطية الكاملة بشكل مماثل لخاصية القطع الناقص في نقطتي المحرقين F_1 و F_2 ، بالتالي فإن مرآة القطع الزائد تكون لجسم نقطي واقع في أحد محرقها خيالياً نقطياً واقعاً في المحرق الآخر. وفي هذه الحال يكون الجسم وخياله من طبيعتين مختلفتين: (أحدهما حقيقي والآخر وهمي) سواء أكانت المرآة الزائدية مقعرة أم محدبة (الشكل (10.4A) والشكل (10.4B)).



الشكل (10.4): النقطية الكاملة في مجسم القطع الزائد القعر والمحدب.

8- العدسة الكروية (الشكل (10.5)) تحقق النقطية الكاملة من أجل نقطتين

معينتين Q و Q' تحققان العلاقتين التاليتين:

$$QC = \frac{R}{n}$$

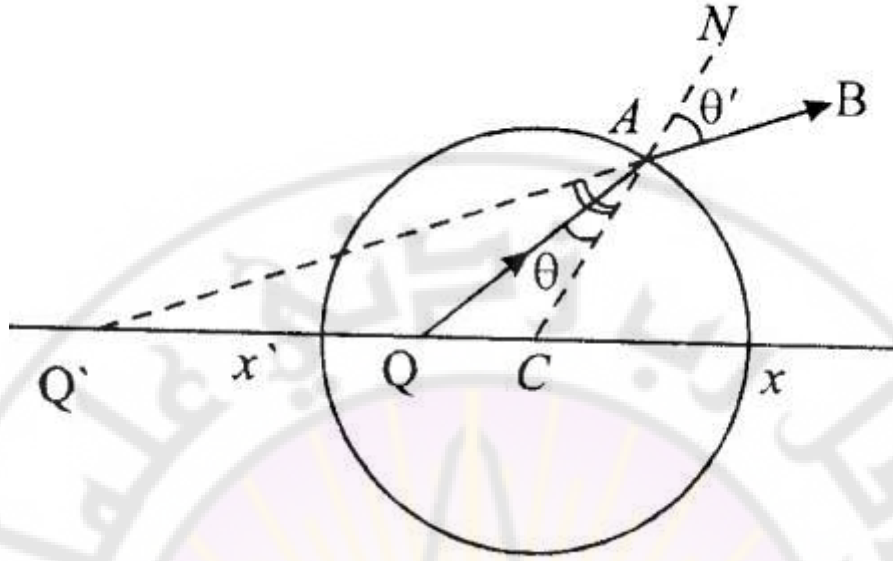
و

$$Q'C = nR$$

حيث إن n قرينة الانكسار النسبية لمادة العدسة و R نصف قطر انحنائها.

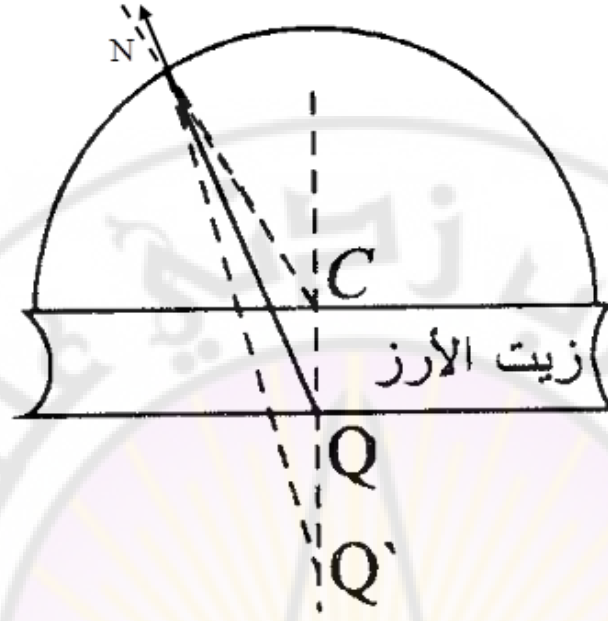
بالنتيجة فإن كل شعاع يصدر من النقطة Q ينكسر مهما كانت زاوية وروده

(θ) ويبرز كأنه صادر من النقطة Q' .



الشكل (10.5): النقطية الكاملة في العدسة الكروية.

ولجعل هذه النتيجة قابلة للتطبيق يجب أن نجعل الجسم Q داخل الكاسر الكروي، ويتم تحقيق ذلك باستخدام عدسة مستوية محدبة كما في الشكل (10.6)، حيث السطح المحدب فيها نصف كرة مركزها C ، ويوضع الجسم عند Q على بعد $QC = R/n$ ويملاً ما بين الجسم ووجه العدسة المستوي بزيت الأرز الذي تساوي قرينة انكساره قرينة انكسار زجاج العدسة مساواة تامة فيصبح سير الأشعة مماثلاً لما هو عليه في الشكل (10.5). في هذه الحالة يصبح الجسم Q وكأنه واقع داخل العدسة الكروية. وتكون مثل هذه العدسة عادة العدسة الأولى في جسمية المجهر التي تسمى حينئذٍ (الجسمية الغاطسة) Oil immersion objective.



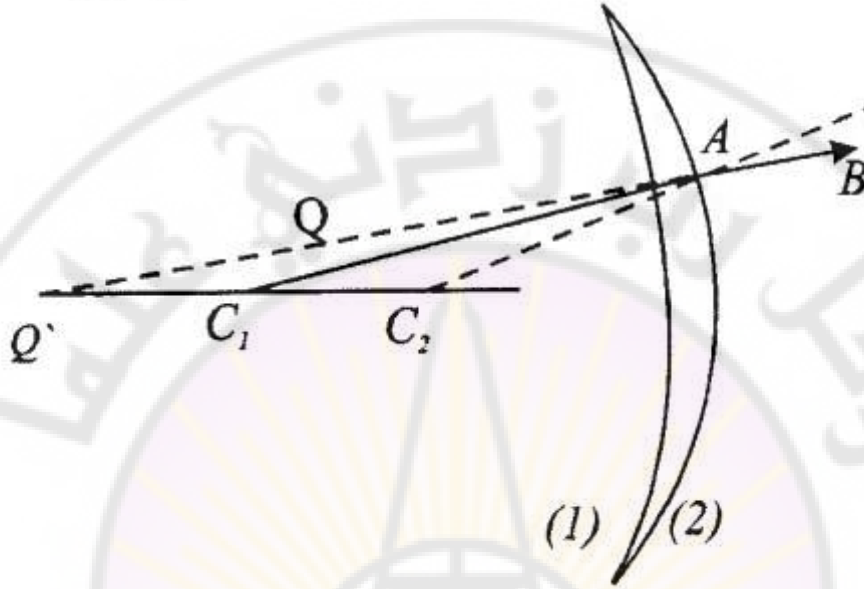
الشكل (10.6): العدسة مستوية محدبة.

ويمكن أن تكون العدسة هلالية كما هو مبين في الشكل (10.7)، في هذه الحالة يوضع الجسم Q في النقطة C_1 التي تمثل مركز انحناء الوجه الأول للعدسة. نلاحظ من الشكل (10.7) أن الأشعة الساقطة من الجسم Q على هذا الوجه لا تعاني أي انكسار بسبب ورودها الناطمي عليه. أما تحذب الوجه الثاني للعدسة فيكون مركز انحنائه C_2 يبعد عن C_1 أي عن Q بالمقدار

$$R_2/n, \text{ أي إن } R_1 - R_2 = R_2/n \text{ أو } R_1 = R_2 \left(1 + 1/n \right) \text{ وبذلك}$$

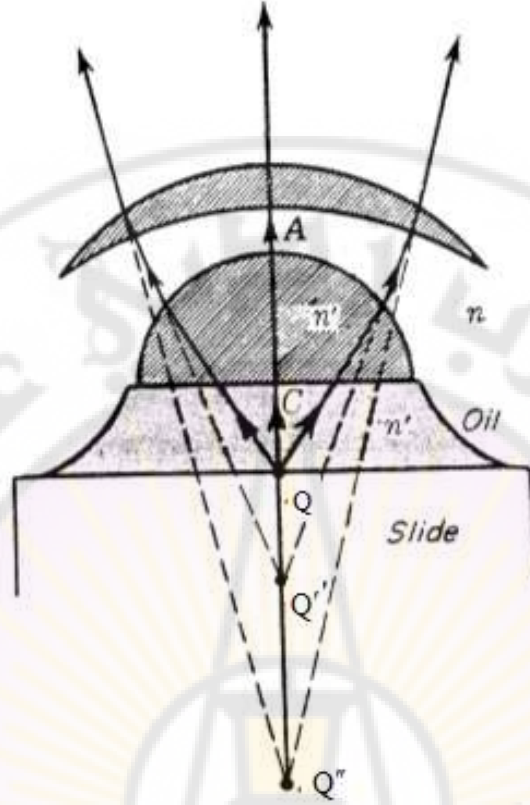
تكون Q إحدى النقطتين اللازيغيتين بالنسبة للعدسة الكروية التي نصف قطرها R_2 . وتتكرر الأشعة الوردية من Q عند الوجه الثاني للعدسة الهلالية

وتبرز كأنها صادرة من النقطة اللازيغية Q' بحيث أن $Q'C = nR$ ويكون للجسم Q خيال واضح تمام الوضوح عند Q' .



الشكل (10.7): العدسة هلالية اللازيغية بالنسبة إلى Q و Q' .

وتجمع العدستان السابقتان (الهالية والمستوية المحدبة) لتستخدم في جسمية المجهر، كما هو مبين في الشكل (10.8)، حيث تكون النقطتان Q و Q' هما النقطتان اللازيغيتان بالنسبة للعدسة الغاطسة الأولى، وتكون Q' و Q'' هما النقطتان اللازيغيتان بالنسبة للعدسة الهالية، في حين تكون Q و Q'' هما النقطتان اللازيغيتان بالنسبة لجملة العدستين. وعندما تبرز الأشعة من العدسة الهالية يكون ميلها على المحور قد قلّ، فتسقط على العدسة التالية من عدسات جسمية المجهر بزوايا ورود صغيرة (أشعة محورية)، وتكوّن هذه العدسة للجسم الذي في Q'' خيلاً واضحاً كل الوضوح.



الشكل (10.8): جمع العدسة الهلالية والعدسة المستوية المحدبة.

10.3 – أنواع الزيوغ

تصنف الزيوغ إلى نوعين هما:

- 1- زيوغ هندسية تشترك فيها كل الجمل الضوئية العاكسة والكاسرة للضوء على حد سواء ويستخدم فيها ضوء وحيد اللون.
- 2- زيوغ لونية خاصة للجمل الضوئية الكاسرة فقط وسببها هو تبدد الضوء الأبيض أو المركب عند انكساره في الجمل الضوئية الكاسرة.

10.3.1 - أولاً: الزيوغ الهندسية

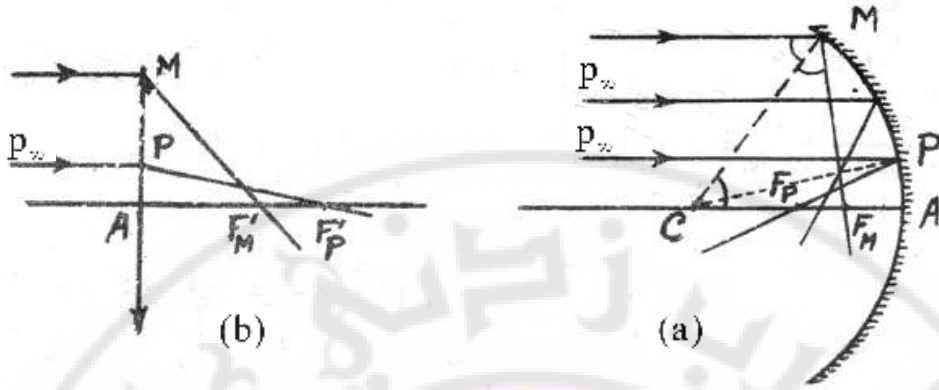
تصنف هذه الزيوغ وفقاً لأسبابها إلى صنفين رئيسيين: هما أولاً: **زيوغ الفتحة:** وهي الزيوغ (التشوهات) الناجمة عن كبر الفتحة التي يسقط من خلالها الضوء على الآداة الضوئية. وثانياً: **زيوغ الميل:** وهي الزيوغ الناجمة عن كون الأشعة الساقطة على الآداة الضوئية ذات ميل كبير على محورها الأصلي على الرغم من ضيق الفتحة التي تدخل من خلالها الأشعة.

10.3.1.1 – زيوغ الفتحة:

يتوقف مظهر زيوغ الفتحة على موقع الجسم النقطي، وهنا نميز حالتين: **الحالة الأولى:** الجسم يقع على المحور الأصلي، و**الحالة الثانية:** الجسم قريب من المحور. وسندرس كلتا الحالتين.

1- الحالة الأولى: الجسم يقع على المحور الأصلي:

نلاحظ من الشكل (10.9) أن الأشعة الساقطة على مرآة كروية مقعرة موازية لمحورها الأصلي تقطع هذا المحور بعد انعكاسها في نقاط مختلفة ويزداد اقترابها من رأس المرآة A كلما ازداد بعد الشعاع الوارد عن المحور الأصلي (شكل (10.9a)، ويحدث الشيء نفسه في حالة العدسة المقربة من أجل ضوء وحيد اللون (شكل (10.9b)، ويتبين من الشكلين أن الأدوات أشد تقريباً عند حوافها ويعود ذلك إلى كونها كروية الشكل، ولذا يسمى هذا الزيغ بالزيغ الكروي Spherical aberration.

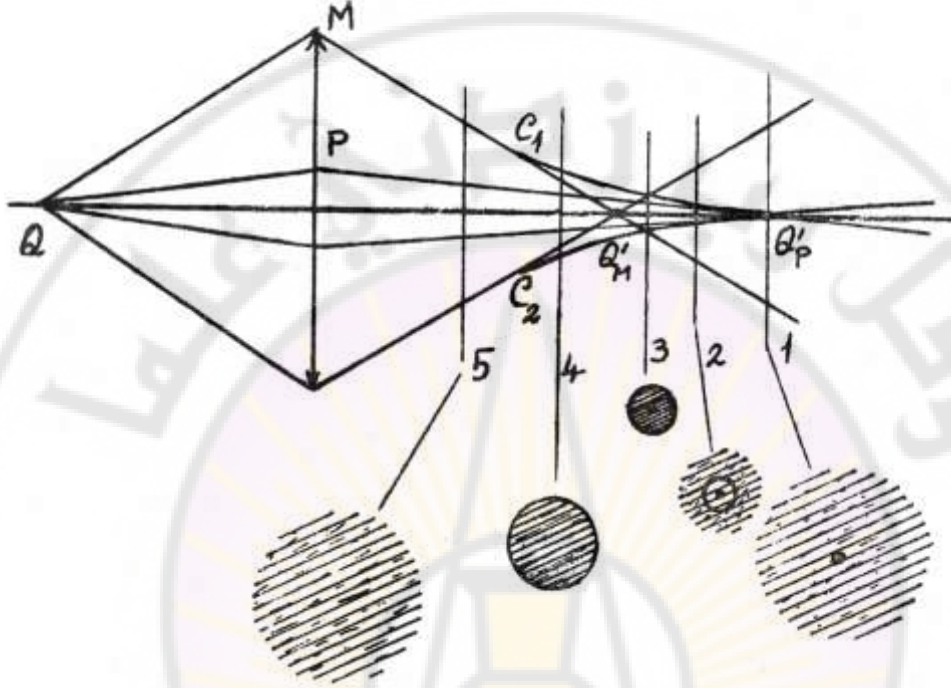


الشكل (10.9): الزيغ الكروي.

وفي حالة الجسم النقطي الواقع على المحور الأصلي وعلى مسافة محدودة من الأداة الضوئية يحدث الشيء نفسه كما هو مبين في الشكل (10.10) من أجل ضوء وحيد اللون في حالة عدسة مقربة. وينتج من تلاقي الأشعة المنعكسة أو المنكسرة سطحٌ كاوٍ ذو إنارة شديدة يتكون من سطح يشبه القمع مقطعه $C_1 Q'_P C_2$ ومن مستقيم $Q'_M Q'_P$ بحيث تمثل Q'_P نقطة تجمع الأشعة المحورية في حين تمثل Q'_M نقطة تجمع الأشعة الحاشيوية (الهامشية).

وإذا استقبلنا الحزمة البارزة من العدسة على لوحة عمودية على المحور الأصلي وجعلناها في المواضع (1) و (2) و (3) و (4) و (5) حصلنا على الإضاءة المبينة في الشكل (10.10)، حيث تمثل المناطق المخططة بخطوط دقيقة مناطق ضعيفة الإنارة ومتساويتها أما النقاط والخطوط الثخينة المستمرة فهي المناطق شديدة الإضاءة وتمثل مقاطع السطح الكاوي باللوحة. ويتبين من الشكل أن Q'_P تمثل خيال الجسم النقطي Q بفعل الأشعة المحورية ويتعين موضعها بقوانين العدسة التي سبق أن وجدناها في حالة الأشعة المحورية، وهي تمثل أفضل خيال للجسم، ويليهما في الأفضلية الخيال الذي يتكون في

الموضع (3) والذي يتكون من دائرة صغيرة مضيئة في مركزها نقطة مضيئة ويطلق عليها دائرة الغمة الصغرى



الشكل (10.10): حالة جسم نقطي واقع على المحور الأصلي وعلى مسافة محدودة من العدسة

هذا ويمكن أن يكون السطح الكاوي حقيقياً في العدسات المقربة والمرابا الكروية المقعرة كما هو مبين في الشكل (10.10)، ويكون وهمياً في العدسات المبعدة والمرابا المحدبة.

بالاستناد إلى الشكل (10.11) في حالة مرآة كروية مقعرة يمكننا التقدير كمياً إذ نعرف الزيغين الأصليين من أجل جسم نقطي واقع في اللانهاية:

$$1- \text{الزيغ الكروي الطولاني الأصلي } \lambda_{\infty} = F'_M F'_P$$

$$2- \text{الزيغ الكروي العرضاني الأصلي } \tau_{\infty} = F'_P B$$

وتم حساب كل من هذين الزيغين الأصليين من أجل جسم نقطي وذلك بالاعتماد على الشكل (10.11) وتم الحصول على الزيغ الكروي الطولاني الأصلي بالعلاقة التالية:

$$F'_P F'_M = \frac{f}{8} \left(\frac{d}{f} \right)^2 = \frac{f}{8} u^2 \quad (10.1)$$

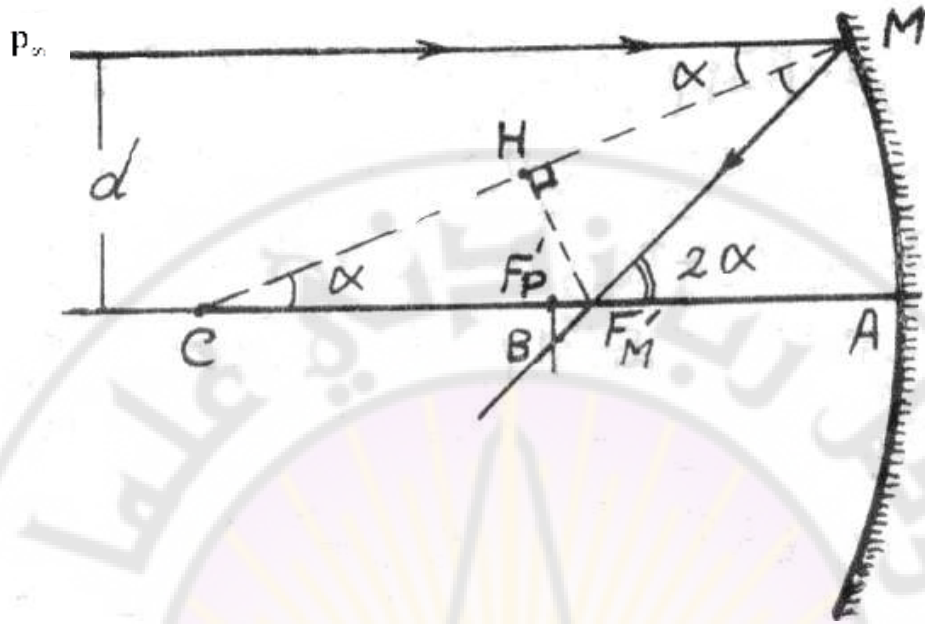
حيث f البعد المحرقي للمرآة الكروية و d نصف قطر قبة المرآة وتمثل u الفتحة الزاوية للمرآة أو الأداة الضوئية بوجه عام. ويتبين من هذه العلاقة أن إضعاف الزيغ الطولاني يستدعي إنقاص قطر كوة الفتحة d .

أما الزيغ العرضاني الأصلي $F'_P B$ فتم الحصول عليه كذلك من الشكل (10.11) بالعلاقة التالية:

$$F'_P B = \frac{f}{8} \left(\frac{d}{f} \right)^3 = \frac{f}{8} u^3 \quad (10.2)$$

وبالمقارنة بين الزيغ العرضاني الأصلي و قيمة الزيغ الطولاني الأصلي، أي بالمقارنة بين المعادلتين (10.1) و (10.2) نجد أنه إذا كان d/f صغيراً كان

الزيغ الطولاني صغيراً من المرتبة الثانية والزيغ العرضاني صغيراً من المرتبة الثالثة.



الشكل (10.11): الزيغ الطولاني الأصلي والزيغ العرضاني الأصلي.

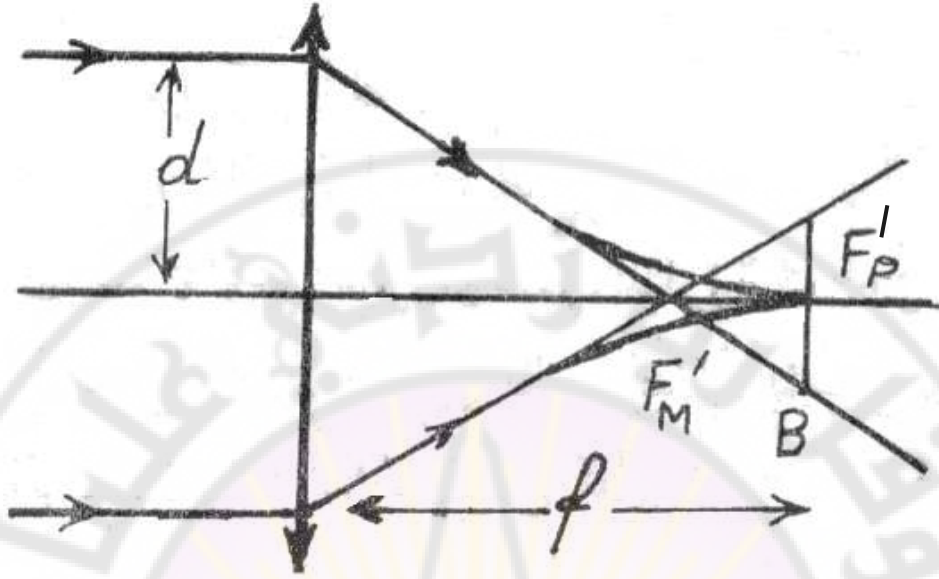
أما من أجل عدسة مقربة موضوعة في الهواء كما في الشكل (10.12) فتم الحصول على الزيغين الأصلي الطولاني والعرضاني بالعلاقتين التاليتين:

$$\lambda_{\infty} = F'_P F'_M = A \cdot f \left(\frac{d}{f} \right)^2 = A f u^2 \quad (10.3)$$

و:

$$\tau_{\infty} = F'_P B = A \cdot f \left(\frac{d}{f} \right)^3 = A f u^3 \quad (10.4)$$

حيث A عامل يتوقف على شكل العدسة التي نصف قطر انحناء وجهيها R_1 و R_2 وعلى قرينة انكسارها n ونصف قطر فتحتها d .



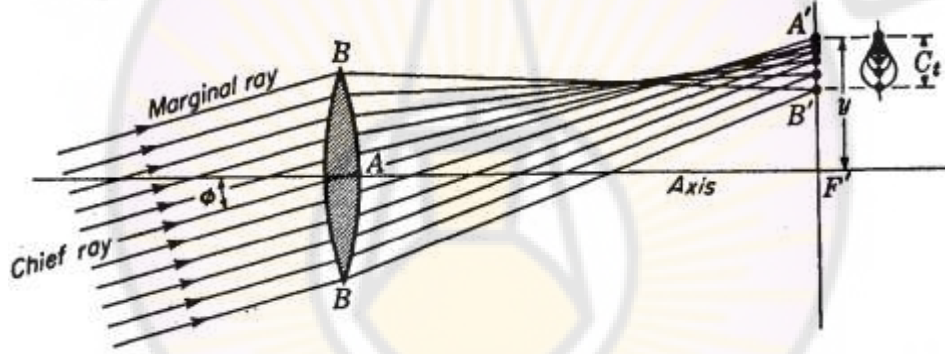
الشكل (10.12): الزيف الطولاني الأصلي والزيف العرضاني الأصلي.

بالاعتماد على ما سبق يمكننا استنتاج أن الزيف الكروي في الأداة الضوئية لا يمكن إهماله لكن يمكن تخفيفه باستعمال فتحة صغيرة ينطبق مركزها على محور الأداة، ولكن هذا قد يسبب إضعاف إضاءة الخيال، ويتم إضعاف الزيف الكروي في العدسة المقربة الرقيقة مثلاً بضم عدسة رقيقة مقربة مع عدسة رقيقة مبعدة وذلك لأن الزيف الكروي في العدسة المقربة الرقيقة يخالف في إشارته الزيف في العدسة المبعدة، وكذلك مع الاختيار المناسب لكل من أقطار وجوها وثخن وقرائن انكسارها وأبعاد بعضها عن بعض حتى يصبح الزيف الكروي أصغر ما يمكن.

2- الحالة الثانية: الجسم يقع بالقرب من المحور الأصلي:

كما يبين الشكل (10.13) يتشكل لدينا في هذه الحالة زيف التذنب (Coma)، وهذا الزيف يبقى ولو كانت الجملة مصححة من الزيف الكروي، فعندما تكون فتحة الجملة

الضوئية كبيرة فإن الحزمة البارزة لا تتجمع في نقطة واحدة بل في نقاط مختلفة مشكلة سطحاً يدعى السطح الكاوي، وعندما تكون الأشعة الواردة موازية للمحور الأصلي، تشكل مقاطعه العمودية على المحور الأصلي دوائر، أما المماسات لهذا السطح فهي مماسات لسطح مخروطي دائري منتظم. أما إذا كانت الأشعة الواردة موازية لمحور ثانوي، فإنها أيضاً لن تتجمع في نقطة المحرق الثانوي، وإنما سينشأ عنها جميعاً سطح مشوه يشبه شكل الذنب، ويكون مظهر الخيال المتكوّن على حاجز عمودي على محور الجملة شبيهاً بنجم مذنب، ولهذا السبب يطلق على هذا الزيغ التذنب (Coma). ويمكن إظهار زيغ التذنب باستعمال عدسة محدبة الوجهين واسعة الفتحة وذات بعد محراقي كبير.

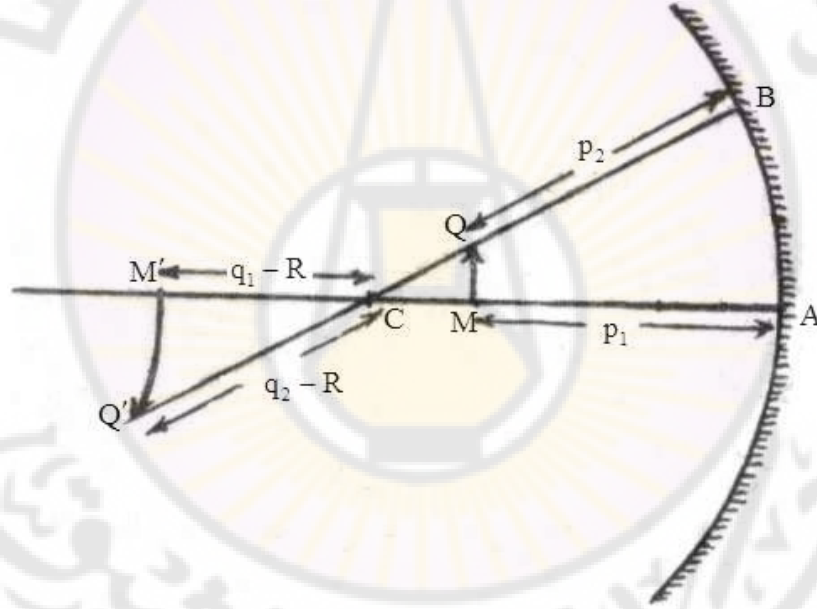


الشكل (10.13): التذنب.

10.3.1.2 - زيوغ الميل:

هي زيوغ تحدث حتى لو كانت الفتحة صغيرة، مثال على هذه الزيوغ هناك التشوه والالتواء، وذلك عندما يكون الجسم منسجماً بحيث يشتمل على نقاط بعيدة عن المحور الأصلي. وتحدث حين يوضع جسم صغير مستو أمام مرآة أو عدسة فإن خياله الذي تولده أي منهما لا يكون مستوياً تمام الاستواء. نلاحظ من الشكل

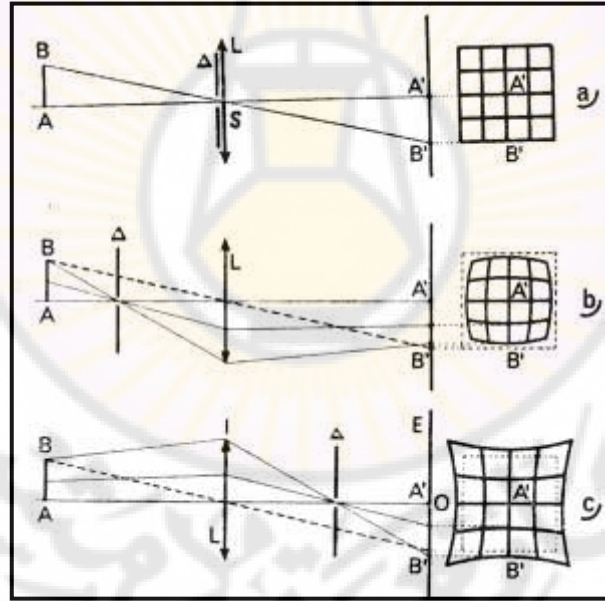
(10.14) أن خيال الجسم MQ هو خيال ملتو $M'Q'$ وهذا يتوافق مع قانون المرآة الكروية، وذلك لأن أبعاد مختلف نقاط الجسم MQ عن المرآة المقيسة على الأقطار المارة من هذه النقاط هي أبعاد غير متساوية. فبعد النقطة M مثلاً عن القطب الموافق لها وهو A لا يساوي بعد النقطة Q عن القطب الموافق لها وهو B أو بعبارة أخرى إن المسافة $AM = p_1$ لا تساوي المسافة $BQ = p_2$ وذلك لأن $p_1 = CA - CM = R - CM$ و $p_2 = CB - CQ = R - CQ$ ولكن $CQ > CM$ في المثلث قائم الزاوية CMQ ، وبالتالي بتطبيق قانون المرايا يكون $q_2 > q_1$ وذلك لأن $p_1 > p_2$. وهذا ما ينتج عنه التواء الخيال.



الشكل (10.14): التواء خيال مستقيم.

ونجد مثل هذه النتيجة في العدسات فنلاحظ من الشكل (10.15) من أجل عدسة مقربة عندما تضاء الشبكة بضوء وحيد اللون وحين يوضع الحظار بأماكن مختلفة مايلي:

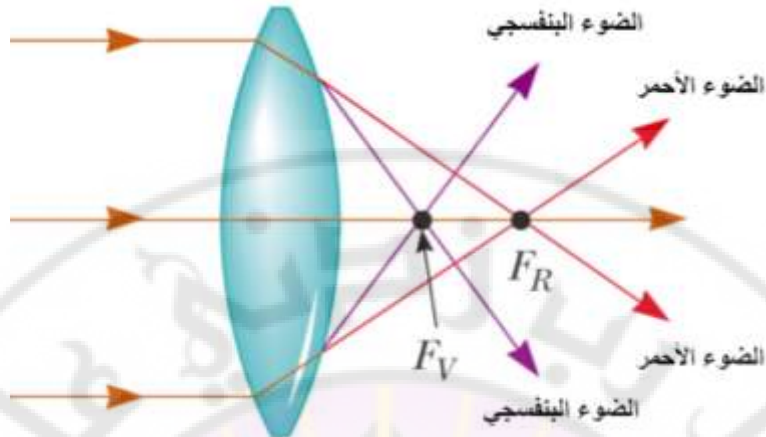
- أ- الحظار بالقرب من مركز العدسة البصري شكل (10.15a). لا يحدث تشوه بخيال الشبكة.
- ب- الحظار بين الشبكة والعدسة شكل (10.15b) يحدث تشوه بالخيال ويسمى بالتشوه البرميلي.
- ث- الحظار بين العدسة والحاجز شكل (10.15c) يحدث تشوه بالخيال ويسمى تشوهاً هلالياً.



الشكل (10.15): التشوه البرميلي والهلالي في خيال شبكة مربعة تقع في فتحة حظار وذلك من أجل مواقع مختلفة للحظار.

10.4 – ثانياً: الزيوغ اللونية

إن دراساتنا السابقة لسير الأشعة الضوئية من خلال الأدوات الضوئية الكاسرة للضوء (عدسة – كاسر كروي – موشور الخ) افترضنا فيها أن الضوء وحيد اللون، أي له طول موجة وحيد. أما في حالة الضوء الأبيض فتظهر لدينا ظاهرة ضوئية تدعى تبدد الضوء الذي ينتج عنها الزيوغ اللونية. فالزيوغ اللونية تحدث فقط في الأوساط الكاسرة للضوء ويعود سبب حدوثها إلى ظاهرة تبدد الضوء التي بدورها تتشكل نتيجة تغير قرينة الانكسار بتغير الطول الموجي للضوء. فعند ورود الضوء الأبيض من خلال عدسة فالشعاع البنفسجي أو الأزرق ينحرف أكثر من الشعاع الأحمر كما في الشكل (10.16)، وبالتالي يكون البعد المحرقي للعدسة أكبر في حالة الضوء الأحمر منه في حالة الضوء البنفسجي. أما الأطوال الموجية الأخرى (التي لم تعرض في الشكل (10.16) بغية التوضيح) تكون لها نقاط محرقية متوسطة بين النقاط المحرقية للأحمر والنقاط المحرقية للبنفسجي هذه الظاهرة تدعى بالزيغ اللوني. إن الزيغ اللوني لعدسة مبعدة ينتج عنه أيضاً بعد محرقي أصغر للضوء البنفسجي منه للضوء الأحمر، ولكنه يقع في الجهة الأمامية للعدسة.



الشكل (10.16): الزيغ اللوني لعنسة مقربة. الأشعة ذات أطوال موجية مختلفة. تتمحرق في نقاط مختلفة، حيث إن F_R هي النقطة المحرقة للضوء الأحمر و F_V هي النقطة المحرقة للضوء البنفسجي.

وجدنا كذلك من قبل أن استطاعة العنسة الرقيقة P بدلالة بعدها المحرقي f حين توجد هذه العنسة في الهواء تعطى بالعلاقة التالية:

$$P = \frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = (n - 1)K \quad (10.5)$$

حيث إن K ثابت يتوقف على شكل العنسة الهندسي. ويتبين من هذه العلاقة أن استطاعة العنسة وبالتالي بعدها المحرقي يتعلّق بقرينة انكسارها n والتي كما نعلم تختلف باختلاف لون الضوء المستعمل. وبما أن لكل من ألوان الضوء المركب قرينة انكسار خاصة به فالناتج أن العنسة التي تستقبل حزمة أشعة متوازية تشكل عدداً من المحارق يساوي عدد الألوان الداخلة في تركيب الحزمة. وكما وجدنا سابقاً تعطى قدرة التبدد w لمادة ما بالعلاقة التالية:

$$\omega = \frac{n_B - n_R}{n_Y - 1} \quad (10.6)$$

حيث إن n_R قرينة الانكسار الموافقة للضوء الأحمر و n_B قرينة الانكسار الموافقة للضوء الأزرق و n_Y قرينة الانكسار الموافقة للضوء الأصفر.

10.4.1 - أنواع الزيوغ اللونية في العدسات:

تصنف الزيوغ اللونية في العدسات في نوعين هما الزيغ اللوني الطولاني والزيغ اللوني العرضاني، فيما يلي شرح مفصل لكلاً من الزيغين.

الزيغ اللوني الطولاني والعرضاني:

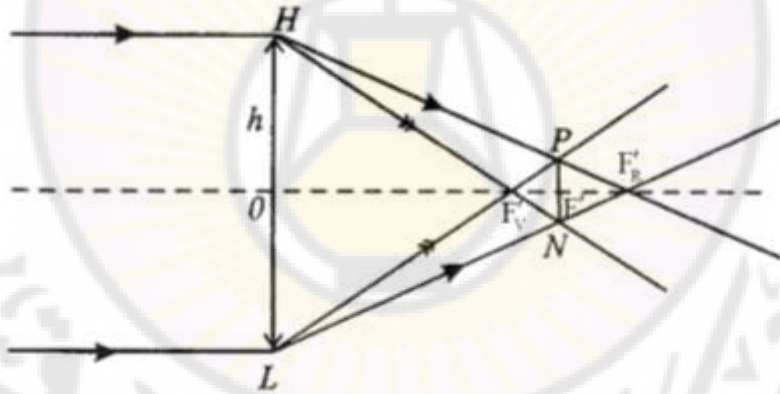
من الشكل (10.17) نسمي الفرق $(f_R - f_B)$ (الفرق بين البعدين المحرقيين العائدين للونين الأحمر R والبنفسجي أو الأزرق B) بالزيغ اللوني الطولاني الأصلي ونرمز له m_∞ ، ونسمي المسافة $F'P$ الموضحة بالشكل (10.17) بالزيغ اللوني العرضاني الأصلي والتي هي عبارة عن نصف قطر الدائرة حيث تتقاطع الحزمتان الحمراء والزرقاء وفق أصغر دائرة مضيئة تقريباً حيث تؤلف أحسن خيال لمنبع نقطي أبيض واقع في اللانهاية. وتم بمساعدة الشكل (10.17) إيجاد العلاقة التي تعطي قيمة الزيغ اللوني الطولاني الأصلي من أجل حزمة موازية للمحور في عدسة رقيقة بدلالة قدرة التبدد ω لمادة العدسة والبعـد المحرقي f_Y المتعلق باللون الأصفر Y . حيث يعطي الزيغ اللوني الطولاني الأصلي بالعلاقة التالية:

$$m_\infty = f_R - f_B = \omega f_Y \quad (10.7)$$

نلاحظ من هذه العلاقة أن الزيغ اللوني الطولاني الأصلي يتناسب طردياً مع البعد المحرقي للعدسة وقدرة تبدها للضوء ولا يتوقف على قطر فتحتها. فتصغير اتساع الحزمة الواردة بحاجز صغير الفتحة لا يجدي نفعاً في إضعاف هذا الزيغ. أما قيمة الزيغ اللوني العرضاني الأصلي $\alpha_{\infty} = F'P$ الموضح في الشكل (10.17) فيمكن استنتاج علاقته من هذا الشكل وتعطى بالعلاقة التالية:

$$\alpha_{\infty} = F'P = \frac{1}{2} h \cdot \omega \quad (10.8)$$

أي إن الزيغ اللوني العرضاني الأصلي يتناسب مع نصف قطر فتحة العدسة h و لا يتوقف على بعدها المحرقي. وهكذا نستنتج أن استعمال حاجز ذي فتحة صغيرة متمركزة على المحور يفيد في إضعاف الزيغ العرضاني دون أن يؤثر في قيمة الزيغ الطولاني.



الشكل (10.17): الزيغ اللوني الطولاني والزيغ اللوني العرضاني.

10.4.2 - إصلاح الزيوغ اللونية:

إن تشوه الخيال سواء كان نتيجة الزيوغ الكروية أم الزيوغ اللونية غير مرغوب فيه في الجمل الضوئية. فالزيوغ اللونية لعدسة أو لأي جملة ضوئية يجب إصلاحه

أو التخفيف منه. ففي المجهر مثلاً يمكن استعمال ضوء وحيد اللون لتفادي هذا الزيف، ولكن هذا الأمر صعب في أغلب الجمل الضوئية الأخرى كالنظارة الفلكية و آلات التصوير. وبالتالي يمكن استخدام مرشحات زجاجية خاصة في هذه الآلات هذه المرشحات تمتص الإشعاعات الخارجية من منطقة الطيف المرئي بشكل خاص، وامتصاص هذه الإشعاعات يكون ضرورياً جداً في أفلام التصوير الملونة. وكذلك يمكننا إضعاف الزيف اللوني العرضاني بتصغير فتحة الجملة بقدر الإمكان. أما إصلاح الزيف اللوني الطولاني (أي تحقيق اللالونية) فسوف نعالجه فيما يلي. مع العلم أن تحقيق لالونية كاملة أمر مستحيل، وستقتصر دراستنا على العدسات الرقيقة بصفتها أكثر العناصر الضوئية استعمالاً. إن تحقيق لالونية جيدة يتم بالحصول على جملة تجمع المحارق الملونة في نقطة واحدة تقريباً، ويمكن أن يتم ذلك من أجل لونين معينين الأحمر R والأزرق B باستعمال عدستين رقيقتين متلاصقتين ومصنوعتين من مادتين مختلفتين بحيث يكون $\omega_1 \neq \omega_2$. أو باستعمال عدستين رقيقتين مصنوعتين من مادة واحدة أي $\omega_1 = \omega_2$ وتفصل بينهما مسافة ما.

10.4.3 - شرط اللالونية في حالة عدستين رقيقتين

متلاصقتين:

ليكن لدينا عدستان رقيقتان متلاصقتان بالتالي تعطى علاقة تغير استطاعة العدسة الأولى δP_1 بالنسبة للضوء الأزرق $P_{1B} (B)$ و بالنسبة للضوء الأحمر $P_{1R} (R)$ بالشكل التالي:

$$\delta P_1 = P_{1B} - P_{1R} = (n_{1B} - n_{1R})K_1 \quad (10.9)$$

وبالطريقة نفسها يكون تغير استطاعة العدسة الأولى δP_2 بالنسبة للضوء الأزرق $P_{2B} (B)$ و بالنسبة للضوء الأحمر $P_{2R} (R)$ بالشكل التالي:

$$\delta P_2 = P_{2B} - P_{2R} = (n_{2B} - n_{2R})K_2 \quad (10.10)$$

باستخدام العلاقة (10.9) وبتعويض قيم كل من K_1 و K_2 نحصل على العلاقتين التاليتين:

$$\delta P_1 = \frac{(n_{1B} - n_{1R})}{(n_{1Y} - 1)} P_{1Y} = \omega_1 P_{1Y} \quad (10.11)$$

$$\delta P_2 = \frac{(n_{2B} - n_{2R})}{(n_{2Y} - 1)} P_{2Y} = \omega_2 P_{2Y} \quad (10.12)$$

بفرض أن الاستطاعة المتوسطة للعدسة مساوية تقريباً لاستطاعتها بالنسبة للضوء الأصفر أي $P_1 = P_{1Y}$ فتصبح العلاقات السابقة:

$$\delta P_1 = \omega_1 P_1 \quad (10.13)$$

و

$$\delta P_2 = \omega_2 P_2 \quad (10.14)$$

وبجمع العلاقتين (10.13) و (10.14) نحصل على مجموع التغيرين بالشكل التالي:

$$\delta P = \delta P_1 + \delta P_2 = \omega_1 P_1 + \omega_2 P_2 \quad (10.15)$$

لتحقيق اللالونية يجب أن يتطابق محرقاً جملة العدستين العائدتين للضوئين الأحمر و الأزرق وبالتالي يجب أن ينعدم تغير الاستطاعة المعطى بالعلاقة (10.15) والتي تكتب بالشكل التالي:

$$\delta P = \delta P_1 + \delta P_2 = \omega_1 P_1 + \omega_2 P_2 = 0$$

ومنه نحصل على شرط اللالونية التالي:

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = -\frac{P_2}{P_1} \quad (10.16)$$

فالشرط بالعلاقة (10.16) يستدعي بأن تكون استطاعتا العدستين P_1 و P_2 مختلفتين في الإشارة أي ينبغي أن تكون إحدى العدستين مقربة و الأخرى مبعدة وذلك لأن قدرة التبدد موجبة دوماً. بالتالي إن المجموعة المكونة من عدستين متلاصقتين قادرة على أن تجعل الخياليين المرافقين للضوئين الأزرق والأحمر ينطبقان على بعضهما بعضاً، ولكن هذا لا يعني أن الأخيلة الملونة الأخرى تكون منطبقة بعضها فوق بعض غير أن امتدادها يكون أقل بكثير من قيمة الزيغ اللوني الطولاني لأي من العدستين. وعندما يراد تحقيق اللالونية في الجمل الضوئية المعدة للرؤية كالعدسات والمكبرات والعينيات والنظارات يحقق شرط اللالونية من أجل الضوئين الأزرق و الأحمر إذ إنَّ البعد المحرقي للجملة يوافق الضوء الأصفر الذي يوافق الحد الأعظم لحساسية العين. أما في جسمية آلة التصوير العادية فيحقق شرط اللالونية من أجل الضوئين الأصفر والأزرق النيلّي الذي يوافق الحساسية العظمى للفيلم، وفي جسمية آلة التصوير الفلكية يختار الضوء الأزرق والبنفسجي اللذان يحصران بينهما الطيف الأشد تأثيراً في لوحة التصوير.

10.4.4 - شرط اللالونية في حالة عدستين رقيقتين

مصنوعتين من مادة واحدة ومنفصلتين:

ليكن لدينا عدستان رقيقتان مصنوعتان من المادة نفسها، أي تكون قدرة التبدد لكل منهما واحدة:

$$\omega_1 = \omega_2 = \omega$$

في هذه الحالة يعطى البعد المحرقى f المكافىء لجملة العدستين وفق العلاقة التالية:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2} \quad (10.17)$$

وتكتب العلاقة (10.17) بدلالة الاستطاعة P بالشكل التالي:

$$P = P_1 + P_2 - dP_1 P_2 \quad (10.18)$$

حيث إن d هي المسافة الفاصلة بين العدستين و تقدر بالمتري في العلاقة (10.18). كما ذكرنا في الفقرة السابقة لتحقيق اللالونية يجب أن يتطابق محرقا جملة العدستين العائدتين للضوئين الأحمر و الأزرق، وبالتالي يجب أن ينعدم تغير الاستطاعة للجملة أي:

$$\delta P = 0$$

وبالتالي تصبح العلاقة (10.18) بالشكل:

$$\delta P = \delta P_1 + \delta P_2 - dP_1 \delta P_2 - dP_2 \delta P_1 = 0 \quad (10.19)$$

بما أن $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ وبتعويض قيم كل من δP_1 و δP_2 بما يساويه باستخدام العلاقتين (10.13) و (10.14) تصبح العلاقة (10.19) بالشكل التالي:

$$\delta P = \omega(P_1 + P_2) - 2d\omega P_1 P_2 = 0$$

ومنه يمكن عزل d من هذه العلاقة لتصبح كما يلي:

$$d = \frac{P_1 + P_2}{2P_1P_2} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_2} \right) \quad (10.20)$$

ويمكن كتابة هذه العلاقة بدلالة الأبعاد المحرقة لكل من العدستين كما يلي:

$$d = \frac{1}{2} (f_1 + f_2) \quad (10.21)$$

أي أنه لتحقيق اللالونية يجب أن يكون البعد بين العدستين مساوياً لمتوسط البعدين المحرقين للعدستين.

الفصل الحادي عشر: العين والرؤية - الآلات البصرية

11.1 - أولاً: العين والرؤية

11.1.1 - بنية العين:

11.1.2 - المطابقة في العين:

11.1.3 - العيوب الشائعة في العين

11.1.3.1 - حسر البصر (العين الحسيرة)

11.1.3.2 - طمس البصر (مد البصر)

11.1.3.3 - اللانقطية

11.1.3.4 - قصور البصر (القدح)

11.2 - ثانياً: الآلات البصرية

11.2.1 - المكبرة

11.2.2 - المجهر



الفصل الحادي عشر: العين والرؤية - الآلات البصرية

11.1 - أولاً: العين والرؤية

11.1.1 - بنية العين

العين لها شكل شبه كرة وتتكون من أوساط كاسرة للضوء تشكل أخيلة حقيقية للأجسام الخارجية وأوساط متممة (أغشية) والتي تختص بتحليل الصورة وإرسالها للدماغ (انظر إلى الشكل (11.1)).

فأوساط العين الكاسرة تتكون من:

- 1- العدسة البلورية: وهي تشبه في شكلها عدسة شفافة محدبة الوجهين، ويبلغ سمكها 4 ملمترات ونصف قطر انحناء وجهها الأمامي 10 ملمترات ونصف قطر انحناء وجهها الخلفي 6 ملمترات، وبنيتها غير متجانسة وتتكون من طبقات متراسة كطبقات حبة البصل تحيط بنواة مركزية أقصى منها وأشد كسراً للضوء، وتزداد قرينة الانكسار فيها من القشرة إلى اللب من المقدار 1.386 إلى المقدار 1.406. ويقع أمام العدسة البلورية حاجز عاتم يدعى القرنية Iris، و يختلف لونها من إنسان إلى آخر، و في وسطها فتحة مستديرة مركزية تدعى إنسان العين أو البؤبؤ Pupil، ومنه يدخل الضوء إلى العين، ويضيق البؤبؤ ويتسع بتأثير عضلات الحدقة التي تنقلص و ترتخي بعوامل غير إرادية، فيتغير قطرها من نحو 2 مم إذا كان الضوء شديداً إلى نحو 8 مم في الظلام الحالك، بالتالي يحدد البؤبؤ مقدار الضوء النافذ إلى العين بحيث لا ينفذ منه إلا القدر المناسب. وهناك حركة أخرى غير إرادية وهي حركة العضلات المتصلة بالعدسة البلورية

والتي تؤثر فيها باستمرار بقوى تسعى إلى إبعاد حواف هذه العدسة عن المحور لتؤدي إلى تغيير في انحناء وجهيها وبالتالي إلى تغيير استطاعتها.

2- الخلط المائي Aqueous humor: هو سائل شفاف يتكون معظمه من الماء يملأ الفراغ الكائن بين القرنية والعدسة.

3- الخلط الزجاجي Vitreous humor هو سائل شفاف هلامي القوام يتكون معظمه من الماء ويملأ الفراغ المحصور بين العدسة والشبكية.

أما الأغشية المحيطة بالعين فتتكون من الأجزاء التالية:

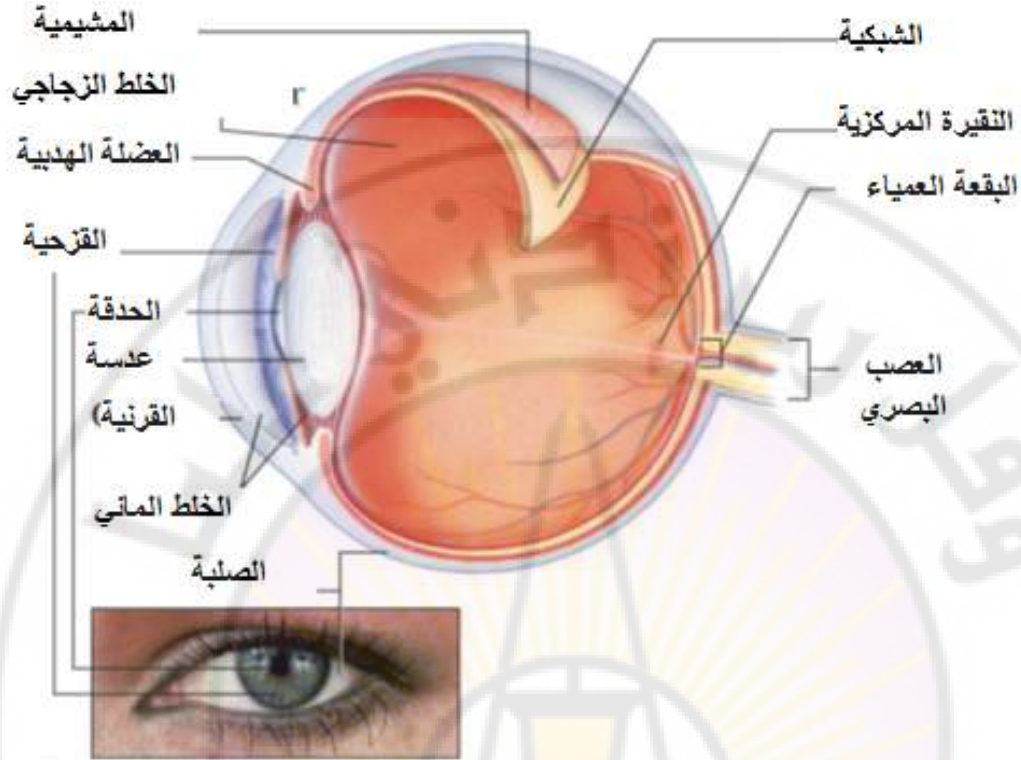
1- الصلبة Sclero: وهي غشاء عاتم أبيض اللون ثخين ومتين تندمج في مقدمته القرنية الشفافة (Cornea)، وهي أكثر انحناء من الصلبة ومنها ينفذ الضوء إلى داخل العين.

2- المشيمية choroids: وهي غشاء أسود اللون غني بالأوعية الدموية، وهي المسؤولة عن تزويد الطبقة الخارجية للشبكية والداخلية للصلبة بالدم.

3- الشبكية Retina: وهي غشاء شاف يقع تحت المشيمية، ويحتوي الغشاء على عدد كبير من العناصر الصغيرة الحساسة للضوء والتي تصنف إلى صنفين: العصيات والمخاريط. فالعصيات تفيد في الرؤية الليلية، ويبلغ عددها 170 مليون خلية تتوزع على محيط الشبكية، وهي حساسة جداً لكمية الضوء، ويقل عددها كلما اتجهنا نحو المركز حيث تنعدم في منطقة البقعة الصفراء. أما المخاريط فتكون حساسة للضوء، وهي المسؤولة عن الرؤية النهارية وعن التمييز بين الألوان. ويوجد ثلاثة أنواع منها: مخاريط حساسة للون الأزرق، وأخرى للأخضر، وثالثة للبرتقالي ويبلغ

عددها 8 ملايين خلية، وكلما ازداد عدد الخلايا قلت المسافة بين الخلية والأخرى وازدادت حدة البصر sharpness of view. وتوجد شبكة من الخيوط العصبية تصل ما بين هذه العناصر والدماغ بوساطة العصب البصري optical nerve. إن توزع العصيات والمخاريط على سطح الشبكية ليس متساوياً، لذلك تختلف حساسية الشبكية من نقطة لأخرى حيث تبلغ حدها الأقصى في منطقة إهليلجية صغيرة تقع بجوار المحور الأصلي للعين وتدعى البقعة الصفراء yellow spot وهي غنية بالمخاريط، ويقع في منتصفها انخفاض صغير لا يتجاوز قطره 0.24mm يدعى الحفيرة (النقيرة) المركزية Fovea. وتنعدم العصيات والمخاريط في منطقة نفوذ العصب البصري والأوعية الدموية، ولا تستطيع العين رؤية الأشياء إذا تشكلت أختلتها في هذه المنطقة التي تدعى البقعة العمياء Blind spot.

أما الثوابت الضوئية للعين فهي عبارة عن كرة العين قطرها 24 ملمتراً، وقرينة انكسار القرنية تساوي 1.376، وإن قرينتي انكسار السائلين (الخطين المائي والزجاجي) متساويتان وقيمتها تساوي إلى 1.336. وتختلف العين عن الآلات البصرية في أن الوسط الأخير فيها (الخط الزجاجي) يختلف عن الوسط الأول (وهو الهواء)، بحيث يكون بعدها المحرقين عندئذٍ مختلفين. ويبلغ البعد المحرقي الجسمي لعين عادية في حالة الراحة نحو 17mm، والبعد المحرقي الخيالي نحو 23mm. وإنَّ النقطتين الأصليتين H و H'' لا تبعد إحداها عن الأخرى بأكثر من 0.3mm، أي إنهما ينطبقان تقريباً عند النقطة H . وأخيراً تبلغ الاستطاعة الكلية للعين نحو 58.64 D (كسيرة).



الشكل (11.1) بنية العين البشرية.

11.1.2 - المطابقة في العين

إن الحالة الطبيعية أو السليمة للعين عندما تكون في راحة تامة هي أن يقع محرقها الخيالي على الشبكية، وبالتالي تستطيع من خلالها رؤية الأجسام البعيدة بوضوح دون بذل جهد. ولكن هناك حالات تكون فيها العين غير قادرة على رؤية الأجسام القريبة منها بشكل واضح وخاصة إذا كانت العين جملة صلبة ذات بعد محراقي ثابت، وفي هذه الحالة يمكن أن يقع الخيال خلف الشبكية. ولكن بالحقيقة تكون

العين قادرة على تغيير استطاعتها والتكيف بفعل العضلات المتصلة بالعدسة البلورية إذ يزداد تحدب وجهي هذه العدسة بارتخاء هذه العضلات وبالتالي تزداد استطاعة العين وينتقل محرقها إلى أمام الشبكية بحيث يتشكل خيال الجسم القريب على الشبكية. وهذا التغيير باستطاعة العدسة البلورية بفعل العضلات يدعى بالمطابقة. إذ تؤدي المطابقة هذه إلى تغيير نصف قطر انحناء العدسة البلورية من المقدارين 10 mm و 6 mm وذلك عندما تكون العين في وضع الراحة إلى 6 mm و 5.5 mm عندما تكون العين في الحالة القصوى من المطابقة.

وتعرف نقطة المدى بأنها أبعد نقطة M تراها العين بوضوح تام دون مطابقة، ويدعى بعدها D عن العين بالبعد الأعظمي للرؤية الواضحة. أما نقطة الكثب فتعرف بأنها أقرب نقطة N تستطيع العين أن تراها بأقصى مطابقة بوضوح تام ويسمى بعدها d عن العين البعد الأصغري للرؤية الواضحة. وتعرف سعة الرؤية بأنها المسافة المحصورة بين النقطتين M و N (أي المسافة $D - d$). وتعرف سعة المطابقة A بالعلاقة التالية:

$$A = \frac{1}{d} - \frac{1}{D} \quad (11.1)$$

على أن يقدر كل من d و D بالأمتار، وبالتالي تقدر A بالكسيرات Diopter. وتختلف سعة المطابقة التي ترتبط بمرونة العدسة البلورية للعين من شخص إلى آخر، فتكون مثلاً عند الطفل 14 كسيرة ومع التقدم بالسن (45 سنة مثلاً) تتناقص مرونة العدسة البلورية بسبب التصلب في العدسة البلورية وبالتالي تنقص سعة المطابقة لتصبح 4 كسيرة.

11.1.3 - العيوب الشائعة في العين

إن أهم العيوب الشائعة في العين هي:

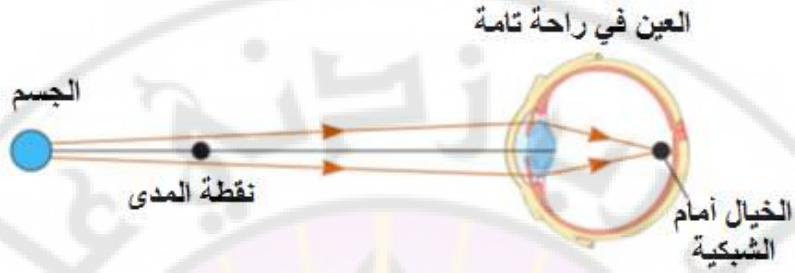
- 1- حسر البصر Myopia: ويحدث عندما تكون نقطة المدى قريبة من العين.
 - 2- طمس البصر Hypermetropia: ويحدث عندما تكون نقطة الكُثْب بعيدة عن العين.
 - 3- قدح البصر Presbyopia: ويحدث عندما تكون سعة المطابقة صغيرة.
 - 4- اللانقطية Astigmatism: تحدث عندما تكون العين غير متناظرة بالنسبة إلى محورها البصري.
- ويتم إصطلاح هذه العيوب في العين بضم عدسة مناسبة إليها، وسنقوم فيما يلي بشرح هذه العيوب بمزيد من التفصيل.

11.1.3.1 - حسر البصر (العين الحسيرة)

يحدث حسر البصر عندما تصبح نقطة المدى قريبة من العين، وبالتالي يكون التحذب في العدسة البلورية للعين أكبر منه في الحالة السليمة عندها لا تستطيع العين الحسيرة أن ترى الأجسام البعيدة بوضوح لأن الخيال يقع أمام الشبكية دون مطابقة (انظر الشكل (11.2)). ويمكن إصطلاح العين الحسيرة بوساطة عدسة L مناسبة بحيث تشكل للنقطة في اللانهاية ($D' = \infty$) خيلاً وهمياً يقع عند نقطة المدى (انظر الشكل (11.3)) أي أن تكون استطاعة العدسة المصححة:

$$P = \frac{1}{f} = \frac{1}{D'} - \frac{1}{D} = \frac{1}{\infty} - \frac{1}{D} = -\frac{1}{D} \quad (11.2)$$

فالعدسة المصححة هي بالتالي عدسة مبعدة يساوي بعدها المحرقى البعد الأعظم للرؤية الواضحة.



الشكل (11.2): عين حسيرة.



الشكل (11.3): عين حسيرة مصححة.

11.1.3.2 - طمس البصر (مد البصر)

يحدث مد البصر (طمس البصر) عندما يكون تحدب العدسة البلورية للعين أقل منه في العين السليمة بحيث يكون محرقها الخيالي في هذه الحالة واقعاً خلف الشبكية (انظر الشكل (11.4)). ويتم إصطلاح هذا العيب بـعدسة تكون استطاعتها P ذات

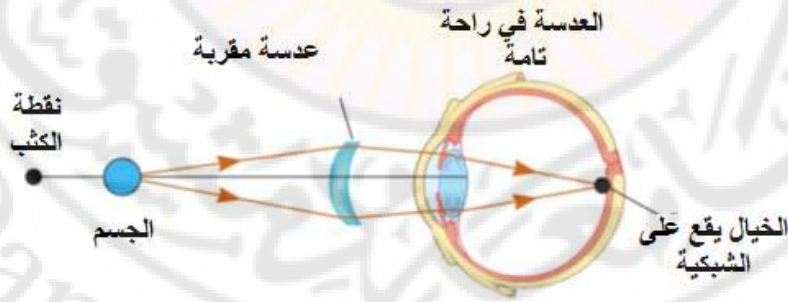
قيمة محددة بحيث تشكل للنقطة التي في اللانهاية $D' = \infty$ خيلاً حقيقياً يقع عند نقطة المدى الوهمية M خلف الشبكية، أي إن:

$$P = \frac{1}{f} = \frac{1}{\infty} - \frac{1}{-D} = \frac{1}{D} \quad (11.3)$$

فالعنسة المصححة هي عنسة مقربة يساوي بعدها المحرقي بعد نقطة المدى (البعد الأعظم للرؤية الواضحة).



الشكل (11.4): عين مديدة.



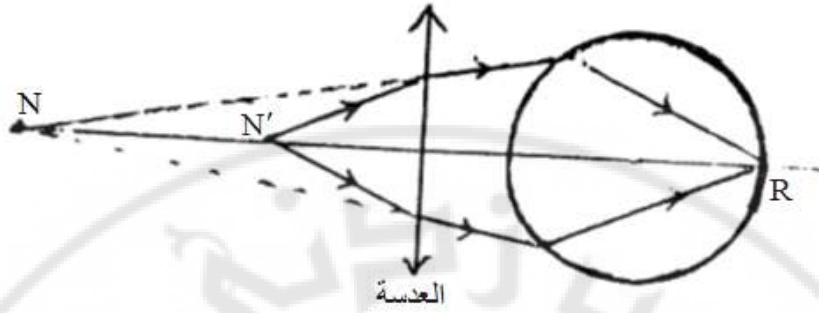
الشكل (11.5): عين مديدة مصححة.

11.1.3.3 - اللانقطية

تحدث اللانقطية عندما تكون السطوح التي تحدد أوساط العين المختلفة غير كروية وغير متجانسة ينتج عنه عدم انتظام انحناء القرنية الشفافة أو انحناء العدسة البلورية فيتشكل في العين لكل جسم عدة أخيلة، ويمكن تصحيح العين المصابة باللانقطية بوساطة عدسة أسطوانية مناسبة.

11.1.3.4 - قصور البصر (القدح)

قدح العين هو تناقص قوة المطابقة فيها، و قد يصيب العين السليمة والحسيرة والطامسة ويزداد بتقدم سن الإنسان، لأن قوة تقلص العضلات التي تؤثر في العدسة البلورية للعين تضعف فتتناقص سعة المطابقة وتبتعد نقطة الكتب شيئاً فشيئاً، ولا تعود العين ترى الأجسام القريبة منها بوضوح. وتصاب العين المديدة (الطامسة) بالقدح قبل العين السليمة، أما العين الحسيرة فإن قدحها يقرب نقطة الكتب من نقطة المدى. وإذا قدحت العين الحسيرة قدحاً تاماً أي انطبقت نقطة كتبها على نقطة مداها، فإنها تصبح جملة ضوئية ثابتة لا تستطيع أن ترى الأجسام بوضوح إلا إذا وقعت في نقطة مداها، ويتم إصطلاح قصور البصر (القدح) بعدسة مقربة تكون استطاعتها P بحيث تشكل لنقطة كتب العين N' قبل قدحها خيالاً وهمياً صحيحاً يقع عند نقطة الكتب الجديدة N كما في الشكل (11.6).



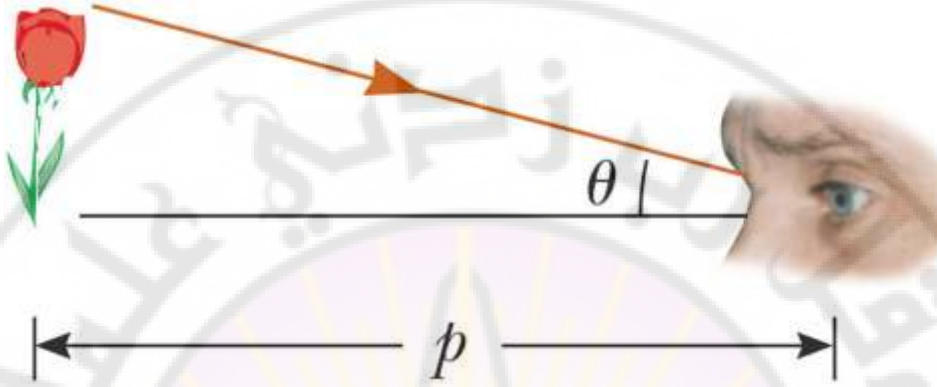
الشكل (11.6): تصحيح قصور البصر.

11.2 - ثانياً: الآلات البصرية

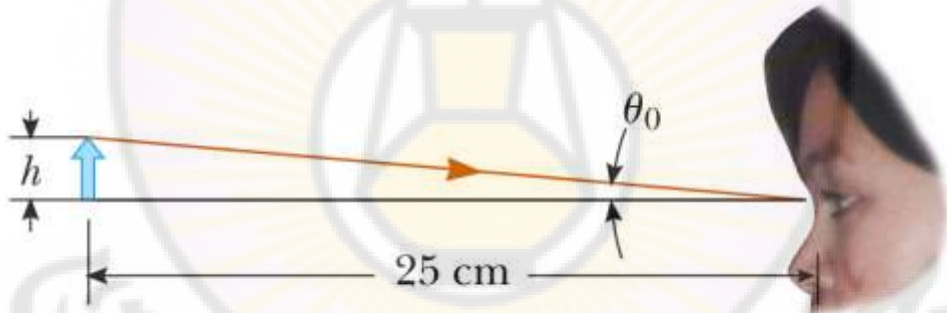
11.2.1 - المكبرة

ترى العين الأجسام من خلال زاوية θ التي تقابل الجسم وتعتبر عن الحجم الظاهري للجسم كما في الشكل (11.7)، حيث يبعد الجسم مسافة p من العين. من هذا الشكل نرى أن حجم الخيال المتشكل على شبكية العين يعتمد على الزاوية θ ، فإذا حركنا الجسم ليصبح أقرب إلى العين فإن θ سوف تزداد، وبالتالي نرى خيلاً أكبر للجسم. ومن المعروف أن العين السليمة لا تستطيع رؤية الأجسام بوضوح عندما يكون بعدها عن العين أقل من 25 cm ؛ أي أقل من نقطة الكتب، ويبين الشكل (11.8) الزاوية θ_0 المقابلة للجسم الواقع في نقطة الكتب للعين. فالمكبرة البسيطة هي عبارة عن عدسة رقيقة مقربة ذات بعد محراقي من رتبة آحاد

السنتمترات الغاية منها تكبير الحجم الظاهري للجسم، أو بعبارة أخرى تكبير أبعاد الخيال المتشكل على الشبكية للعين السليمة.

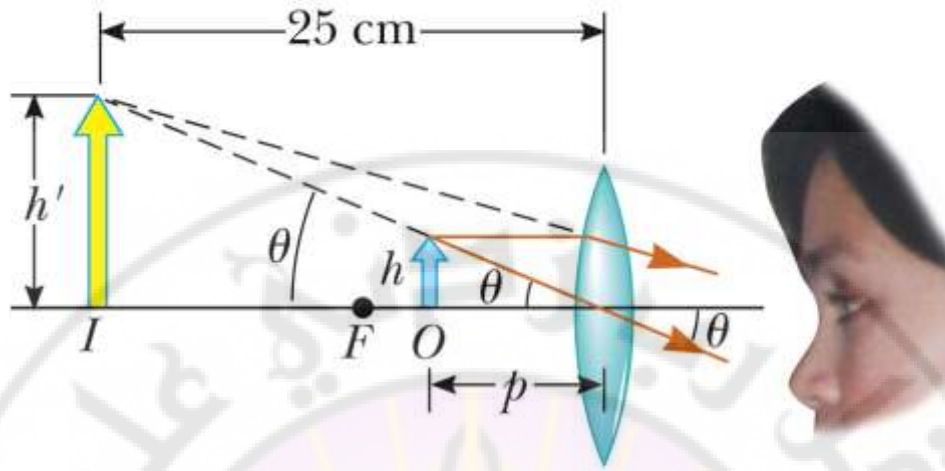


الشكل (11.7): الزاوية θ التي تقابل الجسم وتعبر عن الحجم الظاهري للجسم.



الشكل (11.8): الزاوية θ_0 المقابلة للجسم الواقع في نقطة الكتب للعين.

فعندما نريد زيادة الحجم الظاهري لجسم يجب علينا استخدام عدسة مقربة (مكبرة) نضعها أمام العين كما في الشكل (11.9)، بحيث يقع الجسم بين العدسة ونقطتها المحرقة، ففي هذا الموقع للجسم تشكل العدسة للجسم خيلاً وهمياً وصحيحاً وأكبر منه، ويدعى هذا النوع من العدسات الموجبة المكبرة.



الشكل (11.9): عدسة مقربة (مكبرة) أمام العين بحيث يقع الجسم بين العدسة ونقطتها المحرقة.

نعرّف التكبير الزاوي m لهذه العدسة (المكبرة) بأنه نسبة الزاوية θ المقابلة للجسم بوجود العدسة (الشكل (11.9)) إلى الزاوية θ_0 المقابلة للجسم الواقع في نقطة الكتب وبغياب العدسة (الشكل (11.8))، أي:

$$m = \frac{\theta}{\theta_0} \quad (11.4)$$

فمن هذه العلاقة نرى أن التكبير الزاوي يكون أعظماً عندما يكون الخيال في نقطة الكتب للعين (أي عندما يكون $p = -25 \text{ cm}$) وبالتالي يمكن حساب بعد الجسم الموافق لهذه الحال كما يلي:

$$p = \frac{25f}{25 + f} \quad (11.5)$$

حيث إن f هو البعد المحرقي للمكبرة مقدراً بالسنتيمتر. ومن أجل زوايا صغيرة يكون:

$$\tan\theta_0 \approx \theta_0 \approx \frac{h}{25} , \quad \tan\theta \approx \theta \approx \frac{h}{p} \quad (11.6)$$

و بتعويض المعادلة (11.6) في المعادلة (11.4) نحصل على العلاقة التالية:

$$m_{max} = \frac{\theta}{\theta_0} = \frac{h/p}{h/25} = \frac{25}{p} \quad (11.7)$$

ومنه بتعويض المعادلة (11.5) والمعادلة (11.6) في المعادلة (11.7) يمكننا إيجاد علاقة التكبير الزاوي الأعظمي بالبعد المحرقي للعدسة كما يلي:

$$m_{max} = 1 + \frac{25 \text{ cm}}{f} \quad (11.8)$$

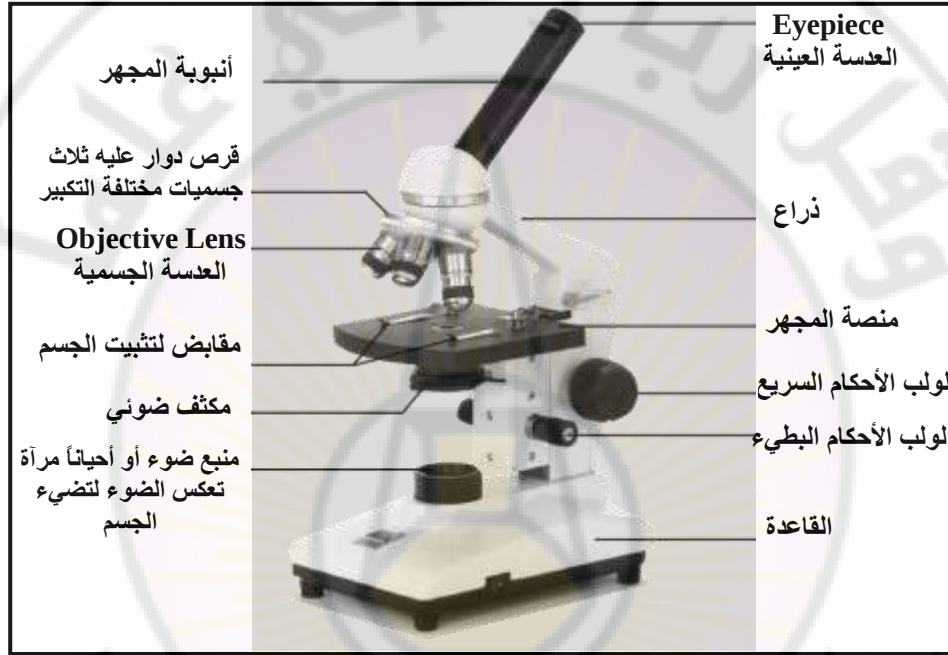
وتعطى استطاعة المكبرة مقدرة بالكسيرة بالعلاقة: $P = 1/f$ ، حيث f البعد المحرقي للعدسة على أن يقدر بالمتر.

11.2.2 - المجهر

المجهر أداة ضوئية تحتوي على مجموعة من العدسات المقربة رتبت بطريقة تمكنه من رؤية الأجسام الدقيقة جداً التي قد تكون بحجم بعض الجراثيم مثلاً. يظهر الشكل (11.10) صورة لمجهر كتبت عليه أقسامه وهي كالتالي:

- المرأة، أحد وجهيها مستوي والآخر مقعر، تستعمل لعكس النور الوارد عليها إلى الجسم المراد فحصه فتتيره (يستعمل الوجه المستوي من المرأة إذا كان المجهر مجهزاً بمكثف ضوئي)؛ وقد تحوي بعض الأجهزة عوضاً عن المرأة منبعاً ضوئياً لإنارة الجسم المراد فحصه، كما في الشكل (11.10).
- المكثف الضوئي، وهو عبارة عن عدسة وظيفتها تجميع النور، بالشدة الكافية على الجسم المفحوص، ويجهز المكثف عادة بلولب لتحريكه، وبحظار لتغيير شدة النور الوارد على الجسم.
- منصّة المجهر، ويوضع عليها الجسم المفحوص على زجاجة فحص يُنفذ إليها النور عن طريق فتحة دائرية في مركز المنصة، ويثبت الجسم على المنصة بمقابض يمكن زلقهما معه يميناً ويساراً، في حين يمكن زلق المنصة بما عليها إلى الأمام والخلف، ويتم تقدير هذا الانسحاب بواسطة مسطرتين كل منها مزودة بورنية، تستطيع كل واحدة أن تقدر 0.1 ملليمترًا. وبعض نماذج المجهر لا تحوي هذه التسهيلات، فتتحرك الجسم المفحوص على المنصة يدوياً.
- العدسة الجسمية، وحامل الجسميات، وهو قرص دوار يمكن أن يحمل ثلاثة جسميات مختلفة التكبير.

- العدسة العينية، وهي إما أن تكون عينية عادية أو عينية مكرومترية، وتستخدم هذه الأخيرة من أجل قياس الأبعاد.
- أنبوبة المجهر الحامل للجسميات والعينية، ويمكن رفعها وخفضها بواسطة لولبين أحدهما لولب الإحكام السريع، والثاني لولب الإحكام البطيء.



الشكل (11.10): المجهر.

يتألف المجهر في شكله المبسط من عدستين انظر الشكل (11.11)؛ الأولى عدسة مقربة ذات بعد محراقي صغير $f_0 < 1 \text{ cm}$ تدعى الجسمية، والأخرى عدسة مقربة بعدها المحراقي مساوٍ لبضعة سنتيمترات تدعى العينية تفصل بين العدستين المسافة L وتكون كبيرة بالنسبة لكل من البعد المحراقي للجسمية أو البعد المحراقي للعينية كما هو مبين في الشكل (11.11). وظيفة العينية هي إظهار جسم صغير

جداً يكون قريباً جداً من العدسة الجسمية. يوضح الشكل (11.11) مسير الأشعة في المجهر؛ ونلاحظ من الشكل أنه يتكون لجسم صغير خيال وهمي مكبر ومقلوب. بالنظر إلى الشكل (11.11)؛ نلاحظ أنه لرؤية الجسم O يجب وضعه خارج النقطة المحرقة للعدسة الجسمية F_0 ولكن قريباً جداً؛ بحيث يمكن بالتقريب عدّ بعد الجسم p عن العدسة مساوياً للبعد المحرقي للعدسة f_0 أي $p \approx f_0$. يعدل البعد بين العدستين العينية والجسمية بحيث يتشكل للجسم خيال I_1 حقيقي مقلوب مكبر للجسم يقع ضمن النقطة المحرقة الأولى للعدسة العينية F_e . من الشكل نلاحظ أن البعد بين العدسة الجسمية و الخيال (I_1) q_1 يمكن تقريبه ليكون مساوياً للطول L أي $q_1 \approx L$. بالتالي بعد استخدام التقريبات المذكورة آنفاً يمكن كتابة عبارة التكبير الخطي العرضاني للعدسة الجسمية كما يلي:

$$M_1 = -\frac{q_1}{p} = -\frac{L}{f_0} \quad (11.9)$$

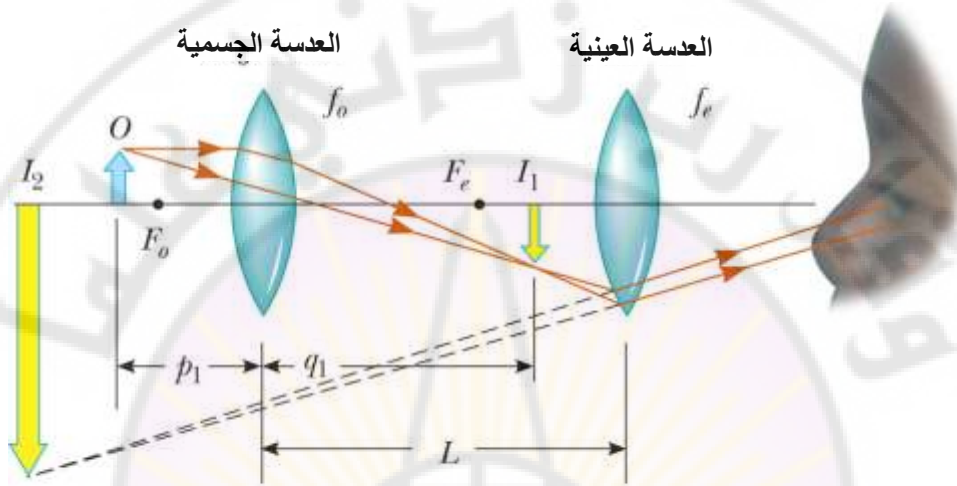
و بما أن الخيال I_1 واقع داخل النقطة المحرقة F_e للعينية (الذي هو بمثابة جسم بالنسبة لها)؛ فإن العينية تعمل كأنها عدسة مكبرة؛ حيث يعطى التكبير الزاوي للعدسة العينية بالعلاقة:

$$m_e = \frac{25 \text{ cm}}{f_e} \quad (11.10)$$

حيث f_e البعد المحرقي للعدسة العينية. بالتالي يرى الناظر خيلاً نهائياً وهمياً ومقلوب I_2 من خلالها للجسم I_1 . بالنتيجة يكون التكبير الخطي العرضاني للمجهر M هو ناتج عن التكبير الخطي العرضاني للعدسة الجسمية M_1 المعطى بالعلاقة (11.9)، والتكبير الزاوي للعدسة العينية m_e المعطى بالعلاقة (11.10) يعطى بالعلاقة:

$$M = M_1 m_e = -\frac{L}{f_0} \frac{25 \text{ cm}}{f_e} \quad (11.11)$$

وهي معادلة التكبير الكلي للمجهر. الإشارة السالبة تشير هنا إلى أن الخيال مقلوب.



الشكل (11.11): سير الأشعة في المجهر الذي يتكون من عدستين، العدسة الجسمية والعدسة العينية وأن المسافة L هي المسافة الفاصلة بين مركزي العدستين (طول أنبوبة المجهر).



الملاحق

ملحق (1): حل بعض مسائل الفصول

فيما يلي مفاتيح حل مسائل بعض الفصول وعلى الطالب مناقشة أجوبة المسائل من حيث طبيعة الخيال، وكذلك يجب على الطالب ذكر تفاصيل الحل.

حل مسائل الفصل الثاني تعريفات ومبادئ وقوانين أساسية في الضوء

2.1- الطول الموجي لضوء الليزر الأحمر (هليوم - نيون) في الهواء 632nm والمطلوب:

أ- احسب تواتره؟

ب- احسب طول موجته في زجاج ذي قرينة الانكسار 1.5؟

ت- احسب سرعته في الزجاج؟

$$v = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8}{632.8 \times 10^{-9}} = 4.741 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow \frac{632.8 \times 10^{-9}}{\lambda_2} = \frac{1.5}{1}$$

ومنه $\lambda_2 = 421.867 \text{ nm}$

$$v = v\lambda_2 = 4.741 \times 10^{14} \times 421.867 \times 10^{-9} = 2 \times 10^8 \text{ m/s}$$

أو

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3 \times 10^8}{1.5} = 2 \times 10^8 \text{ m/s}$$

2.2- أوجد سرعة الضوء في: (أ)- الماء (water)، (ب)- الزجاج الصواني (flint glass). (ج)- ألماس (Diamond). علماً بأن قرائن انكسار هذه المواد معطاة في الجدول

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3 \times 10^8}{1.33} = 2.256 \times 10^8 \text{ m/s} \quad \text{(أ)- الماء (water)}$$

(ب)- الزجاج الصواني (flint glass).

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3 \times 10^8}{1.66} = 1.807 \times 10^8 \text{ m/s}$$

(ج)- ألماس (Diamond).

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3 \times 10^8}{2.419} = 1.24 \times 10^8 \text{ m/s}$$

2.3- شعاع ضوئي ينتشر في الهواء بطول موجة 689nm، يرد هذا الشعاع على سطح صفيحة ملساء ومصقولة من مادة الزجاج التاجي قرينة انكساره 1.52 والمطلوب:

أ- أوجد سرعة الضوء في مادة الزجاج التاجي.

ب- أوجد الطول الموجي للضوء في مادة الزجاج التاجي.

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3 \times 10^8}{1.52} = 1.974 \times 10^8 \quad m/s$$

ج- أوجد الطول الموجي للضوء في مادة الزجاج التاجي.

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{c}{v_2} \rightarrow$$

$$\frac{3 \times 10^8}{1.974 \times 10^8} = \frac{589}{\lambda_2}$$

$$\lambda_2 = 387.562 \text{ nm} .$$

2.4- تصنع حزمة ضوئية متوازية زاوية قدرها 30° مع سطح لوح زجاجي قرينة انكساره 1.5 و المطلوب: (أ)- أوجد الزاوية بين الحزمة المنكسرة و سطح الزجاج. (ب)- كم يجب أن تكون زاوية الورود θ حتى تكون زاوية الانكسار مساوية $\theta/2$ ؟

(أ)- أوجد الزاوية بين الحزمة المنكسرة و سطح الزجاج.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \rightarrow$$

$$\sin 60 = 1.5 \sin \theta_2 \rightarrow$$

$$\theta_2 = 35.264$$

وهي زاوية الانكسار. فتكون الزاوية بين الحزمة المنكسرة و سطح الزجاج

$$\phi = 90 - \theta_2 = 90 - 35.264 = 54.736$$

(ب)- كم يجب أن تكون زاوية الورود θ حتى تكون زاوية الانكسار مساوية $\theta/2$ ؟

$$\sin\theta = 1.5\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \rightarrow$$

$$\frac{\sin\theta}{\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} = 1.5$$

$$2\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) = 1.5 \rightarrow \theta = 82.82$$

2.5- يرد ضوء على لوح زجاجي بزاوية ورود مقدارها 60° ، فينعكس بعض الحزمة، وينكسر بعضها الآخر. ويلاحظ أن الزاوية بين الجزء المنعكس والجزء المنكسر تساوي 90° ، ما هي قرينة انكسار الزجاج؟

$$n_1\sin\theta_1 = n_2\sin\theta_2 \rightarrow$$

$$\sin 60 = n_2\sin 30 \rightarrow$$

$$n_2 = \sqrt{3} = 1.732$$

حل مسائل الفصل الثالث الانعكاس الكلي الداخلي وأهم تطبيقاته وظاهرة تبدد الضوء

3.1- يقع منبع ضوئي نقطي تحت سطح الماء، وعلى بعد 20 cm منه. احسب قطر أكبر دائرة واقعة على سطح الماء يستطيع الضوء أن ينفذ من خلالها خارج الماء.

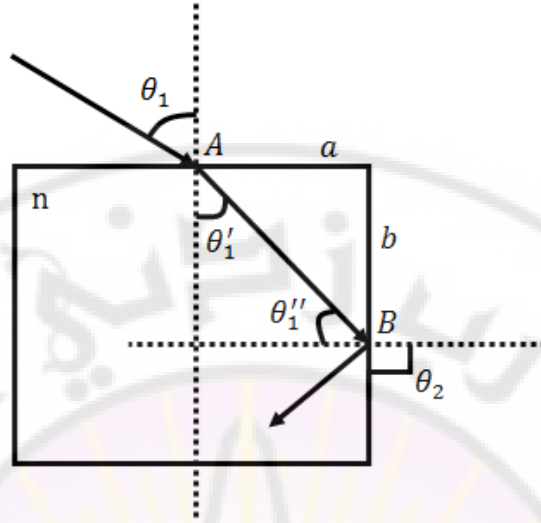
$$\sin \theta_c = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1}{1.33} \rightarrow \theta_c = 48.753$$

$$\tan \theta_c = \frac{R}{20} \rightarrow R = 20 \times \tan(48.753) = 22.808 \text{ cm}$$

$$2 R = 2 \times 22.808 = 45.616 \text{ cm}$$

3.2- يرد شعاع ضوئي من الهواء بزاوية θ_1 على السطح الأفقي العلوي a لمكعب شفاف قرينة انكساره n ، والمطلوب:

(أ)- من أجل أي قيمة لـ θ_1 يحدث للشعاع المنكسر انعكاس كلي داخلي على الوجه الجانبي b للمكعب؟ (ب)- ما أعظم قيمة لـ n التي من أجلها يمكن للشعاع الوارد مماسياً على الوجه a أن يبرز من الوجه b ؟



$$\sin\theta_1'' = \frac{1}{n} \rightarrow n\sin\theta_1'' = 1 \quad (1)$$

حيث تكون زاوية البروز عند النقطة B مساوية لـ $\theta_2 = 90 \text{ deg}$ ينكسر

الشعاع AB وفق المعادلة: $\sin\theta_1 = n\sin\theta_1'$

ولكن الزاويتان θ_1' و θ_1'' متتامتان يعطي:

$$\sin\theta_1 = n\cos\theta_1'' \quad (2)$$

بتربيع المعادلتين (1) و (2) وجمعهما يعطي:

$$n^2 = 1 + \sin^2\theta_1 \rightarrow \sin\theta_1 = \sqrt{n^2 - 1}$$

(ب)- ما أعظم قيمة لـ n التي من أجلها يمكن للشعاع الوارد مماسياً على الوجه

aa' أن يبرز من الوجه ab؟ تحسب أعظم قيمة لـ n من العلاقة الأخيرة بجعل

$\theta_1 = 90 \text{ deg}$ أي:

$$\sin\theta_1 = \sin 90 = 1 = \sqrt{n^2 - 1} \rightarrow n = \sqrt{2}$$

3.3- قيسـت قرينة انكسار زيت الزيتون n_2 بدلالة قرينة انكسار موشور زجاجي قائـم الزاوية n_1 ، فـما هو شرط الحصول على أصغر قيمة لـ n_2 تمكـننا من رؤية الحزمة الضوئية الواردة وروداً مماسياً على الوجه الأفقي الأعلى للموشور عند الوجه الجانبي العمودي عليه، علماً بأن قرينة انكسار مادة الموشور 1.5.

$$\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1} = \frac{n_2}{1.5} \rightarrow n_2 = 1.5\sin\theta_c$$

$$\theta_1 = \frac{\pi}{2} - \theta_c \rightarrow \sin\theta_1 = \cos\theta_c \rightarrow$$

$$n_1\sin\theta_1 = n_2\sin\theta_2 \rightarrow 1.5\cos\theta_c = \sin\theta_2 \rightarrow \cos\theta_c = \frac{\sin\theta_2}{1.5}$$

$$\sin\theta_c = \frac{n_2}{1.5} \text{ ولكن}$$

$$\cos^2\theta_c + \sin^2\theta_c = 1 \rightarrow \left(\frac{\sin\theta_2}{1.5}\right)^2 + \left(\frac{n_2}{1.5}\right)^2 = 1$$

$$n_2 = \sqrt{1.5^2 - \sin^2\theta_2} \text{ بالحل يمكن كتابة المعادلة بالشكل}$$

أصغر قيمة لـ n_2 توافق $\sin^2\theta_2 = 1$ أي $\theta_2 = 90 \text{ deg}$ ومنه

$$n_2 = \sqrt{1.5^2 - 1} = 1.118$$

حل مسائل الفصل الرابع: الانعكاس والانكسار على سطوح مستوية

4.1- يرد شعاع ضوئي وحيد اللون بزاوية ورود قدرها 45° على صفيحة شفافة متوازية الوجهين ثخنها 4cm وقرينة انكسارها 1.5. احسب انزياح الشعاع البارز عن الشعاع الوارد. قارن هذا الانزياح بالانزياح عندما تكون زاوية الورود صغيرة و تساوي 3° .

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \rightarrow$$

$$\sin 45 = 1.5 \sin \theta_2 \rightarrow \theta_2 = 28 \text{ deg.}$$

$$d = \frac{t}{\cos \theta_2} \sin(\theta_1 - \theta_2) \rightarrow$$

$$d = \frac{4}{\cos 28} \sin(45 - 28) \rightarrow d = 1.3 \text{ cm}$$

زاوية ورود 3 درجة تؤخذ عندها الزاوية بالراديان

$$n_1 \theta_1 = n_2 \theta_2 \rightarrow$$

$$0.05 = 1.5 \theta_2 \rightarrow$$

$$\theta_2 = 0.035 \text{ Rd.}$$

$$d = t \sin(\theta_1 - \theta_2) \rightarrow$$

$$d = 4 \sin(0.05 - 0.035) = 0.06 \text{ cm}$$

4.2- موشور زجاجي قرينة انكساره بالنسبة للخط الأصفر من طيف الصوديوم تساوي 1.523 وزاوية الرأس فيه تساوي 50° . إذا وردت حزمة من الضوء الأصفر الأنف الذكر على وجهه الأول بزاوية قدرها 45° ، أوجد: (أ)- زاوية الانحراف β عند الوجه الأول، (ب)- زاوية الانحراف γ عند الوجه الثاني، (ج)- زاوية الانحراف الكلية للموشور.

$$\beta = \phi_1 - \phi'_1 = 45 - \phi'_1$$

$$n \sin \phi_1 = n' \sin \phi'_1 \rightarrow$$

$$\sin 45 = 1.523 \sin \phi'_1 \rightarrow \phi'_1 = 28 \text{ deg.}$$

$$\beta = 45 - 28 = 17 \text{ deg}$$

$$\gamma = \phi_2 - \phi'_2$$

$$\alpha = \phi'_1 + \phi'_2 \rightarrow 50 = 28 + \phi'_2 \rightarrow \phi'_2 = 22 \text{ deg.}$$

$$n \sin \phi_2 = n' \sin \phi'_2 \rightarrow$$

$$\sin \phi_2 = 1.523 \sin 22 \rightarrow$$

$$\phi_2 = 34.8 \text{ deg.}$$

$$\gamma = \phi_2 - \phi'_2 = 34.8 - 22 = 12.7 \text{ deg.}$$

$$\delta = \phi_1 + \phi_2 - \alpha = 45 + 34.8 - 50 = 29.8 \text{ deg.}$$

4.3- تتوضع قطعة معدنية في قعر حوض مليء بالماء حتى ارتفاع قدره 36cm، فإذا كانت قرينة انكسار الماء مساوية 1.333، أوجد البعد الظاهري للقطعة عند النظر إليها من الأعلى بشكل عمودي، مفترضين أن الزوايا صغيرة، أي يمكن إلباس الجيوب بالزوايا مقدرة بالراديان.

$$q = -p \frac{n'}{n} = -36 \frac{1}{1.333} = -27 \text{ cm}$$

أو

$$q = p \frac{n' \cos \phi'}{n \cos \phi}$$

حيث

$$\cos \phi \approx \cos \phi' \approx 1$$

4.4- موشور رقيق زاويته درجتان وقرينة انكساره بالنسبة للشعاع الوارد إليه تساوي 1.58. احسب استطاعة هذا الموشور.

$$\alpha = 2 \text{ deg.} = \frac{2\pi}{180} \text{ Rd.}$$

$$\delta = \alpha(n' - 1) = \frac{2\pi}{180} (1.58 - 1) = 0.02 \text{ Rd.} = 1.16 \text{ deg.}$$

$$\tan \delta = \frac{x}{100} \rightarrow x = 100 \tan \delta = 2.02 \text{ كسيرة}$$

حل مسائل الفصل الخامس: الانعكاس والانكسار على سطوح كروية

1- مسائل المرايا الكروية

5.1- مرآة كروية مقعرة بعدها المحرقي مجهول. وضع جسم مضيء في نقطة ما Q_1 من محورها الأصلي فكانت له خيلاً وهمياً أكبر منه ثلاثين مرة، وحين يُزاح الجسم بعيداً عن المرآة بمقدار 10 cm إلى النقطة Q_2 ، يتكون له خيال حقيقي على بعد 16 m من المرآة. احسب البعد المحرقي للمرآة، وعيّن موضع محرقها F بين Q_1 و Q_2 .

$$m_t = -\frac{q}{p} = 30 \rightarrow q = -30p$$

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \rightarrow f = \frac{30}{29}p \quad (1)$$

$$\frac{1}{p+10} + \frac{1}{1600} = \frac{1}{f} \rightarrow$$

$$f = \frac{(p+10) \times 1600}{1610+p} \quad (2)$$

بحل جملة المعادلتين (1) و (2) نجد:

$$p = 96.667 \text{ cm}, \quad f = 100 \text{ cm}$$

5.2- مرأتان مقعرتان محوراها الأصليان منطبقان على بعضهما، ووجهاهما العاكسان متقابلان و البعد بين رأسيهما أربعة أمتار. في أي نقطة من محوره الأصلي ينبغي وضع جسم حتى يكون طول خياليهما الحقيقيين المتشكلين بالمرأتين متساويين، علماً أن نصف قطر انحناء إحدى المرأتين 1 m، ونصف قطر انحناء الأخرى 2 m.

$$f_2 = \frac{r_2}{2} = 100 \text{ cm}, \quad f_1 = \frac{r_1}{2} = 50 \text{ cm}$$

نفرض أن بعد الجسم عن الأولى p فيكون بعده عن الثانية 400-p وبالتالي يكون:
المرأة الأولى:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{50} \rightarrow q = \frac{50p}{p - 50} \quad (1)$$

المرأة الثانية:

$$\frac{1}{400 - p} + \frac{1}{q'} = \frac{1}{100}$$

$$q' = \frac{100 \times (400 - p)}{300 - p} \quad (2)$$

بما أن طول الخياليين متساويان ينتج:

$$\frac{q}{p} = \frac{q'}{400 - p} \quad (3)$$

بحل جملة المعادلتين (1) و (2) و (3) نجد:

$$p_1 = 133.333 \text{ cm}, \quad p_2 = 266.667 \text{ cm}$$

5.3- يبلغ البعد المحرقي لمرآة كروية مقعرة 25 cm. بين أن هنالك وضعين لجسم يكون معهما البعد الفاصل بين الجسم وخياله في المرآة المقعرة مساوياً 2 m، ثم عين هذين الوضعين.

$$p - q = 200 \text{ cm}$$

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

$$p - 200 = \frac{25p}{p - 25}$$

بحل هذه المعادلة نحصل على: $p_1 = 21.922 \text{ cm}$, $p_2 = 228.078 \text{ cm}$

وتوافق إلى $q_1 = -178.07 \text{ cm}$ خيال وهمي وأكبر من الجسم

$q_2 = 28.07 \text{ cm}$ خيال حقيقي وأصغر من الجسم

5.4- مرآة كروية محدبة ببعد محرقي مساو إلى $f = -10 \text{ cm}$. المطلوب حدد موقع الخيال وطبيعته لجسم بعده، يعطى كما يلي: (أ) - 25cm. (ب) - 10 cm. (ج) - 5cm. ثم احسب التكبير الخطي العرضاني في كل حالة. إذا كان طول الجسم $h = 5 \text{ mm}$ ، أوجد طول الخيال h' في كل حالة من الحالات السابقة.

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \rightarrow \frac{1}{25} + \frac{1}{q} = \frac{1}{-10} \rightarrow q = -7.143 \text{ cm}$$

$$\frac{1}{10} + \frac{1}{q} = \frac{1}{-10} \rightarrow q = -5 \text{ cm}$$

$$\frac{1}{5} + \frac{1}{q} = \frac{1}{-10} \rightarrow q = -3.333 \text{ cm}$$

$$m_{t1} = -\frac{q}{p} = 0.286 \rightarrow h'_1 = 0.143 \text{ cm}$$

$$m_{t2} = -\frac{q}{p} = 0.5 \rightarrow h'_2 = 0.25 \text{ cm}$$

$$m_{t3} = -\frac{q}{p} = 0.667 \rightarrow h'_3 = 0.333 \text{ cm}$$

5.5- مرآة كروية محدبة نصف قطرها متر واحد وجسم طوله 8 cm عمودي على محورها الأصلي وموجود على مسافة 75 cm منها. عيّن مكان الخيال وطبيعته وطوله في الحالتين:

أ- الجسم حقيقي.

ب- الجسم وهمي.

$$r = 100 \text{ cm} \rightarrow f = 50 \text{ cm}$$

أ- الجسم حقيقي. $p = 75 \text{ cm}$

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \rightarrow q = -30 \text{ cm}$$

$$m_t = -\frac{q}{p} = 0.4, \quad h' = 3.2 \text{ mm}$$

ب- الجسم وهمي. $p = -75 \text{ cm}$

$$q = -150 \text{ cm}, \quad m_t = -2, \quad h' = -16 \text{ mm}$$

5.6- يوضع جسم أمام مرآة مقعرة نصف قطرها R و على بعد $1.5R$ من ذروة المرأة، فإذا كان طول الجسم 5mm والمطلوب:

أ- عين مكان الخيال بالرسم الهندسي.

ب- أوجد بعد هذا الخيال.

ج- احسب طول هذا الخيال.

$$\frac{1}{1.5R} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R} \rightarrow q = \frac{1.5R}{2}$$

$$m_t = -\frac{q}{p} = \frac{h'}{h}$$

$$-\frac{\frac{1.5R}{2}}{1.5R} = \frac{h'}{0.5} \rightarrow$$

$$h' = -\frac{1}{4} \text{ cm}$$

2- مسائل الكاسر الكروي

5.7- يُقطع قضيب زجاجي شفاف طوله 40 cm، فتُجعل إحدى نهايتيه مستوية، وتُجعل النهاية الأخرى على شكل نصف كرة ذات نصف قطر يساوي 12cm. يُوضع جسم على محور القضيب الزجاجي وعلى بعد 10 cm من النهاية نصف الكروية. (أ)- ما هو موضع الخيال الأخير؟ (ب)- ما هو تكبيره. نفرض أن قرينة الانكسار تساوي 1.5.

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{R} \rightarrow \frac{1}{10} + \frac{1.5}{q} = \frac{0.5}{12} \rightarrow q = -25.7 \text{ cm}$$

الخيال وهمي أي يقع أمام السطح

$$m_t = \frac{h'}{h} = -\frac{n_1 q}{n_2 p} = -\frac{1}{1.5} \frac{-25.7}{10} = 1.7$$

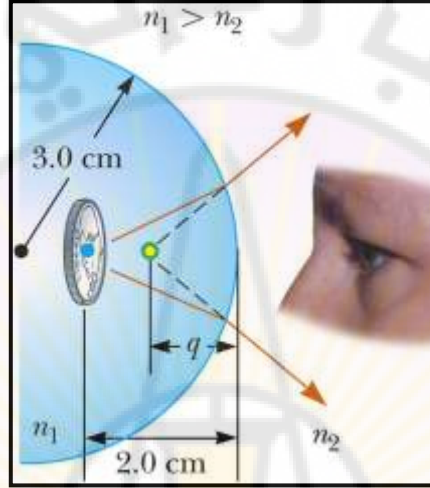
الخيال صحيح

$$h' = 1.7h$$

الخيال أكبر من الجسم.

يجب إعادة حل هذه المسألة بفرض أن هذا القضيب قد غمر في الماء ذو قرينة انكسار 1.333

5.8- غمست قطعة نقود في كرة بلاستيك كما في الشكل التالي. إذا علمت أن قرينة انكسار مادة البلاستيك $n_1 = 1.5$ ، و أن قطعة النقود وضعت على مسافة 2 cm من حافة الكرة، و أن نصف قطر الكرة 3 cm و قرينة انكسار الهواء المحيط بها $n_2 = 1$. أوجد بعد خيال قطعة النقود.



$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{R} \rightarrow \frac{1}{q} = \frac{1 - 1.5}{-3} - \frac{1.5}{2} \rightarrow q = -1.7 \text{ cm}$$

هنا وضعنا $R = -3$ لأن مركز الانحناء يقع أمام السطح

الإشارة السالبة لبعد الخيال تعني أنه وهمي و أقرب من البعد الحقيقي.

5.9- قضيب زجاجي قرينة انكساره $n=1.5$ إحدى نهايتيه محدبة بنصف قطر انحناء 6 cm. وضع جسم في الهواء على المحور الأصلي للقضيب و بجهة النهاية المحدبة للقضيب. أوجد مواقع الخيال الموافقة لأبعاد الجسم التالية: (أ) - 20 cm (ب) - 10 cm (ج) - 3 cm من نهاية القضيب.

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{R} \rightarrow \frac{1}{20} + \frac{1.5}{q_1} = \frac{1.5 - 1}{6} \rightarrow q_1 = \text{cm}$$

تعداد العملية من أجل الأبعاد الأخرى

يجب إعادة حل هذه المسألة بفرض أن هذا القضيب قد غمر في الماء ذو قرينة انكسار 1.333

5.10- قضيب زجاجي طوله 2 cm و قرينة انكساره 1.5. صُقلت نهايته على شكل كاسر كروي محدب نصف قطر انحنائه 2 cm. وضع جسم طوله 2 mm عمودياً على محور القضيب وعلى بعد 5 cm من إحدى نهايتيه والمطلوب:

(أ)- أوجد بعد الخيال النهائي وطبيعته. (ب)- طول هذا الخيال.

(أ)- أوجد بعد الخيال النهائي وطبيعته. (ب)- طول هذا الخيال.

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{R} \rightarrow$$

$$\frac{1}{5} + \frac{1.5}{q_1} = \frac{1.5 - 1}{2} \rightarrow q_1 = 30 \text{ cm}$$

خيال حقيقي ويقع على يمين السطح وهذا الخيال يشكل جسماً وهمياً بالنسبة للسطح الثاني ويبعد عنه بمقدار

$$p_2 = -(30 - 2) = -28 \text{ cm}$$

السطح الثاني

$$\frac{1.5}{-28} + \frac{1}{q_2} = \frac{-0.5}{-2} \rightarrow q_2 = 3.29 \text{ cm}$$

خيال حقيقي ويقع على يمين الوجه الثاني

طول الخيال:

$$m_t = m_{t1} \times m_{t2}$$

$$m_{t1} = -\frac{n_1 q}{n_2 p} = -\frac{1}{1.5} \frac{30}{5} = -4$$

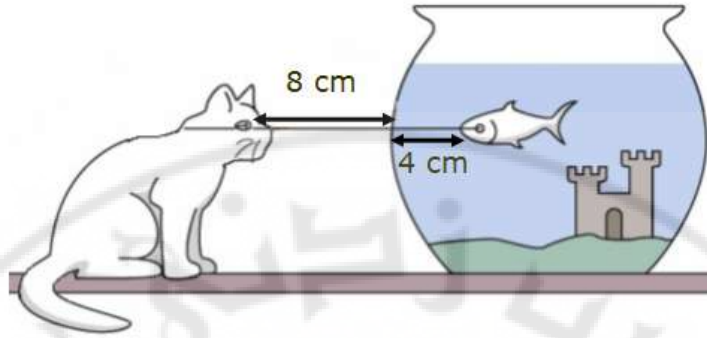
$$m_{t2} = -\frac{n_2 q}{n_1 p} = -\frac{1.5}{1} \frac{3.29}{-28} = 0.176$$

$$m_t = m_{t1} \times m_{t2} = -0.705 \rightarrow$$

$$h' = hm_t = 0.2 \times (-0.705) = -0.141 \text{ cm}$$

والخيال مقلوب.

5.11- سمكة بداخل وعاء جداره الجانبي جزء من كرة نصف قطرها 10 cm كما في الشكل التالي، علماً بأن الأرقام على هذا الشكل تشير إلى الأبعاد الحقيقية. قطة تنظر من الخارج إلى هذه السمكة. المطلوب أوجد البعد الظاهري للسمكة كما تراه القطة، ومن ثم أوجد البعد الظاهري للقطة كما تراه السمكة علماً بأن قرينة انكسار الماء 1.33.



البعد الظاهري للسمكة كما تراه القطة

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{R} \rightarrow \frac{1.33}{4} + \frac{1}{q} = \frac{1 - 1.33}{-10} \rightarrow q = -3.33 \text{ cm}$$

(ملاحظة: الجسم هنا السمكة فيكون نصف القطر سالباً والخيال وهمياً وترى القطة السمكة على بعد 3.33 من سطح الكاسر).

السمكة ترى القطة فيكون نصف القطر موجباً (يقع خلف السطح) والجسم هنا القطة

$$\frac{1}{8} + \frac{1.33}{q} = \frac{1.33 - 1}{10} \rightarrow q = -14.46 \text{ cm}$$

القطة أبعد من بعدها الحالي. ترى السمكة القطة أمام السطح وأبعد من بعدها الحقيقي.

حل مسائل الفصل السادس: قوانين العدسات الرقيقة ودراسة تشكل الأخيلة فيها

6.1- عدسة مقربة بعدها المحرقي 10cm+. إذا كانت الأبعاد الجسمية مساوية 4cm، 10cm، 25cm، 50cm أوجد ما يلي:

(أ)- موقع الخيال في كل حالة. (ب)- التكبير المقابل، هل الخيال حقيقي أم وهمي في كل حالة؟ هل الخيال صحيح أم مقلوب في كل حالة؟ (ج)- إذا كان ارتفاع الجسم 5mm أوجد ارتفاع الخيال في كل حالة.

$$p = 50 \text{ cm} \rightarrow \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \rightarrow$$

$$q = 12.5 \text{ cm}, m_t = -0.25, h' = -0.125 \text{ cm}$$

$$p = 25 \text{ cm} \rightarrow \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \rightarrow$$

$$q = 16.667 \text{ cm}, m_t = -0.667, h' = -0.333 \text{ cm}$$

$$p = 10 \text{ cm} \rightarrow \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \rightarrow$$

$$q = \infty, m_t = \infty, h' = \infty$$

$$p = 4 \text{ cm} \rightarrow \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \rightarrow$$

$$q = -6.667 \text{ cm}, m_t = 1.667, h' = 0.833 \text{ cm}$$

6.2- يوضع جسم على بعد 18cm من شاشة. والمطلوب: (أ) عند أي نقاط واقعة بين الجسم والشاشة يمكن وضع عدسة بعدها المحرقي 4cm للحصول على خيال واقع على الشاشة. (ب)- ما هو تكبير الخيال المقابل لأوضاع العدسة هذه؟

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

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{18 - p} = \frac{1}{4}$$

ومنه

$$p^2 - 18p + 72 = 0$$

وبحل المعادلة ينتج

$$p_1 = 6 \text{ cm} \rightarrow q_1 = 18 - 6 = 12 \text{ cm}$$

$$p_2 = 12 \text{ cm} \rightarrow q_2 = 18 - 12 = 6 \text{ cm}$$

$$m_{t1} = -2 , \quad m_{t2} = -0.5$$

6.3- توضع ثلاث عدسات رقيقة، لكل منها بعد محرقي يساوي 20cm على محور مشترك، و تفصل بين الواحدة و التالية مسافة تساوي 20cm. أوجد موضع الخيال النهائي لجسم صغير واقع على المحور الأصلي، و على بعد 60cm إلى يسار العدسة الأولى.

تحل هذه المسألة من قبل الطالب (هنا خيال الأولى جسم بالنسبة للثانية و خيال الثانية هو جسم بالنسبة للثالثة مع مراعاة اصطلاح الإشارة).

6.4- نصفاً قطري انحناء وجهي عدسة رقيقة هما $R_1 = +10 \text{ cm}$ و

$R_2 = -25 \text{ cm}$ وقرينة انكسار زجاجها $n=1.6$ والمطلوب: (أ)- البعد المحرقي للعدسة. (ب)- استطاعة العدسة.

أعد حل هذه المسألة إذا كان الوسط المحيط بالعدسة هو الماء وقرينة انكساره 1.333.

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

$$\frac{1}{f} = (1.6 - 1) \left(\frac{1}{10} - \frac{1}{-25} \right) \rightarrow f = 11.9 \text{ cm}$$

$$P = \frac{1}{f} = \frac{1}{0.119} = 8.4 \text{ D}$$

6.5- عدستان بعدهما المحرقيان $f_1 = +20 \text{ cm}$ و $f_2 = -30 \text{ cm}$. جعلتا على بعد 20cm إحداهما عن الأخرى. فإذا وضع جسم طوله 5mm على بعد 50cm من العدسة الأولى، أوجد: (أ)- موضع الخيال النهائي. (ب)- طول هذا الخيال.

$$p = 50 \text{ cm} \rightarrow \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \rightarrow q = 33.333 \text{ cm}$$

هذا الخيال هو جسم وهمي بالنسبة للعدسة الثانية:

$$p_2 = -(33.333 - 20) = -13.333 \text{ cm}$$

$$p = -13.333 \text{ cm} \rightarrow \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \rightarrow q = 24 \text{ cm}$$

طول الخيال:

$$m_{t1} = -0.667, \quad m_{t2} = 1.8 \rightarrow$$

$$m_t = m_{t1} \times m_{t2} = -1.2 \rightarrow h' = -6 \text{ mm}$$

6.6- عدسة مبعدة القيمة المطلقة لبعدها المحرقي 10cm. إذا كانت الأبعاد الجسمية مساوية 4cm، 10cm، 25cm، 50cm أوجد ما يلي:

- (أ)- موقع الخيال في كل حالة. (ب)- التكبير الخطي العرضاني المقابل، هل الخيال حقيقي أم وهمي في كل حالة؟ هل الخيال صحيح أم مقلوب في كل حالة؟
(ج)- إذا كان ارتفاع الجسم 5mm أوجد ارتفاع الخيال في كل حالة.

$$f = -10 \text{ cm}, \quad p = 50 \text{ cm} \rightarrow \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \rightarrow$$

$$q = -8.333 \text{ cm},$$

$$m_t = 0.167, \quad h' = 0.083 \text{ cm}$$

$$f = -10 \text{ cm}, \quad p = 25 \text{ cm} \rightarrow \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \rightarrow$$

$$q = -7.143 \text{ cm}$$

$$m_t = 0.286, \quad h' = 0.143 \text{ cm}$$

$$f = -10 \text{ cm}, \quad p = 10 \text{ cm} \rightarrow \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \rightarrow$$

$$q = -5 \text{ cm}$$

$$m_t = 0.5, \quad h' = 0.25 \text{ cm}$$

$$f = -10 \text{ cm}, \quad p = 4 \text{ cm} \rightarrow \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \rightarrow$$

$$q = -2.857 \text{ cm}$$

$$m_t = 0.714, \quad h' = 0.357 \text{ cm}$$

6.7- عدسة نصف قطر وجهها الأول $R_1 = 6cm$ ونصف قطر وجهها الثاني $R_2 = 4cm$ و قرينة انكسار مادتها 1.5. احسب بعدها المحرقي عندما تكون محاطة بوسط واحد هو:

(أ)- الهواء، (ب)- وسط قرينته 1.4، (ج)- وسط قرينته 1.6.

(أ)- الهواء $n_1 = n_2 = 1$

$$\frac{n_2}{f} = \frac{n - n_1}{R_1} + \frac{n_2 - n}{R_2} \rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1.5 - 1}{6} + \frac{1 - 1.5}{4} \rightarrow f = -24 cm$$

(ب)- وسط قرينته 1.4

$$\frac{n_2}{f} = \frac{n - n_1}{R_1} + \frac{n_2 - n}{R_2} \rightarrow \frac{1.4}{f} = \frac{1.5 - 1.4}{6} + \frac{1.4 - 1.5}{4} \rightarrow f = 33.6 cm$$

(ج)- وسط قرينته 1.6.

$$f = -38.4 cm$$

ملحق (2): أهم الثوابت الأساسية في الضوء

جدول بالأطوال الموجية لطيف الانبعاث المرئية لبعض العناصر مقدر بالانغستروم.

أنبوب بخار الزئبق		أنبوب غاز الهليوم		أنبوب غاز النيون	
اللون	طول الموجة	اللون	طول الموجة	اللون	طول الموجة
أحمر	6908	أحمر ضعيف	7065	أحمر 1	6507
أحمر برتقالي	6254	أحمر ش	6678	أحمر 2	6402
أصفر 1 ش	5790	أصفر ش	5876	أحمر 3	6383
أصفر 2 ش	5769	أخضر أزرق	5016	أحمر 4	6305
أخضر مصفر ش	5461	أزرق مخضر	4922	أحمر 5	6267
أزرق أخضر 1	4960	أزرق 1	4713	أحمر 6	6217
أزرق أخضر 2	4916	أزرق 2	4471	برتقال 1	6182
أزرق 1 م	4358	أزرق نيلي	4387	برتقال 2	6164
أزرق 2 م	4347	بنفسجي 1	4121	برتقال 3	6143
أزرق 3 م	4339	بنفسجي 2	4026	برتقال 4	6129
بنفسجي 1	4078	بنفسجي 3	3889	برتقال 5	6096
بنفسجي 2	4047	أنبوب غاز الهيدروجين		برتقال 6	6075
أنبوب بخار الكاديوم		اللون	طول الموجة	برتقال 7	6030
اللون	طول الموجة	أحمر	6563	برتقال 8	5976
أحمر ش	6438			برتقال 9	5940
أخضر 1	5379	أزرق	4861	أصفر 1	5882
أخضر 2	5338	أزرق نيلي	4340	أصفر 2	5853
أزرق مخضرش	5086	بنفسجي 1	4102	أصفر 3	4765
أزرق ش	4800	بنفسجي 2	3970	-	-
أزرق نيلي	4678	-	-	-	-
بنفسجي	4413	-	-	-	-
م: ترمز إلى الألوان المتراسة ش: ترمز إلى الإضاءة الشديدة					



ملحق (3): المصطلحات العلمية

العربية	الإنكليزية
A	
زيغ	Aberration
مطلق	Absolute
صفر مطلق	Absolute Zero
ارتياح مطلق	Absolute error
ارتياح مطلق	Absolute Incertitude
قرينة الانكسار المطلقة	Absolute Index of refraction
ارتياح طارىء	Accidental error
مطابقة	Accommodation
دقة	Accuracy
لالوني	Achromatic
عدسة لالونية	Achromatic lens
فعل	Action
هواء	Air
ارتفاع	Altitude
مطال، سعة	Amplitude
تحليلي	Analytic
لا نقطي	Anastigmatic
زاوية	Angle

Angle of deviation	زاوية الانحراف
Angle of incidence	زاوية الورود
Angle of reflection	زاوية الانعكاس
Angular	زاوي
Anisotropy	تباين المناحي، لا متناحي
Antinode	بطن
Aperture	فتحة
Aplanatic lens	عدسة لازيغية
Aqueous humor	خلط مائي
Area	مساحة
Areas Law	قانون السطوح
Astigmatism	لانقطية
Astronomical	فلكي
Atmosphere	جو
Atom	ذرة
Attraction	تجاذب
Average value	القيمة الوسطية
Axis	محور
Axis fixed	محور ثابت
B	
Band spectrum	طيف شريطي
Bar	قضيب

Barrel distortion	تشوه برميلي
Barrier	حاجز
Base	قاعدة
Beam	حزمة
Biconcave lens	عدسة مقعرة الوجهين
Biconvex lens	عدسة محدبة الوجهين
Bifocal	ثنائي المحرق
Binding Force	قوة ترابط
Birefringence double refraction	انكسار مزدوج
Blind spot	بقعة عمياء
Branch	فرع
Brewster angle	زاوية بروستر
Bright	لامع
Brightness	لمعان
C	
Calculus	حساب
Caliper Gauge	القدم القنوية
Candle	شمعة
Capillarity	خاصة شعرية
Cartesian Coordinates	إحداثيات ديكارتية
Caustic surface	سطح كاو

Center	مركز
Chain	سلسلة
Change of state	تغير الحالة
Characteristic	خصائص
Chromatic aberration	زيغ لوني
Circle	دائرة
Circle of confusion	دائرة التشوش
Circle of diffusion	دائرة الانتشار
Circle of least confusion	دائرة التشوش الأصغري
Classical	تقليدي
Coefficient	معامل
Coherence	ترابط
Collector	مجمع
Collimator	مجمع
Collision	تصادم
Color vision	إدراك اللون، رؤية لونية
Coma	تذنب (تندب)
Components	مركبات
Concave lens	عدسة مقعرة
Concavo convex lens	عدسة مقعرة محدبة
Condenser	مكثف
Conductor	ناقل

Cone	مخروط
Cone of light	مخروط الضوء
Cone of umbra	مخروط الظل
Conjugate	مترافق
Constant	ثابت
Continuity	استمرار
Continuous spectrum	طيف متصل
Contrast	تباين
Converging lens	عدسة مقربة
Convex lens	عدسة محدبة
Convexo concave lens	عدسة محدبة مقعرة
Coordinates	إحداثيات
Core	لب
Cornea	قرنية
Correction	تصحيح
Coupling	الاقتران، التقارن
(lens) Cristalline	جليدية (عدسة العين)
Critical	حرج
Critical angle	زاوية حرجة
Cross	مقطع
Cross – wire	محكمة
Crown glass	زجاج تاجي

Curvature	انحناء، اعوجاج
Curve	منحني
Cushion aberration	تشوه الوسادة
Cycle	حلقة، دورة
Cylindrical Coordinates	إحداثيات أسطوانية
Cylindrical lens	عدسة أسطوانية
D	
Data	معطيات
Density	كثافة
Depth	عمق
Deviation	انحراف
Diagram	رسم بياني - مخطط
Diameter	قطر
Diaphragm	حجاب
Differential	تفاضل
Differential element	عنصر تفاضلي
Diffraction	انعراج
Diffusion (of light)	انتثار الضوء
Dimensions	أبعاد
Dioptr	كسيرة
Direction	اتجاه
Direction cosines	جيوب تمام الاتجاه

Disk	قرص
Dispersion	تبدید
Distortion	تشوه
Distribution	توزع
Distribution of velocities	توزع السرعة
Diurnal vision	رؤية نهائية
Divergence	تفرق
Divergent	مبعدة، متباعدة
Diverging lens	عدسة مبعدة
Division	قسمة
Double	مضاعف
E	
Eclipse	كسوف، خسوف
Ecliptic	مدار الشمس
Effective	فعال
Ellipse	إهليلجي، قطع ناقص
Emergence	بروز
Emission	إصدار
Energy	طاقة
Entrance pupil	بؤبؤ الدخول
Equation	معادلة

Equation of Propagation	معادلة الانتشار
Equation of state	معادلة الحالة
Equi-concave lens	عدسة متماثلة الوجهين المقعرين
Equi-convex lens	عدسة متماثلة الوجهين المحدبين
Equivalent	مكافئ
Erect image	خيال صحيح
erg	الأرعة
Error	خطأ - ارتياب
Ether	أثير
Exit pupil	بؤبؤ الخروج
Exponential	أسّي
Eye accommodation	تكيف العين
Eyepiece	عينية
Eyepupil	بؤبؤ العين
F	
Factor	عامل
Far point	مدى (نقطة)
Fatigue	كلال، تعب
Field	حقل
Filter	مرشح

Flame	لهب
Flint glass	زجاج صخري
Focal length	بعد محراقي
Focal point	نقطة المحرق
Focussing	إحكام
Formation	تشكيل
Formula	صيغة
Fovea centralise	نقيرة مركزية
Frame	جملة
Frame of reference	جملة مقارنة
Free	حر
Free Fall	سقوط حر
Frequency	تواتر
Function	تابع، دالة
G	
Galaxy	مجرة
Gas	غاز
Gradient	تدرج
Gradient vector	شعاع التدرج
Graph	خط بياني، مخطط
Gyroscope	جيروسكوب

H

Head – on collision

تصادم رأسي

Heat

حرارة

Heavy

ثقيل

Height

ارتفاع

Hertz

هرتز

Hole

ثقب

Hollow

أجوف

Horizontal

أفقي

Hyperbola

قطع زائد

Hyperbolic

زائدي

Hypermetropia

طول النظر، مد البصر، بعد البصر

Hypothese

فرضية

I

Ideal Fluid

سائل مثالي

Ideal gas

غاز كامل

Image

خيال

Impulse

الدفع

Incidence

سقوط، ورود

Incident

وارد

Incoherence

غير مترابط

Incompressible Fluid

سائل غير قابل للانضغاط

Independent	مستقل
Index	معامل، قرينة، دليل
Index of refraction	قرينة الانكسار
Indirect lighting	إضاءة غير مباشرة
Infrared	تحت الأحمر
Inhomogeneous	غير متجانس
Initial	ابتدائي
Initial Energy	طاقة ابتدائية
Initial Particle	جسيم بدئي
Initial Speed	سرعة ابتدائية
Inner product	جداء داخلي
Instability	غير مستقر
Integral	تكامل
Intensity	شدة
Interaction	تفاعل متبادل
Interface	سطح بيني
Interference	تداخل
Interpolation	استقراء داخلي
Invariant	لا متغير
Inversely proportional	تناسب عكسي
Inverted image	خيال مقلوب
Invisible spectra	أطياف غير مرئية

Ions	إيونات
Iris	قزحية
Irregular (diffused) reflection	انعكاس غير منتظم، انعكاس منتشر
Isolated	معزول
Isolated System	جملة معزولة
Isotopes	نظائر
Isotropic	متماثل المناحي
Isotropic	متناهي
Isotype	متماثل
Joule	جول
J	
Junction	وصلة
Jupiter	المشتري
Juxta	مجاور
K	
Karat	قيراط
Kelvin	كلفن
Keplerian motion	حركة كبلرية
Keplers Laws	قوانين كبلر

Kick	دفعه
Kilo	كيلو
Kilo bar	كيلو بار
Kilo calorie	كيلو حريرة
Kilo gram	كيلو غرام
Kilo meter	كيلو متر
L	
Lability	قابل للتغيير
Laboratory	مخبر
Landslide	انزلاق
Laplace	لابلاس
Laser	ليزر
Latent	كامن
Latent energy	طاقة كامنة
Latent Heat	حرارة كامنة
Lateral	جانبي
Lateral aberration	زيغ عرضاني
Latitude	خط العرض
Lattice	شبكة، شبكية
Launching	قذف، إطلاق
Law	قانون

Law of conservation	قانون الانحفاظ
Layer	طبقة
Length	طول
Lens	عدسة
Level	مستوى
Light	ضوء
Light source	منبع ضوئي
Limit	حد
Limited	محدود
Line of action	خط الفعل
Line of force	خط القوة
Linear	خطي
Linear accelerator	مسرع خطي
Linear correlation	ارتباط خطي
Linear dependence	تابعية خطية
Linear equation	معادلة خطية
Linear momentum	اندفاع خطي
Linear spectrum	طيف خطي
Lines	خطوط
Lines of field	خطوط الحقل
Lines of force	خطوط القوة
Liquid	سائل (مائع)

Liquid fuel	وقود سائلة (مائع)
Local	موضعي
Location	موضع
Log – Log paper	ورق لوغاريتمي
Logarithmic	لوغاريتمي
Longitudinal aberration	زيغ طولاني
Loss	ضياع
Low	منخفض
Luminance	استنارة
Luminous intensity	شدة الإضاءة
Lunar eclipse	خسوف القمر
M	
Machine	آلة
Macroscopic	جهري
Macroscopy	دراسة جهرية
Magnification	تكبير، تجسيم
Magnified image	خيال مكبر
Magnifier	مكبرة
Main	رئيسي
Main path	مسار رئيسي
Major axis	المحور الكبير

Major diameter	القطر الأكبر
Marginal rays	أشعة طرفية
Mars	المريخ
material	مادي، مادة
Matrix	مصفوفة
Maximum	أعظمي، نهاية عظمى
Mean	متوسط، وسطي
Mean energy	طاقة وسطية
Mean value	قيمة وسطية
Mean velocity	سرعة وسطية
Measure	قياس
Measurment	قياس
Medium	وسط
Mega hertz	ميغا هيرتز
Meridian	خط الزوال
Metal	معدن
Metastable	شبه مستقر
Metastable equilibrium	توازن شبه مستقر
Meter	مقياس
Method	طريقة
Method of least squares	طريقة أصغر المربعات
Metric	مترى

Metric system	نظام متري
Metrology	علم القياس
Micro – photographic	تصوير مجهري
Micrometer Screw	الدوارة اللولبية
Microscope	مجهر
Microscopic	مجهري
Milli liter	ملي لتر
Minimum	أصغري، نهاية صغرى
Minimum deviation	انحراف أصغري
Minute	دقيقة
Mirror	مرآة
Mixed	مختلط
Mobile	متحرك
mode	نمط
Model	نموذج
Mole	مول
Molecular	جزيئي
Monochromatic	وحيد اللون
Moon	قمر
Motion	حركة
Mounting	تركيب
Myopia	حسر البصر

N

Nabla	نبلا
Nano meter	نانو متر
Natural	طبيعي
Natural logarithm	لو غاريتم طبيعي
Natural numbers	أعداد طبيعية
Nautical mile	ميل بحري
Near (point)	كثب (نقطة)
Negative	سلبي
Negative lens	عدسة سالبة
Negligence	إهمال
Network	شبكة
Newton	نيوتن
Newtonian mechanics	ميكانيك نيوتن
Newton's laws	قوانين نيوتن
Night vision	رؤية ليلية
Nodal point	نقطة عقدية
Noise	ضجيج
Non – linear	لا خطي
Non – relativistic	لا نسبوي
Non – stationary	غير مستقر
Non – uniform	غير منتظم

Nonlinear equation	معادلة لاخطية
Normal	عادي، عمودي، ناظمي
Nucleus	نواة
Number	عدد
Numerical constant	ثابت عددي
Numerical value	قيمة عددية
O	
Object	جسم
Object point	نقطة جسمية
Objective	العدسة الجسمية
Oblique	مائل
Oblique coordinates	إحداثيات مائلة
Oblique rays	أشعة مائلة
Observer	مراقب
Octahedral	ثمانى وجوه
Ocular (eyepiece)	عينية
Odd	فردى
Odd function	تابع فردى
Odd number	عدد فردى
Ohm	أوم
One dimensional	أحادي البعد
Opacity	عتمة

Opaque	عاتم
Optical axes	المحور الضوئي
Optical glass	زجاج بصري
Optical instruments	الأجهزة الضوئية
Optical path	مسار ضوئي
Optical system	جملة ضوئية
Optical, Visual	بصري
Optics	علم الضوء - بصريات
Order	مرتبة
Ordinary	عادي
Ordinary ray	شعاع عادي
Ordinate	ترتيب
Origin	مبدأ
Original	أصلي
Orthogonal	متعامد
Oscilloscope	راسم الاهتزاز المهبطي
Output	حاصل، ناتج، خرج
Oval	بيضوي
Overlapping	تراكب
Ozone	أوزون
P	
Parabola	قطع مكافئ

Parallel	موازي
Parameter	وسيط
Parametric	وسيطي
Parametric equation	معادلة وسيطية
Paraxial rays	أشعة محورية
partial	جسيم
Partical	جسيم
Path	مسار
PC or Personal Computer	حاسب شخصي
Peak	ذروة
Pendulum	نواس
Perihelion	نقطة الرأس
perimeter	محيط
Period	دور
Periodic	دوري
Periodic oscillation	اهتزاز دوري
Persistence of vision	بقاء الصورة
phase	طور، مرحلة
Phenomenon	ظاهرة
Photon	فوتون
Pincushion distortion	تشوه هلال
Plane	مستو (مستوي)

Planet	كوكب
Plano concave lens	عدسة مستوية مقعرة
Plano convex lens	عدسة مستوية محدبة
Plate	صفحة
Plot	رسم بياني
Polar	قطبي
Polar axis	محور قطبي
Polar coordinates	إحداثيات قطبية
Polar vector	شعاع قطبي
Pole	قطب
Polishing	صقل
Position	موضع
Positive lens	عدسة موجبة
power	استطاعة، قدرة
Presbyopia	قدح (قصور البصر)
Principle	مبدأ
Principle lateral aberration	زيغ عرضاني أصلي
Principle longitudinal aberration	زيغ طولاني أصلي
Prism	موشور
Projection	مسقط
Property	خاصية
Proportion	تناسب

Proportional	تناسب طردي
Pulse	نبضة
Punctual	نقطي
Pupil	بؤبؤ
Q	
Qualitative	كيفي
Quality	خاصية
Quantitative	كمي
Quantity	كمية (مقدار)
R	
Radian	راديان
Radiation	إشعاع
Radius	نصف قطر
Rainbow	قوس قزح
Random	عشوائي
Random motion	حركة عشوائية
Range	مجال
Rate	سرعة ، معدل
Rate of approach	سرعة الاقتراب
Ratio	نسبة
Ray tracing	رسم الأشعة
Rays	أشعة

Real	حقيقي
Real Fluid	سائل حقيقي
Real Gas	غاز حقيقي
Real image	خيال حقيقي
Real object	جسم حقيقي
Rectangle	مستطيل
Rectangular projection	إسقاط قائم
Reduced image	خيال مصغر
Reduced mass	كتلة مختزلة
Referance	مرجع
Reflecting	عاكس
Reflecting telescope	نظارة فلكية عاكسة
Reflection	انعكاس
Refracting telescope	نظارة فلكية كاسرة
Refraction	انكسار
Refractive	كاسر
Refractive index	قرينة انكسار
Refractometer	مقياس قرينة الانكسار
Regular	منتظم
Regular reflection	انعكاس منتظم
Relation	علاقة
Relative	نسبي

Relative Incertitude	ارتياح نسبي
Relative Index of refraction	قرينة الانكسار النسبية
Relative velocity	سرعة نسبية
Relativity	النسبية
Resolving power	مقدرة الفصل
Resultant	ناتج، محصلة
Retina	شبكة
Retina fatigue	كلال الشبكية
Reversibility	عكسية الضوء
Ring	حلقة
Rods	قضبان
Rotary	دوار
Rotation	دوران
Rough	خشن
Rule	قاعدة
S	
S. I. units	النظام الدولي للوحدات
Sagittal	سهمي
Sample	عينة
Scalar	سلمي
Scalar field	حقل سلمي
Scalar potential	كمون سلمي

Scalar quantity	مقدار سلمي
Scalar quantity	كمية سلمية
Scale	سلم تدريج
Scattering	استطارة، تبعثر
Sciences	علوم
Scientific	علمي
Scintillation	تألق، وميض
Screen	شاشة، حاجز
Sea level	مستوى البحر
Second	ثانية
Self – energy	طاقة ذاتية
Self - field	حقل ذاتي
Semi-log paper	ورق نصف لوغاريتمي
Sensitivity	الحساسية
Shape	شكل
Shutter	حاجب، مغلاق
Sign convention	اصطلاح الإشارة
Simulation	محاكاة
Sine condition	شرط الجيب
Slit	شق
Slope	الميل
Smoothing	صقل، تنعيم

Software	برمجيات
Solar	شمسي
Solar day	يوم شمسي
Solar eclipse	كسوف شمسي
Solar system	المنظومة الشمسية
Source	منبع
Space	فضاء، مكان
Specific	نوعي
Spectra	طيوف
Spectral lines	خطوط طيفية
Spectroscope	مطياف
Spectrum	طيف
Speed	سرعة
Sphere	كرة
Spherical	كروي
Spherical aberration	زيغ كروي
Spherical coordinates	إحداثيات كروية
Spherical dioptre	كاسر كروي
Stability	استقرار، ثبات
Stable	مستقر
Stable Equilibrium	توازن مستقر
Stable orbit	مدار مستقر

Stand	حامل، منصب
Standard	نظامي ، معياري
Static	ساكن
Stationary	استقراري
Stereoscopic vision	رؤية مجسمة
Stop	كوة
String	خيوط
Sum	مجموع
Surface	سطح
Symmetry	تناظر، تماثل
System	منظومة، مجموعة
Systematic error	خطأ نظامي
T	
Table	جدول، قائمة
Tangent	مماس
Tangential	مماسي
Technology	تقانة
Telescope	تلسكوب، نظارة فلكية
Temperature	درجة الحرارة
Theoretical	نظري
Theory	نظرية
Thick lens	عدسة ثخينة

Thickness	ثخانة - ثخانة
Thin lens	عدسة رقيقة
Threshold	عتبة
Time	زمن
Timer	مؤقت
Total	كلي
Total Energy	طاقة كلية
Total reflection	انعكاس كلي
Track	مسار، أثر
Trajectory	مسار
Transformation	تحويل، تحول
Transition	انتقال
Transmission	إرسال، نقل
Transparent	شفاف
Triangle	مثلث
Tube	أنبوب
Tube Capillary	أنبوب شعري
U	
Ultramicroscopic	فوق مجهري
Ultrasonic	فوق صوتي
Ultraviolet	فوق بنفسجي
Undetermined	غير محدد

Uniform	منتظم
Unit	واحدة
Universal	عام، شامل
Unstable	غير مستقر، قلق
V	
Vacancy	شاغر، ثغرة
Vacuum	فراغ، خلاء
Vapor	بخار
Variable	متحول، متغير
Vector	شعاع، متجه
Vector quantity	مقدار شعاعي
Vectorial Division	قسمة شعاعية
Velocity	سرعة
Velocity of light	سرعة الضوء
Vernier	فرنسية
Vertex	رأس
Vertical	شاقولي
Vibration	اهتزاز
Virtual image	خيال وهمي
Virtual object	جسم وهمي (خيالي)
Viscosity	لزوجة
Viscosity coefficient	معامل اللزوجة

Viscous Coefficient

معامل اللزوجة

Viscous Fluid

سائل لزج

Visible rays

أشعة مرئية

Vision

رؤية

Visual acuity

حدة الإبصار

Visual angle

زاوية الإبصار

Vitreous humour

خلط زجاجي

Volume

حجم

W

Wave

موجة

Wave front

صدر الموجة

Wave guide

دليل الموجة

Wave length

طول الموجة

Width

عرض

Wire

سلك

Y

Yellow spot

بقعة صفراء



المراجع العلمية

المراجع العربية:

- 1- الدكتور طاهر تربدار، "الضوء الهندسي"، منشورات جامعة دمشق، 1986 – 1987.
- 2- الدكتور محمد الكوسا والدكتور معن سليم، "الضوء الهندسي"، منشورات جامعة دمشق 2009 – 2010.
- 3- الدكتور خالد عقيل، "الضوء الهندسي"، منشورات جامعة دمشق، 2002 – 2003.
- 4- الدكتور طاهر تربدار و الدكتور أحمد حصري، "مسائل محلولة في الفيزياء لطلاب السنوات الجامعية الأولى"، الجزء الثاني الضوء والفيزياء الحديثة، 1974.
- 5- الدكتور رزق محمد قرفول، الدكتور سلمان عبود دلا، "الضوء الهندسي"، منشورات جامعة اللاذقية، 2004 - 2005.
- 6- الدكتور أدهم السمان، "الضوء الهندسي"، منشورات جامعة دمشق، 1987 – 1988.
- 7- الدكتور فوزي عوض، الدكتور محمد الكوسا، الدكتور كنج الشوفي، الدكتور معن سليم، الفيزياء العملية (1)، كمال كايد، فاتن الفيل، منشورات جامعة دمشق، 2007 – 2008.
- 8- الدكتور أحمد الحصري، الدكتور إحسان الموصلي، عمر طه، الفيزياء العملية، منشورات جامعة دمشق، 2007 – 2008.
- 9- الدكتور محمد صالح حمامي، "الضوء الهندسي"، منشورات جامعة حلب، 1991 – 1992.

المراجع الأجنبية:

- 1) Raymond A. Serway, and Robert J. Beichner, “***Physics for scientist and engineers with modern physics***”, Fifth edition, Saunders college publishing, 2000.
- 2) Hugh D. Young, Roger A. Freedman, “***University Physics with modern physics***”, 12th Edition, Pearson Addison-Wesley, 2007.
- 3) Fancis A. Jenkins, Harvey E. White, “***Fundamentals of Optics***”, Third Edition, McGraw – Hill Book Company, 1957.
- 4) Fancis A. Jenkins, Harvey E. White, “***Fundamentals of Optics***”, Fourth Edition, McGraw – Hill Book Companies, 2001.
- 5) JOSEPH MORGAN, "Introduction to Geometrical and Physical Optics", McGRAW-HILL Book Company, 1953.
- 6) M. BRUHAT, A. MARÉCHAL, COURS DE PHYSIQUE I OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE, MASSON ET C^{ie} ÉDITEURS, 1961

اللجنة العلمية:

- الدكتور كمال كايد
- الدكتور كنج الشوفي
- الدكتور ابراهيم الغريبي

المدقق اللغوي:

- الدكتور سامر محمود زيود

حقوق الطبع والترجمة والنشر محفوظة لمديرية الكتب والمطبوعات