الباب السابع

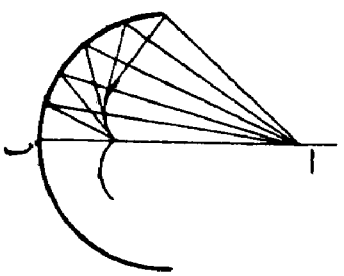
الزيغ الكرى والزيغ اللونى وقوس قزح والعدسات السميكة

الزيغ الكرى

١٤٥ — الزيغ الكرى الحادث عند الانعكاس عن السطوح الكرية

القوانين التى سبق ذكرها فى الباب الثانى فيما يتعلق بالانعكاس عن السطوح الكرية مبنية جميعها على فرض أن السطح العاكس اتساعه صغير وان الأشعة تكاد تقع عمودية على السطح وعلى حسب هذا الفرض يصح اعتبار الأشعة المتوازية الواقعة على السطح مارة بعد الانعكاس (هى أو امتداداتها) بنقطة هى البؤرة ويصح أن يتكون لنقطة مضيئة على المحور نعتبرها جسما صورة حقيقية أو تقديرية تمر الاشعه المنعكسة أو تمر امتداداتها بها

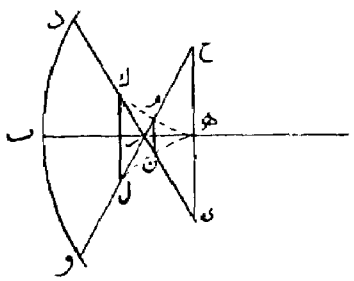
أما اذا كان السطح العاكس كبيراً فقد تبين فى بند (٣٩) أن الاشعة المنعكسة تمس سطحاً منحنياً يسمى السطح الغلافى . وشكل (١٢٠) يوضح المنحنى الغلافى للاشعة المنعكسة فى مستوى الورقة عند صدورها من نقطة ا على المحور ا ب ويتكون السطح الغلافى من دوران المنحنى الغلافى حول هذا المحور واذا فرضنا فى شكل (١٢١) أن د ب و يمثل مقطع السطح العاكس بمستوى الورقه وان ك م هـ ن ل يمثل مقطع السطح الغلافى وان الشعاعين عند د ، و يتقابلان فى نقطة ر (وكذلك الاشعة المنعكسة عند حافة السطح) فى حين أن رأس الغلاف (أى موضع تقابل الاشعة المنعكسة من مساحة صغيرة جدا من السطح عند القطب ب) هو نقطة هـ فالبعد ر هـ أى البعد بين موضع تجمع الأشعة المنعكسة عند الحافة وموضع تجمع الاشعة المنعكسة عند القطب يسمى



(شكل ١٢٠)

« الزيغ الكرى الطولى »[١] . واذا أقيم عنـــد ه العمود ح ه ى على المحور بحيث يتقابل والشعاعين المنعكسين عند طرفى السطح فى نقطتى ح ، ى ، فان كلا من البعدين ه ح ، ه ى يسمى « الزيغ الكرى العرضى »[٢]

واذا وضع حاجز أبيض عمودياً على المحور بحيث يستقبل الضوء المنعكس عن السطح الكرى

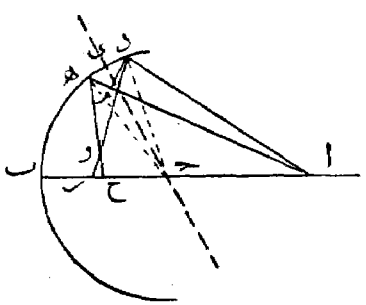


(شكل ١٢١)

د ب و فان موضع وقوع الضوء عليه وهو عند ح ه ى يكون مستديراً وقطر الدائرة ح ى فاذا دنا الحاجز من السطح تأخذ الدائرة فى الصغر حتى يكون قطرها مـ ن ثم تأخذ فى الاتساع بعد ذلك وتكون الدائرة التى قطرها مـ ن هى أصغر مساحة تلم عندها الأشعة المنعكسة وهى تمثل صورة النقطة ا وتسمى « دائرة الغمة الصغرى »[٣] و يلاحظ أنها أقرب الى السطح العاكس من النقطة ه التى تكون موضع الصورة اذا كان السطح العاكس صغيراً جداً

١٤٦ ـــ الخطان البؤريان الحادثان بالانعكاس عند السطح الكرى

لنفرض أن ا (شكل ١٢٢) نقطة مضيئة على المحور ا ب ، ح مركز تكور السطح المقعر



(شكل ١٢٢)

العاكس الذى مقطعه بمستوى الورقة هو القوس د ه ب ولنفرض أن د ، ه نقطتان متقاربتان على هذا القوس . نرسم من ا الشعاعين الساقطين ا د ، ا ه وليكن د ر مسير الاول بعد الانعكاس وليكن ه ح مسير الثانى بعد الانعكاس . فالشعاعان المنعكسان يتقابلان عند و ثم ينفرجان مار أحدهما بنقطة ر على المحور والآخر بنقطة ح عليه . واذا كانت نقطتا د ، ه متقاربتين جداً فان جميع الأشعة الواقعة فى مستوى الورقة

---

(١) Longitudinal Spherical Aberration

(٢) Lateral Spherical Aberration

(٣) Circle of least confusion

والمنعكسة عن الجزء الصغير د هـ ثم بعد انعكاسها بنقطة و ويمثل د و ر ى هـ و ح حدى الحزمة الضوئية المنعكسة

ولكى يسهل تصور هيئة انعكاس الاشعة الساقطة على المساحة الصغيرة من السطح المقعر وهى المساحة التى تمثل فى الشكل بالقوس د هـ نفرض أن الشكل قد أدير بزاوية صغيرة حول المحور ا ب فيتكون من دوران د هـ مساحة صغيرة من السطح العاكس ومن دوران ا د هـ ا حزمة مجسمة من الأشعة تصدر من ا وتقع على هذه المساحة الصغيرة ومن دوران د و ر ح و هـ الحزمة المجسمة من الاشعة المنعكسة . ويلاحظ أن نقطة و فى أثناء الدوران ترسم فى الفضاء خطاً قصيراً عمودياً على مستوى الورقة ، وأن الاشعة المنعكسة لا تمر بعد الانعكاس بنقطة واحدة وانما يمر كل شعاع منها بهذا الخط القصير العمودى على مستوى الورقة ثم يمر بعد ذلك بالمستقيم ر ح فى مستوى الورقة ولذلك تسمى الحزمة الضوئية المنعكسه « بالحزمة اللانقطية »[1]

ويسمى الخط الأول الذى ترسمه نقطة و عمودياً على مستوى الورقة « الخط البؤرى الاول »[2] وسنطلق على الخط الثانى ر ح الموجود فى مستوى الورقة « الخط البؤرى الثانى »[3]

واذا سرنا من موضع و نحو ر ح فان الحزمة الضوئية اللانقطية تضيق فى الاتجاه العمودى على مستوى الورقة وتتسع فى مستوى الورقة حتى اذا بلغنا المحور مرت جميعها بالمستقيم ر ح فى مستوى الورقة بعد ان كانت عند و تمر بخط عمودى على مستوى الورقة . ويتضح من هذا أنه ما بين و ى ر ح توجد منطقة يكون فيها امتداد الحزمة فى الاتجاه العمودى على مستوى الورقة مساوياً امتدادها فى مستوى الورقة وعندها تكون الأشعة قد دنت غاية ما يمكن بعضها الى الآخر وتكون هى اذن بمثابة الصورة التى تتكون بالانعكاس عند المساحة الصغيرة د هـ للنقطة ا وتسمى هذه المنطقة أيضاً « دائرة الغمة الصغرى »

والجزء د هـ من السطح الكرى اذا روعى على حدته كان بمثابة سطح كرى عاكس صغير مركز تكوره ح ومحوره اذن المستقيم ح ى وقطبه نقطة ى وتكون نقطة ا بالنسبة اليه

---

(١) Astigmatic Pencil

(٢) First Focal Line

(٣) Second Focal Line

نقطة مضيئة ليست على المحور . فالاشعة الصادرة من نقطة مضيئة ليست على المحور تنعكس عن السطح المقعر الصغير (بالرغم من صغره) على هيئة حزمة لانقطيـة و تتجمع فى خطين بؤريين متعامدين يتكون بينهما دائرة الغمة الصغرى وهى التى تكون بمثابة الصورة لتلك النقطة

١٤٧ — تعيين موضعى الخطين البؤريين للسطح الـكرى العاكس

لنرمز للبعد اه بالحرف س ولنصف قطر تكور السطح بالرمز س و للبعد هو وهو بعد الخط البؤرى الأول عن السطح العاكس دهـ بالرمز س$_1$ وللبعـد هـ ح وهو بعد الخط البؤرى الثانى عن السطح العاكس بالرمز س$_2$

فلايجاد بعد الخط البؤرى الأول نرى أن

$$\angle \text{درب} = \angle \text{حدر} + \angle \text{دحر} \qquad (١)$$

$$\text{و} \quad \angle \text{دحر} = \angle \text{داه} + \angle \text{ادح} \qquad (٢)$$

وبما أن $\angle$ادح $= \angle$ حدر

ينتج من طرح المعادلة (٢) من المعادلة (١) أن

$$\angle \text{درب} + \angle \text{داه} = ٢ \angle \text{دحر} \qquad (٣)$$

وبالمثل يمكن اثبات أن

$$\angle \text{هحب} + \angle \text{هاح} = ٢ \angle \text{هجح} \qquad (٤)$$

وبما أن $\angle$ درب $= \angle$ هخب $+ \angle$ حور

$$= \angle \text{هحب} + \angle \text{دوه}$$

$$\text{و} \quad \angle \text{دحر} = \angle \text{هحح} + \angle \text{دحه}$$

$$\text{و} \quad \angle \text{داه} = \angle \text{هاح} + \angle \text{داه}$$

ينتج بالتعويض فى المعادلة (٣) ثم طرح المعادلة (٤) من ذلك أن

$$\angle \text{دوه} + \angle \text{داه} = ٢ \angle \text{دحه} \qquad (٥)$$

واذا أسقطنا من د العمود دمـ على اه فان

د مـ = د هـ حتا ∠ هـ د مـ

∴ د مـ = د هـ حتا ∠ ا هـ حـ

واذن ∠ د ا هـ = $\frac{\text{د هـ حتا ∠ ا هـ حـ}}{\text{ص}}$

وبالمثل اذا أسقطنا من هـ العمود هـ ن على د و يكون

هـ ن = د هـ حتا ∠ د هـ ن = د هـ حتا ∠ حـ د ر = د هـ حتا ∠ ا د حـ

واذن ∠ د و هـ = $\frac{\text{د هـ حتا ∠ ا د حـ}}{\text{ص}_1}$

كما أن ∠ د حـ هـ = $\frac{\text{د هـ}}{\text{ص}}$

ونظراً لأن د ، هـ نقطتان متقاربتان جداً فان زاوية السقوط عند د وزاوية السقوط عند هـ تكادان تكونان متساويتين فاذا رمزنا لكل منهما بالحرف ن يكون

∠ ا هـ حـ = ∠ ا د حـ = ن

وبالتعويض فى المعادلة (٥) ينتج أن

$$\frac{\text{د هـ حتا ن}}{\text{ص}_1} + \frac{\text{د هـ حتا ن}}{\text{ص}} = ٢ \frac{\text{د هـ}}{\text{ص}}$$

$$\therefore \frac{١}{\text{ص}_1} + \frac{١}{\text{ص}} = \frac{٢}{\text{ص} \text{ حتا ن}} \quad \ldots\ldots (٦)$$

وهذه هى المعادلة الدالة على العلاقة بين بعد النقطة المضيئة عن السطح و بعد الخط البؤرى الاول عنه ولتعيين بعد الخط البؤرى الثانى وهو البعد هـ حـ المرموز له بالرمز ص$_2$ نرى أن

مساحة △ هـ ا حـ = مساحة △ هـ حـ حـ + مساحة △ هـ ا حـ .... (٧)

ولكن مساحة △ هـ ا حـ = $\frac{١}{٢}$ ا هـ . هـ حـ . حا ٢ ن

= $\frac{١}{٢}$ ص ص حا ٢ ن

ومساحة $\triangle$ هـ حـ ح $= \frac{1}{2}$ حـ هـ . هـ ح . حا ن

$= \frac{1}{2}$ ن س$_{ن}^{2}$ حا ن

ومساحة $\triangle$ هـ ا حـ $= \frac{1}{2}$ ا هـ . هـ حـ . حا ن

$= \frac{1}{2}$ س ن حا ن

فبالتعويض فى المعادلة (٧) ينتج أن

س س$_{ن}^{2}$ حا ٢ ن $=$ ن س$_{ن}^{2}$ حا ن $+$ س ن حا ن : ..... (٨)

وبما أن حا ٢ ن $= ٢$ حا ن . حتا ن ينتج باختصار حا ن وقسمة المعادلة (٨) على س س$_{ن}^{2}$ ن أن

$$\frac{٢ \text{ حتا ن}}{\text{ن}} = \frac{١}{\text{س}} + \frac{١}{\text{س}_{ن}^{2}} \quad \ldots\ldots (٩)$$

وهذه هى المعادلة الدالة على العلاقة بين بعد النقطة المضيئة عن السطح و بعد الخط البؤرى الثانى عنه و يلاحظ من معادلتى (٦) و (٩) انه اذا كانت ن صغيرة جداً أى عند ما تكاد تكون الأشعة ساقطة عمودية على السطح فان المعادلتين تتحولان الى الصورة

$$\frac{١}{\text{س}} + \frac{١}{\text{ص}} = \frac{٢}{\text{ن}}$$

أى تكون العلاقة بين بعد النقطة عن السطح و بعد موضع تجمع الأشعة المنعكسة طبقاً للمعادلة المألوفة

$$\frac{١}{\text{ع}_{١}} + \frac{١}{\text{ع}} = \frac{٢}{\text{ن}}$$

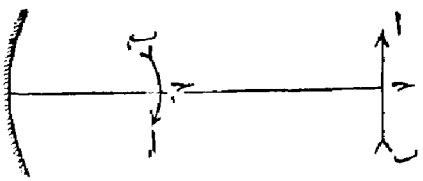
١٤٨ — تقوس الصور المتكونة بالانعكاس عن المرايا الكرية

اذا فرضنا أن جسما مثل ا حـ ب شكل (١٢٣) وضع أمام مرآة مقعرة مثلا سطحها صغير فان نقطة حـ الموجودة على المحور تتكون لها صورة عند حـ$_{١}$ مثلا تكون على المحور أيضاً بحيث

تكون علاقة بعد الاولى عن المرآة ببعد الثانية عنها طبقاً للمعادلة المعروفة

$$\frac{١}{ل} = \frac{٢}{ع} = \frac{١}{ع} + \frac{١}{ع_١}$$

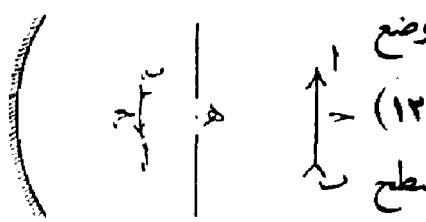
أما الاشعة الصادرة من الطرف ا للجسم فانها تسقط على المرآة بزاوية فاذا كان ارتفاع الجسم كبيراً (نسبيا) كانت هذه الزاوية كبيرة ولذلك تنعكس الاشعة كحزمة لا نقطية ويكون هناك خطان بؤريان (كما سبق ذكره) تقع بينهما دائرة الغمة الصغرى التى تعد



(شكل ١٢٣)

صورة النقطة ا ويمكن الاستدلال (بالقياس مثلا) على أن بعد هذه الصورة عن القطب أصغر من بعد الصورة اذا كانت نقطة ا على المحور وعلى البعد نفسه من المرآة أى أن المرآة بالنسبة الى الأشعة التى تقع عليها من نقطة ا تعمل عمل مرآة ذات بعد بؤرى أقصر واذن تكون أطراف هذه الصورة أقرب الى المرآة من صور أجزاء الجسم الواقعة على المحور فتكون الصورة مقوسة كما هو مبين بشكل (١٢٣) ونظراً لأن الأشعة الساقطة من أطراف الجسم تنعكس على هيئة حزم لا نقطية فان أطراف الصورة تلك الأطراف البعيدة عن المحور لا تكون واضحة دقيقة

واذا فرضنا أن السطح المقعر العاكس ذو اتساع كبير ووضع عند مركز التكور ه حاجز به فتحة صغيرة كالمبين بشكل (١٢٤) فان الأشعة التى تقع من الأجزاء المختلفة من الجسم على سطح



(شكل ١٢٤)

المرآة تنفذ خلال الفتحة واذن تقع على امتداد نصف القطر فمثلا الأشعة الواقعة من ا تكون بمثابة حزمة محورها ا ه وتقع على مساحة صغيرة من سطح المرآة وقوعاً يكاد يكون عمودياً واذن تكون صورة النقطة ا على المستقيم ا ه وموضعها $ا_١$ مثلا يمكن تعيينه من المعادلة المألوفة

$$\frac{٢}{ع} = \frac{١}{ع} + \frac{١}{ع_١}$$

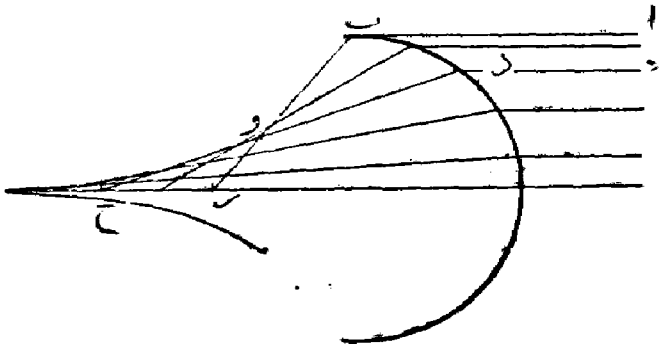
وكذلك بالنسبة الى أية نقطة أخرى من الجسم

وبتعيين مواضع صور النقط المختلفة من الجسم بهذه الكيفية يرى أن الصورة الحادثة بالانعكاس فى هذه الحالة تكون مقوسة بالكيفية المبينة بشكل (١٢٤) ولكنها تكون واضحة دقيقة بالرغم من تقوسها . فهى تتحسن من هذه الوجهة من جراء وجود الحاجز ذى الفتحة عند المركز ولكنها تكون ضئيلة نظراً لان كمية الضوء الواقعة على المرآة من كل نقطة من الجسم صغيرة

وللتمييز بين الحالة الأخيرة هذه وبين سابقتها فان الصورة فى الحالة الأخيرة يقال عنها انها حادثة عن انعكاس حزم مركزية (مارة بالمركز) والتى فى الحالة الاولى حادثة عن انعكاس حزم غير مركزية

١٤٩ — الخطان البؤريان للسطح الكرى الكاسر

اذا رسمت حزمة من الأشعة المتوازية الواقعة على سطح كرى امكن بالرسم ايجاد الشعاع المنكسر لكل واحد من الاشعة الساقطة ويتبين من الرسم (شكل ١٢٥) أن الاشعة المنكسرة لا تمر جميعها بنقطة واحدة ولكنها تمس منحنياً يسمى غلاف الاشعة المنكسرة واذا أدير الشكل حول المحور تكون من دوران المنحنى الغلافى سطحاً غلافياً يكون هو السطح الذى تمسه الاشعة المنكسرة فاذا راعينا الحزمة الضيقة ا ب حـ د فان الأشعة الموجودة منها فى مستوى الورقة تمر أو تكاد تمر بنقطة و ثم تتفرق بعد ذلك



(شكل ١٢٥)

وتمر بالمستقيم رح على المحور فاذا أدير الشكل حول المحور بزاوية صغيرة فان نقطة و ترسم خطاً قصيراً عمودياً على مستوى الورقة تمر به بعد الانكسار الحزمة الضيقة الواقعة على المساحة الصغيرة الحادثة من دوران الخط ب د ويسمى كما فى حالة الانعكاس الخط البؤرى الاول . والأشعة المنكسرة تمر بعد ذلك بالمستقيم رح على المحور وفى مستوى الورقة ونسميه هنا الخط البؤرى الثانى ويتبين أن الأشعة المنكسرة بعد تجمعها عند الخط البؤرى الأول العمودى على مستوى الورقة

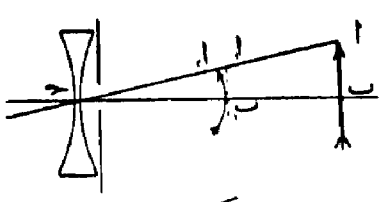
تتجمع بعد ذلك عند الخط البؤرى الثانى فى مستوى الورقة فاذا سرنا من و نحو رح فان الحزمة الضوئية تضيق فى الاتجاه العمودى على مستوى الورقة وتتسع فى مستوى الورقة ويكون هناك موضع بين و ، رح تدنو الأشعة عنده غاية ما يمكن بعضها من الآخر وعنده يكون الامتداد فى الاتجاه العمودى على مستوى الورقة والامتداد فى مستوى الورقة متساويين ويتكون مايسمى هنا أيضاً « دائرة الغمة الصغرى » كما أن الحزمة المنكسرة تسمى حزمة لانقطية

ويلاحظ من الشكل أن رأس الغلاف حيث يتقابل فرعاه على المحور هو النقطة التى تتقابل عندها بعد الانكسار الحزمة المتوازية الواقعة على امتداد المحور فهى بمثابة البؤرة بالنسبة الى الاشعة المتوازية التى تكاد تقع عمودياً على السطح . أما الحزمة المتوازية ا ب حـ د فلو أنها تقع على مساحة صغيرة من السطح فان زاوية سقوطها ليست صغيرة فتتكون منها بعد الانكسار حزمة لانقطية ولا تكون هناك بالنسبة اليها نقطة بمثابة البؤرة بل مساحة صغيرة تكون هى التى تقوم فعلا مقام البؤرة ويلاحظ أن موضعها أقرب الى السطح الحادث عنده الانكسار وانه كلما زادت زاوية سقوط الحزمة المتوازية زادت هذه الدائرة التى تقوم مقام البؤرة قرباً الى السطح ويتضح أيضاً من الشكل انه اذا كانت زاوية السقوط صغيرة فان تأثير اللانقطية واختلاف موضع دائرة الغمة عن موضع البؤرة يكون صغيراً قد يصح اغفاله

١٥٠ — تقوس الصور الحادثة بوساطة العدسات وتشوهها

(أولا) الانكسار عند الجزء الأوسط أو المركزى من العدسة

نعين لسهولة الشرح نوع العدسة ولتكن عدسة مفرقة ولنفرض أن العدسة قد حجبت وعرض منها الجزء الأوسط على حدته ولنفرض أن ا ب (شكل ١٢٦) جسم على محور العدسة ونرسم من رأس هذا الجسم المستقيم ا حـ ماراً بالمركز البصرى فصورة النقطة ا تقع على المستقيم ا حـ كما أن صورة النقطة ب تقع على المحور ب حـ . فاذا رمز للبعد ب حـ بالحرف ع فان موضع ب ، التى هى صورة ب يقدر من المعادلة



(شكل ١٢٦)

$$\frac{١}{ل} = \frac{١}{ح ب_١} - \frac{١}{ع}$$

$$\therefore \quad ح ب_١ = \frac{ع\ ل}{ع + ل}$$

فاذا عينت نقطة $ب_١$ بهذه الكيفية وأقيم عند $ب_١$ العمود $ب_١ ا_١$ على المحور بحيث يقطع $ا ح$ فى نقطة $ا_١$ فان $ا_١ ب_١$ يعتبر فى العادة الصورة ويكون

$$\frac{ح ا_١}{ح ا} = \frac{ح ب_١}{ح ب} = \frac{ل}{ع + ل} \quad \therefore \quad ح ا_١ = ح ا \frac{ل}{ع + ل} \quad . . \quad (١)$$

ولكن الأشعة الصادرة من $ا$ منكسرة خلال العدسة تقع على الجزء الأوسط منها بزاوية ليست صفرا ولكنها أصغر مما لو كانت الأشعة واقعة على الجزء الباقى من العدسة فاذا أغفلنا اللانقطية وما اليها فان صورة $ا$ تقع على المستقيم $ا ح$ فى نقطة مثل $ا_٢$ يقدر بعدها عن العدسة من المعادلة

$$\frac{١}{ح ا_٢} - \frac{١}{ح ا} = \frac{١}{ل}$$

$$\therefore \quad ح ا_٢ = ح ا \frac{ل}{ح ا + ل} \quad ..... \quad (٢)$$

وبما أن $ع = ح ا$. حتا $ه$ باعتبار أن $ه$ زاوية السقوط

يتضح بالمقابلة بين المقدارين (١) و (٢) أن نقطة $ا_٢$ أقرب الى $ح$ من نقطة $ا_١$ واذن تكون الصورة مقوسة بالكيفية المبينة بالشكل

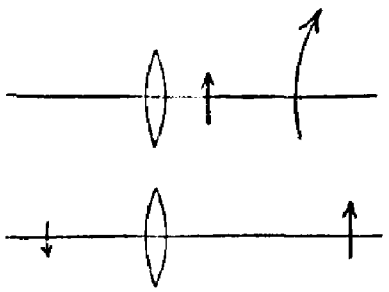
أما اذا كانت العدسة لامة فالبعد البؤرى $ل$ يكون سالباً ويمكن كما سبق بيان أن

$$ح ا_١ = ح ا \frac{ل}{ل - ع}$$

$$\text{ح ا}_{٢} = \frac{\text{ل}}{\text{ل} - \text{ح ا}}$$

فاذا كان الجسم بين البؤرة وبين العدسة أى فى حالة ما تكون الصورة تقديرية وتكون ل أكبر من ح ا فان ح ا$_{٢}$ يكون أكبر من ح ا$_{١}$ فتكون الصورة التقديرية مقوسة بالكيفية المبينة بالرسم الأعلى من شكل (١٢٧)

واذا كان الجسم أبعد عن العدسة من البؤرة أى فى حالة الصور الحقيقية فان ح ا$_{٢}$ يكون أصغر من ح ا$_{١}$ وتكون الصورة مقوسة بالكيفية المبينة فى الرسم الأسفل من الشكل

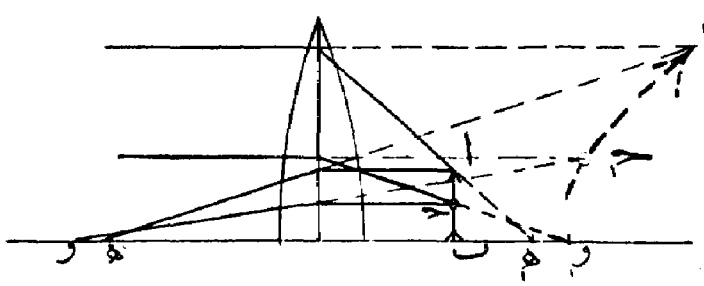


(شكل ١٢٧)

(ثانياً) الانكسار عند الجزء الحافى من العدسة

نفرض فى هذه الحالة أن الجزء الاوسط من العدسة محجوب وأن الانكسار يحدث عند حافة العدسة حيث تكون زوايا السقوط كبيرة وتكون الأشعة المنكسرة عند كل من سطحى العدسة أشعة لانقطية ويكون البعد البؤرى لكل من السطحين بالنسبة الى هذه الأشعة أقصر من البعد البؤرى فى حالة الأشعة التى تكاد تقع عمودياً على السطح فيكون البعد البؤرى للعدسة بالنسبة الى تلك الأشعة أقصر من البعد البؤرى لها بالنسبة الى هذه

ولسهولة الشرح نفرض أن العدسة لامة وأن الجسم ا ب على بعد منها أقل من بعدها البؤرى فبالنسبة الى انكسار الأشعة الصادرة من رأس الجسم أى من نقطة ا يمكن أن تعتبر بؤرة العدسة نقطة ه ولتكن البؤرة الأخرى نقطة ه$_{١}$ فى الجانب الثانى من العدسة و بالنسبة الى انكسار الأشعة الصادرة من منتصف الجسم أى من نقطة ح فان البؤرة تكون نقطة مثل و أبعد قليلا عن ه ولتكن البؤرة الأخرى نقطة و$_{١}$ فى الجانب الثانى



(شكل ١٢٨)

من العدسة وباعتبار أن هـ هى البؤرة يمكن ايجادصورة نقطة ا وذلك بأن نرسم شعاعاً من ا موازيا للمحور فينفذ ماراً بنقطة هـ وآخر من ا امتداده مار بنقطة هـ١ فهذا ينفذ خارجاً من العدسة موازياً للمحور فحيث يتقابل امتداداهما تكون نقطة ا١ وهى صورة ا وبالمثل يمكن ايجاد حـ١ وهى صورة حـ باعتبار أن نقطة و هى البؤرة ويتبين من الرسم أن صورة النصف الأعلى من الجسم تضخمت وأن الصورة فضلا عن تقوسها مشوهة واطرافها من جراء اللانقطية غير واضحة

١٥١ — تقليل أثر الزيغ الكرى فى الصور التى تتكون بوساطة العدسة

ويمكن العمل على تقليل أثر الزيغ الكرى فى الصور التى تتكون بوساطة العدسة اذا تذكرنا أن الحزمة الضيقة التى تسقط على العدسة سقوطاً يكاد يكون عمودياً على سطحها يكون أثر الزيغ الكرى فيها ضعيفاً ومثل هذه الحزمة يكون انحرافها عند الانكسار صغيراً . أى اذا عملنا بالقاعدة أن الحزمة التى يكون انحرافها صغيراً يكون تأثير الزيغ الكرى فيها صغيراً . وجعلنا انحراف الاشعة عند الانكسار صغيراً ما أمكن .

فمثلا اذا أردنا اختيار عدسة لامة ذات بعد بؤرى معين تصلح لاستقبال الأشعة المتوازية يستحسن أن يوزع الانحراف الكلى الذى يحدث بين سطحيها بالتساوى فلو كان الانحراف عند أحدهما صغيراً وأغفل تأثير الزيغ الكرى بالنسبة اليه يكون عند الآخر كبيراً فيكون تأثيره عظيما . ولذلك تفضل فى مثل هذه الحالة العدسة المحدبة المستوية على العدسة المحدبة الوجهين على شرط أن يوجه السطح المحدب للاولى لاستقبال الأشعة المتوازية الواقعة عليها لا السطح المستوى . والا كان الانحراف عند الانكسار الأول معدوماً وكان الانحراف كله عند الانكسار الثانى . ولهذا السبب تستعمل العدسة المحدبة المستوية فى النظارات عند اصلاح طول النظر وتستعمل كعدسة شيئية فى التلسكوبات

١٥٢ — تقليل أثر الزيغ الكرى فى عينية الميكرسكوب والتلسكوب

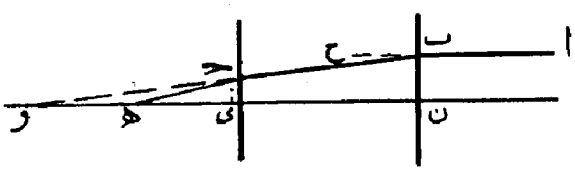
ولم نتعرض فى الباب الرابع عند وصف آلات الابصار كالتلسكوب والميكرسكوب وشرح عملها الى تأثير الزيغ الكرى فى الصور التى ترى بوساطتها وكيفية العمل على تقليله وهذه مسألة

جديرة بالعناية . وقد ذكرنا آنفاً أن الزيغ الكرى فى شيئية التلسكوب يقل كثيراً اذا جعلت الشيئية محدبة مستوية مع توجيه سطحها المحدب نحو الجسم البعيد . غير أنه لا يمكن بمثل هذه السهولة تقليل تأثير الزيغ الكرى فى العينية لأنه من اللازم أن تكون ذات بعد بؤرى قصير وأن تكون قريبة من الصورة التى تعمل هى فى تكبيرها . لذلك تستبدل بالعدسة العينية المفردة قطعة مركبة تصنع من عدستين لامتين منفصلتين موضوعتين بكيفية خاصة وتسمى « القطعة العينية » وتسمى العدسة المتجهة نحو الشيئية فيها « عدسة المجال » (١) والعدسة الاخرى التى توضع العين بقربها وينظر فيها رأسا « عدسة العين » (٢) . وسنذكر فيما يلى طريقتين لتركيب القطعة العينية

١٥٣ — القطعة العينية لهيجنز

القطعة العينية المنسوبة الى هيجنز (٣) يتوخى فى تركيبها أن يكون الانحراف الحادث فى الشعاع الذى يسقط موازياً للمحور من جراء مروره فى عدسة المجال مساوياً الانحراف الذى يحدث فيه بعد ذلك من جراء مروره فى عدسة العين فيتوزع الانحراف الحادث بفعل القطعة المركبة بين عدستيها بالتساوى

فاذا فرضنا أن ب ن (شكل ١٢٩) عدسة المجال ، ح ى عدسة العين وكان ا ب شعاعاً ساقطاً على الاولى موازياً للمحور فانحرف عند نفوذه فيها فى استقامة ب ح ثم انحرف عند نفوذه فى الثانية فى استقامة ح ه وتقابل والمحور فى نقطة ه فان



(شكل ١٢٩)

$$\angle \text{ح ب ح} = \angle \text{و ح ه} = \angle \text{ح و ه}$$

$$\therefore \text{ه ح} = \text{ه و}$$

فاذا كانت زوايا الانحراف صغيرة أمكن اعتبار ه ى مساوياً ه ح واذن تكون نقطة ه منتصف و ى

(١) Field lens (٢) Eye lens (٣) Huygens

ولما كان امتداد ب حـ يقطع المحور فى نقطة و ولما كان الشعاع ب حـ الواقع على العدسة حـ ى يمر بعد نفوذه فيها بنقطة ه فان نقطة و تكون بالنسبة الى هذه العدسة جسما تقديرياً ونقطة ه تكون بالنسبة اليها الصورة الحقيقية . فاذا رمزنا للبعد البؤرى لهذه العدسة (وهى لامة) بالرمز $ل_٢$ يكون

$$\frac{١}{-ل_٢} = \frac{١}{-ى\ ه} - \frac{١}{-ى\ و}$$

حيث يلاحظ وضع الاشارات السالبة طبقاً للقاعدة

فاذا رمزنا للبعد البؤرى لعدسة المجال وهى ب ن بالرمز $ل_١$ وللبعد بين العدستين بالحرف ء يكون

$$ى\ و = ل_١ - ء$$

$$ى\ ه = \frac{١}{٢}(ل_١ - ء)$$

$$\therefore \frac{١}{-ل_٢} = -\frac{٢}{ل_١ - ء} + \frac{١}{ل_١ - ء}$$

$$\therefore ل_٢ = ل_١ - ء$$

$$\therefore ل_١ - ل_٢ = ء$$

وتكون هذه المعادلة هى الدالة على العلاقة بين البعدين البؤريين للعدستين والبعد بينهما فى قطعة هيجنز

وتجعل عادة العدستان فى قطعة هيجنز بحيث يكون البعد البؤرى $ل_١$ لعدسة المجال ثلاثة أمثال البعد البؤرى $ل_٢$ لعدسة العين فيكون

$$ل_١ = ٣\ ل_٢$$

$$ء = ٢\ ل_٢$$

فاذا رمزنا للبعد البؤرى للعدسة المكافئة للقطعة المركبة بالحرف ل يكون

$$\frac{١}{ل} = \frac{١}{-٣ل_٢^٢} + \frac{١}{-ل_٢^٢} + \frac{٢ل_٢^٢}{٣ل_٢^٢} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (\text{بند } ٨٤)$$

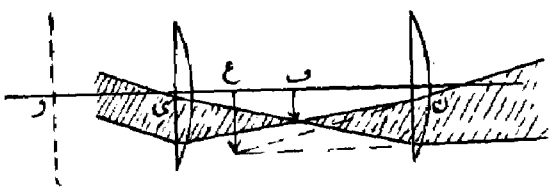
$$\therefore ل = -\frac{٣}{٢}ل_٢^٢$$

والاشارة السالبة تدل على أن المكافئة لامة

ويكون بعد المكافئة عن عدسة المجال هو

$$\frac{-\frac{٣}{٢}ل_٢^٢ \times (-٢ل_٢^٢)}{-ل_٢^٢} = -٣ل_٢^٢ \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (\text{بند } ٨٤)$$

فيكون موضع المكافئة على يسار عدسة المجال وعلى بعد ٣ ل$_٢$ منها وشكل (١٣٠) يوضح موضع العدسة المكافئة بالنسبة الى العدستين اللتين تتركب منهما قطعة هيجنز حيث يكون البعد البؤرى لعدسة المجال (ن) ثلاثة أمثال البعد البؤرى لعدسة العين (ى) والبعد بينهما



(شكل ١٣٠)

ضعفه ويكون موضع المكافئه عند و (بؤرة عدسة المجال) وتكون نقطة ع وهى منتصف ن و هى البؤرة الرئيسية الاولى بالنسبة الى العدسة المكافئة أى تبعد عنها بمقدار البعد البؤرى لها من الجانب الواقع منه الضوء

فاذا استعملت قطعة هيجنز كقطعة عينية عملت المكافئة عملها من حيث تكبير الصورة فاذا استبدلنا بها المكافئة وجب أن يكون موضع تكون الصورة الحادثة بفعل الشيئية فى التلسكوب أو الميكرسكوب عند نقطة ع بالنسبة الى المكافئة الموضوعة عند و . وكذلك وجب أن يكون موضعها عند ع أيضاً بالنسبة الى العدستين ن ى اللتين تتركب منهما قطعة هيجنز أى أن هذه القطعة يجب أن توضع بحيث تقع الصورة التى تتكون بفعل الشيئية فى الموضع المذكور . واذن تكون هذه الصورة بمثابة جسم تقديرى لعدسة المجال واذن تحدث عدسة المجال له صورة على بعد ع$_١$ منها طبقاً للمعادلة

$$\frac{١}{-٣ل_{٢}^{٢}} = \frac{١}{ع_{١}} - \frac{١}{-٤ل_{٢}^{٢}}$$

واذن $ع_{١} = -ل_{٢}^{٢}$

أى أن الصورة التى تحدثها عدسة المجال تكون عند ف منتصف البعد بين العدستين واذن تكون على بعد من عدسة العين يساوى بعدها البؤرى فهذه الصورة اذا نظر اليها خلال عدسة العين فان هذه العدسة تكبرها وتتكون الصورة النهائية التي ترى بوساطة القطعة العينية المركبة

ومما سبق يتبين أن الصورة التى تحدثها الشيئية يكون بعدها عن عدسة المجال سالباً ولذلك تسمى قطعة هيجنز « القطعة السالبة »

واذا أريد وضع خيطين متقاطعين فى القطعة العينيـة كما هو المتبع عادة فى الأجهزة التى تستعمل للقياس لزم أن يوضعا عند منتصف البعد بين العدستين حتى تظهر صورتاهما منطبقة على الصورة النهائية التى ترى بوساطة الجهاز كذلك اذا أريد وضع مقياس دقيق لقياس الأبعاد كما هو الحال فى بعض الاجهزة وجب أن يوضع هو أيضاً عند منتصف البعد بين العدستين ولـكن فى هذه الحالة يرى المقياس خلال عدسة العين على حدتها ويكون موضعه بالقرب منها فلا تخلو صورته من التشوه ولا يكون اذن صالحاً معتمداً عليه

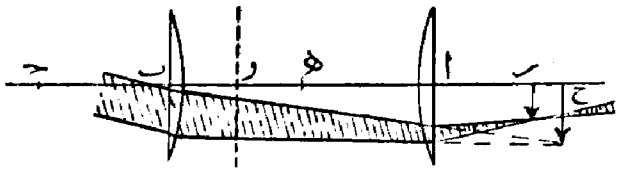
وتصنع كل من عدستى قطعة هيجنز من عدسة محدبة مستوية يوجه سطحها المحدب نحو الشيئية كما هو مبين بشكل (١٣٠) بحيث يقع الضوء على السطح المحدب فى كل وذلك عملا فى تقليل أثر الزيغ الـكرى فى كل واحدة منهما على حدتها ومبين بشكل (١٣٠) مسير حزمة خلال العدستين ومنه يتضح أن الوضع المذكور ادعى الى جعل انحراف الأشعة عند نفوذها فى كل عدسة موزعاً بالتساوى بين الانكسار الحادث عند أحد سطحيها وبين الانكسار الحادث عند الآخر

١٥٤ — القطعة العينية لرمزدن

وتتركب قطعة رمزدن[1] من عدستين لامتين البعد البؤرى لهما واحد والبعد بينهما مساو

(١) Ramsden

ثلثى البعد البؤرى لاحداهما . فاذا رمزنا للبعد البؤرى للواحدة بالرمز $ل_1$ وللبعد البؤرى للمكافئة بالحرف $ل$ فان



(شكل ١٣١)

$$\frac{1}{ل} = \frac{1}{-ل_1} + \frac{1}{ل_1 - ل_1} + \frac{ل_1^{\frac{2}{3}}}{ل_1^{\frac{2}{3}}}$$

$$\therefore ل = -ل_1^{\frac{3}{4}}$$

والاشارة السالبة تدل على أن المكافئة لامة . وبعد المكافئة عن عدسة المجال يكون

$$-ل_1^{\frac{1}{2}} = \frac{-ل_1^{\frac{3}{4}} \times (-ل_1^{\frac{2}{3}})}{-ل_1}$$

فاذا فرضنا أن عدسة المجال هى ا (شكل ١٣١) وعدسة العين هى ب ونقطة حـ بؤرة الأولى ونقطة هـ منتصف ما بين العدستين فان موضع المكافئة يكون عند و منتصف هـ ب وبؤرتها الرئيسية الاولى تكون نقطة ر بحيث يكون البعد و ر مساوياً $\frac{4}{3}$ ا حـ أو يكون ا ر مساوياً $ل_1^{\frac{1}{2}}$

ويتضح كما سبق فى الحالة الاولى أن نقطة ر هى موضع تكوّن الصورة التى تحدثها الشيئية وهذه الصورة تعد جسما حقيقياً بالنسبة الى عدسة المجال وبعده عنها مقدار موجب لذلك تسمى قطعة رمزدن أحياناً « قطعة موجبة » وتكون نقطة ر هى موضع الخيطين المتقاطعين أو المقياس وهذا يرى اذن خلال العدستين فلا يكون مشوهاً كما فى قطعة هيجنز

وبما أن الصورة الحقيقية التى تتكون بفعل الشيئية ويكون موضعها عند ر تعتبر جسما حقيقياً بالنسبة الى عدسة المجال فان هذه العدسة تحدث لهذا الجسم صورة يقدر بعدها عنها من المعادلة

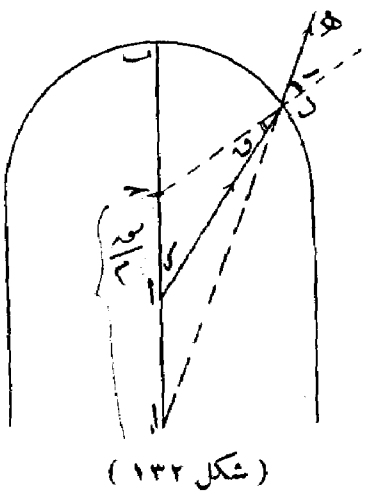
$$\frac{1}{-ل_1} = \frac{1}{ع_1} - \frac{1}{ل_1^{\frac{1}{2}}}$$

واذن يكون بعدها $ع_1$ مساوياً $ل_1^{\frac{1}{2}}$ فهى صورة تقديرية تحدث عند ح كما هو مبين

بالشكل ولذلك تنفذ الأشعة من عدسة المجال كأنها صادرة من هذه الصورة وبما أن بعد هذه الصورة عن عدسة العين يساوى البعد البؤرى فان الأشعة تنفذ بعد ذلك من عدسة العين متوازية وموضح بالشكل مسير حزمة خلال العدستين ويتبين منه أن جعل كلا من العدستين محدبة مستوية وجعل السطح المستوى لعدسة المجال متجهاً نحو الشيئية والسطح المحدب لعدسة العين متجهاً نحو عدسة المجال كما هو مبين بالشكل ادعى الى أن يكون انحراف الأشعة خلال كل عدسة على حدتها موزعاً بالتساوى بين الانكسارين عند سطحيها . وهذا أدعى الى تقليل تأثير الزيغ فى كل عدسة على انفراد . ولهذا السبب تصنع كل من عدستى قطعة رمزدن محدبة مستوية وتركبان بالكيفية المبينة بالشكل

١٥٥ — السطح الذى لا زيغ له

لنفرض أن كتلة سميكة من الزجاج مثلا محدودة بسطح كرى محدب مركز تكوره نقطة حـ (شكل ١٣٢) ولنرمز لنصف قطر تكور السطح بالرمز ر ولمعامل انكسار الضوء من الهواء الى مادة العدسة بالحرف م ولنأخذ نقطة مثل ا على امتداد المحور ب حـ بحيث يكون بعدها عن المركز وهو ا حـ مساوياً $\frac{ر}{م}$



(شكل ١٣٢)

فاذا رسمنا من ا شعاعاً ساقطاً مثل ا د ورسمنا مسيره بعد الانكسار الى الخارج وليكن د هـ ومددنا هـ د على استقامته ليقطع المحور فى نقطة ا، ثم رمزنا لزاوية السقوط بالحرف ن ولزاوية الانكسار بالحرف ع يكون فى المثلث د حـ ا

$$\frac{ا\,حـ}{حـ\,د} = \frac{جا\,ن}{جا\,ح\,ا\,د} = \frac{١}{\frac{ر}{م}} = \frac{م}{ر}$$

$$\therefore \angle حـ\,ا\,د = ع$$

ولكن $\angle ب\,حـ\,د = \angle حـ\,ا\,د + ن = ع + ن$

و $\angle ب\,حـ\,د = \angle حـ\,ا_{،}\,د + \angle حـ\,د\,ا_{،} = \angle حـ\,ا\,د + ع$

$$\therefore \angle حـ\,ا_{،}\,د = ن$$

واذن فى المثلث حـ ا د يكون

$$\frac{\text{حـ ا}}{\text{حـ د}} = \frac{\text{حـ ا}}{\text{حـ ا}} = م$$

$$\therefore \text{حـ ا} = م \cdot \text{حـ د} = م \times م$$

ومن هذا يتضح انه اذا كانت ا نقطة مضيئة فان الأشعة متى تقع منها على السطح الكرى تنكسر خارجة كأنها صادرة من نقطة ثابتة على المحور تبعد عن المركز بمقدار $م$ فلا يكون الانكسار الحادث مصحوباً بزيغ ما. ويسمى السطح الكرى فى هذه الحالة (حيث تكون النقطة المضيئة على المحور وعلى بعد يساوى $م$ من المركز كما هو مبين بالشكل) « سطحاً لا زيغ له »[1] وتسمى نقطتا ا ، ا' « بؤرتين لا زيغ فيهما »[2]

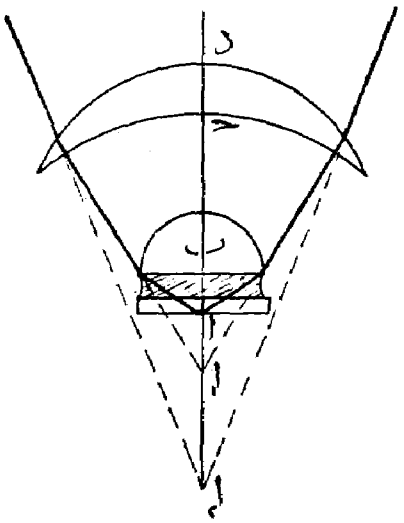
١٥٦ — العدسة التى لا زيغ لها واستعمالها فى شيئية الميكرسكوب

ويلاحظ فى الميكرسكوب أن صورة الجسم الصغير تكبر أضعافاً مضاعفة فلكى يتيسر رؤية الصورة المكبرة بوضوح وجب أن تكون استضاءتها كبيرة ولكى تقع على العدسة الشيئية كمية كبيرة من الضوء وجب أن يكون الجسم قريباً جداً من العدسة ولكن وضع الجسم قريباً جداً من العدسة يجعل تأثير الزيغ كبيراً . ولملافاة هذا تطبق فكرة السطح الذى لا زيغ له . فتستخدم فى شيئية الميكرسكوب عدسة ب (شكل ١٣٣) على هيئة نصف كرة سطحها الاسفل مستوى ويوضع الجسم الصغير عند ا ويغطى بالغطاء الزجاجى كالمعتاد . ويوضع فوق الغطاء قطرة من زيت معامل انكسار الضوء فيه كمعامل انكساره فى الزجاج ، ثم تقرب العدسة حتى يلمس سطحها المستوى قطرة الزيت فتتكون طبقة زيتية بين الغطاء وسطح العدسة . ويمكن اذن اعتبار الجسم الصغير ا كأنه موضوع فى داخل كتلة من الزجاج . فاذا كان على المحور وبعده عن مركز تكور السطح الأعلى للعدسة ب يساوى $م$ فان جميع الاشعة المنكسرة عند السطح الكرى تكون كأنها صادرة من ا' حيث يكون ا ، ا'

(١) Aplanatic Surface

(٢) Aplantic Foci

بؤرتين لا زيغ فيهما وبذلك تنفذ الاشعة من العدسة ب على هيئة حزمة مخروطية زاوية رأس المخروط فيها وهى ا١ أصغر من زاوية رأس المخروط فى الحزمة الاصلية . فاذا وضعت عدسة أخرى بحيث تكون نقطة ا١ مركز تكور سطحها الاسفل ح فان الأشعة تنفذ من هذا السطح الى داخل العدسة دون أن تعانى انكساراً . واذا كانت نقطة ا١ على محور السطح د وعلى بعد من مركز تكوره يساوى حاصل ضرب $\frac{1}{م}$ فى نصف قطر تكوره فان الانكسار عند هذا السطح أيضاً يكون انكساراً لا زيغ فيه وتنفذ الأشعة خارجة من السطح د كأنها صادرة من نقطة ا٢ تكون هى ونقطة ا١ بالنسبة الى السطح د بؤرتين لا زيغ فيهما . واذن تكون زاويه رأس مخروط الحزمة النافذة من السطح د وهى ا٢ أصغر فتزداد الحزمة المخروطية ضيقاً . وبهذه الكيفية يستعان لرؤية الصورة بالضوء المحصور فى الزاوية المجسمة ا وهى تكاد تساوى ٢ ط فى حين أن الأشعة تقع على شيئية الميكرسكوب كأنها حزمة مخروطية ضيقة



(شكل ١٣٣)

ويسمى الميكرسكوب الذى تطبق فى قطعته الشيئية الفكرة السابقة الميكرسكوب ذا العدسة المغمورة ويطلق اسم العدسة المغمورة (١) على التركيب المذكور

الزيغ اللونى

١٥٧ — شدة تشتت الضوء

اذا رمز لمعامل انكسار الضوء فى مادة منشور ثلاثى بالحرف م ولزاوية رأسه بالحرف ا وللنهاية الصغرى لزاوية الانحراف بالحرف ف فقد تبين فى بند (٦١) أن

---

(١) Immersion Lens

$$م = \frac{\text{حا}\frac{ا + ف}{٢}}{\text{حا}\frac{ا}{٢}}$$

فاذا كانت زاوية المنشور صغيرة أمكن اعتبار

$$م = \frac{ا + ف}{ا}$$

$$\therefore ف = ا (م - ١) \ldots\ldots (١)$$

ولما كان انحراف الأشعة عند نفوذها من المنشور وكذلك معامل انكسارها يختلفان تبعاً لاختلاف الوانها نرى بالرمز للنهاية الصغرى لزاوية انحراف الأشعة الحمراء بالرمز $ف_ح$ ولها لانحراف الاشعة البنفسجية مثلا بالرمز $ف_ب$ ولمعامل انكسار الأولى بالرمز $م_ح$ ولمعامل انكسار الثانية بالرمز $م_ب$ أن

$$ف_ح = ا (م_ح - ١)$$

$$\text{و} ف_ب = ا (م_ب - ١)$$

$$\therefore ف_ب - ف_ح = ا (م_ب - م_ح) \ldots\ldots (٢)$$

فاذا جعلنا الحرف ف رمزاً للنهاية الصغرى لزاوية انحراف أشعةمتوسطةبين الطرف الأحمر والطرف البنفسجى من الطيف والحرف م رمزاً لمعامل انكسار هذه الأشعة ينتج من التعويض فى المعادلة (٢) عن ا قيمتها من المعادلة (١) أن

$$ف_ب - ف_ح = \frac{ف}{م - ١} (م_ب - م_ح)$$

$$\therefore \frac{ف_ب - ف_ح}{ف} = \frac{م_ب - م_ح}{م - ١}$$

ويسمى الطرف الايسر من هذه المعادلة شدة تشتت الضوء فى مادة المنسور أو شدة تشتيت[١] مادة المنشور للضوء

١٥٨ – المنشور الحارف غير المشتت والمنشور المشتت غير الحارف

اذا أخذ منشوران زاويتاهما صغيرتان ومصنوعان من نوعين مختلفين من الزجاج كالزجاج الصخرى[٢] والزجاج التاجى[٣] مثلا حيث يكون الانحراف ومعامل الانكسار فيهما مختلفين نرى باستعمال الرموز السابقة لاحدهما والرموز نفسها مشرطة للآخر أن

$$ف_ى - ف_ع = ا(م_ى - م_ع)$$

$$و\ ف_َى - ف_َع = ا_َ(م_َى - م_َع)$$

فاذا وضع المنشوران متلاصقين بحيث يكون الحرف الحارف لأحدهما متجهاً فى عكس اتجاه الحرف الحارف للآخر (كما هو مبين بشكل ١٣٤) وعدلت زاويتا المنشورين بحيث يصير

$$ا(م_ى - م_ع) = ا_َ(م_َى - م_َع) \ldots\ldots (١)$$

فان التشتت الحادث بفعل أحد المنشورين يبطله فعل الآخر واذن ينفذ الشعاع من الضوء الأبيض فى المنشورين ويكاد لا يتشتت ويسمى المنشور المركب من المنشورين منشوراً غير مشتت أو منشوراً لالونياً[٤]

(شكل ١٣٤)

أما اذا عدلت زاويتا المنشور بحيث يكون

$$ا(م - ١) = ا_َ(م_َ - ١) \ldots\ldots (٢)$$

ووضع المنشوران بالكيفية المذكورة فان شعاع الضوء الابيض ينفذ خلالها ويكاد لا ينحرف ويسمى المنشور المركب فى هذه الحالة منشوراً غير حارف . ولكن نظراً لأن شرط عدم التشتت لا يستلزم شرط عدم الحرف وشرط عدم الحرف لا يستلزم شرط عدم التشتت فان المنشور المركب عند توافر شرط المعادلة (١) يسمى منشوراً حارفاً غير مشتت والمنشور المركب عند توافر شرط المعادلة (٢) يسمى منشوراً مشتتاً غير حارف . واذا استعمل الأخير وأنفذ فيه شعاع من

---

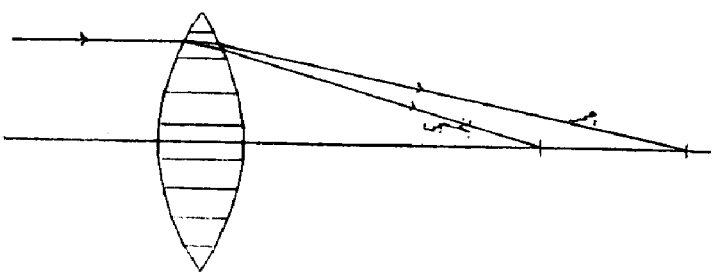
(١) Dispersive Power (٢) Flint glass (٣) Crown glass (٤) Achromatic

الضوء الأبيض يتكون طيف ولكنه أو بالأحرى الجزء المتوسط فيه يكون على امتداد الشعاع الأبيض الساقط على المنشور

و كثيراً ما تستخدم منشورات مرتبة تحدث تشتتاً من غير انحراف فى نوع من السبكترسكوب يسمى السبكترسكوب ذا الرؤية المستقيمة[١] يكون على هيئة أنبوبة مستقيمة ويوجه رأساً الى اللهب أو مصدر الضوء الذى يراد أختبار طيفه ويمتاز فى ذلك عن السبكترسكوب المعتاد وكثيراً ما يستعمل فى الكشف الكيميائى

١٥٩ – الزيغ اللونى فى العدسات

العدسة يمكن اعتبارها مركبة من أجزاء كما هو موضح بشكل (١٣٥) يعتبر كل جزء منها بمثابة منشور أو جزء من منشور اذا سقط عليه شعاع من الضوء الأبيض عانى انحرافاً وتشتيتاً فاذا وقعت على العدسة حزمة من الأشعة البيضاء المتوازية فانها عند نفوذها من العدسة لا تمر هى (فى العدسة اللامة) أو امتداداتها (فى العدسة المفرقة) بنقطة واحدة تعتبر البؤرة بل تكون هناك بؤرة لكل لون من الأشعة ويكون



(شكل ١٣٥)

موضع تقابل الاشعة الحمراء أبعد عن العدسة من موضع تقابل البنفسجية ويسمى البعد بين موضع البؤرة الحمراء وموضع البؤرة البنفسجية « الزيغ اللونى »[٢]

وحدوث هذا فى العدسة يترتب عليه أن صورة الجسم الأبيض التى تتكون بفعل العدسة لاتكون واضحة اذ تكون حدودها عادة ملونة بالوان الطيف

وقد سبق فى بند (٧٤) أن المعادلة الدالة على علاقة البعد البؤرى للعدسة بنصفى قطرى تكور سطحيها ومعامل انكسار الضوء فيها هى

---

(١) Direct Vision Spectroscope

(٢) Chromatic Aberration

$$\frac{١}{ل} = (م - ١)\left(\frac{١}{س_١} - \frac{١}{س_٢}\right) \quad \ldots\ldots \quad (١)$$

فهذه المعادلة لا تنطبق الا على نوع معين من الأشعة ذى لون خاص فاذا رمزنا للبعد البؤرى بالنسبة الى الأشعة البنفسجية بالرمز $ل_ب$ وله بالنسبة الى الحمراء بالرمز $ل_ح$ ولمعامل انكسار الأولى بالرمز $م_ب$ ولمعامل انكسار الثانية بالرمز $م_ح$ يكون

$$\frac{١}{ل_ب} = (م_ب - ١)\left(\frac{١}{س_١} - \frac{١}{س_٢}\right)$$

و

$$\frac{١}{ل_ح} = (م_ح - ١)\left(\frac{١}{س_١} - \frac{١}{س_٢}\right)$$

$$\therefore \frac{١}{ل_ب} - \frac{١}{ل_ح} = (م_ب - م_ح)\left(\frac{١}{س_١} - \frac{١}{س_٢}\right) \ldots (٢)$$

واذا جعلنا حرف ل رمزاً للبعد البؤرى بالنسبة الى أشعة متوسطة بين الاحمر والبنفسجى وحرف م رمزاً لمعامل انكسارها وعوضنا عن $\left(\frac{١}{س_١} - \frac{١}{س_٢}\right)$ فى المعادلة (٢) قيمتها من المعادلة (١) ينتج أن

$$\frac{ل_ح - ل_ب}{ل_ح \, ل_ب} = \frac{م_ب - م_ح}{م - ١} \cdot \frac{١}{ل}$$

وبما أن ل مقدار وسط بين $ل_ب$ و $ل_ح$ أمكن بالتقريب اعتبار

$$ل_ب \, ل_ح = ل^٢$$

واذن يكون

$$\frac{ل_ح - ل_ب}{ل} = \frac{م_ب - م_ح}{م - ١}$$

ويساوى هذا شدة تشتت الضوء فى مادة العدسة

١٦٠ — العدسة اللالونية

واذا كانت هناك عدستان من نوعين مختلفين من الزجاج ورمزنا للمقادير الخاصة باحداهما بالرموز السابقة ، للاخرى بالرموز نفسها مشرطة . وجعلنا من العدستين وهما متلامستان عدسة مفردة مركبة ورمزنا للبعد البؤرى للمركبة بالنسبة الى الاشعة البنفسجية بالرمز ل ولله للحمراء بالرمز ل ع يكون

$$\frac{١}{ل} = \frac{١}{ل_{ن}} + \frac{١}{ل'_{ن}} = (م_{ن} - ١)\left(\frac{١}{س_{١}} - \frac{١}{س_{٢}}\right) + (م'_{ن} - ١)\left(\frac{١}{س_{١}} - \frac{١}{س_{٢}}\right)$$

$$و\ \frac{١}{ل_{ع}} = \frac{١}{ل_{ع}} + \frac{١}{ل'_{ع}} = (م_{ع} - ١)\left(\frac{١}{س_{١}} - \frac{١}{س_{٢}}\right) + (م'_{ع} - ١)\left(\frac{١}{س_{١}} - \frac{١}{س_{٢}}\right)$$

فاذا أريد تلافى الزيغ اللونى فى العدسة المركبة كان حتما أن يكون

$$\frac{١}{ل_{ن}} = \frac{١}{ل_{ع}} \text{ أو } \frac{١}{ل_{ن}} - \frac{١}{ل_{ع}} = \text{صفراً}$$

$$\text{واذن } (م_{ن} - م_{ع})\left(\frac{١}{س_{١}} - \frac{١}{س_{٢}}\right) + (م'_{ن} - م'_{ع})\left(\frac{١}{س_{١}} - \frac{١}{س_{٢}}\right) = \text{صفراً}$$

واذا جعلنا الحرف ل رمزاً للبعد البؤرى للعدسة اللاولى بالنسبة الى أشعة متوسطة بين الأحمر والبنفسجى والرمز ل' رمزاً للبعد البؤرى للثانية بالنسبة الى مثلها من الاشعة وكذلك جعلنا الحرف م رمزاً لمعامل انكسار هذه الأشعة فى الأولى والرمز م' له فى الثانية يكون

$$\frac{م_{ن} - م_{ع}}{م - ١} \cdot \frac{١}{ل} + \frac{م'_{ن} - م'_{ع}}{م' - ١} \cdot \frac{١}{ل'} = \text{صفراً} \ldots (١)$$

أى أنه يجب لتلافى الزيغ اللونى فى العدسة المركبة أن يكون خارج قسمة شدة تشتت الضوء

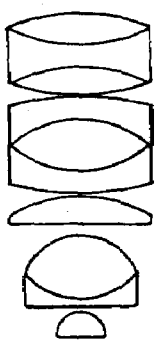
فى احدى العدستين على بعدها البؤرى مضافاً الى خارج قسمة شدة تشتته فى الثانية على بعدها البؤرى مساوياً صفراً

ولما كانت شدة تشتت الضوء فى أى العدستين مقداراً موجباً يتضح من هذا أن احداهما تكون لامة والأخرى تكون مفرقة

والمعادلة (١) تنص على الشرط الذى يجب توافره لكى تكون العدسة المركبة لا لونية فاذا أريد أن يكون للعدسة المركبة اللالونية بعد بؤرى معين ورمزنا له بالحرف ل وجب أن يتحقق أيضاً شرط المعادلة

$$\frac{١}{ل} = \frac{١}{ل_{١}} + \frac{١}{ل_{٢}} \quad \ldots\ldots (٢)$$

وتطبق الفكرة السابقة لتلافى الزيغ اللونى فى شيئية التلسكوب فتصنع الشيئية قطعة مركبة من عدسة لامة من الزجاج التاجى وأخرى مفرقة من الزجاج الصخرى . وكذلك يتلافى أيضاً الزيغ اللونى فى عدسة آلة التصوير الفتوغرافى . أما شيئية الميكرسكوب فتصنع عادة من قطعة مركبة من عدة عدسات . وشكل (١٣٦) يوضح نقلا عن كتاب « ادسر » [1] شيئية ميكرسكوب صنعت فيها العدسات اللامة من أنواع مختلفة من الزجاج التاجى والعدسات المفرقة من أنواع مختلفة من الزجاج الصخرى



(شكل ١٣٦)

١٦١ — الزيغ اللونى فى القطعة العينية

أوضحنا فيما سبق كيف يتلافى الزيغ اللونى فى القطعة المركبة من عدستين متلاصقتين غير أن القطعة العينية سواء أكانت قطعة هيجنز أم قطعة رمزدن تتركب من عدستين من نوع واحد من الزجاج بينهما مسافة معينه . وسنبحث هنا فى كيفية ملافاة الزيغ اللونى الى حد ما فى هذه القطعة

---

(١) Edser

فاذا رمزنا للبعد البؤرى لاحدى العدستين بالحرف ل وللاخرى بالرمز لَ وللبعد بينهما بالحرف ء وللبعد البؤرى للمكافئة بالحرف ل فان

$$\frac{١}{ل} = \frac{١}{ل} + \frac{١}{لَ} - \frac{ء}{ل لَ}$$

ولما كان البعد البؤرى بالنسبة الى الأشعة الحمراء غيره بالنسبة الى البنفسجية مثلا فلنجعل المقادير المذكورة منسوبة الى نوع من الاشعة متوسط بين الاحمر والبنفسجي ولنرمز لمعامل انكساره بالحرف م ولنرمز للبعد البؤرى للعدسة الاولى بالنسبة الى الأشعة البنفسجية بالرمز ل ى وللثانية بالنسبة الى البنفسجية أيضاً بالرمز لَ ى ولمعامل انكسار هذه الأشعة بالرمز م ى ولنصفى قطرى سطحى العدسة الأولى بالرمزين س ١ ، س ٢ وبهما مشرطين لنصفى قطرى سطحى الثانية فيكون

$$\frac{١}{ل_ى} = (م_ى - ١)\left[\frac{١}{س_١} - \frac{١}{س_٢}\right]$$

$$\text{، } \frac{١}{لَ_ى} = (م_ى - ١)\left[\frac{١}{سَ_١} - \frac{١}{سَ_٢}\right]$$

فاذا رمزنا للبعد البؤرى للمكافئة بالنسبة الى الاشعة البنفسجية بالرمز ل ى فان

$$\frac{١}{ل_ى} = \frac{١}{ل_ى} + \frac{١}{لَ_ى} - \frac{ء}{ل_ى لَ_ى}$$

$$\text{واذن } \frac{١}{ل_ى} = (م_ى - ١)\left[\frac{١}{س_١} - \frac{١}{س_٢}\right] + (م_ى - ١)\left[\frac{١}{سَ_١} - \frac{١}{سَ_٢}\right]$$

$$+ ء\,(م_ى - ١)^٢ \left[\frac{١}{س_١} - \frac{١}{س_٢}\right]\left[\frac{١}{سَ_١} - \frac{١}{سَ_٢}\right] \quad \ldots\ldots (١)$$

$$\text{وبما أن } \frac{١}{ل} = (م - ١)\left[\frac{١}{س_١} - \frac{١}{س_٢}\right]$$

$$\text{و} \quad \frac{١}{ل_{ك}} = (م - ١)\left[\frac{١}{س_{١}} - \frac{١}{س_{٢}}\right]$$

ينتج بالتعويض فى المعادلة (١) أن

$$\frac{١}{ل_{ك}} = \frac{ك - ١}{م - ١}\frac{١}{ل} + \frac{ك - ١}{م - ١}\frac{١}{لَ} + \left[\frac{ك - ١}{م - ١}\right]^{٢}\frac{ع}{ل\ لَ}$$

وبالمثل اذا رمزنا للبعد البؤرى المكافئة بالنسبة الى الاشعة الحمراء بالرمز $ل_{ح}$ و لمعامل انكسار هذه الاشعة بالرمز $م_{ح}$ يمكن لثبات أن

$$\frac{١}{ل_{ح}} = \frac{م_{ح} - ١}{م - ١}\frac{١}{ل} + \frac{م_{ح} - ١}{م - ١}\frac{١}{لَ} + \left[\frac{م_{ح} - ١}{م - ١}\right]^{٢}\frac{ع}{ل\ لَ}$$

فاذا أريد أن يكون البعد البؤرى للمكافئة بالنسبة الى الاشعة الحمراء مثله بالنسبة الى الاشعه البنفسجية وجب أن يكون

$$\frac{١}{ل_{ك}} = \frac{١}{ل_{ح}} \quad \text{أو} \quad \frac{١}{ل_{ك}} - \frac{١}{ل_{ح}} = \text{صفراً}$$

$$\text{واذن} \quad \frac{م_{ك} - م_{ح}}{م - ١}\left[\frac{١}{ل} + \frac{١}{لَ}\right] + \frac{(ك - ١)^{٢} - (م_{ح} - ١)^{٢}}{(م - ١)^{٢}}\frac{ع}{ل\ لَ} = \text{صفراً}$$

$$\text{أى أن} \quad \frac{م_{ك} - م_{ح}}{م - ١}\left[\frac{١}{ل} + \frac{١}{لَ}\right] + \frac{(ك - م_{ح})(ك + م_{ح} - ٢)}{(م - ١)^{٢}}\frac{ع}{ل\ لَ} = \text{صفراً}$$

$$\text{أى أن} \quad \frac{١}{ل} + \frac{١}{لَ} + \frac{ك + م_{ح} - ٢}{م - ١} \cdot \frac{ع}{ل\ لَ} = \text{صفراً}$$

فاذا اعتبرنا $ك + م_{ح} = ٢\ م$ وهو اعتبار لا يختلف كثيراً عن الواقع تأخذ المعادلة السابقة الصورة الآتية

$$\frac{١}{ل} + \frac{١}{ل'} + \frac{٢\ ء}{ل\ ل'} = \text{صفراً}$$

أو $\quad ل + ل' + ٢\ ء = \text{صفراً}$

وشرط المعادلة الأخيرة ينطبق فى قطعة هيجنز لأن فيها عدسة المجال بعدها البؤرى ثلاثة أمثال البعد البؤرى لعدسة العين والبعد بين العدستين يساوى ضعف البعد البؤرى لعدسة العين ولكن هذا الشرط لا ينطبق فى قطعة رمزدن

ومن اللازم الاشارة هنا الى أن القول بأن توافر الشرط المذكور يجعل القطعة لا لونية ليس صحيحاً على الاطلاق فان كان البعد البؤرى للمكافئة واحداً بالنسبة الى الأشعة الحمراء أو البنفسجية مثلا ورمزنا للبعد البؤرى هذا بالحرف ل فان بعد موضع المكافئة عن العدسة الاولى يكون كما اتضح فى بند (٨٤)

$$\frac{ل\ ء}{ل'}$$

باعتبار أن ل' البعد البؤرى للعدسة الثانية

فبالنسبة الى الأشعة الحمراء يلزم أن يكون بعدها هذا مساوياً $\frac{ل\ ء}{ل'_{ح}}$

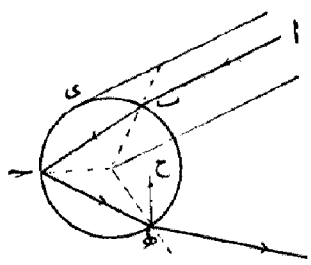
و بالنسبة الى البنفسجية يلزم أن يكون $\frac{ل\ ء}{ل'_{ب}}$

و بما أن العدسة الثانية على حدتها ليست لا لونية فان موضع المكافئة يختلف تبعاً لاختلاف لون الأشعة . فاذا كان الجسم الذى يرى بوساطة القطعة أبيض أو لا لونياً فلكى تقوم المكافئة بعملها وجب أن توضع فى موضع بالنسبة الى الأشعة الحمراء وفى موضع آخر بالنسبة الى البنفسجية وهكذا وثبوت موضعها يترتب عليه أن التكبير لا يكون واحداً فى الصور ذات الالوان المختلفة فلا تتطابق بالتمام

قوس قزح

١٦٢ – القوس الابتدائية

قوس قزح ظاهرة تحدث عند وقوع أشعة الشمس على قطيرات الماء الصغيرة التى تكون موجودة فى الجو عند سقوط الأمطار ثم خروج الأشعة منها الى عين الرائى بعد أن تكون قد عانت انعكاساً داخلياً واحداً أو أكثر . وسنعنى هنا فى شرح هذه الظاهرة ببيان السبب فى ظهور القوس وفى ظهور الألوان وفى تكون القوسين اللتين يمكن فى بعض الأحيان رؤيتهما بوضوح



(شكل ١٣٧)

لنفرض أن ا ب شكل (١٣٧) شعاع من ضوء الشمس يقع على قطيرة كرية صغيرة من الماء ولنفرض أن مسيره عند الانكسار داخل القطيرة هو ب ح وانه ينعكس جزء من الضوء عند ح فى اتجاه ح ه ثم ينفذ جزء خارجاً من القطيرة فى استقامة ه و وينعكس جزء فى استقامة ه ح وهكذا

فاذا رمزنا لزاوية السقوط عند ب بالحرف ن ولزاوية الانكسار بالحرف ر تكون زاوية الانحراف الذى يعانيه الشعاع المنكسر ب ح بالنسبة الى ا ب هى ن – ر فى عكس اتجاه حركة عقربى الساعة ثم يعانى الشعاع ح ه بالنسبة الى ب ح انحرافاً فى الاتجاه نفسه قدره ط – ٢ ر ويحدث مثل هذا الانحراف فى كل مرة ينعكس فيها الشعاع انعكاساً داخليا فاذا راعينا حالة الانعكاس الداخلى الواحد فان الشعاع ه و عند خروجه من القطيرة ينحرف عن مسيره ح ه بمقدار ن – ر وفى عكس اتجاه حركة عقربى الساعة فيكون اذن انحراف الشعاع الذي يخرج من القطيرة بعد انعكاس داخلى واحد هو

ن – ر + ط – ٢ ر + ن – ر

واذا رمزنا بالحرف ى لزاوية انحراف الشعاع الذى يخرج من القطيرة بعد أن يعانى عدداً من الانعكاسات الداخلية نرمز له بالحرف ع يكون

ى = ن – ر + ع (ط – ٢ ر) + ن – ر

$$\therefore \quad \text{ن} = ٢(\text{ن} - \text{ر}) + \text{ع}(\text{ط} - ٢\text{ر})$$

وقيمة زاوية الانحراف ن مرتبطة بقيمة زاوية السقوط ن فهى تتغير تبعاً لها . فاذا قدرنا تفاضل ن بالنسبة الى ن يكون

$$\frac{\text{د ن}}{\text{د ن}} = ٢ - ٢\frac{\text{د ر}}{\text{د ن}} - ٢\text{ع}\frac{\text{د ر}}{\text{د ن}}$$

وهذا المقدار يساوى صفراً اذا بلغ الانحراف ن نهايته الصغرى (أو العظمى) واذن عند هذه النهاية يكون

$$١ - \frac{\text{د ر}}{\text{د ن}}(\text{ع} + ١) = \text{صفراً}$$

$$\therefore \quad \text{د ن} = (\text{ع} + ١)\,\text{د ر} \quad \ldots\ldots \quad (١)$$

ولايجاد قيمة زاوية السقوط فى هذه الحالة فأن

$$\text{حا ن} = \text{م حا ر} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (٢)$$

$$\therefore \quad \text{حتا ن د ن} = \text{م حتا ر د ر} \quad \ldots\ldots \quad (٣)$$

وبالتعويض من (١) ينتج أن

$$(\text{ع} + ١)\,\text{حتا ن} = \text{م حتا ر} \quad \ldots\ldots \quad (٤)$$

$$\therefore \quad (\text{ع} + ١)\,\text{حتا ن} = \text{م}\sqrt{١ - \text{حا}^٢\text{ر}}$$

$$= \sqrt{\text{م}^٢ - \text{م}^٢\,\text{حا}^٢\text{ر}} = \sqrt{\text{م}^٢ - \text{حا}^٢\text{ن}}$$

$$\therefore \quad (\text{ع} + ١)^٢\,\text{حتا}^٢\text{ن} = \text{م}^٢ - \text{حا}^٢\text{ن}$$

$$\therefore \quad \text{ع}^٢\,\text{حتا}^٢\text{ن} + ٢\text{ع}\,\text{حتا}^٢\text{ن} + ١ = \text{م}^٢$$

$$\therefore \quad \text{حتا ن} = \sqrt{\frac{\text{م}^٢ - ١}{\text{ع}^٢ + ٢\text{ع}}} \quad \ldots\ldots \quad (٥)$$

ويمكن تعيين ما اذا كانت النهاية نهاية صغرى أو عظمى بالطريقة المعتادة . فالتفاضل الثانى لزاوية الانحراف هو

$$\frac{\text{د}^٢\text{ن}}{\text{د ن}^٢} = -٢(\text{ع} + ١)\frac{\text{د}^٢\text{ر}}{\text{د ن}^٢} \quad \ldots \quad (٦)$$

ومن المعادلة (٣) يتضح أن

$$\frac{\text{ظ}\,\nu}{\text{ظ}\,\upsilon} = \frac{\text{حتا}\,\upsilon}{\text{م حتا}\,\nu}$$

$$\therefore \quad \frac{\text{ظ}^{٢}\,\nu}{\text{ظ}^{٢}\,\upsilon} = \frac{\text{حتا}\,\upsilon\,\text{حا}\,\nu - \text{حا}\,\upsilon\,\text{حتا}\,\nu}{\text{م حتا}^{٢}\,\nu}$$

$$\therefore \quad \frac{\text{ظ}^{٢}\,\upsilon}{\text{ظ}^{٢}\,\upsilon} = -٢(\text{ع} + ١)\frac{\text{حتا}\,\upsilon\,\text{حا}\,\nu - \text{حا}\,\upsilon\,\text{حتا}}{\text{م حتا}^{٢}\,\nu}$$

فاذا عوضنا فى هذه المعادلة بدلا من زاوية ν قيمتها بالنسبة الى υ من المعادلتين (٢) ، (٤) يتضح أن التفاضل الثانى هذا موجب واذن تكون النهاية نهاية صغرى فتكون قيمة υ فى المعادلة (٥) هى قيمة زاوية السقوط عند ما تكون زاوية الانحراف عند نهايتها الصغرى ومن هذه المعادلة يمكن استخراج القيمة العددية لزاوية السقوط وثم القيمة العددية لزاويتى الانكسار والانحراف وذلك بالتعويض عن م ، ع قيمتيهما

فاذا راعينا الحالة التى يعانى فيها الشعاع الخارج من القطرة انعكاساً داخلياً واحداً حيث يكون ع = ١ واعتبرنا م مساوية $\frac{٤}{٣}$ فان

$\upsilon = ٥٩,٤^{\circ}$ بالتقريب

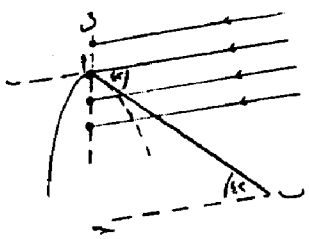
$\nu = ٤٠,٢^{\circ}$ »

$\upsilon = ١٣٨^{\circ}$ »

أى أن زاوية الانحراف الصغرى للشعاع الذى يخرج من القطرة بعد أن ينعكس انعكاساً داخلياً واحداً هى ١٣٨° . فاذا وقعت على القطرة حزمة من الاشعة المتوازية كالحزمة المحدودة بالمماس المرسوم عند ى (شكل ١٣٧) والمستقيم الموازى له المار بمركز القطيرة فان كل شعاع منها يقع على سطح القطيرة بزاوية سقوط تختلف عن زاوية سقوط الآخر . واذن تكون لكل شعاع منها يخرج من القطيرة بعد انعكاس واحد زاوية انحراف معينة تختلف عن

انحراف الآخر الا الاشعة التى تقع بزاوية سقوط اكبر قليلا من ٥٩,٤° أو أقل قليلا منها فنظراً لأن زاوية السقوط المذكورة يكون الانحراف المقابل لها النهاية الصغرى للانحراف فان انحراف هـذه الأشعة أيضاً لا يختلف كثيراً عن قيمة النهاية الصغرى للانحراف ويمكن أن نعده مساوياً لها [1] . ومن هذا يتبين أن من بين الأشعة المتوازية الواقعة على القطيرة لا يوجد شعاع واحد يعانى انحرافاً قدره ١٣٨° فحسب بل توجد حزمة من الأشعة المتوازية تخرج منحرفة بمقدار ١٣٨° يكون الشعاع الذى زاوية سقوطه ٥٩,٤° هو بمثابة محور لها . واذن الضوء الذى ينفذ خارجاً من القطيرة بعد أن يعانى انعكاساً داخلياً واحداً وتكون زاوية انحرافه ١٣٨° بمثابة حزمة من الأشعة المتوازية فتكون شدته بالقياس الى غيره كبيرة

فاذا فرضنا أن أشعة الشمس تسقط كما هو مبين بشكل (١٣٨) وفرضنا أن القطيرة ينحرف الشعاع النافذ منها بعد أن يعانى انعكاساً داخلياً واحداً الى العين عند ب بحيث يكون انحرافه مساوياً النهاية الصغرى نرى أن الأشعة الواقعة على ما فوق ا رأسياً من القطيرات لا يمكن عند نفوذها بعد انعكاس داخلى واحد أن تصل الى العين عند ب والا كان انحرافها أصغر من النهاية الصغرى للانحراف والأشعة الواقعة على القطيرات التى تحت ا رأسياً وان كان يمكن أن ينفذ منها ما يصل الى ب بعد أن يعانى انعكاساً داخليا واحداً فان الضوء الواصل الى ب بانحراف قدره ١٣٨° يكون شديداً جداً اذا قيس بالضوء الواصل الى ب من هذه القطيرات



(شكل ١٣٨)

ولكن القطيرات التى تكون مثل ا وينطبق عليها ما قيل بشأن هذه ، تقع فى الفراغ على سطح مخروط محوره ب ح موازٍ لأشعة الشمس والزاوية بين محوره وحرفه ب ا أى نصف زاوية رأسه تساوى ٤٢° ومن جراء هذا يرى الرائى فى السماء قوسا دائرية مضيئة بشدة خارجها ظلام وداخلها فيه ضياء ضعيف

ويتضح من شكل (١٣٨) انه اذا كانت قطيرات الماء تعم مجال البصر فانه كلما ارتفعت العين رؤى من دائرة القوس أكثر حتى اذا ارتفعت العين ارتفاعاً كافياً اكتملت القوس دائرة

---

(١) من المعلوم أن المقادير الجبرية عند النهايتين الصغرى أو الكبرى أو حواليهما تكون ثابتة

وقد تغاضينا فى كل ما ذكر عن أن نفوذ الضوء من القطيرات مصحوب بتشتته فان معامل انكسار الضوء فى الماء يختلف تبعاً لاختلاف لون الأشعة فهو للاشعة الحمراء ١,٣٣٩ وللبنفسجية ١,٣٤٣ واذن تكون النهاية الصغرى لانحراف الأشعة الحمراء غيرها لانحراف البنفسجية أو غيرها من الأشعة . ويمكن بالتعويض فى معادلة (٥) عن م قيمتها للحمراء ثم قيمتها للبنفسجية مع اعتبار ع = ١ بيان أن النهاية الصغرى لزاوية انحراف الأشعة الحمراء تساوى ١٣٧,٢° وهى للبنفسجية ١٣٩,٢° . واذن يكون نصف زاوية رأس مخروط الأشعة الحمراء ٤٢,٨° ونصف زاوية مخروط البنفسجية ٤٠,٨ ومن جراء هذا لاترى القوس بيضاء بل ترى أقواس متحدة المركز ملونة بألوان الطيف بترتيبها المعتاد وتكون الخارجية منها حمراء والداخلية بنفسجية

١٦٣ — القوس الثانوية

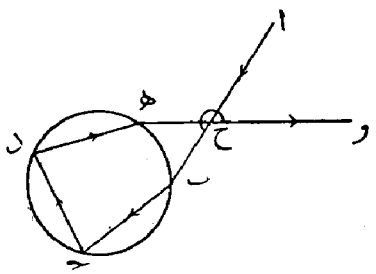
راعينا فى الشرح السابق الأشعة التى تنفذ من القطيرة الواحدة بعد أن تعانى انعكاساً داخلياً واحداً ويمكن من المعادلة (٥) باعتبار أن ع = ٢ ، م = ٤/٣ تقدير قيمة كل من زاوية السقوط والانكسار والانحراف حيث تكون قيمة الزاوية الأخيرة هى النهاية الصغرى لزاوية الانحراف عند ما يعانى الشعاع انعكاسين داخليين قبل خروجه من القطيرة

وتكون زاوية السقوط فى هذه الحالة ٧٢° بالتقريب

وزاوية الانكسار ٤٥,٥° »

والنهاية الصغرى لزاوية الانحراف ٢٣١° »

وموضح بشكل (١٣٩) مسير شعاع يعانى قبل خروجه من القطيرة انعكاسين داخليين فاذا مثل الشكل حالة ما يكون الانحراف أصغره فان زاوية ٢٣١° هى الواقعة بين الشعاع ا ب والشعاع هـ و مقيسة فى اتجاه حركة عقربى الساعة فتكون الزاوية ب ح و مساوية ٣٦٠ — ٢٣١ = ١٢٩° واذن تكون نصف زاوية رأس المخروط ١٨٠ — ١٢٩ = ٥١° فتكون قوس ثانية تسمى



(شكل ١٣٩)

للتمييز بينها وبين الاولى القوس الثانوية وتسمى الاولى القوس الابتدائية وبما أن نصف زاوية رأس المخروط فى حالة الثانوية ٥١° وفى حالة الابتدائية ٤٢° فان الثانوية تكون خارج الابتدائية

ويتضح من شكل (١٣٩) على فرض أن هـ و هو مسير الشعاع الذى يعانى أقل انحراف أن الأشعة الأخرى التى تنفذ من القطيرة بعد انعكاسين داخليين تكون فيها زاوية ب ح و أقل من ١٢٩° فاذا فرضنا أن القطيرة د (شكل ١٣٨) هى التى ترسل الى العين عند ب شعاعاً يعانى أقل انحراف فى حالة الانعكاسين الداخليين فان القطيرات التى تحت د رأسياً لا يمكن أن ترسل الى العين أشعة تعانى انعكاسين داخلين ولذلك يكون ما بين القوسين الابتدائية والثانوية مظلماً

ويمكن تقدير النهاية الصغرى لانحراف الأشعة الحمراء والنهاية الصغرى لانحراف الاشعة البنفسجية واستخراج نصف زاوية رأس مخروط لكل منهما حيث يوجد أن القوس الثانوية تكون حمراء من الداخل وبنفسجية من الخارج . ويمكن الوصول الى هذه النتيجة بالاستعانة بشكل (١٣٩) فاذا فرضنا أن انحراف هـ و (فى اتجاه حركة عقربى الساعة) بالنسبة الى ا ب يمثل النهاية الصغرى لانحراف الاشعة الحمراء فان النهاية الصغرى لانحراف البنفسجية (فى الاتجاه نفسه) تكون اكبر واذن زاوية ب ح و للاشعة الحمراء تكون اكبر منها للبنفسجية

واذن زاوية رأس مخروط الأولى تكون أصغر أى أن القوس الثانوية تكون حمراء من الداخل وبنفسجية من الخارج

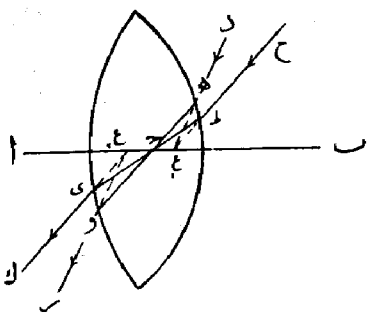
وتكون القوس الثانوية أقل وضوحاً من الابتدائية نظراً لان الضوء النافذ بعد انعكاسين داخليين يكون أقل كثيراً من النافذ بعد انعكاس واحد كما أنه يكون اكبر من النافذ بعد ثلاثة انعكاسات وهكذا

ويمكن نظرياً حدوث قوس ثالثة حيث تنفذ الاشعة بعد ثلاثة انعكاسات داخلية ولكنها تكون ضئيلة تحول ضآلتها دون رؤيتها عادة ومكان هذه القوس (كما يتضح اذا رسم مسير شعاع يعانى ثلاثة انعكاسات داخلية) فى الجهة التى تكون فيها الشمس من عين الرائى لا فى الجهة المقابلة لها كما فى حالتى القوس الابتدائية والقوس الثانوية

العدسات السميكة

١٦٤ — النقطتان العقديتان

لنفرض أن نقطة ا شكل (١٤٠) مركز تكور أحد وجهى عدسة سميكة محدبة الوجهين ونقطة ب مركز تكور الوجه الآخر ولنفرض أن الوسط المحيط بالعدسة من الجانبين واحد ومعامل انكسار الضوء منه الى مادة العدسة م ولنفرض أن نقطة ح المركز البصرى للعدسة . فاذا رسم شعاع مثل د ه يمر عند نفوذه من العدسة بالمركز البصرى ح وكان مسيره فى مادة العدسة ه و فانه يخرج فى استقامة و ر بحيث يكون و ر موازياً للمستقيم د ه . فاذا كانت



(شكل ١٤٠)

نقطة السقوط أى نقطة ه قريبة من المحور ا ب ومد الشعاع د ه على استقامة ليقطع المحور فى نقطة ع١ ومد ر و على استقامة ليقطع المحور فى نقطة ع٢ فان النقطتين ع١ ، ع٢ تسميان النقطتين العقديتين[1] وهما نقطتان ثابتتان ما دامت نقطة سقوط الشعاع المار بالمركز البصرى قريبة من المحور . والسبب فى ثبوت هاتين النقطتين اذا توافر الشرط المذكور أن الاشعة بعد انكسارها عند السطح الأول للعدسة تنفذ مارة بالمركز البصرى فاذا كانت مواضع سقوطها قريبة من قطب السطح الأول أمكن اعتبار المركز البصرى صورة حقيقية تحدث بالانكسار عند السطح الأول لجسم تقديرى يكون هو الموضع الذى تتجمع عنده الأشعة الساقطة لولا الانكسار كما هو مبين بالشكل وطبقاً لما تبين فى الانكسار عند السطح الكرى فان مثل هذه الصورة لا تتكون الا اذا وقعت الاشعة وتكاد مسيراتها تكون عمودية على السطح . فى هذه الحالة تكون نقطة ح صورة حقيقية للنقطة العقدية ع١ والاشعة الواقعة على السطح الثانى تصدر عن نقطة ح واذن تعتبر ح جسما حقيقياً فيتكون له بالانكسار عند السطح الثانى صورة تقديرية تكون امتدادات الاشعة النافذة من هذا السطح مارة بها كما هو مبين أيضاً بالشكل فالنقطة

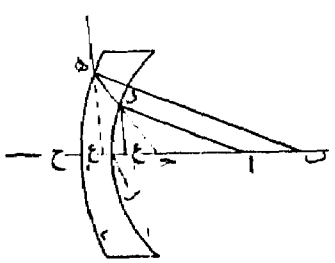
---

(١) Nodal Points

العقدية ع$_{١}$ هى بمثابة الجسم التقديرى الذى يتكون له بالانكسار عند السطح الاول صورة حقيقية هى المركز البصرى والنقطة العقدية الثانيـة هى بمثابة الصورة التقديرية التى تتكون بالأنكسار عند السطح الثانى للجسم الذى هو فى هـذه الحالة المركز البصرى وللنقطتين العقديتين خاصة طبيعية وهى أن الشعاع الواقع على أحد وجهى العدسة مار امتداده بالنقطة العقدية بالنسبة الى هذا الوجه ينفذ من الوجه الآخر مار امتداده بالنقطة العقدية الاخرى

١٦٥ — ايجاد بعد المركز البصرى عن سطحى العدسة

نفرض أن العدسـة السميكة محدودة بالسطحين المرقومين بالرقمين ١ ، ٢ شكل (١٤١) وليكن الأول مقعراً والثانى محدباً بحيث اذا وقع الضوء على الأول ونفذ من الثانى كان س$_{١}$ نصف قطر الأول ، س$_{٢}$ نصف قطر الثانى كلاهما موجباً فاذا كانت نقطة ا مركز تكور السطح الاول ونقطة ب مركز تكور الثانى ورسمنا نصفى القطرين ا د ، ب هـ متوازيين ووصلنا هـ د ومددناه على استقامته حتى يقطع المحور فى نقطة ح



(شكل ١٤١)

كانت هذه النقطة المركز البصرى ويلاحظ فى هذه الحالة أن الشعاع الذى ينفذ خلال العدسة وامتداده مار بالمركز البصرى يخرج من العدسة ومسيره موازٍ لمسيره الاصلى ولايجاد بعد المركز البصرى عن النقطة ر وهى قطب السطح الاول وعن نقطة ح وهى قطب السطح الثانى نرى نظراً لتوازى المستقيمين ا د ، ب هـ أن

$$\frac{\text{ب ح}}{\text{ا ح}} = \frac{\text{س}_{٢}}{\text{س}_{١}}$$

$$\therefore \quad \frac{\text{ب ح} - \text{ا ح}}{\text{ا ح}} = \frac{\text{س}_{٢} - \text{س}_{١}}{\text{س}_{١}}$$

ولكن ب ح = س$_{٢}$ — ح

$$\text{و } ا\,حـ = ن_1 - حـ\,ر$$

$$\therefore \frac{ن_2 - حـ - ن_1 + حـ\,ر}{ا\,حـ} = \frac{ن_2 - ن_1}{ن_1}$$

$$\therefore \frac{ن_2 - ن_1 - ر\,ح}{ا\,حـ} = \frac{ن_2 - ن_1}{ن_1}$$

$$\therefore ا\,حـ = \frac{ن_1 (ن_2 - ن_1) - ن_1 \cdot ر\,ح}{ن_2 - ن_1}$$

والمقدار ر ح هو سمك العدسة عند القطبين فاذا رمزنا لمعامل انكسار الضوء من الوسط الخارجي الى مادة العدسة بالحرف م واعتبرنا ر ح = ا م حيث يكون ا مقداراً ثابتاً يكون

$$ا\,حـ = \frac{ن_1 (ن_2 - ن_1) - ا\,م\,ن_1}{ن_2 - ن_1}$$

وبما أن $ا\,حـ = ن_1 - حـ\,ر$

$$\therefore حـ\,ر = ن_1 - \frac{ن_1 (ن_2 - ن_1) - ا\,م\,ن_1}{ن_2 - ن_1}$$

$$\therefore حـ\,ر = \frac{ا\,م\,ن_1}{ن_2 - ن_1} \quad \ldots\ldots (١)$$

ويساوى هذا بعد المركز البصرى عن السطح الاول للعدسة

وبالمثل يمكن بيان أن

$$حـ = \frac{ا\,م\,ن_2}{ن_2 - ن_1} \quad \ldots\ldots (٢)$$

ويساوى هذا بعد المركز البصرى عن السطح الثانى للعدسة

١٦٦ — ايجاد بعد كل من النقطتين العقديتين عن سطحى العدسة

بينا فى بند (١٦٤) أن النقطة العقدية الاولى تعتبر جسما حيث يكون المركز البصرى صورته الحادثة بالانكسار عند السطح الاول وهو وان كان جسما تقديرياً بالنسبة الى العدسة المحدبة الوجهين فى شكل (١٤٠) فانه يكون جسما حقيقياً فى حالة العدسة المبينة بشكل (١٤١) فاذا رمزنا لبعد هذا الجسم عن السطح الاول بالحرف س وطبقنا معادلة الانكسار عند السطح الكرى واعتبرنا المركز البصرى هو الصورة يكون

$$\frac{\frac{م}{ن_1 م س_1}}{ن_2 - ن_1} - \frac{1}{س} = \frac{م - 1}{س_1}$$

حيث يكون مقام الحد الاول من الطرف الايمن هو بعد المركز البصرى عن السطح

$$\therefore \quad \frac{1}{س} = \frac{ن_2 - ن_1}{ا\ س_1} - \frac{م - 1}{س_1}$$

$$= \frac{ن_2 - ن_1 - ا\ (م - 1)}{ا\ س_1}$$

$$\therefore \quad س = \frac{ا\ س_1}{ن_2 - ن_1 - ا\ (م - 1)} \quad \ldots\ldots (1)$$

ويساوى هذا بعد النقطة العقدية الاولى عن السطح الاول

واذا راعينا الانكسار عند السطح الأول للعدسة وعرفنا البعد البؤرى الاول لهذا السطح ببعد الجسم عنه عندما تكون صورته الحادثة بالأنكسار فى ما لانهاية أى عندما تكون الاشعة المنكسرة متوازية فبتطبيق المعادلة العامة للانكسار وهى

$$\frac{م}{ع_1} - \frac{1}{ع} = \frac{م - 1}{س_1}$$

يتضح أن قيمة ع عندما تكون ع$_{١}$ لا نهاية لها هى $-\frac{س_{١}}{م-١}$ ويكون هـذا المقدار مساوياً البعد البؤرى الأول طبقاً للتعريف المذكور فاذا رمزنا له بالرمز ل$_{١}$ كان

$$\frac{١}{ل_{١}} = -\frac{م-١}{س_{١}} \quad \ldots\ldots (٢)$$

وبالمثل اذا راعينا الانكسار عند السطح الثانى للعدسة وعرفنا البعد البؤرى الثانى لهذا السطح ببعد الصورة عنه عندما يكون الجسم فى ما لا نهاية أى عندما تسقط الاشعة على هذا السطح متوازية وبتطبيق المعادلة العامة للانكسار مع ملاحظة أن الضوء ينكسر فى هذه الحالة من مادة العدسة الى الوسط الخارجى يكون

$$\frac{\frac{١}{م}}{ع_{١}} - \frac{١}{ع} = \frac{١-\frac{١}{م}}{س_{٢}}$$

واذن قيمة ع$_{١}$ عندما تكون قيمة ع لا نهاية لها تكون $-\frac{س_{٢}}{م-١}$ ويكون هذا المقدار مساوياً البعد البؤرى الثانى للسطح الثانى طبقاً للتعريف فاذا رمزنا له بالرمز ل$_{٢}$ يكون

$$\frac{١}{ل_{٢}} = -\frac{م-١}{س_{٢}} \quad \ldots\ldots (٣)$$

وبالتعويض فى المعادلة (١) عن س$_{١}$ قيمتها من المعادلة (٢) وعن س$_{٢}$ قيمتها من المعادلة (٣) يكون

$$س = \frac{ا\ ل_{١}}{ل_{٢} - ل_{١} + ا} \quad \ldots (٤)$$

ويكون هـذا هو بعد النقطة العقدية الاولى عن السطح الاول مقدرا بالنسبة الى البعدين البؤريين للسطحين

ولتعيين بعد النقطة العقدية الثانية عن السطح الثانى نعتبر المركز البصرى جسما والنقطة

العقدية الثانية صورته الحادثة بالانكسار عند السطح الثانى فاذا رمزنا لبعدها عن هذا السطح بالحرف $ص$ ومع ملاحظة أن الانكسار يحدث فى هذه الحالة من مادة العدسة الى الوسط الخارجى يكون

$$\frac{\frac{1}{م}}{ص} - \frac{1}{\frac{ن_2 ن_1}{ن_2 - ن_1}} = \frac{\frac{1}{م} - 1}{ن_2}$$

حيث يكون مقام الحد الثانى من الطرف الأيمن هو بعد المركز البصرى عن السطح الثانى

$$\therefore \quad ص = \frac{\frac{ن_2 - ن_1}{ن_2 ن_1} - \frac{م - 1}{ن_2}}{}$$

$$= \frac{ن_2 - ن_1 - 1 (م - 1)}{ن_2 ن_1}$$

$$\therefore \quad ص = \frac{ن_2 ن_1}{ن_2 - ن_1 - 1 (م - 1)} \quad \ldots\ldots (٥)$$

وبالتعويض عن $ن_1$ قيمتها من المعادلة (٢) وعن $ن_2$ قيمتها من المعادلة (٣) يكون

$$ص = \frac{ل_2 ل_1}{ل_2 - ل_1 + 1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (٦)$$

ويكون هذا هو بعد النقطة العقدية الثانية عن السطح الثانى مقدراً بالنسبة الى البعد البؤريين

١٦٧ — ايجاد البعد البؤرى للعدسة السميكة

بؤرة العدسة هى موضع الصورة التى تتكون بوساطة العدسة عند ما يكون الجسم فى ما لا نهاية . فاذا راعينا الانكسار الحادث عند السطح الاول يتبين من المعادلة

$$\frac{م - 1}{ن_1} = \frac{1}{ع} - \frac{م}{ع_1}$$

أن بعد الصورة عن هذا السطح عند ما يكون الجسم فى مالانهاية هو $\frac{م_1 ع_1}{م - 1}$ فاذا كانت قيمة $ع_1$ موجبة أى كان السطح الاول مقعراً وكان الانكسار من وسط كالهواء الى آخر كالزجاج أى كان $م > 1$ فان بعد الصورة عن السطح الاول يكون موجباً واذن يقاس بعد الصورة عن السطح الاول فى عكس اتجاه الضوء واذن يكون بعد هذه الصورة عن السطح الثانى مساوياً المقدار المذكور مضافاً اليه سمك العدسة (وهذا يساوى $1 م$) ويساوى اذن

$$\frac{م_1 ع_1}{م - 1} + 1 م = \frac{م_1 ع_1 + 1 م (م - 1)}{م - 1}$$

وتعتبر هذه الصورة جسما بالنسبة الى السطح الثانى يكون بعده عنه هو المقدار المذكور فاذا رمزنا لبعد صورته التى تتكون بالانكسار عن هذا السطح بالرمز $ع_2$ ومع ملاحظة أن الانكسار فى هذه الحالة من مادة العدسة الى الوسط الخارجى وان السطح الحادث عنده الانكسار مقعر (شكل ١٤١) يكون

$$\frac{م}{ع_1} - \frac{م - 1}{م_1 ع_1 + 1 م (م - 1)} = \frac{\frac{م}{م} - 1}{ع_2}$$

ومنه يتبين أن

$$ع_1 = \frac{ع_2 [ع_1 + 1 (م - 1)]}{(م - 1) ع_2 - ع_1 ع_2 (م - 1) - 1 (م - 1)^2}$$

ويساوى هذا المقدار بعد البؤرة عن السطح الثانى للعدسة وبما أن بعد النقطة العقدية الثانية عن هذا السطح هو

$$\frac{1 ع_2}{ع_2 - ع_1 - 1 (م - 1)}$$

وبما أن كلا من البعدين فى الاتجاه الموجب

اذن يكون بعد البؤرة عن النقطة العقدية الثانية هو

$$\frac{س_1 س_2}{(م-1)[س_2 - س_1 - (م-1)]} \quad \ldots\ldots\ldots (1)$$

وبالتعويض عن $س_1$ ، $س_2$ قيمة كل منهما بالنسبة الى $ل_1$ ، $ل_2$ يكون المقدار المذكور وهو البعد البؤرى للعدسة السميكة مقيساً عن النقطة العقدية الثانية هو

$$ل = - \frac{ل_1 ل_2}{(ل_2 - ل_1 + 1)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

والبعد البؤرى المذكور هو الذى يسمى أحياناً البعد البؤرى الرئيسى الثانى وبالمثل يمكن ايجاد البعد البؤرى الرئيسى الأول أى موضع النقطة المضيئة عندما تنفذ الأشعة خارجة من العدسة متوازية وفى هذه الحالة نعتبر أولا الانكسار عند السطح الثانى حيث تخرج الأشعة منه متوازية وتتكون صورة فى مالا نهاية فمن المعادلة

$$\frac{\frac{1}{م}}{ع_1} - \frac{1}{ع_2} = \frac{1 - \frac{1}{م}}{س_2}$$

يتضح أن بعد الجسم عن السطح الثانى عندما تكون صورته فى مالا نهاية هو $\frac{م س_2}{م-1}$ وهذا الجسم يكون بمثابة الصورة التى تتكون بالانكسار عند السطح الاول فيكون بعده عن السطح الأول مساوياً

$$\frac{م س_2}{م-1} - 1 م = \frac{م س_2 - 1 م (م-1)}{م-1}$$

وبعد الجسم الذى تعتبر هذه صورته المتكونة بالانكسار عند السطح الأول يستخرج من المعادلة

$$\frac{1-م}{س_1} = \frac{1}{ع} - \frac{م(م-1)}{م س_2 - 1 م (م-1)}$$

∴ بعد الجسم عن السطح الاول هو

$$ع = \frac{(م-١)\,ن_١\,ن_٢ - ١\,ن_١\,(م-١)}{(م-١)[ن_١ - ن_٢ + ١\,(م-١)]}$$

ويساوى هذا المقدار البعد البؤرى الأول مقيساً من السطح الاول و بما أن بعد النقطة العقدية الاولى عن السطح الأول هو

$$\frac{١\,ن_١}{(م-١)\,ن_٢ - ن_١ - ١\,(م-١)}$$

يكون البعد البؤرى الاول مقيساً من النقطة العقدية الاولى هو

$$\frac{(م-١)\,ن_١\,ن_٢ - ١\,ن_١\,(م-١)}{(م-١)[ن_١ - ن_٢ + ١\,(م-١)]} - \frac{١\,ن_١}{ن_٢ - ن_١ - ١\,(م-١)}$$

$$= \frac{(م-١)\,ن_١\,ن_٢}{(م-١)[ن_١ - ن_٢ + ١\,(م-١)]}$$

$$= - \frac{ن_١\,ن_٢}{(م-١)[ن_٢ - ن_١ - ١\,(م-١)]} \quad \ldots\ldots (٣)$$

وبالمقابلة بين المقدارين (١) و(٣) يتضح أن بعد البؤرة الرئيسية الثانية عن النقطة العقدية الثانية يساوى بعد البؤرة الرئيسية الاولى عن النقطة العقدية الاولى وفى الجانب الآخر من العدسة

١٦٨ — قانون العدسة السميكة

نفرض نقطة مضيئة موجودة على محور العدسة ونرمز لبعدها عن السطح الأول للعدسة بالحرف ع فبالرمز لبعد صورتها الحادثة بالانكسار الأول عن السطح الاول بالحرف ص يكون

$$\frac{م}{ص} - \frac{١}{ع} = \frac{م-١}{ن_١} = \frac{١}{ل_١}$$

باعتبار أن $ل_١$ البعد البؤرى الأول للسطح الاول ومنه يتضح أن

$$\text{ص} = \frac{\text{م ع ل}_1}{\text{ل}_1 - \text{ع}}$$

وبالرمز لسمك العدسة بالمقدار ا م يكون بعد هذه الصورة عن السطح الثانى هو

$$\frac{\text{م ع ل}_1}{\text{ل}_1 - \text{ع}} + \text{ا م} = \frac{\text{م ع ل}_1 + \text{ا م ل}_1 - \text{ا م ع}}{\text{ل}_1 - \text{ع}}$$

فاذا اعتبرنا هـذه الصورة جسما بالنسبة الى السطح الثانى ورمزنا لبعد صورته التى تتكون بالانكسار عند هذا السطح بالرمز ع$_1$ مقيساً عن السطح نفسه يكون

$$\frac{\frac{1}{\text{م}}}{\text{ع}_1} - \frac{\text{ل}_1 - \text{ع}}{\text{م ع ل}_1 + \text{ا م ل}_1 - \text{ا م ع}} = \frac{\frac{1}{\text{م}} - 1}{\text{ص}_2} = \frac{1}{\text{م ل}_2}$$

باعتبار أن ل$_2$ البعد البؤرى الثانى للسطح الثانى

$$\therefore \quad \frac{1}{\text{ع}_1} - \frac{\text{ل}_1 - \text{ع}}{\text{ع ل}_1 + \text{ا ل}_1 - \text{ا ع}} = \frac{1}{\text{ل}_2}$$

وبضرب طرفى المعادلة فى حاصل ضرب مقامات الحدود الثلاثة ثم ترتيب المقادير ينتج أن

ع ع$_1$ (ل$_2$ − ل$_1$ + ا) + ع (ل$_1$ ل$_2$ − ا ل$_2$) − ع$_1$ (ا ل$_1$ + ل$_1$ ل$_2$)
+ ا ل$_1$ ل$_2$ = صفراً

وبقسمة المعادلة كلها على ل$_2$ − ل$_1$ + ا ينتج أن

$$\text{ع ع}_1 + \text{ع}\frac{\text{ل}_1\text{ل}_2 - \text{ا ل}_2^2}{\text{ل}_2 - \text{ل}_1 + \text{ا}} - \text{ع}_1\frac{\text{ا ل}_1\text{ل}_2 + \text{ا ل}_1^2}{\text{ل}_2 - \text{ل}_1 + \text{ا}} + \frac{\text{ا ل}_1\text{ل}_2^2}{\text{ل}_2 - \text{ل}_1 + \text{ا}} = \text{صفراً} \quad .. (١)$$

وتكون المعادلة (١) هى الدالة على العلاقة بين بعد الجسم عن السطح الاول و بعد صورته عن السطح الثانى ولكن يمكن تحويل العلاقة بين بعد الجسم وبعد الصورة الى قالب بسيط اذا قيس بعد الجسم من النقطة العقدية الاولى وقيس بعد الصورة من النقطة العقدية الثانية .

فاذا راعينا المعادلة الآتية

$$\frac{١}{ص - و} - \frac{١}{س - هـ} = \frac{١}{ل} \quad \ldots\ldots\ldots (٢)$$

وضربنا طرفيها فى حاصل ضرب مقامات الحدود الثلاثة ورتبنا المقادير ينتج أن

$$س ص - س (ل + و) - ص (هـ - ل) + هـ و + ل هـ - ل و$$
$$= \text{صفراً} \quad \ldots\ldots\ldots (٣)$$

و بالمقابلة بين المعادلة (١) والمعادلة (٣) يتبين أن المعادلة (١) تتحول الى صورة المعادلة (٢) اذا كان

$$ل + و = - \frac{ل_١ ل_٢ - ا ل_٢^٢}{ل_٢ - ل_١ + ا} \quad \ldots\ldots (٤)$$

$$\text{و} \quad هـ - ل = \frac{ا ل_١ + ل_١ ل_٢}{ل_٢ - ل_١ + ا} \quad \ldots\ldots (٥)$$

$$\text{و } هـ و + ل هـ - ل و = \frac{ا ل_١ ل_٢}{ل_٢ - ل_١ + ا} \quad \ldots\ldots (٦)$$

و يمكن من المعادلات (٤) و (٥) و (٦) استخراج قيمة كل من هـ و و ل التى بها يمكن وضع المعادلة (١) فى صورة المعادلة (٢)

ولحل هذه المعادلات الثلاث نضرب المعادلتين (٤) و (٥) احداهما فى الاخرى فينتج أن

$$ل هـ + هـ و - ل^٢ - ل و$$
$$= \frac{- ا ل_١^٢ ل_٢ + ا^٢ ل_١ ل_٢ - ل_١^٢ ل_٢^٢ + ا ل_٢^٢ ل_١}{(ل_٢ - ل_١ + ا)^٢} \quad \ldots (٧)$$

و بطرح المعادلة (٦) من المعادلة (٧) ينتج أن

$$ل^٢ = \frac{ل_١^٢ ل_٢^٢}{(ل_٢ - ل_١ + ا)^٢}$$

$$\therefore ل = \pm \frac{ل_١ ل_٢}{ل_٢ - ل_١ + ا} \quad \ldots\ldots (٨)$$

ويتضح من بنـد (١٦٦) أن المقدار $ل_1$ هو بعد الجسم عن السطح الاول عند ما تنكسر الأشعة فى مادة العدسة متوازية والمقدار $ل_2$ هو بعد الصورة عن السطح الثانى عند ما تقع على هذا السطح الأشعة متوازية وفى العدسة الرقيقة يكون $ل_1$ بعد الجسم عنها و $ل_2$ بعد صورته

وفى هذه الحالة تتحول المعادلة الدالة على علاقة بعد الجسم ببعد الصورة الى القالب المألوف للعدسة الرقيقة وتكون قيمة ل فى المعادلة (٢) هى قيمة البعد البؤرى ويكون

$$\frac{١}{ل_2} - \frac{١}{ل_1} = \frac{١}{ل} \quad \therefore \quad ل = \frac{ل_1 ل_2}{ل_1 - ل_2}$$

فاذا وضعنا قيمة ١ فى المعادلة (٨) صفراً فان قيمة ل الحاصلة من التعويض تتساوى والقيمة المذكورة آنفاً اذا اتخذنا الاشارة السالبة دون الموجبة ولهذا السبب تتخذ الاشارة السالبة ونعتبر

$$ل = - \frac{ل_1 ل_2}{١ + ل_1 - ل_2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (٩)$$

ومن المعادلتين (٥) و (٩) ينتج أن

$$هـ = \frac{١ ل_1}{١ + ل_1 - ل_2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (١٠)$$

ومن المعادلتين (٤) و (٩) ينتج أن

$$و = \frac{١ ل_2}{١ + ل_1 - ل_2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (١١)$$

واذن نرى أن المعادلة (١) يمكن وضعها فى القالب الآتى

$$\frac{١}{ع_1 - \frac{١ ل_2}{١ + ل_1 - ل_2}} - \frac{١}{ع - \frac{١ ل_1}{١ + ل_1 - ل_2}} = \frac{١}{\frac{ل_1 ل_2}{ل_1 - ل_2 + ١}} \quad \ldots\ldots \quad (١٢)$$

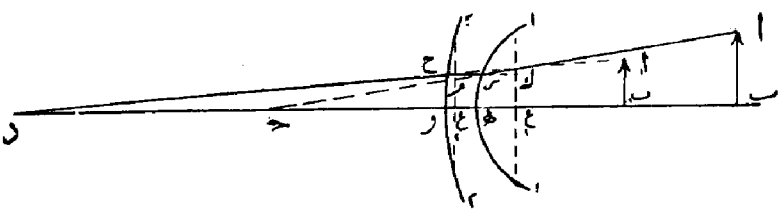
وبما أن المقدار (١١) هو بعد النقطة العقدية الثانية عن السطح الثانى والمقدار (١٠) هو بعد النقطة العقدية الاولى عن السطح الاول والمقدار (٩) هو البعد البؤرى للعدسة السميكة مقيساً من النقطة العقدية الثانيـة يتضح انه اذا رمز لبعد الجسم عن النقطة العقدية الاولى بالحرف ع ولبعد صورته عن النقطة العقدية الثانية بالحرف ع، فان

$$\frac{١}{ع_{،}} - \frac{١}{ع} = \frac{١}{ل} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (١٣)$$

حيث يكون ل البعد البؤرى للعدسة السميكة مقيساً من النقطة العقدية الثانية فتتحول معادلة العدسة السميكة الى صورة معادلة العدسة الرقيقة اذا قيست الابعاد من النقطتين العقديتين

١٦٩ — ايجاد نسبة طول الصورة الى طول الجسم — تكبير العدسة السميكة

لنفرض أن ا ب شكل (١٤٢) جسم موضوع على محور العدسة ولتكن نقطة ح البؤرة الاولى للسطح (١) ونقطة د البؤرة الثانية للسطح (٢) طبقاً للتعريفين الواردين فى بند (١٦٦)[1]



(شكل ١٤٢)

فاذا رسم من ا الشعاع ا ر مار امتداده بنقطه ح فانه ينكسر فى مادة العدسة موازياً للمحور فيكون مسيره فيها فى استقامة ر ح فاذا نفذ خارجاً من السطح الثانى مر بنقطة د فاذا رسمنا د ح ومددناه على استقامة كان حتما أن تقع صورة ا (وهى التى تتكون بفعل العدسة) على امتداد هذا المستقيم

ويمكن ايجاد ب، وهى صورة ب بتطبيق المعادلة (١٢) مثلا فى البند السابق فاذا رسمنا من نقطة ب، العمود ب، ا، على المحور ومددناه ليقطع امتداد د ح فى نقطة ا، كانت ا، ب، صورة ا ب

---

(١) مقلوب بعد البؤرة عن السطح = $\frac{ن - ١}{ر}$ فاذا كانت العدسة من الزجاج فان بعد البؤرة عن السطح يساوى — $\frac{٢}{ر}$

واذا رسمنا عند كل من ع$_{١}$ ، ع$_{٢}$ (وهما النقطتان العقديتان) مستويين عموديين على المحور نسميهما المستويين العقديين ورمزنا لنقطة تقابل امتداد ح ر والأول بالحرف ك ولنقطة تقابل ح ر والثانى بالحرف مـ وباعتبار أن النقطتين ر ، ح قريبتان جداً من المحور يتضح من تشابه المثلثين د ح و ، د ا$_{١}$ ب$_{١}$ أن

$$\frac{\text{ح و}}{\text{ا}_{١}\text{ب}_{١}} = \frac{\text{ل}_{٢}}{\text{ل}_{٢} + \text{ع}_{١}}$$ باعتبار أن ع$_{١}$ بعد الصورة عن السطح الثانى

ومن تشابه المثلثين ح ر هـ ، ح ا ب ينتج أن

$$\frac{\text{ر هـ}}{\text{ا ب}} = \frac{\text{ل}_{١}}{\text{ل}_{١} + \text{ع}}$$ باعتبار أن ع بعد الجسم عن السطح الأول

وبما أن ح و = ر هـ يكون

$$\frac{\text{ا}_{١}\text{ب}_{١}}{\text{ا ب}} = \frac{\text{ل}_{١}(\text{ل}_{٢} + \text{ع}_{١})}{\text{ل}_{٢}(\text{ل}_{١} + \text{ع})} \quad \ldots\ldots (١)$$

وتكون هذه المعادلة هى الدالة على التكبير

وقد تبين فى شرح خاصة النقطتين العقديتين انه اذا كانت احداهما جسما كانت الأخرى صورته واذن اذا فرضنا أن الجسم عند المستوى العقدى الاول فان صورته تكون عند المستوى العقدى الثانى وفى هذه الحالة تكون قيمة ع هى

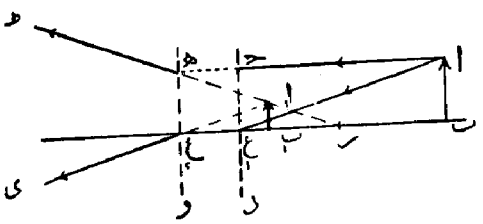
$$\frac{\text{ا ل}_{١}}{\text{ل}_{٢} - \text{ل}_{١} + \text{ا}}$$ وتكون قيمة ع$_{١}$ هى $$\frac{\text{ا ل}_{٢}}{\text{ل}_{٢} - \text{ل}_{١} + \text{ا}}$$

واذن يكون طول الصورة وطول الجسم فى هذه الحالة متساويين

ويتضح من هذا انه اذا أخذت نقطة فى المستوى العقدى الاول على ارتفاع معين من المحور تكون صورتها نقطة فى المستوى العقدى الثانى على الارتفاع نفسه من المحور

١٧٠ — ايجاد الصورة التى تتكون بوساطة العدسة السميكة بطريقة الرسم

والنتيجة السابقة يستعان بها فى ايجاد الصورة التى تتكون بوساطة عدسة سميكة بطريقة الرسم ويكفى لذلك تعيين موضعى المستويين العقديين والبعد البؤرى للعدسة فاذا فرضنا أن ا ب (شكل ١٤٣) جسم موضوع فوق محور العدسة وان حـ د ، هـ و المستويان العقديان المماران بالنقطتين العقديتين ع١ ، ع٢ وان نقطة ر البؤرة الرئيسية الثانية للعدسة ، نرسم من ا شعاعاً ا حـ يسقط موازياً للمحور بحيث يقطع هو أو امتداده المستوى العقدى الأول فى نقطة حـ فنظراً لان صورة نقطة حـ تكون على المستوى العقدى الثانى وعلى ارتفاع فوق المحور كارتفاع حـ فوقه فانه اذا أخذنا نقطة مثل هـ بحيث يكون حـ ع١ مساويا هـ ع٢ فان الشعاع ا حـ ينفذ من العدسة كأنه صادر



(شكل ١٤٣)

من نقطة هـ وبما أن ا حـ موازٍ للمحور فامتداده بعد نفوذه من العدسة يمر بالبؤرة ر واذن اذا رسم المستقيم ر هـ فان امتداده هـ ط يمثل مسير الشعاع ا حـ بعد خروجه من العدسة السميكة

كذلك اذا رسم من ا الشعاع ا ع١ مار هو أو امتداده بالنقطة العقدية الاولى فانه بعد نفوذه من العدسة يمر هو أو امتداده بالنقطة العقدية الثانية ويكون مسيره موازياً للمستقيم ا ع١ واذن اذا رسم المستقيم ع٢ ى موازياً للمستقيم ا ع١ فان الاول يكون مسير الشعاع ا ع١ بعد نفوذه من العدسة

وبهذه الكيفية يتعين مسيرا شعاعين نافذين من العدسة فموضع تقابلهما أو تقابل امتداديهما يكون صورة ا فاذا مددنا ط هـ ، ى ع٢ على استقامتيهما ليتقابلا فى نقطة ا١ كانت ا١ صورة ا

وبالمثل يمكن ايجاد الصورة اذا كانت البؤرة الثانية ر فى الجانب الآخر من العدسة

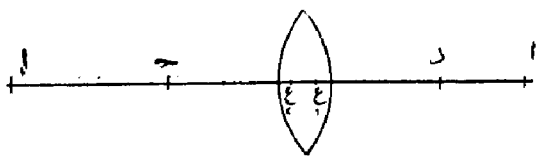
ويلاحظ عند رسم الشعاعين مع تحديد سطحى العدسة أن كلا من المستقيمين ا حـ ، ا ع١ يمد حتى يقطع السطح الاول للعدسة فى نقطة وكذلك يمد كل من المستقيمين ط هـ ، ى ع٢ حتى يقطع السطح الثانى للعدسة فى نقطة فاذا وصلت نقطة تقابل ا حـ والسطح الاول بنقطة تقابل

ط هـ والسطح الثانى كان المستقيم الواصل بينهما مسير الشعاع خلال مادة العدسة . و بالمثل بالنسبة الى الشعاعين ا ع١ ، ا ع٢ ى

١٧١ — ايجاد النقطتين العقديتين للعدسة عملياً

(أولا) العدسة اللامة — الطريقة الاولى

لنفرض أن ا شكل (١٤٤) نقطة مضيئة على محور العدسة وان ا١ صورتها وأن نقطة حـ البؤرة الثانية ونقطة د البؤرة الاولى فاذا



(شكل ١٤٤)

رمزنا للقيمة العددية للبعد البؤرى للعدسة بالحرف ل ورمزنا للبعد ا د بالحرف س وللبعد ا١ حـ بالحرف ص كان بعد النقطة المعينة عن النقطة العقدية الاولى مساوياً س + ل و بعد صورتها عن النقطة العقدية الثانية مساويا ص + ل واذن يتضح بتطبيق المعادلة (١٣) من بند (١٦٨) مع ملاحظة الاشارات أن

$$\frac{١}{-ل} = \frac{١}{(س + ل)} - \frac{١}{(ص + ل)}$$

ومنه يتضح أن س ص = ل٢ فاذا وجدت قيمة كل من س ، ص أمكن استخراج قيمة ل من هذه المعادلة فاذا عين موضع كل من حـ ، د أمكن بذلك تعيين موضعى ع١ ، ع٢ ولتطبيق هذه الفكرة عملياً تستخدم لوحة الابصار فتثبت العدسة على حامل فى موضع ثابت حوالى منتصف اللوحة و يؤتى بالحاجز ذى الثقب المضىء من أحد جانبيها وليكن الايسر و يؤتى من الجانب الآخر بمرآة مستوية رأسية و يغير موضع الحاجز ذى الثقب حتى تتكون عليه صورة للثقب بجوار الثقب (أنظر الطريقة الثانية لايجاد البعد البؤرى للعدسة اللامة بند ١٣٦) فيكون موضع الحاجز عند البؤرة حـ (شكل ١٤٤) و يعين موضعها على المقياس المدرج . ثم ينقل الحاجز الى الجانب الأيمن من العدسة وتوضع المرآة فى الجانب الأيسر و يعين بالكيفية نفسها موضع البؤرة د على المقياس المدرج فاذا أزيح الحاجز ذو الثقب بعد ذلك بعيداً عن نقطة د وأتى بحاجز أبيض فى الجانب الايسر من العدسة وحرك بعيداً عنها أو قريباً منها حتى تتكون عليه صورة حقيقية

واضحة للثقب كان بعد الاول عن د مساوياً س وبعد الثانى عن حـ مساوياً ص واذن أمكن تقدير ل من المعادلة

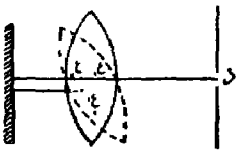
$$س\ ص = ل^{٢}$$

فتكون النقطة العقدية الاولى على بعد من نقطة د يساوى ل والنقطة العقدية الثانية على بعد من حـ يساوى ل أيضاً

الطريقة الثانية

يستعان فى هذه الطريقة بالخاصة الطبيعية للنقطتين العقديتين وهى ان الشعاع الذى يقع على العدسة مار هو أو امتداده باحداهما ينفذ من العدسة مار هو أو امتداده بالاخرى ويكون مسيره بعد النفوذ منها موازياً مسيره قبل الوقوع عليها

ويمكن استخدام لوحة الابصار .ويؤتى بمرآة مستوية كما فى الطريقة السابقة لتعيين موضع البؤرة د . فاذا لبثت العدسة فى مكانها وأديرت حول محور رأسى حول نفسها فان موضع الصورة الحادثة على الحاجز ذى الثقب يتغير من جراء هذا الدوران الا اذا كان محور الدوران ماراً بالنقطة العقدية القريبة من الثقب ففى هذه الحالة لا يترتب على دوران العدسة تغير موضع الصورة على الحاجز ذى الثقب



(شكل ١٤٥)

ويتضح السبب فى ذلك من شكل (١٤٥) فاذا فرضنا أن $ع_{١}$ ، $ع_{٢}$ النقطتان العقديتان فى الوضع الاول للعدسة فالشعاع الواقع على العدسة على امتداد $د ع_{١}$ وينطبق مسيره على المستقيم الواصل بين النقطتين العقديتين ينفذ ذهاباً وإياباً فى الاستقامة نفسها ويعود مرة أخرى الى نقطة د واذا أديرت العدسة حول محور عمودى على مستوى الورقة (وهو يمثل مقطعاً أفقياً للعدسة) وكان محور الدوران ماراً بنقطة $ع_{١}$ فان الشعاع الواقع على العدسة فى استقامة $د ع_{١}$ ينفذ منها كأنه صادر من $ع_{٢}$ ويكون مسيره بعد الخروج من العدسة موازياً للمستقيم $د ع_{١}$ فاذا انعكس عن سطح المرآة عاد فى مسيره الاول ونفذ من العدسة خارجاً فى استقامة $ع_{١} د$ ويعود مرة أخرى الى نقطة د نفسها فلا يكون لدوران العدسة حول المحور المار بنقطة $ع_{١}$ تأثير فى موضع الصورة الحادثة على الحاجز ذى الثقب

وتتطلب هذه الطريقة أن تكون العدسة محمولة على حامل خاص قابل للدوران حول محور رأسى وأن تكون العدسة نفسها قابلة للازاحة بالاضافة الى هذا الحامل فيهيأ موضعها عليه حتى لا يترتب على دوران الحامل حول المحور الرأسى بمقادير مناسبة تغير فى موضع صورة الثقب على الحاجز ذى الثقب فيكون محور الدوران فى هذه الحالة ماراً بالنقطة العقدية القريبة من الحاجز ويكون البعد بين هذا المحور وهذا الحاجز مساوياً البعد البؤرى للعدسة

ويوجد موضع النقطة العقدية الثانية بقلب العدسة وتكرار العملية نفسها

(ثانياً) العدسة المفرقة

وتطبق الطريقة نفسها لايجادموضعى النقطتين العقديتين للعدسة المفرقة وتتبع فى هذه الحالة الطريقة الخامسة لايجاد البعد البؤرى للعدسة المفرقة (بند ١٣٧) ويغير موضع العدسة على الحامل الخاص الذى يحملها حتى اذا أدير الحامل حول المحور الرأسى بمقادير مناسبة لا يترتب على هذا الدوران تغير فى موضع الصورة فيكون محور الدوران ماراً بالنقطة العقدية

١٧٢ — النقطتان الرئيسيتان للعدسة السميكة

العدسة السميكة التى راعيناها فى كل ماسبق فرضناها محفوفة من الجانبين بوسط واحد رمزنا لمعامل انكسار الضوء منه الى مادة العدسة بالحرف م ولكن اذا كانت العدسة السميكة يحفها من الجانبين وسطان مختلفان أمكن أيضاً بيان أن هناك نقطتين اذا رمز لبعد الجسم عن الاولى بالحرف ع ولبعد صورته عن الثانية بالحرف ع$_{١}$ كانت العلاقة بين هذين البعدين طبقاً للمعادلة

$$\frac{م_{٣}}{ع_{١}} - \frac{م_{١}}{ع} = \frac{١}{ل}$$

حيث يكون م$_{١}$ رمزاً لمعامل انكسار الضوء فى الوسط الواقع منه الضوء على العدسة و م$_{٣}$ رمزاً لمعامل انكساره فى الوسط الذى ينفذ الضوء من العدسة اليه ويكون ل مقداراً ثابتا .

وتسمى النقطتان النقطتين الرئيسيتين[١] وهما فى هذه الحالة غير النقطتين العقديتين

---

(١) Principal Points