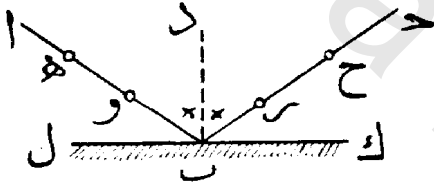


الباب الثاني

الانعكاس عند السطوح المستوية والسطوح الكرية

١٤ - قانون الانعكاس

رأينا في الباب السابق أن أشعة الضوء في وسط كالهواء خطوط مستقيمة ولكن اذا وقعت هذه الخطوط المستقيمة على سطح وسط آخر كما في اناء أو كتلة من الزجاج أو صفيحة مصقولة من المعدن فان بعض الضوء يرتد عن السطح وتسير أشعته في خطوط مستقيمة في الوسط الأول بعد أن تكون قد غيرت اتجاهها عند وقوعها على السطح ويسمى هذا بوجه عام انعكاساً



شكل (١١)

واذا فرضنا أن ك ل يمثل السطح الأفقي لماء موضوع في اناء مثلاً وفرضنا أن ا ب شعاع يقع على السطح عند ب وأنه ينعكس فيسير في اتجاه ب ح فان الشعاع ا ب الواقع على السطح

يسمى الشعاع الساقط والشعاع ب ح المرتد عنه يسمى الشعاع المنعكس ونقطة ب وهي موضع تقابل الشعاع الساقط بالسطح تسمى نقطة السقوط والسطح ك ل الذي يحدث عنده الانعكاس يسمى السطح العاكس والعمود ب د المقام على السطح العاكس عند نقطة السقوط يسمى العمود والزاوية المحصورة بين الشعاع الساقط والعمود تسمى زاوية السقوط والزاوية المحصورة بين الشعاع المنعكس والعمود تسمى زاوية الانعكاس

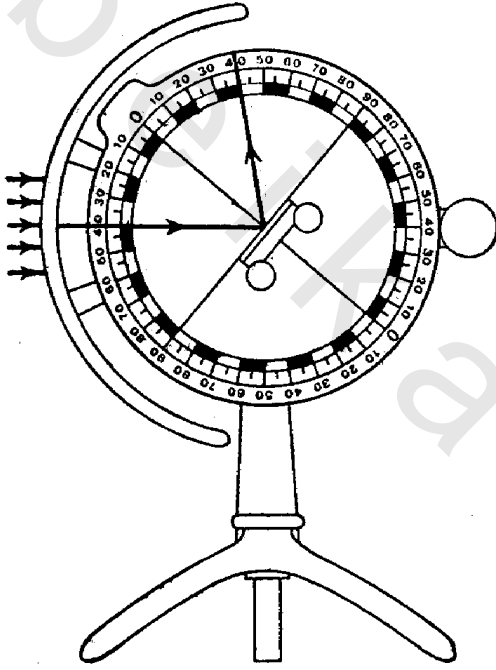
وانعكاس الضوء الذي يحدث بهذه الكيفية عند سطح الماء أو الزجاج أو المعادن المصقولة ينقاد لقانونين يعرفان بقانوني الانعكاس ينص القانون الأول منهما على أن الشعاع الساقط والعمود والشعاع المنعكس في مستوى واحد وينص القانون الثاني على أن زاوية السقوط مساوية لزاوية الانعكاس

والقانون الثاني هذا معروف من قديم الزمان ذكره افلاطون واوقليدس وغيرهما من فلاسفة اليونان وطبقوه في بعض بحوثهم في الضوء . أما القانون الأول فأول من نص عليه صريحاً الحسن بن الهيثم فهو من الوجهة التاريخية قد جاء في أثر الثاني

١٥ - الاستدلال عملياً على صحة قانوني الانعكاس

وتوجد تجارب ومشاهدات تبين صحة هذين القانونين . فإذا أدخلت حزمة ضيقة من أشعة الشمس من ثقب ضيق في غرفة مظلمة بحيث تقع على سطح مرآة مستوية مثلاً فتعكس ، أمكن بالملاحظة (لا سيما إذا عني بأن يكون في طريق أشعة الشمس قبل سقوطها على المرآة وبعد انعكاسها عنها هباء مثار أو دخان منتشر) أمكن التحقق من صحة القانون الأول وإذا أخذت مرآة مستوية (ويستحسن أن تكون صفيحة معدنية مستوية مصقولة أو كتلة سميكة من الزجاج على شكل متوازي مستطيلات يتخذ أحد سطوحها سطحاً عاكساً) وثبتت بحيث يكون السطح العاكس رأسياً ، على قطعة من الورق الأبيض قد بسطت فوق لوح أفقي من الخشب وعين السطح العاكس كـ ل (شكل ١١) بالقلم الرصاص ثم رشق على الورقة دبوسان رأسيان عند هـ و ونظر الى السطح العاكس بحيث تظهر صورتا الدبوسين منطقتين ، ووضع على امتداد خط البصر في هذه الحالة دبوسان آخران عند رـ ح بحيث يظهر كلاهما منطبقاً على صورتى الدبوسين الأولين ، يرى عند توصيل سمي الدبوسين هـ و بمستقيم وتوصيل سمي الدبوسين رـ ح بمستقيم انهما اذا مدا يتقابلان في نقطة ب على كـ ل واذا أقيم العمود على كـ ل عند ب وقيست الزاوية بين كل من المستقيمين وهذا العمود وجدت الزاويتان متساويتين ففي هذه التجربة البسيطة يمثل المستقيم الواصل بين سمي الدبوسين الأولين وهو المستقيم ا ب شعاعاً ساقطاً ويمثل المستقيم الواصل بين سمي الدبوسين الآخرين وهو المستقيم ب ح شعاعاً منعكساً ففي تجربة التحقق من القانون الثاني كما أنه اذا وضعت الدبابيس الأربعة رأسية وكان السطح العاكس أيضاً رأسياً واختيرت الدبابيس متساوية الأطوال ونظر الى صورتى رأسي الدبوسين الأولين بحيث تريان منطقتين فان خط البصر ينطبق أيضاً على الخط الأفقي الواصل بين رأسي الدبوسين

الآخرين دالا ذلك على أن الشعاع الساقط الذى يمثله المستقيم الواصل بين رأسى الدبوسين الاولين يمثله بعد الانعكاس المستقيم الواصل بين رأسى الآخرين ويكون المستقيمان فى مستوى أفقى واحد . وواضح ان العمود على مستوى المرآة الرأسية يكون أفقياً وواقعاً فى المستوى الأفقى السابق وكثيراً ما يستعان بجهاز يسمى القرص الضوئى ^(١) لبيان القوانين والظواهر الأساسية فى الضوء وتوضيحها . والجهاز يتركب كما بشكل (١٢) من قرص رأسى مدرج قابل للدوران



(شكل ١٢)

حول محور أفقى مار بمركزه ويحرف حول نصف القرص حاجز به فتحة مستطيلة ضيقة افقية (أو عدة فتحات افقية) فاذا ثبتت فى مركز القرص مرآة مستوية وسلطت على الفتحة أشعة متوازية من أشعة الشمس مثلاً وعدل المستوى الرأسى للقرص بالنسبة الى اتجاه الأشعة المسلطة على الفتحة فان مسير الشعاع أو بالأحرى الحزمة الضيقة سواء الساقطة على المرآة أو المنعكسة عنها يمثّل على سطح القرص كخط مستقيم من نور فيسهل التحقق من أن زاويتي السقوط والانعكاس متساويتان . وادارة القرص ومعه المرآة

حول المحور الافقى المار بمركزه يغير من زاوية سقوط الشعاع على سطح المرآة ويحول هذا التحقق من تساوى الزاويتين فى حالات مختلفة

وتوجد تجارب أخرى يمكن بها تحقيق قانونى الانعكاس بدقة أكبر من الدقة المتيسرة فى التجارب السابقة . ولكن يستعان فيها بأجهزة ضوئية لاحتل لشرحها أود رها هنا . وأن أكبر دليل على صحة هذين القانونين ان كل ما يستنبط منهما يتفق ونتائج المشاهدات والتجارب العملية

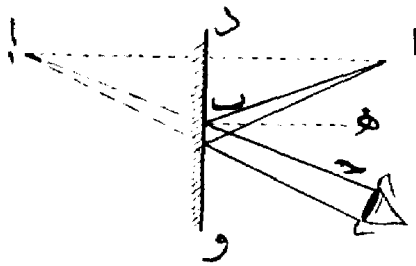
١٦ - الانعكاس عند السطوح الغير المصقولة

والانعكاس فيما تقدم يحدث عند السطوح المصقولة ولكن اذا وقعت أشعة الضوء على

حائط أبيض أو صحيفة بيضاء من الورق أو ما شابه ذلك فهي تنعكس انعكاساً يظن أول وهلة أنه غير منقاد للقانونين السابقين لأنه يحدث في جميع الجهات ونسميه تمييزاً له عن الانعكاس السابق انتشاراً . والانتثار هذا ناشئ عن خشونة في السطح فإذا كانت أجزاء السطح ليست جميعها في مستوى واحد فإن الأشعة المتوازية مثلاً الواقعة على الأجزاء المختلفة ، تنعكس في اتجاهات مختلفة ، فلا تتكون من الأشعة المنعكسة حزمة متوازية يكون ميلها على العمود المقام على السطح كميل الحزمة الساقطة عليه

١٧ — موضع الصورة التي تحدث بالانعكاس عند السطح المستوي

وبصفة حدوث صور المرئيات في السطوح المصقولة أن الأشعة الصادرة من أية نقطة من الجسم عند سقوطها على السطح تنعكس طبقاً للقانونين فإذا وقعت الأشعة المنعكسة على العين تراهي للرأى أنها صادرة من نقطة خلف السطح هي موضع تقابل امتدادات الأشعة المنعكسة .



(شكل ١٣)

ويمكن الحصول على موضع الصورة التي تحدث لنقطة مضيئة موضوعة أمام سطح عاكس ببرهان هندسي مبني على قانوني الانعكاس. فلذا فرضنا أن نقطة أ (شكل ١٣) هي النقطة المضيئة وأن د و يمثل مقطع السطح العاكس، نسقط من أ العمود ا د على السطح ونمده

على استقامته إلى نقطة أ بحيث يكون د ا = د ا فتكون نقطة أ هي موضع صورة أ ولا يثبت هذا نرسم من نقطة أ أي مستقيم مثل ا ب ب يقطع السطح العاكس في نقطة ب ونرسم من ب العمود ب ه على السطح ونصل نقطتي ب د

فالثلثان ا ب د و ا ب د متطابقان

∴ زاوية د ا ب = زاوية د ا ب

وبما أن المستقيم ا ب مواز للمستقيم ب ه

فإن زاوية د ا ب = زاوية ا ب ه

١. زاوية دا ب = زاوية هـ ب >

∴ ا ب هـ = ا ب هـ >

وهما في مستوى واحد

∴ ا ب شعاع ساقط ١ ب > الشعاع المنعكس

وهذا برهان عام ينطبق كيفما رسم المستقيم ا ب > ومنه يتضح أن جميع الأشعة المنعكسة مثل ب > تتلاقى امتداداتها في نقطة ا . ويتراءى للرائى أنها صادرة منها فتكون هي اذن صورة النقطة ا

ويتبين من هذا أن صورة النقطة تقع على امتداد العمود الواقع من هذه النقطة على السطح وعلى بعد من السطح يساوى بعد هذه النقطة عنه

١٨ — إيجاد موضع الصورة بطريقة عملية

ويمكن التحقق عملياً من النتيجة السابقة بتجارب بسيطة منها

(١) أن يوضع أمام سطح رأسى عاكس موضوع على قطعة من الورق مبسوطة فوق لوح أفقى من الخشب دبوس ا يرشق فى وضع رأسى على الورقة . ويعتبر الجسم الذى تتكون له صورة خلف السطح . ثم ينظر الى صورته ويحدد خط البصر بدبوسين يوضعان بحيث يكونان هما والصورة على استقامة واحدة . ويكرر هذا مثنى وثلاث . فاذا وصلت سهام الدبابيس التى يتعين بها خطوط البصر بخطوط مستقيمة ومدت على استقامتها تلاقى هذه الخطوط فى نقطة خلف السطح تكون هى موضع الصورة الحادثة للدبوس ا . ويمكن بالقياس التحقق من النتيجة المذكورة

(٢) ان تطبق طريقة انطباق المواضع وهى طريقة سهلة مبنية على أن المواضع الظاهرية للبرئيات يختلف بعضها بالنسبة الى الآخر تبعاً لاختلاف موضع النظر اليها فاذا نظر مثلاً الى مرئين بحيث كان خط البصر على استقامة المستقيم الواصل بينهما رؤى المرئيان منطبقين ولكن اذا حيد قليلاً عن هذه الاستقامة انفصل المرئيان أحدهما عن الآخر وظهر البعيد منهما كأنه قد تحرك فى

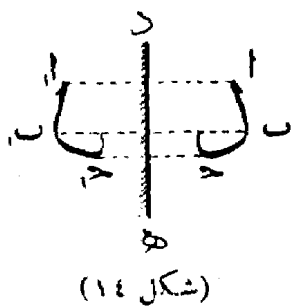
الجهة التي تحركت اليها العين واذا كان المرئيان منطبقين حقيقة فهما لا ينفكان يظهران كذلك مهما تحركت العين

وتطبق هذه الطريقة في كثير من التجارب الضوئية لاييجاد مواضع الصور وسنعتبر عنها هنا بطريقة انطباق المواضع (١)

ولتطبيقها فيما نحن بصدده يوضع السطح العاكس كما في التجربة السابقة رأسياً على قطعة افقية من الورق وليكن ارتفاعه صغيراً ثم يوضع أمامه دبوس ١ وينظر الى صورته ويؤتى في خلف السطح العاكس بدبوس طويل يتسنى من الموضع الذي ترى العين منه صورة ١ رؤية عالية ناتجة فوق السطح العاكس، ويغير موضع هذا الدبوس حتى يرى هو والصورة الحادثة للدبوس ١ منطبقين ويظلان منطبقين مهما تغير موضع العين. فاذا حدث ذلك كان موضع الدبوس الطويل منطبقاً على موضع تلك الصورة

١٩ - الانقلاب الجانبي للصور الحادثة بالانعكاس عند السطوح المستوية

والجسم الموضوع أمام المرآة مثلاً تتكون لكل نقطة من سطحه صورة في المرآة وتتكون من صور هذه النقط صورة الجسم كله. فاذا فرضنا أن الجسم ا ب ح (شكل ١٤) على شكل حرف ل قد وضع رأسياً أمام المرآة الراسية د ه ووجدت مواضع صور الأجزاء المختلفة التي



(شكل ١٤)

يتكون منها الجسم اتضح أن صورتي ا ب ح مثلاً وهما ا ب ح تكونان أبعد عن السطح من طوره ح مثلاً وهى ح واذن تظهر الصورة ا ب ح منقابة لا رأساً على عقب بحيث يكون عاليها مثلاً صورة سافل الجسم بل جنباً على جنب

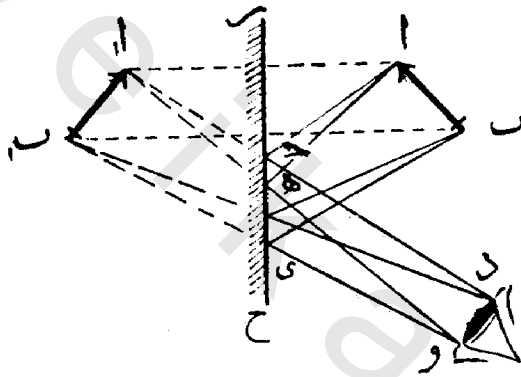
بحيث يكون الجانب الأيمن مثلاً من الصورة مقابلاً الجانب الأيسر من الجسم. ويعبر عن هذا الانقلاب بالانقلاب الجانبي (٢)

(١) تسمى هذه الطريقة بطريقة Parallax

(٢) Lateral Inversion

٢٠- رسم مسير الأشعة التي ترى العين بها صورة حادثة بالانعكاس

ولتوضيح مسير الأشعة التي ترى بها العين صورة حادثة في مرآة مثلاً لجسم امامها يمكن أولاً إيجاد موضع الصورة بالطريقة الهندسية فإذا فرضنا ان المستقيم $اب$ (شكل ١٥) يمثل الجسم



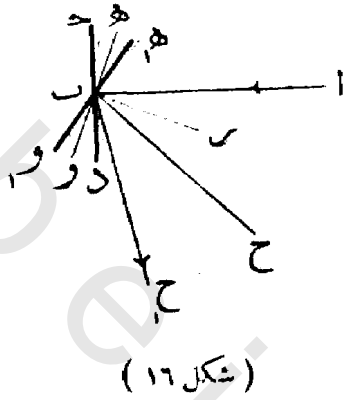
(شكل ١٥)

مـرح يمثل السطح العاكس نعين موضع $ا$ ، وهى صورة $ا$ وموضع $ب$ ، وهى صورة $ب$ بالطريقة الهندسية فيكون $ا ب$ ، صورة $ا ب$ فالناظر الى الصورة $ا ب$ ، يتراى له ان الاشعة صادرة منها أى يتراى له أن مخروط الاشعة التي ترى العين بها $ا$ مثلاً رأسه عند هذه النقطة في حين أن هذه

الاشعة وان انعكست كأنها صادرة من هذه النقطة ففى قبل وقوعها على السطح العاكس كانت صادرة من نقطة $ا$. ولذلك اذا رسم المخروط $ا ب$ و $د$ و $و$ وصلت نقط تقابله والسطح بالنقطة $ا$ فان الحزمة $ا ب$ تكون الحزمة الساقطة. ولذلك تمثل الخطوط $ا ب$ و $د ب$ و $و ب$ حدود مخروط الاشعة التي ترى العين بها صورة $ا$ وبالمثل يمكن رسم مخروط الاشعة التي ترى العين بها صورة $ب$ أو صورة أى نقطة أخرى من الجسم. والحزمة المحدودة بالمستقيمات $ا ب$ و $د ب$ و $و ب$ و $ي ب$ وتمثل في مستوى الورقة الاشعة التي ترى العين بها صورة الجسم كله

وهذه الطريقة في توضيح مسير الأشعة أفضل كثيراً من حيث السهولة من الابتداء برسم أشعة تسقط من النقط المختلفة من الجسم وتنعكس عند السطح العاكس بحيث تكون زوايا السقوط مساوية زوايا الانعكاس

٢١ - تأثير انحراف السطح العاكس في سير الشعاع المنعكس



(شكل ١٦)

إذا فرضنا أن $اب$ (شكل ١٦) شعاع يسقط على السطح $ح د$ عمودياً عليه فهو ينعكس في اتجاه $ب ا$ ولكن إذا دار السطح العاكس حول محور مار بنقطة $ب$ عمودياً على مستوى الورقة وأخذ الوضع $هـ و$ ، على فرض أن الشعاع $اب$ لم يتغير مسيره ورسمنا العمود $ب ر$ على $هـ و$ فإن زاوية $اب ر$ وهي زاوية السقوط على $هـ و$ تساوى زاوية $ح ب هـ$ وهي التي دار السطح خلالها واذاً يعمل الشعاع المنعكس $ب ح$ مع المستقيم $اب$ زاوية هي $اب ح$ وتساوى ضعف الزاوية التي دار السطح خلالها وهي زاوية $ح ب هـ$ وبالمثل نرى أنه إذا أخذ السطح العاكس $ح د$ الوضع $هـ و$ فإن الشعاع المنعكس عنه في هذا الوضع وهو $ب ح$ يعمل مع $اب$ زاوية هي $اب ح$ وتساوى ضعف الزاوية التي دار السطح خلالها وهي زاوية $ح ب هـ$.

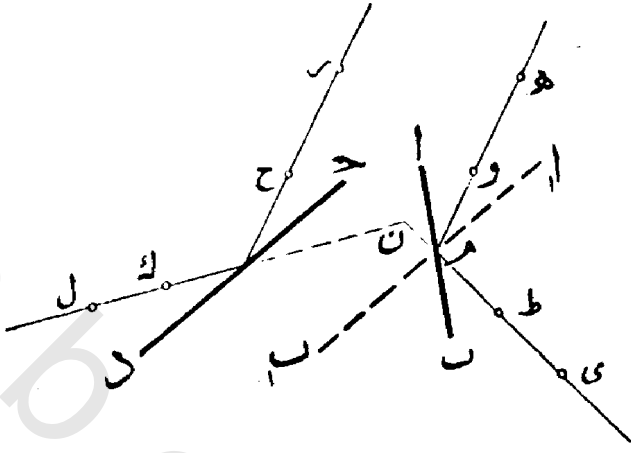
$$\begin{aligned} \text{فتكون } \angle اب ح - \angle اب ح &= 2(\angle ح ب هـ - \angle ح ب هـ) \\ &= 2\angle ح ب هـ \\ &= \angle ح ب ح \end{aligned}$$

ومنه يتضح أنه إذا انحرف السطح العاكس من الوضع $هـ و$ إلى الوضع $هـ و$ ، ينحرف الشعاع المنعكس من الوضع $ب ح$ إلى الوضع $ب ح$ ، وتكون زاوية انحرافه ضعف زاوية انحراف السطح وهذه النتيجة كثيراً ما تطبق في أجهزة يحدث فيها انحراف صغير يراد قياسه أو الاستدلال عليه كالجلفانومترات مثلاً.

٢٢ - إيجاد الزاوية الواقعة بين سطحين مستويين عاكسين بطريقة ضوئية

وتطبيقاً لقانوني الانعكاس نذكر هنا مثلاً يطبق فيه القانونان لإيجاد الزاوية الواقعة بين

سطحين عاكسين



(شكل ١٧)

لنفرض أن السطحين العاكسين هما
 ا ب و ح د (شكل ١٧) وليكونا مثلاً
 السطحين المستطيلين المنشور ثلاثي قائم
 مصنوع من الزجاج وموضوع وقاعدته
 الثلاثية على قطعة من الورق الأبيض
 مبسوطة على لوح أفقي من الخشب
 ولنفرض أنه يراد إيجاد الزاوية المحصورة
 بين هذين الوجهين

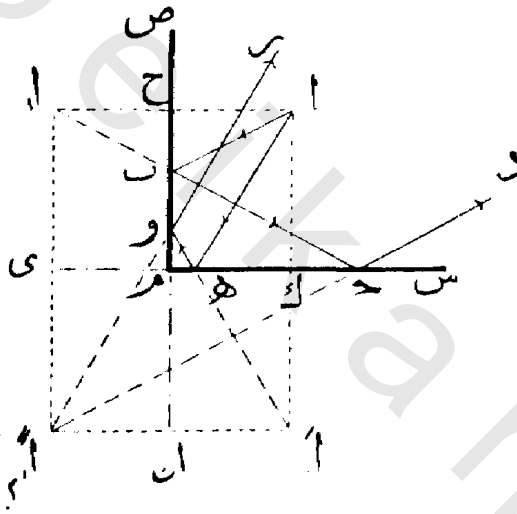
يرسم على سطح الورقة مستقيمان متوازيان مثل هـ و مـ مـ حـ
 ويوضع المنشور بحيث تقع الزاوية المراد إيجادها بين هذين المستقيمين كما هو مبين بالشكل
 ثم يرشق على سطح الورقة دبوسان رأسيان في نقطتين مثل هـ و مـ و على المستقيم الأول وينظر إلى
 السطح ا ب بحيث ترى صورتاهما منطبقتين ويحدد خط البصر بدبوسين عند طـ و يـ فيكون
 المستقيم الواصل بين سميتهما وهو طـ ي بمثابة الشعاع المنعكس إذا اعتبر المستقيم هـ و الواصل بين
 سمي الأولين الشعاع الساقط

ثم يكرر هذا بالنسبة إلى المستقيم مـ حـ فيوضع دبوسان رأسيان في نقطتي مـ حـ عليه وينظر
 نحو السطح حـ د بحيث ترى صورتاهما منطبقتين ويحدد خط البصر بدبوسين عند كـ و لـ فاذا مد
 المستقيمان لـ كـ و مـ يـ طـ حتى يتقابلا في نقطة نـ كانت زاوية لـ نـ يـ ضعف الزاوية المحصورة بين
 السطحين ا ب و حـ د وهي التي يراد إيجادها

ولعل أبسط برهان لا ثبات ذلك أن نفرض أن السطح ا ب قد أدير حول محور عمودي على
 مستوى الورقة عند مـ (وهي نقطة سقوط الشعاع هـ و على السطح) في اتجاه حركة عقرب الساعة
 حتى يتخذ الوضع ا بـ ويصير موازياً للسطح حـ د فالشعاع المنعكس طـ ي يدور في أثناء ذلك
 بزاوية تساوي ضعف الزاوية التي يدور خلالها السطح أي ضعف الزاوية بين ا ب و حـ د وإذا
 اتخذ السطح الوضع ا بـ الموازي للسطح حـ د فنظراً لأن الشعاعين هـ و مـ مـ حـ متوازيان

ويسقطان في هذه الحالة على سطحين متوازيين فان الشعاعين المنعكسين يكونان متوازيين واذن يكون الشعاع ك ل موازياً للشعاع المنعكس عند السطح المدار إذا اتخذ الوضع ا ب واذن تكون الزاوية بين المستقيمين ل ك م ي ط مساوية ضعف الزاوية التي يدور خلالها السطح

٢٣ - تعدد الصور بتعدد الانعكاسات - الانعكاس عند السطحين المتعامدين

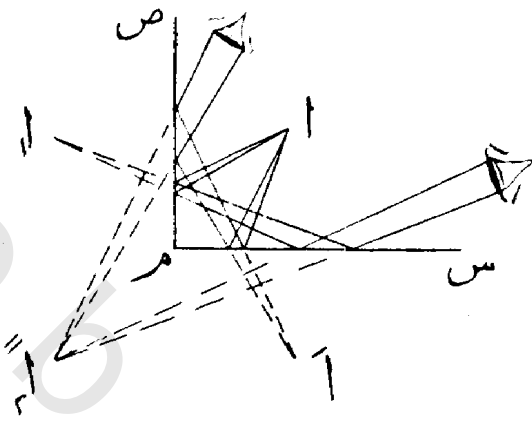


(شكل ١٨)

إذا فرضنا مثلاً أن جسماً وليكن نقطة مضيئة مثل ا (شكل ١٨) قد وضع بين سطحين عاكسين متعامدين م س م ص حدث عن انعكاس الضوء مرة واحدة عن السطح م ص الصورة ا و موضعها على امتداد العمود ا ح الواقع من ا على هذا السطح بحيث يكون ح ا = ح ا براكض بعض الأشعة المنعكسة عند هذا السطح وهي التي

تكون نقط سقوطها تحت العمود ا ح في الشكل كالشعاع ب > مثلاً قد تقع على السطح م س فتنعكس كما ينعكس ب > في استقامة > د فيتكون بهذا الانعكاس صورة ترى على استقامة د > . ولما كان الشعاع ب > مثلاً يقع على السطح م س كأنه آت من ا يمكن اعتبار الصورة ا كأنها جسم موضوع أمام السطح م س تتكون له بالانعكاس عن هذا السطح الصورة ا و يكون موضع هذه الصورة على امتداد العمود ا ي الواقع من ا على امتداد س م بحيث يكون ا ي = ا ي وتكون هذه هي الصورة التي ترى عند انعكاس الأشعة المنعكسة عن السطح م ص مرة أخرى عند السطح م س . وتكون جميع هذه الأشعة بعد انعكاسها الثاني كأنها صادرة من ا . ولما كانت ا خلف السطح م ص فهذه الأشعة لا يمكن أن تقع بعد ذلك على هذا السطح

وفي الوقت نفسه تتكون للجسم ا صورة بالانعكاس عن السطح م س وهي ا وموضعها



(شکل ۱۹)

نقط تقاطعه والسطح م- س بنقطة ا
فيتكون مخروط توصل نقط تقاطعه والسطح
م- ص بنقطة ا فيكون مخروط الأشعة التي ترى
العين بها الصورة ا^٢ هو الذي رأسه عند ا ويقع
على السطح م- ص ثم ينعكس عنه الى السطح
م- س ثم ينعكس عن هذا الى العين كما هو مبين
بشكل (١٩)

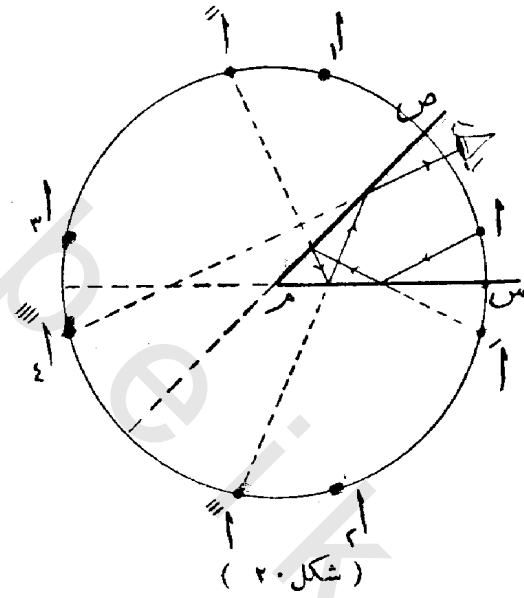
أما اذا راعينا الحالة التي ينعكس فيها الضوء أولا عن السطح مـ س فانعكاسه هذا يكون الصورة اَ وتعتبر هذه جسما بالنسبة الى السطح مـ ص وتتكون بانعكاس الضوء الآتي من قبله ، بانعكاسه عند السطح مـ ص الصورة اَ فيعين موضع اَ باعتبارها صورة اَ وتوجه العين نحو السطح مـ ص ويرسم مخروط الأشعة كأنه صادر من اَ ثم توصل نقطة تقاطعه والسطح مـ ص بنقطة اَ فيتكون مخروط توصل نقط تقاطعه والسطح مـ س بنقطة ا ف يكون مخروط الاشعة التي ترى العين بها الصورة اَ هو الذي رأسه عند ا ويقع أولا على السطح مـ س ثم ينعكس عنه نحو السطح مـ ص وينعكس عن هذا الى العين كما هو مبين بالشكل

٢٥ - الانعكاس عند سطحين الزاوية بينهما 45°

وبالكيفية السابقة يمكن إيجاد مواضع الصور التي تتكون في حالات أخرى ويمكن حصر عددها ورسم مسير الأشعة التي تراها العين بها وسنراعى هنا زيادة في التوضيح حالة سطحين بينهما زاوية قدرها ٤٥°

ولما كانت الصور تقع على محيط دائرة ويقع الجسم أيضاً على محيطها نفرض أن a (شكل ٢٠) نقطة مضيئة نعتبرها الجسم وأن s السطحين العاكسين هما s و s' ونرسم الدائرة التي مركزها m ونصف قطرها a وتقع الصور على محيطها ولنفرض أنها تقطع السطحين في نقطتي s و s' ولنبحث أولاً في سلسلة الصور التي تتكون مبتدئة بصورة a الحادثة بالانعكاس عند أحد السطحين ثم صورة هذه الصورة وصورة صورتها وهكذا ولنبتدئ بالصورة a الحادثة

بالانعكاس عن السطح مـ ص فلايجاد موضعها يمكن أن نركز في نقطة ص ونقطع على محيط



الدائرة القوس ص ا مساويا القوس ص ا .

ولايجاد صورة ا الحادثة بالانعكاس عندالسطح

مـ س نركز في نقطة س ونقطع القوس س ا

مساوياً س ا ولايجاد صورة ا الحادثة

بالانعكاس عند السطح مـ ص نركز في نقطة

ص ونقطع القوس ص ا مساوياً ص ا

ولايجاد صورة ا الحادثة بالانعكاس عند السطح

مـ س نركز في نقطة س ونقطع القوس س ا

مساوياً س ا وهنايتبين أن ا تقع خلف السطح مـ ص فلا تحدث لها صورة بالانعكاس

عنده . فتنتهى بالصورة ا السلسلة الاولى

وبالمثل يمكن ايجاد سلسلة الصور التى تتكون مبتدئة بصورة ا الحادثة بالانعكاس عند

السطح مـ س وهى ا . ولايجاد موضعها نركز في نقطة س ونقطع القوس س ا مساوياً

س ا ولايجاد صورة ا الحادثة بالانعكاس عندالسطح مـ ص نركز عند ص ونقطع القوس

ص ا مساويا ص ا وهكذا حيث يلاحظ هنا ايضا ان هذه السلسلة تنتهى بالصورة ا وهذه

تنطبق على الصورة ا . ويتضح من الشكل ان كلا من السلسلتين تنتهيان بالصورة التى

تقع فى الزاوية الحادثة بين امتداد ص م وامتداد س مـ

ويلاحظ أن الدلالة على الصور بالكيفية التى اتبعناها هنا وبالنظام السابق يجعل الرقم الناعت

للصورة أو عدد الشروط المميزة لها يدل فى الحالتين على عدد الانعكاسات التى أدت الى تكون

الصورة فمثلا الصورة ا تحدث بثلاثة انعكاسات أولها عند السطح مـ س ، والصورة ا

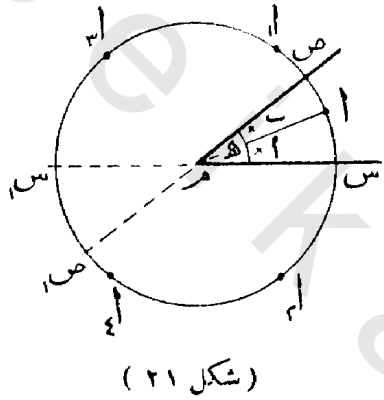
تحدث بأربعة انعكاسات أولها عند السطح مـ ص

ويتضح من الشكل أن الصور فى كل سلسلة عددها أربع ولكن نظراً لانطباق الصورة النهائية

فى احدى السلسلتين على نظيرتها فى الاخرى يصير عدد الصور كلها سبعة

ومبين بالشكل مسير الشعاع الذى هو محور مخروط الاشعة التى ترى العين بها الصورة ^ا ويمكن بمثل ما تقدم بيان أنه اذا كانت الزاوية بين السطحين العاكسين 60° يكون عدد الصور خمساً واذا كانت 30° يكون عددها احد عشر وكذلك يمكن الاستدلال على أنه اذا كانت الزاوية بين السطحين تقسم ϕ بدون باق فان عدد الصور يساوى خارج قسمة ϕ على هذه الزاوية منقوصاً منه واحد

٢٦ - الانعكاس عند سطحين بينهما زاوية ما



تفرض أن السطحين هما م-س و م-ص (شكل ٢١) ولنرمز للزاوية بينهما بالحرف h ولنفرض أن نقطة a تمثل الجسم ولنرمز للزاوية ام-س بالحرف α وللزاوية ام-ص بالحرف β ولنرسم الدائرة التى مركزها م وتقع على محيطها الصور ولنفرض أنها تقطع السطحين فى نقطتى س و ص ولنعين على هذه الدائرة سلسلة الصور التى تبتدىء بالصورة a الحادثة بالانعكاس واحد عند السطح م-ص فيكون

$$\text{زاوية ام-ا} = \beta = \alpha$$

$$\text{وبما أن القوس س-ا} = \text{القوس س-ا} \text{ وزاوية س-م-ا} = \alpha + \beta \text{ تكون}$$

$$\text{زاوية س-م-ا} = \alpha + \beta = \alpha$$

$$\text{واذن زاوية ام-ا} = \alpha = \alpha + \beta + \alpha = \alpha + \beta + \alpha$$

$$\text{كذلك بما أن القوس ص-ا} = \text{القوس ص-ا}$$

$$\text{وزاوية ص-م-ا} = \alpha = \alpha + \beta + \alpha$$

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

$$\text{تكون زاوية ص-م-ا} = \alpha = \alpha + \beta + \alpha$$

$$\text{واذن زاوية ام-ا} = \alpha = \alpha + \beta + \alpha = \alpha + \beta + \alpha$$

وبالمثل يمكن بيان أن

زاوية $ام_١ = ه٤$

وزاوية $ام_١ = ه٤ + ه٢$ وهكذا

فاذا راعينا الحالة العامة ورمزنا للصورة الحادثة بعد عدد زوجي من الانعكاسات بالرمز $ا_{١+٢}$

والحادثة بعد عدد فردي من الانعكاسات بالرمز $ا_{١+٢}$

تكون زاوية $ام_١ = ه٢٢$

وزاوية $ام_١ = ه٢٢ + ه٢$

وبالمثل بالنسبة الى السلسلة الاخرى التي تبتدىء بالصورة $ا$ الحادثة بالانعكاس عند

السطح $م س$ فبالرمز للصورة الحادثة بعد عدد زوجي من الانعكاسات بالرمز $ا_{١+٢}$ وللصورة

الحادثة بعد عدد فردي من الانعكاسات بالرمز $ا_{١+٢}$ يمكن بيان أن (١)

زاوية $ام_١ = ه٢٢$

وزاوية $ام_١ = ه٢٢ + ه٢$

فاذا راعينا السلسلة الاولى وكانت الصورة $ا_{١+٢}$ هي آخر صورة في هذه السلسلة فنظراً

لان آخر صورة لا بد من وقوعها في الزاوية المحصورة بين $م س$ و $ه٢$ وبما أن هذه الصورة

تحدث بعد عدد زوجي من الانعكاسات واذن فهي تحدث بالانعكاس عند السطح $م س$ يكون

زاوية $ام_١$ اكبر من زاوية $ام_ص$

∴ $ه٢٢ > ه٢$

∴ $ه٢٢ > ه٢$ (١)

اما اذا كانت الصورة $ا_{١+٢}$ هي آخر هذه السلسلة فنظراً لوقوعها هي أيضاً في الزاوية

بين $م س$ و $ه٢$ ولانها تحدث بعد عدد فردي من الانعكاسات ولانها لذلك تحدث بالانعكاس

عن السطح $م س$ يكون

(١) يتحدد بالرمز $ا_{١+٢}$ أن القطر مكررة (٢) مرة

» » » » (١+٢) » » » »

زاوية $ام ا١ + ا٢$ أكبر من زاوية $ام س$

$$\therefore ١ + ا٢ + س > ١ - ط$$

وبإضافة المقدار $١ - س$ الى الطرفين ينتج أن

$$١ + ا٢ + س > ١ - ط$$

$$\therefore (١ + ا٢) > ١ - ط$$

$$\therefore ١ + ا٢ > \frac{١ - ط}{س} \quad (٢)$$

ويتضح من (١) و (٢) أنه سواء أكان عدد الانعكاسات زوجياً أم فردياً فإن عدد الانعكاسات الحادثة في السلسلة الأولى واذن عدد صور هذه السلسلة يكون العدد الكامل التالى للمقدار $\frac{١ - ط}{س}$ وبالمثل يمكن اثبات أن عدد الصور الحادثة في السلسلة الثانية يكون العدد الكامل التالى للمقدار $\frac{١ - ط}{س}$

فمثلاً اذا أخذنا زاوية ٤٥° مثلاً وفرضنا أن $١ = ٢٥^\circ$ $٦ = ٢٠^\circ$ فان

$$\frac{٥}{٣} = \frac{٢٠ - ١٨٠}{٤٥} = \frac{١ - ط}{س}$$

$$\frac{٤}{٣} = \frac{٢٥ - ١٨٠}{٤٥} = \frac{١ - ط}{س} \quad ٦$$

فيكون عدد الصور في كل من السلسلتين اربعاً ونظراً لانطباق الصورتين النهائيتين في كل منهما يكون عدد الصور كلها سبعة

أما اذا كانت الزاوية ٤٠° وكانت زاوية $١ = ١٥^\circ$ $٦ = ٢٥^\circ$ فان

$$\frac{٧}{٣} = \frac{٢٥ - ١٨٠}{٤٠} = \frac{١ - ط}{س}$$

فيكون عدد صور هذه السلسلة اربعاً

$$\text{فيكون عدد صور هذه السلسلة خمسا} \quad 6 \frac{1 - \tau}{\delta} = \frac{180 - 10}{40} = \frac{1}{8}$$

أما اذا كان الجسم واقعاً على منتصف الزاوية بين السطحين فيكون

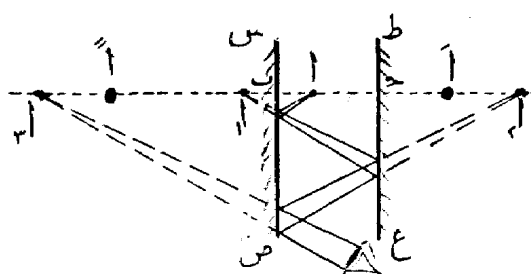
$$4 = \frac{1 - \tau}{\delta} = \frac{180 - 20}{40}$$

ويكون عدد صور كل من السلسلتين أربعاً ويمكن التحقق من ذلك بالرسم كما انه يستنبط أيضاً من (١) و (٢) أنه اذا كانت زاوية δ تقسم τ بدون باق فان خارج القسمة يكون العدد الكامل التالي لكل من المقدارين (١) و (٢) فمثلا اذا كانت الزاوية 60° فان

$$\frac{1 - 180}{60} = 3 - \frac{1}{60} \text{ والمقدار } \frac{1}{60} \text{ كسر}$$

∴ العدد الكامل التالي للمقدار (١) في هذه الحالة هو ٣

٢٧ - الانعكاس عند السطحين المتوازيين



(شكل ٢٢)

لنفرض ان نقطة ا (شكل ٢٢) نقطة مضيئة موضوعة بين سطحين متوازيين عاكسين س ص ط ع ولنسقط من ا عمودا على السطحين يقطع الاول

في نقطة ب والثاني في نقطة ح ف باعتبار أن نقطة ا تمثل الجسم يتكون لهذا الجسم صورة تحدث بالانعكاس عن السطح س ص وموضعها ا_١ على امتداد العمود ا ب بحيث يكون ا_١ = ب ا. ومن الاشعة المنعكسة عن السطح س ص كأنها صادرة عن ا_١ ما يقع على السطح ط ع ولذلك يمكن أن نعتبر الصورة ا_١ كأنها جسم بالنسبة الى السطح ط ع تتكون له الصورة ا_٢ على امتداد العمود ا_١ ح بحيث يكون ا_٢ = ا_١ ح وبالمثل يمكن اعتبار

الصورة $ا$ كأنها جسم بالنسبة الى السطح $س$ ص فتكون له الصورة $ا$ وهكذا من غير نهاية واذن تحدث سلسلة لا نهاية لها من الصور

ولذلك يشكون للجسم $ا$ صورة $ا$ تحدث بالانعكاس عن السطح $ط$ ع وموضعها على امتداد العمود $ا$ بحيث يكون $ا = ا$ والصورة $ا$ يمكن اعتبارها جسماً بالنسبة الى السطح $س$ ص فتكون له الصورة $ا$ وهكذا من غير نهاية واذن تحدث سلسلة أخرى من الصور لا نهاية لعددها

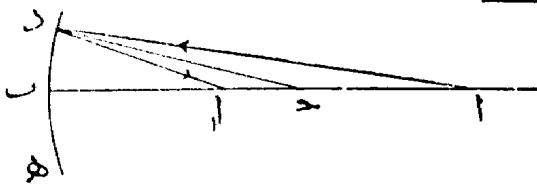
ويلاحظ هنا أيضاً أن العدد الناعت للصورة أو عدد الشرط المميزة لها يدل على عدد الانعكاسات التي تحدث للصورة بعدها . ويمكن رسم مسار الأشعة التي ترى العين بها أى صورة من الصور الحادثة كما شرحنا فيما سبق ومبين في الشكل مسار الأشعة التي ترى العين بها الصورة $ا$ الحادثة بعد ثلاثة انعكاسات أولها عند السطح $س$ ص

الانعكاس عند السطوح الكرية

٢٨ - الانعكاس عند السطح المنحني

وعند وقوع أشعة الضوء على سطح عاكس ليس بالمستوى يمكن اعتبار الجزء الصغير جداً من المساحة عند موضع سقوط الشعاع (أى الجزء التفاضلى من السطح عند نقطة السقوط) مستويًا فينعكس الشعاع بحيث يكون الشعاع الساقط والعمود المرسوم على الجزء التفاضلى من المساحة عند نقطة السقوط والشعاع المنعكس فى مستوى واحد وتكون زاوية السقوط مساوية زاوية الانعكاس . ويكون الانعكاس عند السطوح المنحنية منقاداً لقانونى الانعكاس كالانعكاس عند السطوح المستوية . وسنقتصر هنا على دراسة ما يترتب على الانعكاس عند السطوح الكرية

٢٩ - الانعكاس عند السطح الكرى المقعر



(شكل ٢٣)

نفرض أن السطح العاكس كرى مقعر كالسطح $د ب ه$ (شكل ٢٣) ولتكن نقطة $ح$ مركز تكور السطح $ا$ أى مركز الكرة التي

يعتبر السطح العاكس جزءاً منها فالمستقيم γ الذي هو محور التماثل بالنسبة الى السطح العاكس يسمى المحور الرئيسى أو بإيجاز المحور ونقطة β التي هي مركز السطح العاكس أو منتصفه (ويلاحظ أنها ليست مركز تكوره) أو هي موضع تقابل المحور والسطح تسمى القطب

فاذا فرضنا أنه يوجد على المحور نقطة مضيئة مثل α ورسمنا أى شعاع مثل $\alpha\delta$ يسقط منها على السطح العاكس فإن العمود على السطح عند δ هو نصف القطر $\gamma\delta$ فاذا رسمنا $\delta\alpha$ بحيث تكون الزاوية $\alpha\delta\gamma$ مساوية للزاوية $\delta\gamma\alpha$ كان المستقيم $\delta\alpha$ الشعاع المنعكس ولتكن نقطة α' نقطة تقابله والمحور

فاذا رمزنا لكل من زاويتي السقوط والانعكاس بالحرف ν وللزاوية $\delta\alpha\beta$ بالحرف α وللزاوية $\delta\gamma\beta$ بالحرف γ وللزاوية $\delta\alpha\gamma$ بالحرف α فالزاوية الخارجة فى المثلث $\alpha\delta\gamma$ وهى $\alpha + \gamma = 180^\circ$ (١)

والزاوية الخارجة فى المثلث $\delta\gamma\alpha$ وهى

$$\alpha + \gamma = 180^\circ \quad (٢)$$

ومن المعادلتين (١) و (٢) يتضح أن $\alpha - \gamma = 180^\circ$

$$\alpha - \gamma = 180^\circ \quad (٣)$$

فاذا فرضنا أن نقطة δ قريبة من نقطة β بحيث يكون المستقيمان $\alpha\delta$ و $\delta\alpha'$ متساويين بالتقريب وكذلك $\beta\delta$ و $\delta\alpha'$ وهذا فرض يمكن الذهاب اليه اذا كان اتساع السطح العاكس صغيراً بالنسبة الى هذه الاطوال امكن اعتبار زاوية

$$\frac{\delta\alpha}{\beta\alpha} = 1$$

$$\frac{\delta\alpha}{\beta\alpha} = 1$$

$$\frac{\delta\alpha}{\beta\alpha} = 1$$

وبما أن

ينتج بالتعريض في المعادلة (٣) وباختصار ب د أن

$$(٤) \quad \dots \quad \frac{1}{b} + \frac{1}{a} = \frac{2}{c}$$

ويتضح من هذه المعادلة أنه أيا كانت نقطة سقوط الشعاع المرسوم من a على السطح (على فرض أنها قريبة من القطب) فإن الشعاع المنعكس يمر بنقطة ثابتة على المحور هي نقطة a ، فاذا رمزنا لنصف قطر التكور بالرمز c ولبعد النقطة a عن القطب بالحرف e ولبعد a عنه بالرمز e يكون

$$(٥) \quad \dots \quad \frac{1}{e} + \frac{1}{e} = \frac{2}{c}$$

ولما كانت نقطة a نقطة ثابتة على المحور وهي موضع تلاقي الأشعة المنعكسة عن السطح بعد انعكاسها فهي تعتبر صورة لنقطة a وتكون المعادلة (٥) هي الدالة على علاقة بعد نقطة مضئية على المحور عن القطب ببعد الصورة التي تتكون على المحور لهذه النقطة عن القطب أيضاً ويتضح من الشكل أنه إذا وضعت النقطة المضئية عند a فإن الشعاع a د بعد انعكاسه يقطع المحور في نقطة a واذن تكون هذه النقطة موضع الصورة فكأن موضع النقطة المضئية وموضع صورتهما موضعان يمكن تبادلها ولذلك يسميان موضعين متبادلين وتسمى النقطتان a ، a نقطتين متبادلتين (١)

٣٠ - البؤرة والبعد البؤري في حالة السطح المقعر

وإذا راعينا حالة خاصه تكون النقطة المضئية فيها على المحور وعلى بعد شاسع جداً من القطب أي تكون فيها قيمة e في المعادلة السابقة لا نهاية لها يكون

$$\frac{2}{c} = \frac{1}{e}$$

واذن يكون موضع صورة النقطة على المحور وفي منتصف نصف قطر تكور السطح وتسمى

الصورة في هذه الحالة «البؤرة» ^(١) ويسمى بعدها عن القطب «البعد البؤرى» وإذا رمزنا للبعد البؤرى هذا بالحرف u تكون المعادلة الدالة على علاقة بعد الجسم ببعد الصورة هي

$$\frac{1}{u} = \frac{1}{e} + \frac{1}{e_1}$$

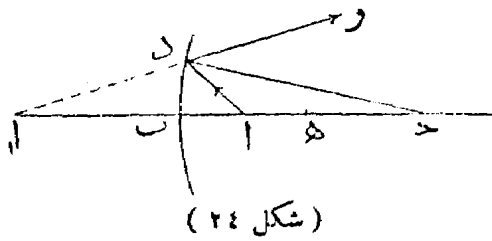
ولما كانت البؤرة هي موضع الصورة عند ما تكون النقطة المضيئة في ما لا نهاية فإن الأشعة الواقعة من هذه النقطة على السطح تكون متوازية وموازية للمحور وتكون البؤرة اذن موضع تجمع الأشعة التي تسقط على السطح موازية للمحور بعد انعكاسها عنه وكذلك يلاحظ أنه اذا كانت $e = u$ أى اذا كانت النقطة المضيئة عند البؤرة فإن قيمة e_1 التي تستخرج من المعادلة تكون لا نهاية لها واذن تنعكس الأشعة في هذه الحالة عن السطح متوازية

٣١ - الصور الحقيقية والصور التقديرية

وينتج من المعادلة

$$\frac{1}{u} = \frac{2}{v} = \frac{1}{e} + \frac{1}{e_1}$$

انه في جميع الحالات التي تكون فيها قيمة e أكبر من $\frac{v}{2}$ أى أكبر من u تكون فيها قيمة e_1 موجبة ولكن اذا كانت قيمة e أصغر من قيمة u تصبح قيمة e_1 سالبة



(شكل ٢٤)

ولتوضيح هذا نفرض أن نقطة (أ) (شكل ٢٤)

النقطة المضيئة واتكن نقطة h مركز تكور السطح

ونقطة h منتصف نصف القطر h (أى البؤرة)

بحيث تقع نقطة a بين البؤرة h والقطب b ونرسم من a شعاعاً مثل ad يسقط على السطح فيكون d العمود فاذا رسم d و h بحيث تكون زاوية $ود$ مساوية زاوية $اد$ كان $دو$ مسير الشعاع المنعكس والشعاع $دو$ لا يقطع المحور وإنما امتداد $و$ الى خلف السطح العاكس يقطع

المحور في نقطة a ، فاذا رمزنا لكل من زاويتي السقوط والانعكاس بالحرف u وللزاوية d ب
بالرمز a ، وللزاوية d ب بالحرف a ، وللزاوية d ب بالحرف a ، فان الزاوية d الخارجية في
المثلث ada هي

$$a + a = u$$

والزاوية d الخارجية في المثلث ada هي

$$a + u = u$$

ومن هاتين المعادلتين ينتج أن

$$a + a = u$$

واذن باستعمال الرموز السابقة وباعتبار أن نقطة d قريبة من القطب يكون

$$(1) \quad \frac{1}{u} = \frac{1}{a} + \frac{1}{a} = \frac{2}{a}$$

فالصورة في هذه الحالة لا يكون موضعها أمام السطح العاكس بل خلفه والمعادلة الدالة على
علاقة بعد الجسم ببعد الصورة تختلف من حيث اشارة u عن المعادلة الدالة على هذه العلاقة
عند ما تكون الصورة أمام السطح

والصورة في هذه الحالة تختلف اختلافاً جوهرياً عن الصورة في الحالات السابقة ففي الحالات
السابقة تتكون الصورة من تلاقى الأشعة المنعكسة بعد انعكاسها أمام هذه الحالة فالأشعة المنعكسة
لا تتلاقى وإنما تتلاقى امتداداتها فيخيل للرأى عند وقوع الأشعة المنعكسة على عينه كأنها صادرة
من نقطة خلف السطح العاكس . وتشبه الصورة من هذه الوجهة تلك التي تحدث عن الانعكاس
عند السطح المستوي. لذلك يقال عن الصورة التي تحدث عن تجمع الأشعة المنعكسة نفسها «صورة
حقيقية» (١) وتلك التي تحدث عن تلاقى امتدادات مسير الأشعة المنعكسة «صورة تقديرية» (٢)
ولما كانت المعادلة في حالة الصورة التقديرية تختلف من حيث اشارة u عن المعادلة في حالة

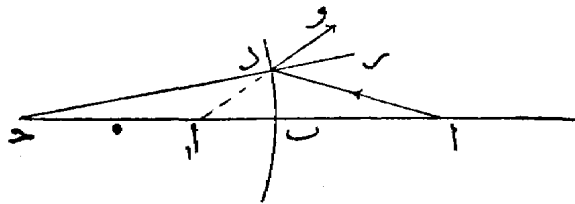
الصورة الحقيقية وهذا الاختلاف غير مرغوب فيه فان هناك قاعدة تعرف « بقاعدة الاشارات » اذا روعيت يبطل الاختلاف بين المعادلتين وتكون صورتها واحدة والقاعدة أن يبدأ دائماً في قياس الأبعاد من القطب وما يقاس في عكس اتجاه أشعة الضوء الواقعة على السطح يعد موجباً وما يقاس في اتجاه هذه الأشعة يعد سالباً فالأبعاد في حالة الصورة الحقيقية تكون جميعها طبقاً لهذه القاعدة موجبة ولكن في حالة الصورة التقديرية فان بعد الصورة وهو المقدار e عند بدء قياسه من القطب يقاس في اتجاه الضوء الواقع على السطح واذن يعد طبقاً للقاعدة مقداراً سالباً واذا روعى هذا أمكن اعتبار المعادلة

$$\frac{1}{u} = \frac{2}{r} = \frac{1}{e} + \frac{1}{e'}$$

معادلة عامة تنطبق في جميع حالات الصور. فاذا روعيت الحالة التي تكون فيها قيمة e أقل من r وتكون فيها قيمة e' المستخرجة من المعادلة سالبة يتضح أن الصورة لا يكون موضعها من القطب في الجهة التي توجد فيها النقطة المضيئة بل في الجهة الاخرى وأنها تكون صورة تقديرية أما الحالات الأخرى التي تكون فيها قيمة e أكبر من r وقيمة e' موجبة فان موضع الصورة من القطب يكون في الجهة الموجودة فيها النقطة المضيئة وتكون الصورة حقيقية

٣٢ - الانعكاس عند السطح الكرى المحدب

الاصطلاحات المختلفة التي تستعمل في حالة السطح المقعر كالقطب ومركز التكور والمحور تستعمل أيضاً للدلالة على المعاني نفسها في حالة السطح المحدب فاذا فرضنا أن د ب (شكل ٢٥)



(شكل ٢٥)

يمثل السطح العاكس ونقطة $د$ مركز تكوره ونقطة $ب$ القطب وفرضنا أن نقطة $ا$ نقطة مضيئة على المحور ورسمنا $ا د$ مسير شعاع ساقط على السطح فان العمود عند $د$

يكون المستقيم $د ر$ ولذلك اذا رسمنا $د و$ بحيث تكون زاوية $و د ر$ مساوية زاوية $ا د ر$ فان $د و$

يكون مسير الشعاع المنعكس. والشعاع المنعكس هذا لا يقطع المحور وإنما اذا مد على استقامته فان امتداده يقطع المحور في نقطة $ا$.

واذا رمزنا لكل من زاويتي السقوط والانعكاس بالحرف $و$ وللزاوية $د ح ب$ بالحرف $هـ$ وللزاوية $د ا ب$ بالحرف $ا$ وللزاوية $د ا ب$ بالرمز $ا$ فان الزاوية $ود ا$ وهي الخارجة في المثلث $اد ا$ هي

$$ا + ا = و + و$$

والزاوية $رد ا$ وهي الخارجة في المثلث $اد ح$ هي

$$ا + هـ = و$$

$$\therefore و + هـ - ا - ا = \text{صفرًا}$$

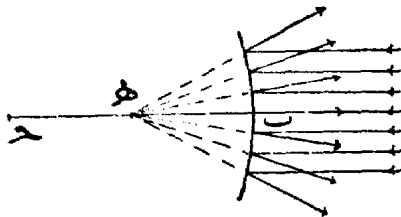
فاذا كانت نقطة $د$ قريبة من القطب $ب$ واستعملت الرمز السابقة يكون

$$\frac{1}{ع} - \frac{1}{ا} = \frac{2}{و}$$

وتكون هذه المعادلة هي الدالة على العلاقة بين بعد النقطة المضيئة عن القطب وبعد صورتها عنه وتكون الصورة في هذه الحالة تقديرية بالمعنى الذي تقدم في البند السابق واذا كانت قيمة $ع$ لا نهاية لها فان

$$\frac{2}{و} = \frac{1}{ا}$$

ويكون موضع الصورة في هذه الحالة عند منتصف نصف قطر التكور وعلى المحور كما في حالة السطح المقعر ويسمى موضعها البؤرة ويسمى بعدها عن القطب البعد البؤري ولكن البؤرة في حالة السطح المحدب تختلف عنها في حالة السطح المقعر فهي في حالة السطح المحدب تقديرية ولكنها في الحالة الأخرى حقيقية



(شكل ٢٦)

وشكل (٢٦) يوضح معنى البؤرة التقديرية فالأشعة التي تسقط على السطح المحدب موازية للمحور تنعكس عن السطح كأنها صادرة من نقطة $هـ$ التي هي منتصف

نصف القطر r كما أنه اذا وقعت الأشعة على السطح المحدب على هيئة حزمة مخروطية مملوئة في نقطة h فانها تنعكس عن السطح متوازية فاذا رمزنا للبعد البؤرى بالحرف r يكون

$$\frac{1}{r} = \frac{2}{s} = \frac{1}{e} - \frac{1}{e_1}$$

واذا قبلت هذه المعادلة بالمعادلة العامة في حالة السطح المقعر نراها تختلف عنها من حيث الاشارات ولكن اذا طبقنا القاعدة الخاصة بالاشارات واعتبرنا نصف قطر تكوّن السطح المحدب والبعد البؤرى بقيمة e ، مقادير سالبة فان المعادلة هنا تتحول الى الصورة الآتية

$$\frac{1}{r} = \frac{2}{s} = \frac{1}{e} + \frac{1}{e_1}$$

وتتوحد بهذه الكيفية معادلة السطح المقعر ومعادلة السطح المحدب وتكون هناك معادلة واحدة بهذه الصورة الأخيرة للسطح الكرى بوجه عام وتشمل جميع حالات الصور وتراعى عند تطبيقها قاعدة الاشارات

٣٣ - إيجاد صورة نقطة مضيئة ليست على المحور

في جميع الحالات التى بحثناها آنفاً اعتبرنا الجسم الذى تحدث له صورة بالانعكاس بمثابة نقطة مضيئة على المحور وسنبحث هنا عن الصورة التى تتكون اذا وضع جسم ذو ارتفاع معين ولكنه صغير أمام السطح الكرى عمودياً على المحور

وفي هذه الحالة اذا راعينا أية نقطة من الجسم ليست على المحور واستطعنا تحديد مسير شعاعين أو أكثر يصدران منها، مسيرهما بعد الانعكاس عن السطح فان موضع تقابلهما يكون صورة تلك النقطة

فمن المعلوم أن الشعاع الذى يسقط عمودياً على السطح بحيث تكون زاوية سقوطه صفراً وزاوية انعكاسه صفراً ينعكس فى استقامته الأولى سائراً فى الجهة المضادة والشعاع الذى يسقط عمودياً على السطح الكرى هو الذى يمر بمركز التكور اذا كان السطح مقعراً أو يمر امتداده

بمركز التكور اذا كان السطح محدباً

ومن المعلوم أن الشعاع الذي يقع على السطح الكرى عند القطب صانعا مع المحور زاوية ما ينعكس بحيث يصنع الشعاع المنعكس مع المحور الزاوية نفسها

ومما دللنا عليه فيما سبق أن الشعاع الذي يسقط موازياً للمحور ينعكس ماراً بالبؤرة اذا كان السطح مقعراً أو ماراً امتداده بالبؤرة اذا كان السطح محدباً

وكذلك دللنا على أن الشعاع الذي يسقط على السطح المقعر ماراً بالبؤرة أو يسقط على السطح المحدب ماراً امتداده بالبؤرة ينعكس موازياً للمحور

فبالاهتداء بهذه المعلومات يمكن تعيين مسير شعاعين أو أكثر يصدران من أية نقطة على الجسم ويكون موضع تقابل هذين الشعاعين أو موضع تقابل هذه الأشعة صورة تلك النقطة

٣٤ — إيجاد الصورة التي تحدث بالانعكاس عند السطح المقعر لجسم أمامه

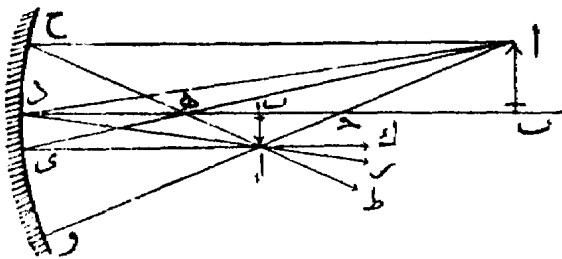
(أولاً) اذا كانت الصورة حقيقية

لنفرض أن السطح المقعر كما بشكل (٢٧) مركز تكوره C وبؤرته H وقطبه D ولنفرض أن A جسم موضوع على بعد من القطب A أكبر من البعد البؤرى وأنه عمودى على المحور

فاذا رسمنا من نقطة A الشعاع AC ماراً بالمركز فإنه يسقط على السطح في استقامة A و C وينعكس في استقامة AC

واذا رسمنا الشعاع AD صانعاً مع المحور زاوية AD فإنه ينعكس في اتجاه D صانعاً مع المحور زاوية AD مساوية زاوية السقوط فيتقابل الشعاعان المنعكسان في نقطة A تكون

هي صورة نقطة A



(شكل ٢٧)

واذا أسقطنا من A العمود AB على المحور كانت نقطة B صورة نقطة A ويكون A B صورة A B . ويمكن بيان أن نقطة B صورة نقطة A فمن تشابه

المثلثين $\triangle ABC$ و $\triangle A'B'C'$ يتبين أن

$$\frac{AB}{A'B'} = \frac{AC}{A'C'}$$

ومن تشابه المثلثين $\triangle ABC$ و $\triangle A'B'C'$ يتبين أن

$$\frac{BC}{B'C'} = \frac{AB}{A'B'}$$

$$\frac{BC}{B'C'} = \frac{AC}{A'C'} \quad \text{اذن}$$

فاذا وصلنا نقطة B بأية نقطة على السطح بحيث تكون النقطة قريبة من المحور ولتكن النقطة N مثلاً (غير مبينة بالشكل) ووصلنا هذه النقطة بنقطة B' أيضاً فإن

$$BN = B'N \quad \text{و} \quad BN = B'D \quad \text{و} \quad B'D = B'N$$

واذن $\frac{BN}{B'D} = \frac{B'N}{B'D}$ واذن زاوية BND في المثلث BND ينصفها

المستقيم BN واذن يكون BND مسير شعاع ساقط على السطح BD N مسيره بعد الانعكاس ولما كانت N أية نقطة على السطح العاكس فإن جميع الأشعة المنعكسة تمر بنقطة B' واذن فهي صورة للنقطة B

ولايجاد نقطة A' يمكن رسم الشعاع ACH موازياً للمحور فيكون مسيره بعد الانعكاس H ط ماراً بالبؤرة أو رسم الشعاع AHI بحيث يسقط ماراً بالبؤرة فإنه ينعكس في اتجاه I ك موازياً للمحور . فتكون نقطة تقابل هذين الشعاعين أو تقابل أحدهما وأحد الشعاعين المنعكسين السابقين وهي A' صورة A وسنبين في بند (٣٩) أن جميع هذه الأشعة المنعكسة تتقابل في نقطة واحدة هي A'

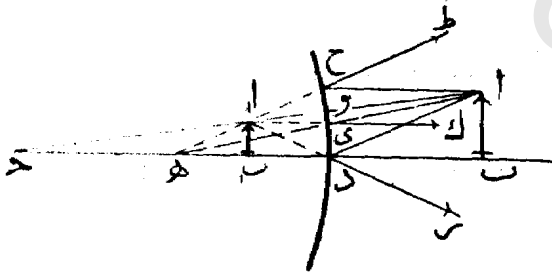
ويتضح من الشكل أنه اذا فرضنا أن AB الجسم فإن صورته الحادثة بالانعكاس تكون $A'B'$ وتكون مسيرات الأشعة هي AB وإنما يكون اتجاه سيرها مضاداً لاتجاهه في الحالة السابقة ويتضح

أيضاً أنه إذا كان الجسم $اب$ على بعد من القطب أبعد من مركز التكور كانت صورته بين مركز التكور والبؤرة وتكون حقيقية مقلوبة مصغرة وإذا كان الجسم بين مركز التكور والبؤرة كانت صورته أبعد من مركز التكور وتكون حقيقية مقلوبة مكبرة ويمكن بالرسم أيضاً بيان أنه إذا كان الجسم عند مركز التكور تكون صورته عنده أيضاً وتكون حقيقية مقلوبة مثل الجسم طولاً أو ارتفاعاً (ثانياً) إذا كانت الصورة تقديرية

في هذه الحالة يوضع الجسم $اب$ بين البؤرة والقطب وترسم أشعة صادرة من نقطة $ا$ كما في الحالة السابقة تماماً فيرى أنها لا تتقابل بعد انعكاسها وإنما تتقابل امتداداتها في نقطة $ا$ خلف السطح العاكس ثم يسقط من هذه النقطة العمود $اب$ على المحور فيكون $اب$ صورة $ا$ ويتضح من الشكل أن الصورة في هذه الحالة تقديرية معتدلة مكبرة

٣٥ — إيجاد الصورة التي تحدث بالانعكاس عند السطح المحدب لجسم أمامه

لنفرض أن السطح المحدب كما بشكل (٢٨) مركز تكوره $ح$ وبؤرته $هـ$ وقطبه $د$ ولنفرص أن $اب$ جسم موضوع على المحور عمودى عليه فإذا رسمنا من نقطة $ا$ الشعاع $او$ بحيث يكون امتداده ماراً بمركز التكور $ح$ فإنه ينعكس في استقامة $وا$. وإذا رسمنا الشعاع $اد$ صانعاً زاوية $ادب$ مع المحور فإنه ينعكس في اتجاه $د$ بحيث تكون زاوية $مردب$ مساوية زاوية $ادب$ فيتقابل



(شكل ٢٨)

امتدادا الشعاعين المنعكسين في نقطة $ا$ وتكون هي صورة $ا$ وإذا أسقط العمود $اب$ على المحور تكون نقطة $ب$ صورة $ب$ (ويمكن بيان ذلك كما في الحالة السابقة) وإذا كان $ا$ صورة $ا$ ولايجاد نقطة $ا$ يمكن رسم الشعاع $اح$ موازياً للمحور. فهو ينعكس في اتجاه $ط$ بحيث يمر امتداد $ط$ بالبؤرة $هـ$ أو رسم الشعاع $اي$ بحيث يمر امتداده بالبؤرة $هـ$ فهو ينعكس في استقامة $ي$ $ك$ موازياً للمحور فتكون نقطة تقابل امتدادى هذين الشعاعين المنعكسين أو امتداد أحدهما

وامتداد أحد الشعاعين المنعكسين السابقين هي نقطة a وتكون هي صورة a وسنبين فيما يأتي أن امتدادات جميع هذه الأشعة المنعكسة تتقابل في نقطة واحدة هي a ويتضح من الشكل أن الصورة تقديرية معتدلة مصغرة

٣٦ — إيجاد نسبة طول الصورة الى طول الجسم — التكبير

نسبة طول الصورة الى طول الجسم أو ارتفاع الصورة الى ارتفاع الجسم أو أي بعد طولى في الصورة الى البعد الطولى الذى يقابله من الجسم تسمى التكبير وتستخرج هذه النسبة من الطرق الهندسية التى سبق ذكرها لإيجاد الصورة

فاذا راعينا أولاً حالة السطح المقعر ورجعنا الى شكل (٢٧) يتضح من تشابه المثلثين $a_1 b_1 d_1$

$$٦ \text{ ادب أن } \frac{a_1 b_1}{a b} = \frac{e}{e} \dots \dots \dots (١)$$

حيث توضع الإشارة السالبة للدلالة على أن الصورة مقلوبة

$$\text{ويتضح من تشابه المثلثين } a_1 b_1 h_1 \text{ م ح د ه أن } \frac{a_1 b_1}{h_1} = \frac{a b}{h} \text{ ولكن } a b = h د$$

$$\therefore \frac{a_1 b_1}{a b} = \frac{h_1}{h} = \frac{e - u}{u} \dots \dots \dots (٢)$$

حيث يلاحظ أن h_1 يقاس في الاتجاه الموجب h د يقاس في الاتجاه السالب طبقاً للقاعدة التى يعد تبعاً لها الاتجاه المضاد لاتجاه سقوط الضوء موجباً

ويتضح من تشابه المثلثين $a_1 b_1 h_1$ م ح د ه أن

$$\dots \dots \dots (٣) \quad \frac{a_1 b_1}{a b} = \frac{h_1}{h} = \frac{e - u}{u} = \frac{(e - u) - e}{e - u} = \frac{h_1}{h} = \frac{a_1 b_1}{a b}$$

ويتضح من تشابه المثلثين $a_1 b_1 h_1$ م ح د ه أن

$$\frac{a_1 b_1}{a b} = \frac{h_1}{h} \text{ ولكن } a b = h د$$

$$(٤) \dots\dots\dots \frac{u}{u - e} = \frac{u -}{u - e} = \frac{hd}{hb} = \frac{ab}{ab} \dots\dots\dots$$

واذن يكون التكبير مساوياً أحد المقادير الأربعة المذكورة حيث يكون المقدار الأول دالا على التكبير بالنسبة إلى بعد الجسم وبعد الصورة والمقدار الثاني دالا عليه بالنسبة إلى بعد الصورة والبعد البؤرى والمقدار الثالث بالنسبة إلى بعد الجسم وبعد الصورة ونصف القطر والمقدار الرابع بالنسبة إلى بعد الجسم والبعد البؤرى وإذا استبدل في المقدارين (٢) و (٤) بالبعد البؤرى ما يساويه من المعادلة

$$\frac{1}{u} = \frac{1}{v} = \frac{1}{e} + \frac{1}{f}$$

واستبدل في المقدار (٣) بنصف القطر ما يساويه من هذه المعادلة اتضح أن جميع النسب الأربع متساوية وفي هذا دليل على أن الأشعة الأربعة التي حددنا مسيراتها بعد الانعكاس تتقابل فعلا في نقطة واحدة هي f

ويكتفى عادة من هذه النسب الأربع بتذكر النسبة الأولى وهي أن التكبير يساوى $\frac{v}{u}$ فإذا أريد إيجاد التكبير بالنسبة إلى البعد البؤرى وبعد الجسم مثلاً عوضنا بدلاً من e قيمتها بالنسبة إلى هذين المقدارين وهكذا

والنسب المذكورة مستخرجة من الحالة التي تكون فيها الصورة حقيقية . ويمكن إيجاد النسب في حالة الصورة التقديرية إذا كان السطح العاكس مقعراً وكذلك إذا كان محدباً من تشابه المثلثات المقابلة للمثلثات المذكورة هنا ويلاحظ أن النسب في جميع الحالات ترجع إلى صورها المذكورة هنا إذا روعيت قاعدة الإشارات الخاصة ببعد الصورة والبعد البؤرى ونصف قطر التكور في الحالات المختلفة

٣٧- الصور الحادثة بالانعكاس عند السطح الكرى : مواضعها وصفاتها

(أولا) السطح المقعر

يمكن إيجاد موضع الصورة والتكبير بالرجوع الى المعادلات

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

وسنراعى فيما يلى الحالات المختلفة

(١) الجسم على بعد لا نهاية له من السطح

فى هذه الحالة يكون

$$\frac{1}{s} = \frac{1}{\infty}$$

واذن الصورة فى البؤرة وهى حقيقية

(٢) الجسم على بعد أكبر من نصف قطر التكور

$$\infty > s > f$$

$$\therefore \frac{1}{s} < \frac{1}{f} < \frac{1}{s'}$$

$$\therefore \frac{1}{s} > \frac{1}{f} > \frac{1}{s'}$$

$$\therefore s < f < s'$$

واذن الصورة تقع بين البؤرة ومركز التكور وهى حقيقية مصغرة ومقلوبة

(٣) الجسم عند مركز التكور

$$s = f$$

$$\therefore s = s'$$

واذن الصورة تقع عند مركز التكور وهى حقيقية مساوية للجسم ومقلوبة

(٤) الجسم بين المركز والبؤرة

$$s < f$$

$$\begin{aligned} \therefore \frac{1}{n} &> 6 \quad \frac{1}{n} < \frac{1}{2} \\ \therefore \frac{1}{n} &> \frac{1}{2} \quad 6 < \text{صفر} \\ \therefore \frac{1}{n} &< \frac{1}{2} \quad 6 > \infty \end{aligned}$$

واذن الصورة تقع على بعد اكبر من نصف قطر التكور واقل من لانهاية له وهى حقيقية مكبرة ومقلوبة
(٥) الجسم فى البؤرة
فى هذه الحالة

$$\infty = 1, 2$$

واذن الأشعة تنعكس متوازية

(٦) الجسم بين البؤرة والسطح

$$n > 2 \quad \text{أى}$$

$$\therefore \frac{1}{n} < \frac{1}{2}$$

$$\therefore \frac{1}{n} \text{ مقدار سالب وقيمته اصغر من قيمة } \frac{1}{2}$$

$$\therefore 1, 2 \text{ مقدار سالب وقيمته أكبر من قيمة } 2$$

واذن الصورة تقديرية مكبرة ومعتدلة حيث يتضح أن التكبير مقدار موجب نظراً لأن

قيمة 1, 2 سالبة

(ثانياً) السطح المحدب

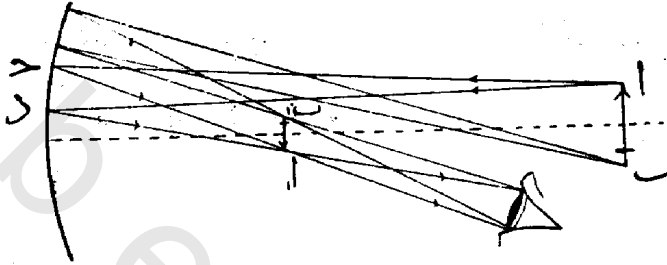
تطبيق المعادلات فى حالة السطح المحدب يتطلب اعتبار كل من n و s مقداراً سالباً واذن

$$\text{أياً كانت قيمة } 2 \text{ فإدامت قيمتها موجبة فإن } \frac{1}{n} \text{ تكون سالبة وأكبر من } \frac{1}{2}$$

واذن الصورة تكون تقديرية مصغرة معتدلة

٣٨ - رسم مسير الأشعة التي ترى العين بها صورة تحدث بالانعكاس عن مرآة كرية

(أولاً) اذا كانت المرآة مقعرة والصورة حقيقية



نفرض أن AB (شكل ٢٩)

الجسم ولنعين الصورة $A'B'$ أما بالرسم وأما بتطبيق القانون فالعين في موضعها المبين بالشكل ترى نقطة A

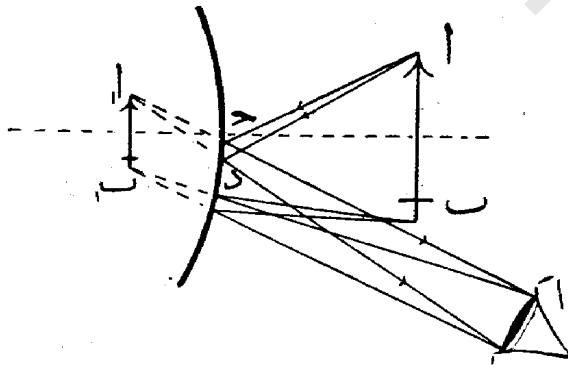
مثلاً من جراء وقوع مخروط الأشعة

(شكل ٢٩)

الذي رأسه عند A عليها فإذا مدت هذه الأشعة حتى تقطع سطح المرآة ثم وصلت نقط تقابلها والسطح بنقطة A تكون المخروط AHD فهذا عند انعكاسه يلم في نقطة A ثم يقع على العين واذن يمثل مسير الأشعة التي ترى العين بها صورة A

وبالمثل يمكن رسم مخروط الأشعة التي ترى العين بها صورة أية نقطة أخرى

(ثانياً) اذا كانت المرآة محدبة



في هذه الحالة تكون الصورة تقديرية

ولنفرض أن AB (شكل ٣٠) الجسم ولنعين

صورته $A'B'$ أما بالرسم وأما بتطبيق القانون

فالعين في موضعها المبين بالشكل ترى الصورة

A بمخروط من الأشعة يكون امتداده ماراً

(شكل ٣٠)

بنقطة A فإذا رسم هذا المخروط تقابل والسطح العاكس في نقط اذا وصلت بنقطة A تكون

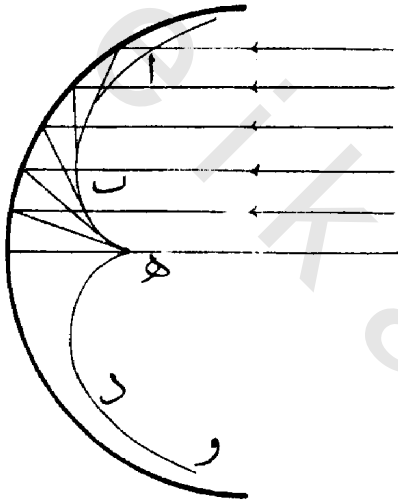
المخروط AHD فهذا عند انعكاسه يقع على العين كأنه صادر من نقطة A فيكون هو مخروط

الأشعة التي ترى العين بها صورة A وبالمثل يمكن رسم مخروط الأشعة التي ترى العين بها صورة أية

نقطة أخرى

٣٩ — غلاف الأشعة المنعكسة عند السطح الكرى

إذا رسم في مستوى الورقة عدة أشعة متوازية تسقط موازية للمحور على سطح كرى عاكس ورسم لكل شعاع منها على حدة الشعاع المنعكس بحيث تكون زاوية السقوط مساوية لزاوية الانعكاس فإن الأشعة المنعكسة عند ما يكون السطح مقعراً أو امتداداتها إذا كان السطح محدباً لا تمر بنقطة واحدة هي البؤرة ولكنها تلمس منحنياً كالمنحنى ا ب هـ د و (شكل ٣١) يكون



(شكل ٣١)

غلافها ويسمى المنحنى الغلافى للأشعة المنعكسة وتكون نقطة هـ هي موضع البؤرة لأنها تكون نقطة تقابل الأشعة المنعكسة في حالة السطح المقعر (أو امتداداتها في حالة السطح المحدب) حين تكون مواضع سقوطها قريبة جداً من القطب كذلك إذا رسمت عدة أشعة صادرة من نقطة على المحور ورسم لكل واحد منها شعاع منعكس فإن الأشعة المنعكسة تلمس هي أو امتداداتها منحنياً شديداً بالغلاف في حالة الأشعة المتوازية ويسمى الغلاف أيضاً

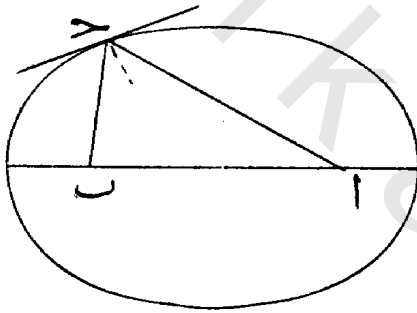
وتكون النقطة المقابلة لنقطة هـ وهي رأس الغلاف هي الصورة الحادثة للنقطة المضيئة إذا كانت مواضع سقوط الأشعة قريبة جداً من القطب

والغلاف المبين بشكل (٣١) هو الغلاف للأشعة المنعكسة الواقعة في مستوى الورقة فإذا أدير الشكل كله حول المحور تكون من نصف الدائرة نصف كرة ومن المنحنى الغلافى سطح يكون غلافاً للأشعة المنعكسة عن السطح الكرى ويسمى السطح الغلافى للأشعة المنعكسة

ويمكن بيان الغلاف عملياً بطريقة سهلة بأن توضع مرآة اسطوانية سطحها العاكس هو المقعر وليست بذات ارتفاع كبير، عمودياً على سطح قطعة من الورق الأبيض أو لوح من الزجاج النصف الشفاف ويصوب على سطحها حزمة من أشعة الشمس فنظراً لتقارب الأشعة المنعكسة بعضها من الآخر بالقرب من الغلاف يرى على سطح الورقة أو سطح اللوح الزجاجى خط منحن من نور يمثل الغلاف

٤٠ - الانعكاس عن مدور القطع الناقص ومدور القطع المكافئ

مدور القطع الناقص هو السطح الحاصل من دوران القطع الناقص حول أحد محوريه أو قطريه ، وللقطع الناقص نقطتان مجموع بعدهما عن أية نقطة على المحيط ثابت وتسميان بؤرتيه ومن الخواص الهندسية للقطع الناقص أنه اذا وصلت بؤرتاه a و b (شكل ٣٢) بأية نقطة مثل c على المحيط كان ميل المستقيمين $a > c$ و $b > c$ على المماس المرسوم عند نقطة c واحدا واذن تكون الزاوية الواقعة بين a و c والعمود على المماس عند c مساوية الزاوية الواقعة بين هذا العمود والمستقيم b فعند دوران القطع الناقص حول المحور ab وتكون مدور القطع



شكل (٣٢)

الناقص يتضح مما سبق أنه اذا كان سطحه الداخلى عاكساً وفرضنا عند احدى بؤرتيه نقطة مضيئة فان أى شعاع يسقط منها على السطح ينعكس ماراً بالبؤرة الثانية واذن تلم بالانعكاس عن السطح جميع الاشعة الصادرة من النقطة المضيئة في البؤرة الثانية

فاذا استعمل جزء من سطح مدور القطع الناقص كسطح عاكس فانه يمتاز عن السطح الكرى المقعر في أنه اذا وضعت نقطة مضيئة عند احدى البؤرتين تكونت بالانعكاس صورة لها عند البؤرة الثانية أياً كان اتساع السطح العاكس (أى دون أن يتوافر الفرض الذى ذهبنا اليه في السطوح الكرية وهوان تكون نقط السقوط قريبة جداً من القطب)

ومن المعلوم أن القطع المكافئ يمكن اعتباره قطعاً ناقصاً قد بعدت احدى بؤرتيه عن الاخرى بعداً لا نهاية له واذن نرى أنه اذا استعمل جزء من سطح مدور القطع المكافئ كسطح مقعر عاكس فان الاشعة الموازية للمحور الواقعة على جميع أجزاء هذا السطح (من غير أن تقتصر على الاشعة التى تكون نقط سقوطها قريبة جداً من القطب) تمر بعد الانعكاس بنقطة واحدة هي البؤرة كما انه اذا وضعت نقطة مضيئة في البؤرة فان جميع الاشعة المنعكسة تكون متوازية وموازية للمحور أياً كان اتساع السطح .