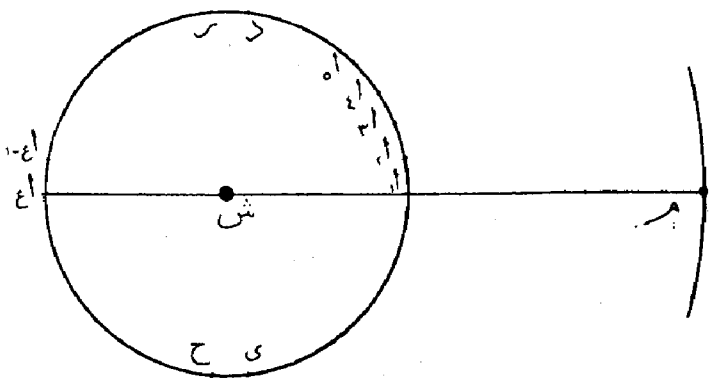
الباب الثامن

سرعة الضوء

١٧٣ — كشف السرعة المحدودة للضوء

استنبط « رومر »(١) فى سنة ١٦٧٦ من أرصاد فلكية كان يعملها بخصوص أقمار المشترى أو توابعه أن الضوء يستغرق فى الانتقال من مكان الى آخر مدة زمنية وان له سرعة محدودة

ولكى يتيسر شرح كيفية استنباط هذه الحقيقة من تلك الأرصاد نفرض أن ش ١ ٢ ٣ ٤ ٥ ٦ ٧ ٨ (شكل ١٤٦) تمثل بالترتيب مواضع الشمس والأرض والمشترى فى وقت ما وللمشترى أقمار أو توابع تدور حوله ، فاذا راعينا أحد هذه الأقمار (وليكن الذى يستغرق فى الدوران حول المشترى مدة قصيرة تكاد تكون يومين) فانه يحتجب عن الارض واذن يرى مخسوفاً كلما دخل منطقة



(شكل ١٤٦)

ظل المشترى فاذا فرضنا أن هذا القمر يستغرق فى الدوران حول المشترى دورة كاملة مدة زمنية ثابتة نرمز لها بالحرف ن نرى انه لو كانت الأرض ثابتة فى مكانها عند ١ وكان المشترى ثابتاً عند م فان البرهة الزمنية التى تمضى بين رؤية خسوف هذا القمر مرة و رؤيته مرة أخرى تكون ن وتكون هذه المدة ثابتة ولكن يلاحظ انه اذا كان الضوء ينتقل بسرعة محدودة فان الخسوف فى كل مرة لا يراه الراصد على سطح الأرض آن حدوثه بالضبط بل يراه بعد حدوثه بمدة من الزمن هى التى

---

(١) Römer

يستغرقها الضوء فى الانتقال من مـ الى ا١

غير أن الأرض والمشترى متحركان كل فى فلكه حول الشمس ولكن المدة التى يستغرقها المشترى فى الدوران حول الشمس أطول كثيراً من المدة التى تستغرقها الأرض فى الدوران حولها فاذا فرضنا أن الدائرة التى نصف قطرها ش ا١ تمثل بالتقريب فلك الأرض حول الشمس وفرضنا لسهولة الشرح انه عند تحرك الأرض فى فلكها حول الشمس من ا١ الى ا٢ الى ا٣ الخ يكاد المشترى يبقى مكانه لايبرحه وفرضنا أن الخسوف رؤى والأرض عند ا١ ثم رؤى المرة التالية وهى عند ا٢ فان المدة الزمنية التى تمضى بين رؤية الخسوف الأول و بين رؤية الخسوف الثانى لا تساوى ٢ (وهى المدة التى تمضى بين حدوث الخسوف الاول و بين حدوث الخسوف الثانى) لأن الأرض تكون قد بعدت فى أثناء الفترة الفاصلة بين الرؤيتين عن المشترى بمقدار (مـ ا٢ — مـ ا١) واذن تكون تلك المدة أكبر قليلا من ٢

فاذا رمزنا لسرعة الضوء بالحرف ص تكون

المدة بين رؤية الخسوف الأول وبين رؤية الخسوف الثانى $= ٢ + \frac{مـ ا_٢ - مـ ا_١}{ص}$

وبالمثل « « « الثانى « « « الثالث $= ٢_٢ + \frac{مـ ا_٣ - مـ ا_٢}{ص}$

وهكذا

فاذا رمزنا بالحرف ع لعدد مرات الخسوف فى خلال نصف عام أى فى اثناء المدة التى تستغرقها الأرض فى الدوران حول نصف الدائرة تكون

المدة بين رؤية الخسوف الذى قبل الأخير رأساً وبين رؤية الأخير $= ٢ + \frac{مـ ا_ع - مـ ا_{ع-١}}{ص}$

فاذا جمعنا هذه المدات كان الزمن الذى يمضى بين رؤية الخسوف الأول والارض عند ا١ وبين رؤية الخسوف الأخير والارض عند اع مساوياً

$$ع\ ٢ + \frac{مـ ا_ع - مـ ا_١}{ص}$$

وبالرمز لنصف قطر فلك الأرض بالرمز س كان هذا الزمن مساوياً

$$\frac{س^{٢}}{ص} + ن ع$$

وعند عودة الأرض من ا إلى ا١ حول النصف الثانى من فلكها فان المدة التى تمضى بين رؤية الخسوف مرة ورؤيته مرة أخرى تكون أقل من ن ع ويمكن كما سبق بيان أن الزمن الذى يمضى بين رؤية أول خسوف فى النصف الثانى من السنة حيث تكون الارض عند ا١ وآخر خسوف حيث تصل الارض الى ا١ يساوى

$$ن ع - \frac{س^{٢}}{ص}$$

واذن يكون الفرق بين الزمنين مساوياً $\frac{٤ س}{ص}$

فاذا ابتدئ من ا١ والارض أدنى ما تكون الى المشترى وانتهى عند ا٢ والارض أبعد ما تكون منه وقيست المدة الزمنية بين رؤية أول خسوف فى الموضع الاول وبين رؤية آخر خسوف فى الموضع الثانى ثم ابتدئ مرة ثانية من ا٢ والارض أبعد ما تكون من المشترى وانتهى عند ا١ والارض أدنى ما تكون منه وقيست المدة الزمنية بين رؤية أول خسوف ورؤية آخر خسوف فان الفرق بين المدتين يساوى الزمن الذى يستغرقه الضوء فى قطع ضعف قطر فلك الارض حول الشمس

هذا تحليل الفكرة التى استنبط بها « رومر » أن للضوء سرعة محدودة واستطاع بها تقدير سرعته

ويتعين مما سبق أنه اذا ابتدأنا من ا١ فان الفترة التى تمضى بين رؤية الخسوف مرة وبين رؤيته مرة أخرى تأخذ فى الازدياد حتى تبلغ اكبر قيمة بعد ربع عام بالتقريب حيث تكون المسافة التى تبعد بها الارض عن المشترى فى الفترة التى تمضى بين الرؤيتين (وهى المسافة التى تساوى فى الشكل م ر ــ م د) اكبر ما يمكن . ثم تأخذ الفترة المذكورة فى النقص حتى تبلغ قيمتها الاولى وتكون الارض قد بلغت ا٢ وانقضى ربع آخر من العام . ثم تستمر تلك

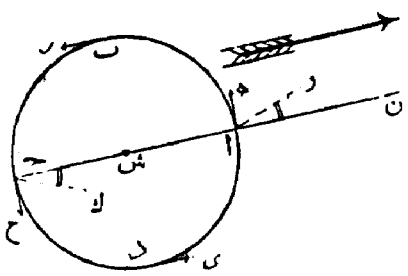
الفترة فى النقص حتى ينقضى ربع ثالث من العام فتبلغ حينئذ أصغر قيمة . ثم تزداد بعد ذلك حتى تبلغ قيمتها الاولى وتكون الارض قد بلغت ا ، ويكون قد انقضى الربع المتمم للعام

ويتضح من هـذا أنه على فرض ثبوت المشترى فان الفترة الزمنية بين خسوفين متتاليين تتغير تغيراً دورياً فى كل عام فى حين ان الفترة الحقيقية بين حدوث الخسوف مرة وحدوثه مرة أخرى هى فرضاً ثابتة وتساوى مدة دوران القمر المرصود حول المشترى . ويلاحظ أنه نظراً لتحرك المشترى فى فلكه فان مدة الدورة فى التغير الدورى الذى يطرأ على الفترة لا يساوى عاماً بالضبط

ويتبين من التحليل السابق كيف يمكن استنباط سرعة الضوء دون أن يكون ذلك متوقفاً على معرفة المدة الحقيقية التى تمضى بين حدوث الخسوف مرة وحدوثه مرة تالية . وقد قدر « رومر » سرعة الضوء من نتائج الارصاد التى عملها بمقدار ١٩٢٠٠٠ ميلا فى الثانية وهى طبقاً للارصاد الحديثة تساوى ١٨٥٠٠٠ ميلا فى الثانية

١٧٤ — ظاهرة الزيغ الضوئى

وقد كشف « برادلى »[1] فى سنة ١٧٢٧ ظاهرة فلكية أخرى عززت القول بأن للضوء سرعة محدودة وأدت الى استنباط قيمة لهـذه السرعة تقرب كثيراً من القيمة المذكورة آنفاً . والظاهرة التى كشفها « برادلى » تعرف بظاهرة « الزيغ الضوئى »[2] وهى تتلخص فى أن المواضع الظاهرية للنجوم الثوابت تتغير تغيرات دورية منتظمة تستغرق الدورة فيها عاماً كاملا



(شكل ١٤٧)

ولشرح هـذه الظاهرة نفرض أن الدائرة فى شكل (١٤٧) تمثل بالتقريب فلك الارض حول الشمس ولنفرض أن الأرض تتحرك فى فلكها هذا فى عكس اتجاه حركة عقربى الساعة بسرعة نرمز لها بالحرف ع ولنفرض لسهولة الشرح أن نجماً من النجوم الثوابت موضعه فى امتداد

---

(١) Bradley

(٢) Aberration of Light

مستوى فلك الأرض (أى فى مستوى الشكل) و يشير اليه السهم المبين فى الشكل . فنظراً للبعد الشاسع بين النجم و بين الأرض فان موقع النجم من الأرض يكون دائماً على امتداد المستقيم الذى يرسم موازياً للسهم . فاذا رسمنا من نقطة ش وهى مركز فلك الأرض المستقيم ش ا ن موازياً للسهم فان موقع النجم من الارض وهى عند ا يكون على امتداد المستقيم ا ب وتكون سرعة الأرض فى فلكها (وهى عند ا) فى اتجاه المماس ا هـ . فاذا رمزنا لسرعة الضوء بالحرف هـ فان الضوء الصادر من النجم يقدم نحو الأرض وهى عند ا فى استقامة ن ا بسرعة هـ وتكون الارض متحركة فى اتجاه ا هـ بسرعة ع . وطبقاً للقاعدة الخاصة بالسرع النسبية[1] المعروفة فى علم الحركة يكون الاتجاه الظاهرى لمجىء الضوء الى الارض أى اتجاهه بالنسبة الى الأرض مائلا مثل و ا على المستقيم ا ن بزاوية اذا رمزنا لها بالحرف هـ يكون ظا هـ = $\frac{ع}{هـ}$

واذا بلغت الأرض فى فلكها نقطة ب بحيث يكون المماس ب ر فى سمت المستقيم المشير الى النجم فان اتجاه سرعة الضوء بالنسبة الى الارض ينطبق على هذا المستقيم . واذا وصلت الارض الى نقطة حـ حيث يكون المماس عند حـ عمودياً على الاتجاه المشير الى الوضع الحقيقى للنجم وتكون الارض متحركة فى اتجاه المماس حـ ح فان اتجاه سرعة الضوء بالنسبة الى الأرض يكون مائلا مثل ك حـ على المستقيم حـ ا بزاوية قدرها هـ أيضاً . واذا وصلت الارض نقطة د حيث يكون المماس د ى فى سمت المستقيم المشير الى النجم فان اتجاه سرعة الضوء بالنسبة الى الارض ينطبق أيضاً على هذا المستقيم

ويتضح من هذا أن الراصد على سطح الأرض وهى عند ا يظهر له الضوء الواصل من النجم كأنه آت على استقامة و ا واذن يظهر له النجم على امتداد المستقيم ا و بحيث يعمل الاتجاه الظاهرى مع الاتجاه الحقيقى زاوية ظلها نسبة سرعة الارض الى سرعة الضوء فاذا أخذت الارض تنتقل من ا نحو ب أخذت هذه الزاوية فى النقص حتى اذا انقضى ربع عام وصلت الارض الى نقطة ب صار الاتجاه الظاهرى منطبقاً على الحقيقى . واستمرار انتقال الارض من ب الى حـ يجعل الاتجاه

---

(١) تنص القاعدة بايجاز على أنه اذا كان جسمان متحركين فان سرعة أحدهما بالنسبة الى الآخر هى محصلة سرعة الأول وسرعة الثانى معكوس اتجاهها فاذا أخذنا من نقطة ا على امتداد هـ ا (شكل ١٤٧) بعدا يتناسب وسرعة الارض ع وأخذنا من ا على امتداد ن ا بعداً يتناسب وسرعة الضوء هـ فان سرعة الضوء بالنسبة الى الارض تكون محصلة السرعتين

الظاهرى يميل على الحقيقى بزاوية فى الجانب الآخر تأخذ فى الازدياد حتى اذا انقضى ربع آخر من العام ووصلت الارض الى حـ بلغت قيمة الزاوية المقدار الاول . واستمرار انتقال الارض من حـ الى د يجعل هذه الزاوية تنقص رويداً رويداً حتى اذا انقضى ربع آخر من العام ووصلت الارض الى د صار الاتجاه الظاهرى منطبقاً على الحقيقى . ثم يأخذ الاتجاه الظاهرى ينحرف بعد ذلك فى الاتجاه المضاد حتى اذا تم الربع الاخير من العام ووصلت الارض الى ا عادت السيرة الاولى وهكذا

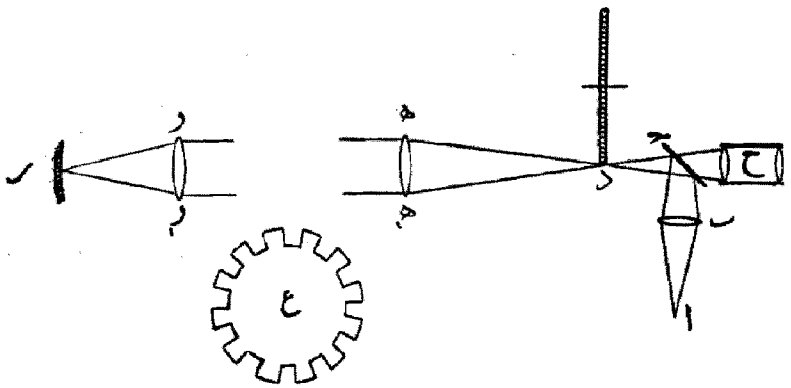
ونتيجة كل هـذا الا يكون الموضع الذى يرى فيه النجم ثابتاً بل يكون متغيراً تغيراً دورياً منتظما تستغرق دورته عاماً كاملا . ويرى النجم كأنه يتذبذب بين نقطتين على جانبى موضعه الحقيقى ينتقل بينهما ذهاباً وإياباً . وتسمى الزاوية ه وهى نصف الزاوية الواقعة بين الاتجاه ا و والاتجاه حـ ك زاوية الزيغ . واذا قيست زاوية ٢ ه وهى المحصورة بين أقصى موضع يزيغ اليه النجم فى أحد الجانبين وبين أقصى موضع يزيغ اليـه فى الجانب الآخر فان ظل نصفها يساوى نسبة سرعة الارض الى سرعة الضوء فاذا عرفت سرعة الارض وقيست زاوية الزيغ أمكن استخراج سرعة الضوء

وقد فرضنا فيما سبق أن النجم موضعه فى مستوى فلك الارض فكان كأنه يتحرك بين نقطتين فى المستوى نفسه على المستقيم الواصل بينهما وموضعه الحقيقى فى منتصف هذا المستقيم أما اذا كان الاتجاه المشير الى النجم عمودياً على مستوى فلك الارض بحيث يقع الضوء عنـد ا ، ب ، حـ ، د شكل (١٤٧) فى اتجاه عمودى على مستوى الشكل فان النجم يظهر كأنه يتحرك حول محيط دائرة مركزها الموضع الحقيقى للنجم . واذا كان الاتجاه المشير الى النجم يميـل على مستوى فلك الارض بزاوية فانه يظهر كأنه يتحرك حول محيط قطع ناقص

١٧٥ — طريقة فيزو لقياس سرعة الضوء

أول طريقة تيسر بهـا قياس سرعة الضوء عمليـاً طريقة « فيزو »[1] وأجراها فى سنة ١٨٤٩ والجهاز مبين تخطيطياً بشكل (١٤٨) فالضوء يصدر من فتحة عند ا فيقع على قطعة

(١) Fizeau



(شكل ١٤٨)

لامة ممثلة فى الشكل بالعدسة ب ثم ينعكس عن سطح لوح من الزجاج ح ويلم عند د حيث تتكون صورة حقيقية للفتحة ا . ثم يقع الضوء بعد ذلك على عدسة لامة ه ه١ بحيث تخرج الاشعة منها متوازية ثم تقع على عدسه لامة و و١ على بعد كبير بلغ فى تجارب فيزو ثمانية كيلو مترات ويلم بوساطة هذه العدسة فى بؤرتها عند ر حيث يوجد سطح كرى عاكس ينعكس الضوء عنه فيعود مرة أخرى الى د حيث تتكون من تجمع الاشعة المنعكسة صورة ثانية ثم ينفذ بعض هذا الضوء خلال اللوح الزجاجى ح فاذا نظر من خلفه فى قطعة عينية مناسبة مثل ح يتيسر رؤية صورة الفتحة التى تحدث عند د من تجمع الاشعة المنعكسة عن المرآة ر ويلاحظ فى تركيب العدسات فى هذا الجهاز أن الشعاع الذى مسيره عند الذهاب الى المرآة البعيدة ه و ر مثلا مسيره عند الاياب ر و١ ه١ فالضوء الذى ينفذ عند الذهاب من أحد شطرى العدسة ه ه١ أو و و١ ينفذ عند الاياب من الشطر الثانى . ويتضح من الشكل أن العدسة ه ه١ والقطعة العينية ح تكونان تلسكوباً تستقبل به الاشعة المنعكسة عند المرآة ر والفتحة ا والقطعة ب تكونان مجمعاً كالمجمع فى السبكترسكوب . كما أن العدسة و و١ والمرآة ر يعملان أيضاً عمل مجمع يعكس الأشعة موجهاً اياها نحو التلسكوب ويكونان ما يسمى « المجمع العاكس »

وبالجهاز عند د عجلة ذات أسنة منتظمة كالمبينة بالجزء المنفصل من الشكل عند ع . مستواها عمودى على محور التلسكوب وحرفها عند د حتى اذا دارت وحل سن من أسنانها عند د حال حاجزاً فى سبيل الضوء فاذا ذهب السن وحلت الفرجة بين السنين سلك الضوء فيها وهكذا

ونظرية هذه الطريقة انه اذا أخذت العجلة تدور مبتدئة من السكون فان الصورة التى

تتكون من تجمع الأشعة المنعكسة تظهر للعين ثم تختفي ثم تظهر وهكذا فاذا زادت سرعة الدوران بالتدريج صغرت الفترة بين رؤية الصورة مرة وبين رؤيتها مرة أخرى حتى اذا صارت هذه الفترة أصغر من مدة دوام استمرار تأثر الشبكية رؤيت الصورة باستمرار ولكن اذا زادت سرعة الدوران بعد ذلك حتى تصير المدة الزمنية التي يستغرقها السن في الانتقال الى مكان الفرجة التي تليه مساوية المدة الزمنية التي يستغرقها الضوء في الانتقال من د الى المرآة ر والعودة الى د فان الضوء الذاهب الى المرآة ر يسلك في سبيله اليها خلال الفرجة ولكنه متى عاد وجد السن حائلا في سبيله الى العين فتختفي الصورة اختفاء كلياً

فاذا عرفت سرعة دوران العجلة وعدد أسنتها والبعد بين د ، ر أمكن تقدير سرعة الضوء . فاذا رمزنا لعدد دورات العجلة في الثانية بالحرف ع ولعدد أسنتها بالحرف ن كان الزمن الذي يستغرقه السن في الانتقال الى مكان الفرجة التي تليه مساوياً $\frac{١}{٢ ع ن}$ وبالرمز للبعد بين د ، ر بالحرف ء ولسرعة الضوء بالحرف ص فان الزمن الذي يستغرقه الضوء في الذهاب والاياب يساوي $\frac{٢ ء}{ص}$

واذن $\frac{١}{٢ ع ن} = \frac{٢ ء}{ص}$

عند اختفاء الصورة كما تبين آنفاً

واذن ص = ٤ ع ن ء

واذا زادت سرعة الدوران بعد ذلك ظهرت الصورة مرت أخرى حتى اذا بلغت سرعة الدوران ضعف سرعتها المذكورة بلغت الصورة غايتها في الوضوح وفي هذه الحالة يسلك الضوء في أثناء ذهابه الى المرآة في الفرجة فاذا عاد وجد الفرجة التي تلي هذه في سبيله فيسلك فيها الى العين . أما اذا بلغت سرعة الدوران ثلاثة أمثال السرعة الأولى فانه عند العودة يجد أمامه السن الأول بعد السن الذي يلي الفرجة التي يسلك فيها في الذهاب فتختفي الصورة مرة أخرى وهكذا

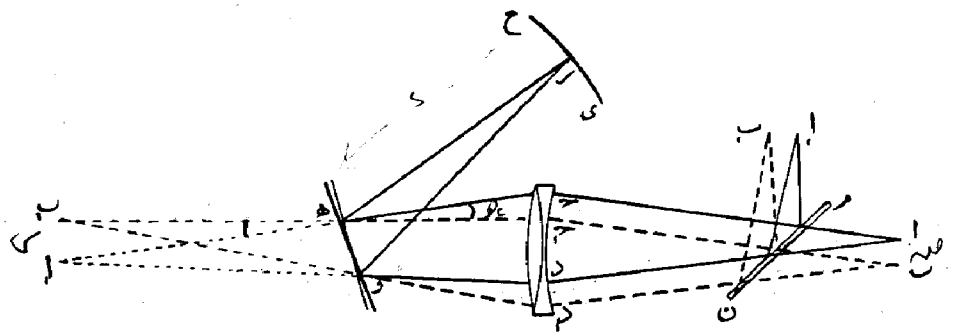
وقد كانت الصعوبة الكبرى في اجراء التجربة أن الضوء من جراء نفوذه في العدسات وانعكاسه عند السطح ح وعند ر تقل شدته فتكون الصورة التي ترى ضئيلة والانعكاس عن سطوح الأسنة وجوانبها عند حلولها في سبيل الضوء يضيء شيئاً ما مجال النظر فتزداد الصورة غموضاً . وقد أعيدت طريقة « فيزو » فكسى سطح العجلة بالسناج وجعلت جوانب أسنتها مائلة بحيث ينعكس

الضوء عنها الى جدار أنبوبة التلسكوب وكسيت هذه من الداخل بالسناج وقد أدخل « كورنو »[1] اصلاحات أخرى فأصلح طريقة قياس سرعة دوران العجلة وجعل البعد الذى يقطعه الضوء ذهاباً وإياباً حوالى ٣٢ كيلومتراً واستطاع أن يزيد سرعة الدوران حتى اختفت الصورة أول مرة ثم مرة ثانيـة وثالثة حتى المرة الثلاثين حيث دارت العجلة بالسرعة التى تخول مرور ١٥ سناً من أسنتها فى الفترة التى يستغرقها الضوء فى الذهاب والاياب

وقد قدر فيزو سرعة الضوء بالمقدار ٣١٥ ٠٠٠ كيلو متراً فى الثانية وقدرها « كورنو » فى الهواء بالمقدار ٣٠٠ ٣٣٠ كيلو متراً فى الثانية

١٧٦ – طريقة فوكول لقياس سرعة الضوء

وأجرى فوكول[2] فى سنة ١٨٥٠ طريقة لقياس سرعة الضوء مبين جهازها تخطيطياً بشكل (١٤٩) فالضوء يصدر من فتحة ا و بوساطة عدسة لامة لا لونية حـ د بلم عند ا, لولا وجود مرآة



(شكل ١٤٩)

مستوية هـ و تعكس الضوء نحو مرآة مقعرة ح ى على بعد من المرآة المستوية يساوى نصف قطر تكور المقعرة فتلم الأشعة فى ر على سطح هذه المرآة فتعكس هذه المرآة الضوء نحو هـ و فاذا كانت هذه ثابتة يعود الضوء فى مسيره الأول نحو العدسة و يتجمع مرة أخرى عند ا فتتكون هنا من جراء تجمع الأشعة المنعكسة صورة يمكن اعتبارها صورة ا, وانما يلاحظ أن الشعاع الذى مسيره ا حـ هـ ر مثلا عند الذهاب يصير مسيره ر و د ا عند الاياب أما اذا دارت المرآة المستوية هـ و بزاوية صغيرة نرمز لها بالحرف ه فى أثناء ذهاب الضوء منها الى المقعرة والرجوع اليها فان الضوء عند عودته

(١) Cornu (٢) Foucault

الى العدسة لا يعود سائراً فى مسيره الاول تماماً . فالشعاع الذى يقع على المرآة المستوية فى وضعها الجديد فى استقامة رهـ ينعكس عنها فى استقامة هـ حـ١ بحيث يصنع المستقيم هـ حـ١ مع هـ حـ (وهو مسير المنعكس لو كانت المرآة ثابتة) زاوية قدرها ٢ هـ . واذن تعتبر الاشعة العائدة الى العدسة كانها صادرة من ب١ وهى صورة ر الحادثة بالانعكاس عن المرآة المستوية فى وضعها الجديد . فتتجمع الأشعة بوساطة العدسة عند ب على بعد منها يساوى بعد ا كما هو مبين بالشكل حيث يمكن اعتبار ب صورة ب١ المتكونة بفعل العدسة

فاذا رمزنا لبعد ا ب عن العدسة بالحرف ا ولبعد العدسة عن المرآة المستوية بالحرف ب ولبعد هذه عن الكرية بالحرف ء ونظراً لأن ا ى١ ، صورتان متبادلتان وكذلك ب ى١ نرى باعتبار ا١ ب١ جسما ى ا ب صورته وبالرمز للبعد بين ا١ ى ب١ بالحرف س وللبعد بين ا ى ب بالحرف ص أن

$$\frac{\text{ص}}{\text{س}} = \frac{\text{ا}}{\text{ب} + \text{ء}}$$

وبما أن زاوية ب١ هـ ا١ = ٢ هـ وهى زاوية صغيرة

يكون س = ٢ هـ ء

$$\therefore \quad \text{ص} = \frac{٢\,\text{هـ ء ا}}{\text{ب} + \text{ء}}$$

واذا رمزنا للسرعة الزاوية للمرآة المستوية الدائرة بالحرف ر فان زاوية هـ هى الزاوية التى تصنعها المرآة فى البرهة التى يستغرقها الضوء فى قطع البعد بينها وبين المقعرة (ذهاباً وايابا) فبالرمز لسرعة الضوء بالحرف ع تكون هذه البرهة مساوية $\frac{٢\,\text{ء}}{\text{ع}}$

$$\therefore \quad \text{هـ} = \frac{٢\,\text{ر ء}}{\text{ع}}$$

$$\therefore \quad \text{ص} = \frac{٤\,\text{ر}^{٢}\,\text{ء}^{٢}\,\text{ا}}{\text{ع}\,(\text{ب} + \text{ء})}$$

فاذا أمكن قياس البعد ص وهو البعد بين الوضع الحقيق للفتحة أو بالاحرى الصورة الحقيقية التى تتكون من تجمع الأشعة المنعكسة عند ثبوت المرآة وبين الصورة التى تتكون من

تجمع الاشعة المنعكسة عند دوران المرآة وعرفت الابعاد الأخرى وقيست السرعة الزاوية ، أمكن من المعادلة الأخيرة استخراج قيمة سرعة الضوء ص

ولكى يتيسر قياس البعد س يوجد لوح من الزجاج من موضوع بحيث يميل على محور العدسة بزاوية ٤٥ فتقع عليه الأشعة العائدة فتنعكس متجمعة عند ا٢ فى حالة ثبوت المرآة المستوية وعند ب٢ فى حالة دورانها . ويكون البعد بين ا٢ ، ب٢ مساوياً المقدار س

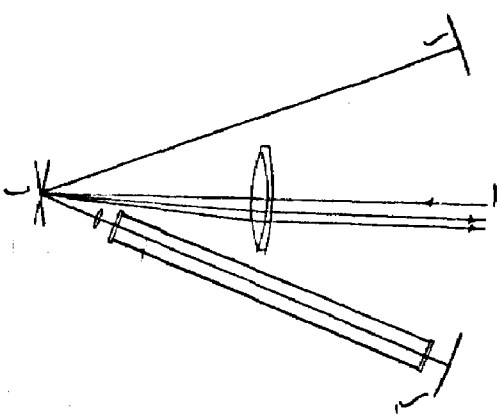
ويلاحظ فى هذه الطريقة انه اذا كانت المرآة المستوية تدور ببطء فان الصورة التى تتكون بوساطة الاشعة العائدة تظهر وتختفى، تظهر ما دامت الاشعة التى تنعكس عنها نحو المقعرة تقع على سطح هذه المرآة وتختفى ما دامت هذه الاشعة تقع خارج سطحها . فاذا زادت سرعة الدوران رؤيت الصورة باستمرار نظراً لاستمرار تأثر الشبكية مدة بعد زوال الضوء ولكن اذا ضوهيت الصورة التى ترى فى هذه الحالة بالصورة التى ترى عند سكون المرآة المستوية فان الاستضاءة فى تلك تكون كسراً من الاستضاءة فى هذه يساوى نسبة مساحة المرآة ح ى الى مساحة الكرة كلها . واذن كلما زاد اتساع المرآة المقعرة زادت الصورة سطوعا

وقد جعل « فوكول » فى تجاربه أشعة الشمس تضىء فتحة مستطيلة رأسية عند ا وجعل عند هذه الفتحة مقياساً دقيقاً يتكون من خطوط مستقيمة مخدوشة على سطح مفضض للوح من الزجاج ويبعد الواحد عن الآخر بمقدار $\frac{١}{١٠}$ المليمتر . فتتكون صورة للمقياس يكون موضعها عند ا٢ حين ثبوت المرآة المستوية وعند ب٢ عند دورانها فيكون البعد س هو ازاحة الصورة من جراء دوران المرآة المستوية ووضع « فوكول » العدسة اللامة بين المرآة المستوية وبين المرآة المقعرة وكان البعد البؤرى للعدسة ١,٩ من المتر والبعد بين المرآتين أربعة أمتار ولكنه استطاع بتعدد الانعكاسات عن سطوح بضعة مرايا مقعرة قبل سقوط الضوء مرة أخرى على سطح المرآة المستوية أن يجعل قيمة ، فى المعادلة التى تقدر منها سرعة الضوء مساوية ٢٠ متراً وكانت الازاحة التى حصل عليها حوالى ٧٠ من المليمتر وكانت قيمة سرعة الضوء التى استخرجها ٢٩٨٠٠٠ كيلو مترا فى الثانية

١٧٧ — سرعة الضوء فى الماء

وطريقة « فوكول » تصلح لقياس سرعة الضوء فى أوساط أخرى غير الهواء فاذا وضعت بين المرآة المستوية وبين المقعرة أنبوبة فيها ماء فان الضوء يسير فى ذهابه وايابه بين المرآتين فى الماء وتكون السرعة المقدرة هى سرعة الضوء فى الماء . ويتسنى بذلك أن يضاهى بين سرعته فى الهواء وسرعته فى الماء ومعرفة أى السرعتين اكبر .

ولكى يتسنى المقابلة بين الازاحة التى تحدث عند مسير الضوء فى الهواء وبين الازاحة التى تحدث عند مسيره فى الماء عند ما تكون سرعة الدوران واحدة فى الحالتين جعل فوكول مرآتين مقعرتين متماثلتين ر ى ر، (شكل ١٥٠) عند مركز تكورهما المرآة المستوية الدائرة وجعل بين احداهما ر، وبين المستوية أنبوبة فيها ماء فتتكون صورة مزاحة من جراء دوران المرآة فى اثناء انتقال الضوء من المرآة ب الى ر الى ب مرة أخرى فى الهواء . وصورة أخرى من جراء دورانها فى أثناء انتقال الضوء من المرآة ب الى ر، الى ب مرة أخرى فى الماء . فاذا كان الوقت الذى يستغرقه الضوء فى الانتقال خلال الماء اكبر فان المرآة تدور فى أثناء ذلك بزاوية اكبر وتكون ازاحة الصورة فى هذه الحالة اكبر وتكون سرعة الضوء فى الماء أصغر وقد عززت تجارب فوكول هذه النتيجة



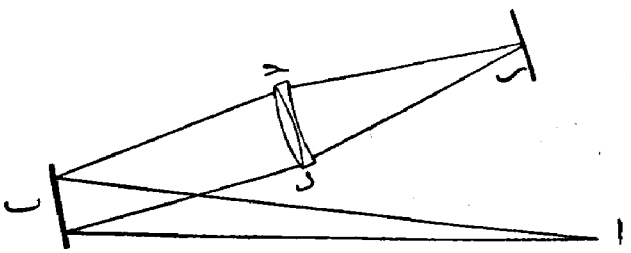
(شكل ١٥٠)

ومما يلاحظ فى هذه الطريقة أنه اذا كانت الاشعة المنعكسة عند المرآة ب تلم عند ر، قبل وضع الانبوبة المملوءة ماء فان تأثير انكسار هذه الأشعة فى الماء يجعلها تلم فى نقطة أبعد من ر، ويتضح هذا بالرجوع الى شكل(٤٧) بصفحة(٧٢) فمنه يرى أن الاشعة الصادرة من نقطة ه بعد نفوذها خلال اللوح الزجاجى أو أى وسط آخر أكبر كثافة ضوئية من الهواء محدود بسطحين متوازيين تخرج على هيئة المخروط الناقص المحدود فى الشكل بالمستقيمين رح ى ك كأنها صادرة من نقطة ه، . كذلك اذا فرضنا أن الاشعة تسقط فى الاتجاه المعكوس على هيئة

حزمة مخروطية ملمومة عند هـ٢ فان تأثير الانكسار فى المادة يجعلها تلم عند هـ . فاذا وضعت المرآة المقعرة ر١ شكل (١٥٠) على بعد من ب يساوى بعد المرآة ر عنها فان الاشعة بعد انكسارها فى الماء لا تكون ملمومة عند ر١ واذن لكى تلم عند ر١ يتطلب ذلك استخدام عدسة لامة ذات بعد بؤرى مناسب كالعدسة المرقومة بالحرف حـ فى الشكل

١٨٧ — تجارب ميكلسن فى قياس سرعة الضوء

وقد أجرى ميكلسن حوالى سنة ١٨٨٠ تجارب لقياس سرعة الضوء فى الهواء وفى بعض الاوساط الاخرى مطبقاً طريقة فوكول وجعل فيها العدسة اللامة حـ د شكل (١٥١) بين المرآة المستوية ب وبين المرآة المقعرة ر وكانت العدسة



(شكل ١٥١)

اللامة التى استخدمها ذات بعدبؤرى طويل بلغ ١٥٠ قدماً وكان قطر سطحها ثمانية بوصات والبعد بين المرآتين حوالى ٢٠٠ قدم فبلغت الازاحة فى تجاربه ١٣٣ مليمتراً وهى فى تجارب فوكول حوالى ٠,٧ من المليمتر . ونظراً لكبر الازاحة لم تكن هناك حاجة الى اللوح الزجاجى مـ ن (شكل ١٤٩)

وأجرى ميكلسن تجارب للمقابلة بين سرعة الضوء الابيض وسرعة الضوء الأحمر فى الهواء فجعل فى أحد نصفى الفتحة المستطيلة لوحاً من الزجاج الاحمر فتكون الصورة الحادثة عند رجوع الضوء نصفها أحمر ونصفها أبيض فاذا كان هناك اختلاف بين السرعتين صارت احداهما مزاحة بالنسبة الى الأخرى . وتجاربه دلت على أنه لا يوجد اختلاف ما بين السرعتين كذلك أجرى تجارب لقياس سرعة الضوء فى ثانى كبريتور الكربون فاتخذ أنبوبة طولها ثلاثة أمتار وجعلها بين المرآة المستوية وبين المرآة المقعرة وقاس سرعة الضوء فيها وقدر نسبة سرعته فى الهواء الى سرعته فى هذه المادة كما أنه استطاع أيضاً قياس سرعة الاضواء ذات الألوان المختلفة فى ثانى كبريتور الكربون

ودلت تجارب ميكلسن على أن سرعة الضوء فى الفراغ تساوى ٢٩٩٨٥٠ كيلو متراً فى الثانية