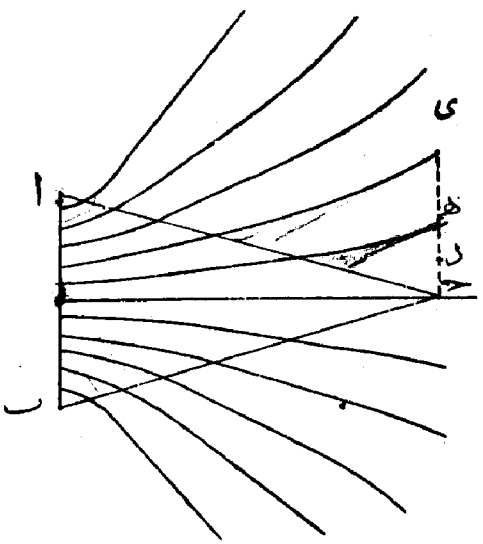
الباب العاشر

التـــداخل

٢١١ — شرح معنى التداخل

اذا فرضنا أن مركزى اضطراب يصدران موجات متشابهة باستمرار وكان المصدران فى طور واحد من الحركة بحيث اذا صدر من أحدهما قمة مثلا يصدر من الآخر فى الوقت نفسه قمة ، واذا صدر قرار يصدر من الآخر قرار فان صدور هذه الموجات تتقاطع فتتلاقى فى بعض أجزاء الوسط المتموج القمة الصادرة من أحد المصدرين والقمة الصادرة من الآخر أو القرار الصادر من أحدهما والقرار الصادر من الآخر فاذا كان اتساع الاهتزازة الحادثة عند موضع التقابل بفعل كل من المصدرين على حدته واحداً تضاعف اتساع الاهتزازة الحاصلة من تلاقى القمتين أو القرارين كذلك يتلاقى فى بعض أجزاء الوسط القمة الصادرة من أحد المصدرين والقرار الصادر من الآخر فاذا كان اتساع الاهتزازة الحادثة عند موضع التقابل بفعل كل من المصدرين على حدته واحداً عدم اتساع الاهتزازة الحاصلة من تلاقى القمة والقرار وعدمت الحركة الاهتزازية . وهذه الظاهرة التى فيها تقوى الموجات بعضها الآخر فى مواضع و يضعف بعضها الآخر فى مواضع أخرى تسمى بوجه عام « ظاهرة التداخل »(١)



(شكل ١٨١)

ولزيادة شرح هذه الظاهرة لنفرض أن ا ، ب (شكل ١٨١) مصدرا اضطراب ولنفرض أن الموجات الصادرة منهما متشابهة متصلة ومقصور

(١) Interference

انتشارها على سطح الورقة وانها تنتشر على هذا السطح بسرعة واحدة فى جميع الجهات . فاذا أخذنا نقطة مثل حـ على امتداد العمود المنصف للمستقيم ا ب وكانت حركة المصدرين فى طور واحد بحيث تحدث من أحدهما قمة مثلا ومن الآخر قمة فى وقت واحد ، فان القمتين الصادرتين من المصدرين فى وقت واحد تصلان الى نقطة حـ فى وقت واحد وكذلك القراران الصادران منهما فى وقت واحد يصلان اليها فى وقت واحد وذلك لأن السرعتين متساويتان والبعدين المقطوعين متساويان أيضاً أو كما يقال ان المسيرين ا حـ ، ب حـ متساويان . فيحدث عند حـ من تداخل قطار الموجات الصادرة من ا وقطار الموجات الصادرة من ب حركة اهتزازية شديدة . واذا أخذنا نقطة أخرى مثل د بحيث يكون ب د ــ ا د مساوياً نصف الطول الموجى فان القمة الصادرة من ب وقت صدور قمة اخرى من ا لاتدرك عند د هذه القمة التى اصدرتها ا وانما تدرك القرار الصادر من ا بعدها رأساً . وكذلك القرار الصادر من ب لا يدرك عند د القرار الذى يصدر فى الوقت نفسه من ا وانما يدرك القمة التى تلى هذا القرار رأساً فتضعف الحركة الاهتزازية الحاصلة عند د بفعل المصدرين ويكون فى هذه الحالة طور الاهتزازة الحادثة عند د بفعل المصدر ب متخلفاً عن طور الاهتزازة الحادثة عندها بفعل المصدر ا بمقدار قائمتين أى ط ويقال ان الموجات الصادرة من ب متخلفة عن الموجات الصادرة من ا بمقدار نصف الطول الموجى أو أنه يوجد فرق فى المسير قدره نصف الطول الموجى بين ب د ، ا د

واذا أخذنا نقطة مثل هـ بحيث يكون (ب هـ ــ ا هـ) مساويا الطول الموجى فان القمة الصادرة من ب لا تدرك عند هـ القمة الصادرة من ا فى وقت صدورها هى من ب وانما تدرك القمة الصادرة بعدها رأساً فتكون نقطة هـ موضع تقابل قمتين وكذلك موضع تقابل قرارين . فيقوى عندها قطار الموجات الصادرة من ا قطار الموجات الصادرة من ب ولكن يكون طور الاهتزازة الحادثة عند هـ بفعل المصدر ب متخلفاً عن طور الاهتزازة الحادثة بفعل المصدر ا بمقدار ٢ ط ويوجد فرق فى المسير قدره الطول الموجى بين ب هـ ، ا هـ

وكذلك اذا أخذت نقطة أخرى وكان فرق المسير مساوياً الطول الموجى ونصفه أو ضعف الطول الموجى ونصفه وهكذا ضعفت عندها الاهتزازة أما اذا كان فرق المسير مساوياً ضعف

الطول الموجى أو ثلاثة أمثاله وهكذا اشتدت عندها الاهتزازة . فاذا راعينا حالة عامة ورمزنا للطول الموجى بالحرف ل وأخذنا نقطة أياً كانت مثل ى وكان ب ى — ا ى = ن ل

حيث تكون ن عدداً كاملا أياً كان قدره فان الاهتزازة عند هـذه النقطة تكون شديدة أما اذا كان

$$ب ى - ا ى = (٢ ن + ١) \frac{ل}{٢}$$

فان الاهتزازة تكون ضعيفة

والنقط التى تكون مثل حـ بعدها عن ا ﻫ ب واحد يكون المحل الهندسى لها هو العمود المنصف للمستقيم ا ب واذن تكون الحركة الاهتزازية فى جميع النقط الواقعة على هذا العمود شديدة والنقط التى تكون مثل هـ الفرق بين بعدها عن ب وبعدها عن ا يساوى الطول الموجى يكون المحل الهندسى لها قطعا زائدا بؤرتاه ا ﻫ ب ، واذن تكون الحركة الاهتزازية فى جميع النقط الواقعة على فرعى هذا القطع الزائد شديدة . كذلك النقط التى تكون مثل د الفرق بين بعدها عن ب وبين بعدها عن ا يساوى نصف الطول الموجى فالمحل الهندسى لها قطع زائد أيضاً يقع بين العمود المنصف للمستقيم ا ب وبين فرعى القطع الزائد الأول ، وهكذا . ويكون توزع المواضع التى تشتد لديها الاهتزازة والمواضع التى تضعف عندها الاهتزازة على هيئة أقطاع زائدة بؤرتاها ا ﻫ ب بكيفية كالمبينة تخطيطياً بشكل (١٨١)

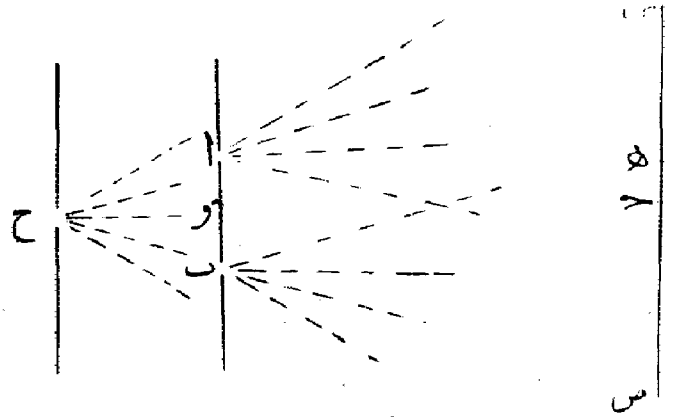
٢١٢ — تجربة ينج لبيان التداخل فى الضوء — وهدب التداخل

ظاهرة التداخل التى شرحناها فيما سبق ظاهرة عامة تحدث فى الحركة الموجية بوجه عام متى توافرت الشروط اللازمة لحدوثها . فاذا كان الضوء حركة موجية وفرضنا أن نقطتى ا ﻫ ب فيما سبق مصدران يصدر منهما ضوء ذو طول موجى معين يكون واحداً فيهما وان المصدرين متشابهان بحيث يحدث فى الوقت الذى يصدر من أحدهما قمة مثلا ان يصدر من الآخر قمة وهكذا فانه ينتظر طبقاً للشرح السابق أن تكون هناك مواضع تشتد فيها الاهتزازة فيشتد فيها الضياء وعندها يكون فرق المسير معدوماً أو مساوياً الطول الموجى أو أضعافه وتكون هناك مواضع أخرى تضعف فيها الاهتزازة فيقل فيها الضياء أو يعدم وعندها يكون فرق المسير مساوياً نصف

الطول الموجى أو عدداً فردياً من أنصاف الطول الموجى

ويمكن بيان حدوث ظاهرة التداخل فى الضوء بتجربة تعرف بتجربة « ينج »[1] وكان « ينج » أول من بين حدوث ظاهرة التداخل فى الضوء

ولتوضيح الفكرة الأساسية فى هذه التجربة نفرض أن نقطة ح (شكل ١٨٢) تمثل ثقباً ضيقاً فى حاجز معتم رأسى وأن هذا الثقب أضيء بضوء ذى لون واحد كضوء لهب الصوديوم يمكن أن نعتبر موجته ذات طول معين فالثقب ح يمكن اعتباره مركز اضطراب تنتشر منه موجات صدورها كرية ومركزها ح. فاذا وضع فى سبيل هذه الموجات حاجز رأسى معتم به ثقبان ا ، ب فى المستوى الأفقى الذى يشمل



(شكل ١٨٢)

الثقب ح وكان الثقبان ا ، ب متشابهين وفى وضعين متماثلين بالنسبة الى نقطة ح كما هو مبين بالشكل فانهما يكونان بمثابة نقطتين على صدر الموجة الكرية التى مركزها ح ويكونان طبقاً لقاعدة هيجنز مصدرى اضطراب فى طور واحد من الحركة فاذا صدرت من أحدهما قمة مثلا تصدر فى الوقت نفسه من الآخر قمة وهكذا فتتداخل الموجات الصادرة من أحدهما والموجات الصادرة من الآخر فى المواضع التى يصل اليها الفريقان فيحدث من جراء هذا أن تشتد الاهتزازة فى مواضع وتضعف فى أخرى فيشتد الضياء فى الأولى ويضعف فى الأخرى

فاذا قصرنا القول مبدئياً على التداخل الحادث فى مستوى الورقة فان المواضع المذكورة تكون المحال الهندسية لها اقطاعاً زائدة بؤرتاها ا ، ب وهيئة توزعها كما هو مبين بشكل (١٨١) حيث يلاحظ الاكتفاء بالجزء الواقع على يمين المستقيم ا ب . ولكن لما كان الضوء الصادر من المصدرين ا ، ب ليس مقصوراً على مستوى الورقة فالمحل الهندسى للنقط التى يكون فرق بعديها عن ا ، ب ثابتاً هو سطح مدور القطع الزائد أى السطح الذى يحدث عن دوران القطع الزائد

---

(١) Young

حول المحور ا ب . فاذا وضع حاجز أبيض مثل س ص شكل (١٨٢) مستواه مواز للحاجز الذى به الثقبان فان الحاجز الابيض يقطع سطوح مدورات الاقطاع الزائدة فى مواضع هى فى الحقيقة أقواس من الاقطاع الزائدة وتمثل هذه الأقواس مواضع الضياء حيث الاهتزازة شديدة أو الظلمة حيث الاهتزازة ضعيفة . فيتكون اذن على الحاجز الأبيض س ص مناطق مضيئة تفصلها ظلمة نسميها « هدب التداخل » (١)

وزيادة فى توضيح صور هذه الهدب نرى أن و ح العمود المنصف للمستقيم الواصل بين الثقبين ا ى ب (شكل ١٨٢) يحدث من دورانه حول ا ب مستوى هو المحل الهندسى للنقط التى فرق بعديها عن ا ى ب معدوم ويقطع مستوى الحاجز س ص هذا المستوى فى خط أفقى عند ح عمودى على مستوى الورقة يكون موضعه موضع ضياء أو هدبة مضيئة نسميها الهدبة الوسطى أو الهدبة المركزية . واذا أخذنا نقطة مثل ه بحيث يكون ب ه — ا ه مساوياً الطول الموجى ل فالمحل الهندسى لمثل هذه النقطة فى مستوى الورقة قطع زائد بؤرتاه ا ى ب فاذا راعينا الفرع الأعلى على حدته وأدير حول المحور ا ب تكون سطح المدور وهذا السطح يقطع مستوى الحاجز س ص فى خط هو فى الحقيقة قوس من القطع الزائد وهو يمثل موضع الهدبة المضيئة التى تلى الهدبة المركزية ح من أحد جانبيها (الجانب الأعلى فى شكل ١٨٢) كذلك اذا روعى الفرع الأسفل من القطع الزائد وأدير هذا الفرع حول المحور ا ب فان سطح المدور يقطع مستوى الحاجز س ص فى خط هو أيضاً قوس من القطع الزائد (وهو والقوس الأول متماثلان بالنسبة لنقطة ح) و يمثل موضع الهدبة المضيئة التى تلى المركزية من جانبها الآخر وهو الجانب الأسفل فى الشكل . وتكون بين الهدبة المركزية و كل من هاتين الهدبتين ظلمة . و بالمثل تتكون الهدب المضيئة الأخرى التى تحف بالهدبة المركزية من جانبيها

وان كانت أشكال هذه الهدب هى أقواس من الاقطاع الزائدة على جانبى الهدبة المركزية المستقيمة ومتماثلة بالنسبة اليها فان الاستضاءة على سطح الحاجز س ص كلما بعدنا فى الاتجاه العمودى على مستوى الورقة تقل فاذا اكتفينا بالأجزاء الشديدة الضياء من الهدب وهى التى لا تمتد على

---

(١) Interference Fringes

مستوى الحاجز س ص فى الاتجاه العمودى على مستوى الورقة الا الى مدى صغير أمكن اغفال تقوسها واعتبارها مستقيمة فتكون الهدب فى هذه الحالة مستقيمة متوازية تحف بالهدبة المركزية من جانبيها

وقد فرضنا فيما سبق أن المصدرين ا ، ب ثقبان ولكن اذا تصورنا أنه قد استبدل بالثقبين فتحتان مستطيلتان ضيقتان رأسيتان (أى عموديتان على مستوى شكل ١٨٢) وكانت الفتحتان تضيئهما فتحة مستطيلة ضيقة رأسية عند ح فان كلا من الفتحتين ا ، ب تكون بمثابة نقط مضيئة متتالية متصلة فتتداخل الموجات الصادرة من أية نقطة من احدى الفتحتين والنقطة التى فى مستواها الافقى من الفتحة الثانية و يحدث من تداخلها هدب رأسية يمكن اعتبارها كما سبق بيانه مستقيمة متوازية . وتتكون من اندماج مجموعات هذه الهدب مجموعة من الهدب المستقيمة المتوازية تكون الهدب المضيئة فيها أشد ضياء وسطوعا

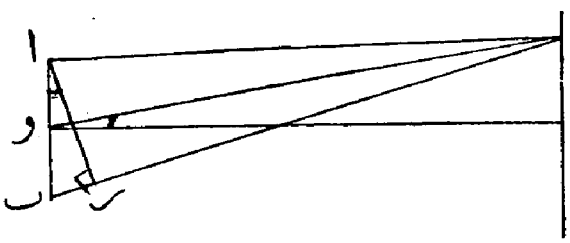
ومن أجل ذلك تستخدم عادة للحصول على هدب التداخل بطريقة « ينج » فتحة مستطيلة ضيقة رأسية عند ح تضاء بلهب الصوديوم وفتحتان ضيقتان موازيتان للاولى وفى وضعين متماثلين بالنسبة اليها عند ا ، ب يكونان المصدرين اللذين يتداخل ضوءاهما و يسميان المصدرين المتداخلين

وقد فرضنا فيما سبق لسهولة الشرح أن الهدب تتكون على حاجز رأسى أبيض غير أن هذه الهدب نظراً لدقتها وقربها بعضها الى الآخر لا يتيسر رؤيتها على الحاجز بالعين المجردة ويستعان عادة لرؤيتها بميكرسكوب صغير أو قطعة عينية مكبرة . ويلاحظ أن وجود الحاجز الأبيض ليس ضرورياً فان العين اذا وضعت فى وضع مناسب بحيث يصل اليها ضوءا الفتحتين ترى الهدب لو لا دقتها وقربها بعضها الى الآخر . ولذلك فالطريقة المتبعة لرؤية الهدب أن ينظر اليها خلال قطعة عينية كقطعة رمزدن أو خلال ميكرسكوب صغير . ومن المعلوم عند استعمال مثل هذين الجهازين أن الصورة التى ترى واضحة مكبرة بوساطته هى صورة الجسم الموضوع على بعد معين بالنسبة الى الجهاز واذا رسم على هذا البعد مستوى عمودى على محور الجهاز فانه يسمى عادة « المستوى البؤرى » للجهاز . فالقطعة العينية مثلا ترى بوساطتها صورة الأجسام واضحة مكبرة اذا كانت هذه الأجسام عند المستوى البؤرى للقطعة . فاذا وضعت

القطعة العينية بحيث يكون محورها على امتداد المستقيم وح (شكل ١٨٢) أمكن رؤية صورة مكبرة للهدب التي يكون موضعها الحقيقي عند المستوى البؤرى للقطعة وكلما بعدت القطعة العينية عن الفتحتين ا ى ب زادت الهدب التي موضعها الحقيقي عند مستواها البؤرى بعداً بعضها عن الآخر وكانت صورتها أكبر

٢١٣ — تقدير البعد بين الهدبة والأخرى

نفرض أن نقطة ح (شكل ١٨٣) تمثل موضع الهدبة المركزية ونقطة ه تمثل موضع احدى الهدب المضيئة الأخرى ولتكن نقطة و منتصف ا ب (البعد بين المصدرين المتداخلين) نصل ا ه ى ب ه ى و ه ى و ح ونركز عند ه ونرسم قوساً من دائرة نصف قطرها ه ا يقطع ه ب فى نقطة ر فاذا فرضنا أن البعد ر ب صغير جداً بالنسبة الى البعد



(شكل ١٨٣)

بين المصدرين المتداخلين ا ى ب أمكن اعتبار القوس ا ر خطاً مستقيماً عمودياً على ب ه وعمودياً أيضاً على و ه واذن تكون

زاوية ب ا ر = زاوية ه و ح

وبما أن الهدب واقعة فى مستوى واحد موازٍ للمستقيم ا ب يكون

$$\frac{\text{ب ر}}{\text{ا ب}} = \frac{\text{ه ح}}{\text{ه و}} \qquad \text{أو} = \frac{\text{ه ح}}{\text{ح و}}$$

فاذا رمزنا للبعد ا ب بين المصدرين المتداخلين بالحرف ا وللبعد ح و بين موضع تكون الهدب وبين المصدرين بالحرف ع وللبعد ه ح بين الهدبة التي نراعيها وبين الهدبة المركزية بالحرف و فان

$$\text{ب ر} = \frac{\text{ا و}}{\text{ع}}$$

فاذا كانت ه موضع الهدبة المضيئة الأولى التي تلى المركزية ورمزنا للطول الموجى بالحرف

ل يكون ب ر مساوياً ل واذن البعد بين الهدبة المضيئة الأولى وبين المركزية يكون $\frac{ع}{ا}$ ل واذا كانت هـ موضع الهدبة المضيئة الثانية يكون ب ر مساوياً ٢ ل ، واذن البعد بين الهدبة المضيئة الثانية وبين المركزية يكون $\frac{ع}{ا} \times ٢$ ل وهكذا فاذا راعينا الحالة العامة واعتبرنا أن نقطة هـ موضع الهدبة المضيئة النونية يكون ب ر مساوياً ن ل واذن بعد هذه الهدبة المضيئة النونية عن الهدبة المركزية يكون

$$ء = \frac{ع}{ا} ن ل$$

ويلاحظ انه نظراً لصغر البعد ب ر بالنسبة الى البعد بين المصدرين وهو الفرض المتوقف عليه التقدير السابق تكون هـذه الهدب متساوية الأبعاد بعضها عن الآخر ويكون البعد بين هدبتين متتاليتين منهـا مساوياً $\frac{ع}{ا}$ ل ويدل هـذا المقدار على أنه كلما صغر البعد بين المصدرين المتداخلين كانت الهدب المضيئة أبعد بعضها عن الآخر فيسهل رؤيتها . ومن أجل هـذا يجعل المصدران المتداخلان فى تجارب التداخل بوجه عام متقاربين ما أمكن

وبالمثل يمكن اثبـات أن البعد بين موضعى ظلامين متتاليين يساوى $\frac{ع}{ا}$ ل . فاذا اعتبرنا الهدبة المضيئة نهايتهـا من أحد الجانبين موضع ظلام ومن الآخر موضع ظلام يكون المقدار $\frac{ع}{ا}$ ل هو عرض الهدبة المضيئة الواحدة

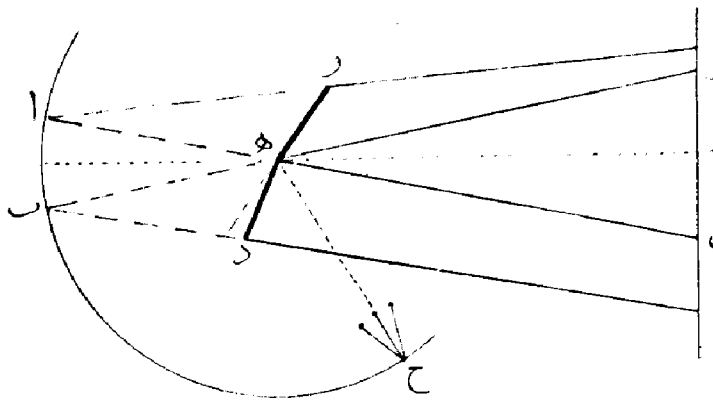
ويتضح مما سبق أنه اذا قيس البعد بين الفتحتين وهو المقدار ا وقيس البعد بين الفتحتين وبين موضع تكون الهدب وهو المقدار ع وقيس متوسط البعد بين هدبتين مضيئتين أو متوسط عرض الهدبة المضيئة كان هذا مساوياً $\frac{ع}{ا}$ ل واذن امكن استخراج قيمة ل وهو الطول الموجى للضوء

٢١٤ — تجربة المرآة الثنائية

أجرى « فرسنل » [1] تجارب عدة لبيان حدوث التداخل فى الضوء منهـا تجربة « المرآة الثنائية »[2]. ونظرية هذه التجربة موضحة بشكل (١٨٤) حيث تمثل نقطة ح فتحة مستطيلة ضيقة رأسية عمودية على مستوى الورقة . تضاء بضوء ذى لون واحد أو ذى طول موجى معين

(١) Fresnel (٢) Bi-Mirror Experiment

كضوء لهب الصوديوم . ويمثل د هـ ى هـ و السطحين العاكسين لمرآتين مستويتين تتقابلان عند هـ والزاوية بين سطحيهما العاكسين منفرجة كبيرة تنقص عن القائمتين بمقدار صغير .



(شكل ١٨٤)

وسطحاهما العاكسان رأسيان عموديان على مستوى الورقة .

فالضوء الواقع من المصدر ح على المرآة د هـ ينعكس عن سطحها كأنه صادر من ب والضوء الواقع منه على المرآة هـ و ينعكس عن سطحها كأنه صادر من ا حيث يكون ا ى ب صورتين تقديريتين للمصدر ح . والتداخل فى هذه التجربة يحدث بين الضوء المنعكس عند احدى المرآتين والضوء المنعكس عند الأخرى فى المنطقة التى يصل اليها الضوءان وهى المحدودة فى الشكل بالمستقيمين هـ ر ، هـ ى ويمكن اعتبار ا ى ب المصدرين المتداخلين ويكونان فى هذه الحالة مصدرين تقديريين . فاذا رمز كما فى تجربة « ينج » للبعد بين المصدرين المتداخلين بالحرف ا وللبعد بين الهدبة المضيئة النونية والهدبة المركزية بالحرف ء وللبعد بين موضع تكون الهدب وبين المصدرين المتداخلين بالحرف ع يكون

$$ء = \frac{ع}{ا} \, ن$$

حيث يكون ن الطول الموجى

واذا رمز للبعد بين موضع الهدب وبين نقطة هـ بالحرف س وللبعد بين موضع الفتحة ح وبين هـ بالحرف س فنظراً لأن ح ى ب ى ا تقع على محيط دائرة مركزها هـ وأن ا ى ب متقاربان يكون

$$ع = س + س$$

وبالرمز للزاوية الحادة الصغيرة الواقعة بين سطحى المرآتين بالحرف ، فان

$$\text{زاوية } ر هـ ى = ٢ ، = \text{زاوية } ا هـ ب$$

وبما أن ، صغيرة تكون زاوية ا هـ ب صغيرة وتكون مساوية $\frac{ا}{ل}$

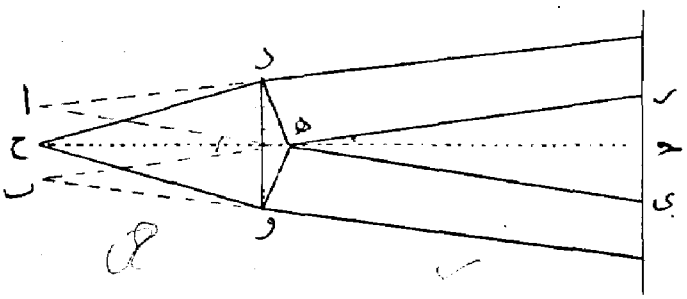
$$\therefore \quad \frac{1}{م} = ٢ \, ر \, م \qquad \therefore \quad ١ = ٢ \, ر \, م$$

واذن $ر = \frac{م + م}{٢ \, م} \, ن \, ل$

فاذا قيست $و \, ، \, م \, ، \, م$ وعرفت قيمة $ر$ أمكن تقدير $ل$

٢١٥ — تجربة المنشور الثنائى

ومن التجارب التى أجراها « فرسنل » تجربة تعرف بتجربة « المنشور الثنائى » (١) ونظريتها موضحة بشكل (١٨٥) حيث تمثل ح فتحة مستطيلة ضيقة رأسية عمودية على مستوى الورقة تضاء بضوء ذى لون واحد (لهب الصوديوم) ويمثل د هـ و منشوراً موضوعاً عمودياً على مستوى الورقة وزاويتاه د ، و صغيرتان ومتساويتان ويمكن اعتباره



(شكل ١٨٥)

كأنه مكون من منشورين متماثلين زاويتاهما د ، و صغيرتان

فالضوء الصادر من الفتحة ح عند نفوذه فى المنشور ينحرف بحيث يمكن اعتبار النافذ خلال النصف الذى زاويته د كأنه صادر من ا والذى ينفذ خلال النصف الذى زاويته و كأنه صادر من ب وتكون ا ، ب صورتين تقديريتين نعتبرهما المصدرين المتداخلين . ويحدث التداخل فى المنطقة المحدودة فى الشكل بالمستقيمين هـ ر ، هـ ى

فاذا رمز لبعد موضع الهدب عن المنشور بالحرف س ولبعد المنشور عن الفتحة ح بالحرف م واستعملت الرموز فى البند السابق للمدلولات نفسها يكون

$$ء = \frac{م + م}{١} \, ن \, ل$$

ولايجاد قيمة ١ نرمز لمعامل انكسار الضوء فى مادة المنشور بالحرف م ولكل من الزاويتين د ، و بالحرف ر فتكون النهاية الصغرى لزاوية الانحراف خلال المنشور هى

$$ن = (م - ١) \, ر$$

---

(١) Bi—Prism Experiment

وبما أن ن صغيرة أمكن اعتبارها مساوية $\frac{\text{ا ح}}{\text{ص}}$ واذن يكون

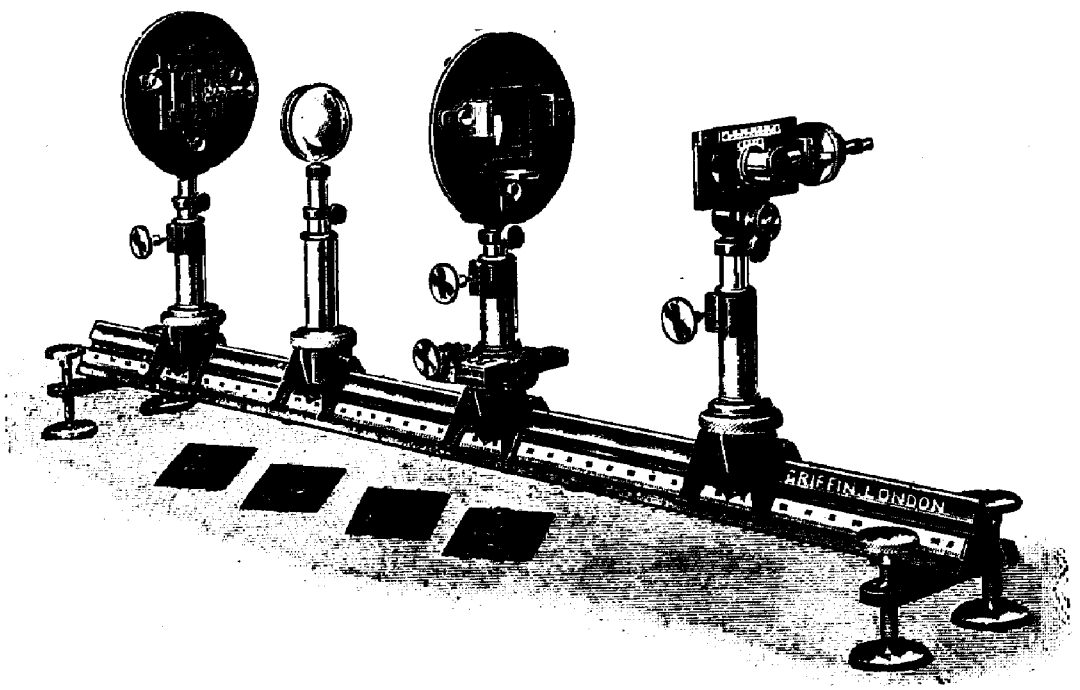
$$\text{ا} = ٢ \text{ ن ص} = ٢ \text{ و ص} (م - ١)$$

$$\therefore \text{و} = \frac{\text{س} + \text{ص}}{٢ \text{ و ص} (م - ١)} \text{ ن ل}$$

فاذا عرفت المقادير و ، س ، ص ، و ، م أمكن ايجاد قيمة ل

٢١٦ — ايجاد الطول الموجى لضوء لهب الصوديوم بوساطة المنشور الثنائى

تجربة المنشور الثنائى الواردة نظريتها فيما سبق تطبق كثيراً كتجربة عملية يجريها الطلبة لتعيين الطول الموجى لضوء لهب الصوديوم . وتستخدم لهذه الغاية لوحة ابصار كالمبينة بشكل (١٨٦)



(شكل ١٨٦)

وهى تتركب من قضيب متين من الحديد يستعمل كقاعدة ويرتكز على مسامير محواة يمكن بوساطتها تسويته والقضيب مدرج ويزلق عليه ثلاثة قوائم رأسية بكل واحد منها ورنية تتحرك على المقياس المدرج ويحمل أحد هذه القوائم فتحة رأسية مستطيلة ضيقة ويحمل ثانيها المنشور الثنائى ويحمل ثالثها قطعة عينية (قطعة رمزدن)[١] والفتحة يمكن توسيعها أو تضييقها بوساطة مسمار

(١) وبالشكل قائم رابع يحمل عدسة لامة سيأتى ذكر فائدتها فيما بعد

لولبي معد لذلك وهي وان كانت موضوعة على القائم بحيث تكون رأسية على قدر الامكان فان هناك مسماراً لولبياً آخر يمكن بوساطته امالتها عند الحاجة . و لذلك المنشور الثنائي وان كان موضوعاً على القائم بحيث تكون حروفه د ، ه ، و (شكل ١٨٥) رأسية على قدر الامكان فان له هو أيضاً مسماراً لولبياً يمكن بوساطته امالته على حسب الارادة . والقطعة العينية موضوعة بحيث يكون محورها موازياً للقضيبين ولها خطان متقاطعان أو خط رأسي واحد في مستواها البؤري وهي متصلة بنهاية مسمار لولبي دقيق مدرج يمكن بوساطته ازاحتها في اتجاه أفقي عمودي على محورها و يمكن قياس قدر هذه الازاحة بالدقة . وقد يكون هناك مسمار لولبي يحرك القائم الذي يحمل العينية في اتجاه عمودي على محورها

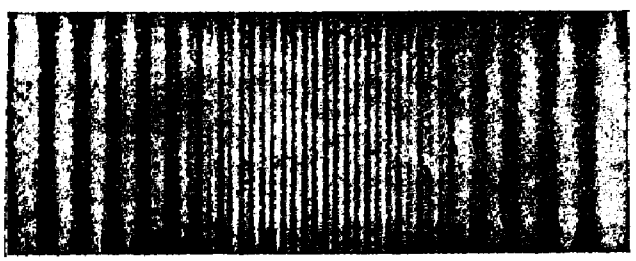
ونظراً لأن التجربة تتطلب شيئاً من العناية والدقة في تهيئة جهازها وتتبع الخطوات المتتالية في اجرائها نرى أن نسهب هنا في وصفها من الوجهة العملية

(أولا) الحصول على الهدب

تهيأ لوحة الابصار بحيث يكون القائم الحامل للفتحة عند أحد طرفيها و يليه القائم الحامل للمنشور و يلي هذا القائم الحامل للعينية ، ونجعل الفتحة والحرف ه (شكل ١٨٥) للمنشور رأسيين على قدر الامكان و يهيأ محور العينية بحيث يكون منطبقاً على قدر الامكان على الخط الأفقي المار بمنتصف الحرف ه للمنشور ومنتصف الفتحة . ثم تضاء الفتحة بلهب الصوديوم و يستحسن أن يكون ضوءه شديداً وقد يكون من المناسب تكثيف الضوء على الفتحة بوساطة عدسة لامة مناسبة ثم يقرب المنشور الثنائي الى الفتحة غاية ما يمكن ، و ينظر بالعين المجردة من الجانب الآخر للمنشور نحو الفتحة للتأكد من رؤية الصورتين التقديريتين ا ، ب (شكل ١٨٥) على جانبي الحرف ه . ثم تضيق الفتحة وتمال هي أو المنشور أو كلاهما حتى ترى الصورتان كخطين رأسيين مضيئين موازيين للحرف المذكور من المنشور وعلى جانبيه . وتقرب بعد ذلك العينية من المنشور حتى تدنو منه غاية ما يمكن و ينظر خلالها فترى الهدب . و يشبه ما يرى منطقة عريضة رأسية من الضوء يتخللها خطوط رأسية سوداء متساوية البعد . وتزداد هذه الخطوط دقة ووضوحاً بامالة الفتحة أو المنشور و بتعديل في اتساع الفتحة . و بعد هذا تبعد العينية عن المنشور مع الاستمرار

فى النظر الى الهدب . فاذا كان المنشور فى وضع متماثل تماماً بالنسبة الى الفتحة (بحيث يكون ح ه شكل ١٨٥ عمودياً على و د) وكان محور العينية منطبقاً على امتداد ح ه فان الهدب تكبر دون أن تتحول من مكانها فى مجال النظر ، ويتطلب وضوحها وجلاؤها أن يعدل قليلا ميل الفتحة أو المنشور ويعدل أيضاً اتساع الفتحة فى أثناء ابعاد العينية . فاذا بلغ بعد العينية عن المنشور خمسين أو ستين سنتمتراً وكانت الغرفة التى تجرى فيها التجربة مظلمة ظهرت الهدب عريضة واضحة (شكل ١٨٧) و يتيسر قياس متوسط البعد بين هدبتين (أو عرض الهدبة الواحدة منها) بوساطة اللولب المدرج المتصل بالعينية

(ثانياً) ايجاد البعد بين المصدرين المتداخلين



(شكل ١٨٧)

والمعادلة التى يقدر منها الطول الموجى تشمل البعد بين المصدرين المتداخلين . ويتبين فى البند السابق امكان الاستعاضة عن هذا البعد بالمقدار ٢ م و (م — ١) ولكن هذا المقدار يشمل مقادير قد لا يكون من السهل الحصول عليها بالدقة ، ولذلك تتبع فى العادة طريقة اخرى يستعان فيها بعدسة لامة تخول لنا ايجاد البعد بين المصدرين المتداخلين

ونظرية هذه الطريقة تتلخص فى أنه اذا وضعت عدسة لامة بين جسم وحاجز وكان البعد بينهما اكبر من أربعة أمثال بعدها البؤرى فان العدسة فى وضع معين تكوّن صورة مصغرة للجسم على الحاجز وفى وضع آخر تكوّن صورة مكبرة عليه . فاذا رمزنا فى الحالة الاولى لبعد العدسة عن الجسم بالرمز $ع_1$ ولبعدها عن الصورة بالرمز $ع_2$ فان بعد العدسة عن الجسم فى الحالة الثانية يكون $ع_2$ وبعدها عن الصورة يكون $ع_1$ فاذا رمزنا لطول الجسم بالحرف ا ولطول الصورة فى الحالة الأولى بالرمز $ا_1$ ولطول الصورة فى الحالة الثانية بالرمز $ا_2$ فان

$$\frac{ا_1}{ا} = \frac{ع_2}{ع_1}$$

$$\frac{ع_{١}}{ع_{٢}} = \frac{ا_{٢}}{ا_{١}} \quad \text{و}$$

$$\therefore \quad \overline{ا_{١}ا_{٢}} = ا \quad \text{و}$$

فاذا ما تم الحصول على الهدب بالكيفية المتقدمة يؤتى بعدسة لامة ذات بعد بؤرى مناسب وتوضع بين المنشور وبين العينية . فاذا كان البعد بين الفتحة أو بالأحرى بين موضع صورتيها ا و ب وبين المستوى البؤرى للعينية أكبر من أربعة أمثال البعد البؤرى للعدسة أمكن بوساطة هذه العدسة أن نحصل عند المستوى البؤرى للعينية على صورة مصغرة للفتحتين وامكن فى وضع آخر للعدسة ان نحصل عند المستوى البؤرى للعينية على صورة مكبرة للفتحتين، وتكون العدسة اللامة فى الحالة الأولى أقرب الى العينية وفى الثانية أقرب الى الفتحة . فاذا كان البعد بين العينية وبين المنشور يخول ذلك ، وهيئت العدسة اللامة حتى ترى خلال العينية الصورة المصغرة للفتحتين وقيس البعد بينهما وليكن $ا_{١}$ ثم ازيحت العدسة حتى ترى خلال العينية الصورة المكبرة للفتحتين وقيس البعد بينهما وليكن $ا_{٢}$ فان البعد الحقيقى بين الفتحتين يكون مساوياً $\overline{ا_{١}ا_{٢}}$

ومما تلزم العناية به عند تطبيق هذه الطريقة التأكد قبل الابتداء فى قياس متوسط البعد بين هدبتين، من أن البعد بين العينية وبين المنشور يخول للعدسة أن تأخذ وضعيها المذكورين بينهما . ويستحسن متى حصل الطالب على الهدب أن يسعى لايجاد البعد بين المصدرين المتداخلين بهذه الطريقة قبل الابتداء فى قياس متوسط البعد بين الهدبتين . ومما تلزم العناية به أن تظل الفتحة والمنشور والعينية فى مواضعها ثابتة حتى تتم جميع المقاييس . ويجب اذا لزم تعديل ما فى موضع أحدها أن تعاد المقاييس من أولها

(ثالثاً) تصحيح قراءتى الورنيتين عند قياس البعد بين الهدب وبين المصدرين

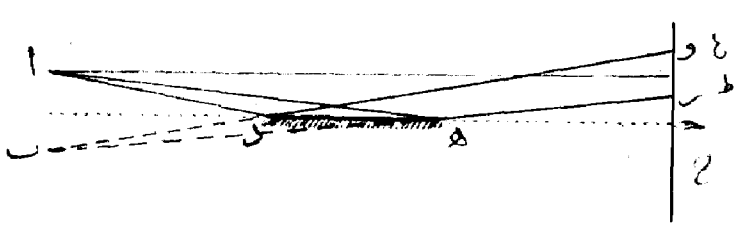
ولايجاد البعد بين موضع الهدب وبين المصدرين المتداخلين يعين موضع الورنية المتصلة بقاعدة القائم الذى يحمل العينية ، على المقياس المدرج . ويعين موضع الورنية المتصلة بقاعدة القائم الذى يحمل الفتحة على هذا المقياس . والبعد بين الموضعين لا يكون بوجه عام مساوياً

البعد بين المستوى البؤرى للعينية (حيث موضع الهدب) وبين الفتحة لأن مبدأ تدريج الورنية الأولى لا يكون عادة منطبقاً على امتداد المستوى البؤرى للعينية كما أن مبدأ تدريج الورنية الثانية لا يكون منطبقاً على المستوى الرأسى الذى تقع فيه الفتحة . ولتصحيح الخطأ الذى ينجم عن هذا يؤتى بساق معدنية مستقيمة مدببة الطرفين طولها حوالى ١٥ سنتمتراً مثلا ويقاس طولها بالدقة بوساطة ميكرسكوب متحرك أو مايقوم مقامه . ثم يزال المنشور الثنائى من موضعه على لوحة الابصار وتثبت الساق على حامل بحيث تكون أفقية موازية للقضيب المدرج وأحد طرفيها ملامس لمستوى الفتحة . وتقرب العينية من الطرف الآخر للساق حتى ترى بوساطتها صورة هذا الطرف واضحة جلية . فى هذا الوضع يكون هذا الطرف عند المستوى البؤرى للعينية ويكون البعد بين هذا المستوى وبين والفتحة مساوياً بالضبط طول الساق . فاذا عين موضعا الورنيتين على المقياس المدرج فالفرق بين البعد المحصور بينهما وبين طول الساق هو الذى يصحح به البعد المقيس . فاذا كان طول الساق أصغر من البعد المحصور بين موضعى الورنيتين فالفرق يطرح واذا كان طولها أكبر فالفرق يضاف

ونظراً لأن طرف الساق عند اجراء هذه العملية الأخيرة تكون عند المستوى البؤرى للعينية وهو المستوى الموجود فيه الخيطان المتعامدان أيضاً فمن اللازم العناية بألا تلمس الساق هذين الخيطين منعاً لاتلافهما .

٢١٧ — تجربة مرآة لويد

ويمكن بيان التداخل والحصول على الهدب بتجربة بسيطة تعرف بتجربة « مرآة لويد »[1] وفى هذه التجربة توضع فتحة مستطيلة ضيقة ا (شكل ١٨٨) موازية لسطح مستوى عاكس د هـ بحيث تكون قريبة جداً منه



(شكل ١٨٨)

(١) Lloyd's Mirror

فالمنطقة المحدودة فى الشكل بالمستقيمين د و ، هـ ر يصل اليها ضوء منعكس عند السطح العاكس ويصل اليها أيضاً ضوء صادر من ا رأساً لا يعانى انعكاساً . ولما كانت الأشعة المنعكسة يمكن اعتبارها صادرة من الصورة التقديرية ب التى تتكون بالانعكاس أمكن اعتبار الضوء الواصل الى المنطقة المذكورة منبعثاً من مصدرين أحدهما ا والآخر ب يكونان بمثابة مصدرين متداخلين ومنعاً لتعدد الانعكاسات يستخدم فى هذه التجربة سطح معدنى عاكس أو يتخذ لوح سميك من الزجاج ينعكس الضوء على أحد وجوهه وتكسى جوانبه ووجهه الآخر بالسناج أو بطلاء أسود قاتم . وللحصول على الهدب يوضع السطح العاكس رأسياً وتوضع فتحة مستطيلة ضيقة تضاء بضوء لهب الصوديوم بحيث تكون موازية للسطح وعلى بعد صغير (كمليمتر أو اثنين) أمام امتداده (أنظر الشكل) ثم ينظر بالقرب من الطرف الآخر للسطح العاكس بحيث ترى العين الفتحة وصورتها و يعدل السطح العاكس قليلا حتى تكون الفتحة وصورتها متوازيتين ومتقاربتين فاذا أتى بعد ذلك بميكرسكوب صغير أو قطعة عينية ونظر خلالها الى الفتحة وصورتها تسنى رؤية الهدب

ولتجربة مرآة لويد خطورة خاصة فقد استطاع « لويد » أن يدلل بها على أن الهدبة المركزية فى مجموعة الهدب الحادثة فى هذه التجربة ليست مضيئة . ونظراً لأن ظروف التجربة لا تخول حدوث الهدبة المركزية كما يتضح بالرجوع الى شكل (١٨٨) فانه استدل[1] على أن الهدب التى تتكون فى هذه التجربة مزاحة عن مواضعها التى ينتظر أول وهلة حدوثها فيها بمقدار نصف البعد بين هدبتين . أى أنه فى الموضع الذى ينتظر أن يحدث فيه ضياء مثلا حيث يقدر فرق المسير بين الشعاعين المتداخلين بأضعاف الطول الموجى تحدث ظلمة دالا ذلك على أن فرق المسير يساوى أضعاف الطول الموجى مضافاً الى ذلك نصف الطول الموجى . واستدل من هذا على أن انعكاس الضوء عند وقوعه من الهواء على سطح الزجاج أو على سطح وسط اكبر كثافة ضوئية مقرون بتغير فى الطور قدره ط (قائمتان) . فالقمة مثلا تنعكس قراراً . والقرار ينعكس قمة

---

(١) استدل على ذلك بوساطة ظاهرة سيأتى ذكرها فى بندى ٢٢٢ ، ٢٢٣

٢١٨ — شرط التداخل — التلاؤم بين المصدرين المتداخلين

اذا كان المصدران المتداخلان متحدين فى الطور بحيث يصدر أحدهما قمة مثلا فى الوقت الذى يصدر فيه الآخر قمة وهكذا فان نقطة تبعد بمقدار واحد عن المصدرين يحدث فيها ضياء وأخرى فرق بعديها عن المصدرين يساوى نصف الطول الموجى تحدث فيها ظلمة . وهكذا . ودوام حدوث الظلمة والضياء فى المواضع المذكورة متوقف على دوام اتحاد الطور بين المصدرين فاذا حدث لسبب ما أن أحد المصدرين أصدر قراراً فى الوقت الذى يصدر فيه الثانى قمة . فمواضع الضياء والظلمة تتبدل ولكنها تظل هى هى ما دام أحد المصدرين يصدر قراراً فى الوقت الذى يصدر فيه الثانى قمة . أى أن دوام حدوث الظلمة والضياء فى المواضع الجديدة متوقف على دوام ثبوت اختلاف الطور بين المصدرين المتداخلين . أما اذا لم يكن بين المصدرين المتداخلين فرق ثابت فى الطور ، فكان أحدهما يصدر قمة مرة ويصدر قراراً مرة فى الوقت الذى يصدر فيه الثانى قمة مثلا ، ولبث هذا التبدل مستمراً متكررا مرات عدة فى الثانية فان مواضع الظلمة والضياء تتبدل باستمرار فتزول الهدب وتبطل معالم التداخل

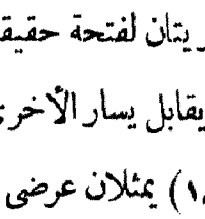
فتكون الهدب بحيث يمكن رؤيتها ومعاينتها متوقف على وجود تلاؤم مستمر بين المصدرين المتداخلين . ولا يستلزم هذا أن يكون المصدران فى طور واحد من الحركة بل يستلزم أن يكون الفرق فى الطور بين حركتيهما ثابتاً حتى اذا تغير لأمر ما طور الحركة فى أحدهما تغير أيضاً فى الثانى بحيث يظل الفرق واحداً . وهذا الشرط متوافر فى تجربة « ينج » لأن كل نقطتين متداخلتين (مثل ا ، ب شكل ١٨٢) بمثابة نقطتين على صدر موجة صادرة من نقطة واحدة (نقطة ح) تستقى منها النقطتان ضوءيهما ، وفى تجربة المرآة الثنائية وتجربة المنشور الثنائى فهما صورتان لنقطة مضيئة . ولذلك يكون كل من هاتين النقطتين فى هذه التجارب فى طور واحد من الحركة دائماً . أما فى تجربة مرآة لويد فالنقطتان المتداخلتان احداهما نقطة مضيئة والأخرى صورتها فاذا كان الانعكاس مقروناً بتغير فى الطور قدره ط فان النقطتين المتداخلتين لا تكونان فى طور واحد وانما يكون بينهما اختلاف ثابت فى الطور قدره ط

ودلت التجارب على أنه من المحال الحصول على هدب التداخل من مصدرين لا علاقة ولا ارتباط بينهما، فمثلا اذا أضيئت الفتحتان ا ، ب (شكل ١٨٢) فى تجربة ينج كل واحدة منهما على حدتها بمصدر ضوئى منفصل عن الآخر أو أضيئت الواحدة منهما بجزء من مصدر ضوئى واحد وأضيئت الأخرى بجزء آخر منه ، فلا يمكن الحصول على الهدب . ويعزى هذا الى عدم وجود التلاؤم المستمر بين المصدرين المتداخلين ، ويتخذ دليلا على أن طور الحركة فى أية نقطة ينبعث منها الضوء يتغير تغيراً مستمراً لاعلاقة له بتغير طورها فى أية نقطة أخرى حتى اذا كانت النقطتان من مصدر واحد

٢١٩ — النقط المتقابلة من المصدرين المتداخلين

فى التجارب السابقة يتخذ المصدران المتداخلان فتحتين مستطيلتين ضيقتين . ولكن مهما بولغ فى تضييق الفتحة فان لها اتساعاً معيناً . فاذا كانت الفتحتان رأسيتين وأخذنا مقطعاً أفقيا فنظراً لاتساع كل منهما ، فان مقطعيهما يكونان خطين مستقيمين قصيرين مثل س$_1$ ص$_1$ ، س$_2$ ص$_2$ شكل (١٨٩)

والفتحتان اللتان نعتبرهما المصدرين المتداخلين فى تجربة المرآة الثنائية أو فى تجربة المنشور الثنائى هما صورتان تقديريتان لفتحة حقيقية . فيمين الواحدة منهما يقابل يمين الأخرى ويسارها يقابل يسار الأخرى . فاذا فرضنا أن س$_1$ ص$_1$ ، س$_2$ ص$_2$ شكل (١٨٩) يمثلان عرضى الفتحتين المتداخلتين ا ، ب



(شكل ١٨٩)

فى التجربتين المذكورتين تكون نقطة س$_1$ من احداهما مقابلة لنقطة س$_2$ من الأخرى ونقطة ص$_1$ مقابلة لنقطة ص$_2$. فيكون موضع الهدبة المركزية المضيئة الحادثة عن تداخل المصدرين س$_1$ ، س$_2$ على المستوى العمودى المنصف للبعد المحصور بين هاتين النقطتين ، وكذلك يكون موضع الهدبة المركزية المضيئة الحادثة عن تداخل المصدرين ص$_1$ ، ص$_2$ على المستوى العمودى المنصف للبعد المحصور بين هاتين النقطتين وهكذا بالنسبة الى سائر النقط الأخرى من الفتحتين فلا تكون اذن مواضع الهدب المركزية منطبقة ولا مواضع الهدب الأخرى ولكن نظراً لأن

البعد بين كل نقطتين متقابلتين واحد فإن البعد بين أية هدبتين فى مجموعة الهدب الحادثة بفعل كل نقطتين متقابلتين يكون واحداً فى جميع المجموعات وينشأ عن عدم الانطباق أن الهدب لا تكون جلية واضحة ما لم تكن الفتحتان ضيقتين جداً

أما فى تجربة مرآة لويد فأحد المصدرين المتداخلين هو الفتحة الحقيقية والآخر صورتها التقديرية وبما أن الصورة الحادثة عن الانعكاس عند السطح المستوى تكون مقلوبة انقلاباً جانبياً فانه اذا فرضنا أن سَ صَ (شكل ١٨٩) يمثل مقطع الفتحة الحقيقية فان سً صً يمثل مقطع صورتها وتكون كل نقطتين متقابلتين متداخلتين مثل سَ ، سً أو صَ ، صً متماثلتين وضعاً ويكون المستوى العمودى المنصف للبعد بين أية نقطتين منها واحداً . فالهدب المركزية فى هذه الحالة تكون متطابقة ولكن نظراً لأن البعد بين كل نقطتين متقابلتين ليس واحداً فيها جميعاً فان البعد بين هدبتين متتاليتين من كل مجموعة لا يكون واحداً فى جميع المجموعات ويترتب على هذا أن الهدب المركزية وان كانت متطابقة فان الهدب الأخرى يختل تطابقها كلما بعدنا عن المركزية

ففى تجربة مرآة لويد قد تكون الفتحة متسعة شيئاً ما وتظهر بالرغم من هذا الهدب القريبة من المركزية جلية واضحة خلافاً لما يحدث فى التجربتين الأخريين

٢٠٠ — هدب التداخل فى الضوء الأبيض

تبين فيما سبق أن متوسط البعد بين هدبتين متتاليتين أو عرض الهدبة يساوى $\frac{ع}{ب}$ ل فاذا كان الطول الموجى أطول كان هذا المقدار أكبر أى كانت الهدب أبعد بعضها عن الآخر وبالعكس اذا كان الطول الموجى أقصر كانت الهدب أقرب بعضها الى الآخر . فاذا لم يكن الضوء المنبعث من المصدرين المتداخلين ضوءاً بسيطاً ذا طول موجى معين بل كان مكوناً من موجات مختلفة تختلف أطوالها الموجية بعضها عن الآخر كالضوء الأبيض مثلا الذى يعد مكوناً من موجات متفاوتة الأطوال أقصرها طولا موجة الضوء البنفسجى وأطولها موجة الضوء الأحمر، فان الهدبة

المركزية حيث يكون فرق المسير بين الشعاعين المتداخلين معدوماً يكون موضعها واحداً بالنسبة الى جميع الأضواء ذات الأطوال الموجية المختلفة ، وتكون اذن هدبة مضيئة بيضاء . ولكن نظراً لأن الهدب الحمراء أعرض من الهدب البنفسجية فان الهدبة المركزية الحمراء تكون أعرض من الهدبة المركزية البنفسجية . فلو أن الهدبة المركزية تكون بيضاء (أو بالأحرى لا لون لها) فى الوسط فانها تضرب الى الحمرة عند حافتيها . و بما أن بعد الهدبة المضيئة الاولى التى تلى المركزية عن الهدبة المركزية هو $\frac{ع}{ا}$ ل فان الهدبة البنفسجية الأولى تكون أقرب الى المركزية من الهدبة الحمراء الاولى . فتكون الهدب اذن ملونة

و يتضح من هذا أن الهدب التى تتكون عندما يكون الضوء المنبعث من المصدرين المتداخلين أبيض تكون هدباً ملونة ، الهدبة المركزية منها بيضاء . و يشاهد عملياً أن عدد الهدب فى هذه الحالة محدود ، أى أن الهدبة المركزية البيضاء تكون محفوفة من جانبيها بهدب ملونة لا يتجاوز عدد ما بالجانب الواحد منها نيفاً وعشر هدبة . والسبب فى هذا أن مواضع الضياء فى هدب ذات لون معين قد تقع على مواضع الظلمة فى هدب ذات لون آخر . فيؤول ذلك الى زوال معالم الظلمة الفاصلة بين مواضع الضياء . كما أنه قد يقع موضع هدبة مضيئة ذات لون معين على موضع هدبة مضيئة ذات لون آخر و يؤول ذلك الى امتزاج الألوان بعضها بالآخر وحدوث الضوء الأبيض . فاذا فرضنا أن فرق المسير عند موضع هدبة مضيئة من الهدب التى تتكون من تداخل ضوء ذى طول موجى نرمز له بالرمز ل$_{ا}$ هو ن ل$_{ا}$ فان المقدار ن ل$_{ا}$ قد يكون مساوياً

$$ن\ل_{ا}^{٢} + \frac{ل_{ا}^{٢}}{٢}$$

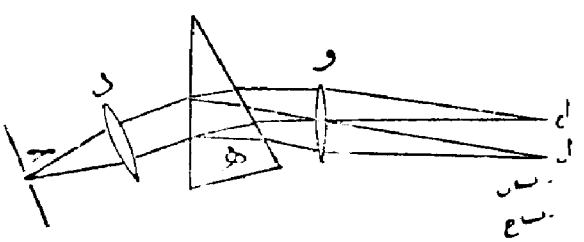
حيث يكون ل$_{ا}$ الطول الموجى لضوء آخر وقد يكون مساوياً ن ل$_{٣}$ + ل$_{٣}$ حيث يكون ل$_{٣}$ الطول الموجى لضوء غير هذا وذاك وهكذا فيكون موضع حدوث الهدبة المضيئة من الضوء الأول واقعاً على موضع الظلمة من الضوء الثانى وعلى موضع الضياء من الثالث وهكذا فاذا كانت قيمة ن كبيرة تتعدد الهدب المضيئة والهدب المظلمة التى يقع بعضها على الآخر و يكون مآل ذلك امحاء الهدب وحدوث الضوء الابيض

واذا اختبر الضوء الابيض المذكور بوساطة سبكترسكوب ووضعت فتحته بحيث تستمد ضوءها من موضع بعيد عن الهدبة المركزية البيضاء أى من موضع ليست فيه هدب ظاهرة للعين وكانت فتحة السبكترسكوب موازية للهدبة المركزية والهدب الملونة التى تحف بها من الجانبين ، فان طيف الضوء يرى مكوناً من مناطق مضيئة فى المواضع الطيفية للاضواء التى تقع هدبها المضيئة بعضها على الآخر عند موضع فتحة السبكترسكوب ، و بين هذه المناطق المضيئة مناطق مظلمة تدل على المواضع الطيفية للاضواء التى يحدث من تداخلها عند موضع الفتحه ظلة وكلما بعد موضع الفتحة عن الهدبة المركزية زاد عدد المناطق المضيئة والمناطق المظلمة التى تتخللها

٢٢١ — الحصول على الهدب اللالونية

اتضح مما سبق أن تداخل الضوء الابيض يؤدى الى حدوث هدب ملونة تكون الهدبة المركزية منها هدبة لالونية . و بما أن البعدبين هدبتين متتاليتين يساوى $\frac{\lambda}{\mu}$ ل يتضح انه اذا أمكن جعل البعد بين المصدرين المتداخلين وهو ا متناسباً والطول الموجى ل ، فان البعد بين الهدب يكون واحداً واذن تقع الهدب المضيئة ذات الألوان المختلفة بعضها على الآخر ، فتتكون هدب بيضاء تسمى « هدباً لا لونية »[1]

وللحصول عملياً على الهدب اللالونية يستعان بمرآة لويد . وطريقة ذلك مبينة تخطيطياً بشكل (١٩٠) حيث تمثل نقطة ح فتحة مستطيلة ضيقة عمودية على مستوى الورقة تضاء بضوء



(شكل ١٩٠)

ابيض موضوعة عند بؤرة عدسة لامة د بحيث يتكون منهما مجمع كمجمع السبكترسكوب تنفذ الاشعة منه متوازية فتقع على منشور مثلا عند ه ثم تقع بعد نفوذها منه على عدسة لامة أخرى و

(١) Achromatic Fringes

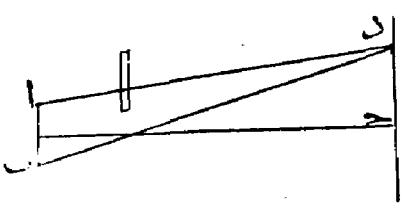
فتلم الأشعة الحمراء عند ا ع والبنفسجية عند ا ى ويتكون طيف نقى حقيقى كل جزء ذى لون واحد منه بمثابة صورة حقيقية للفتحة ح عمودية على مستوى الورقة . ويتكون هذا الطيف الحقيقى أمام سطح عاكس س ص يكون بمثابة مرآة لويد فيحدث تداخل بين ا ع باعتبارها صورة حقيقية حمراء للفتحة ح ، وبين صورتها التقديرية الحادثة بالانعكاس وهى ب ع ، وتتكون مجموعة من الهدب الحمراء . ويحدث تداخل بين ا ى باعتبارها صورة حقيقية بنفسجية للفتحة ح ، وبين صورتها التقديرية الحادثة بالانعكاس وهى ب ى ، وتتكون مجموعة من الهدب البنفسجية . فاذا هيء سطح المرآة بحيث تكون نسبة البعد ا ع ب ع الى البعد ا ى ب ى مساوية نسبة الطول الموجى للضوء الأحمر الى الطول الموجى للضوء البنفسجى يكون البعد بين أية هدبتين حمراوين مساوياً البعد بين أية هدبتين بنفسجيتين ، فتقع الهدب الحمراء على الهدب البنفسجية . أى اذا رمز للطول الموجى للضوء الاحمر بالرمز ل ع وللطول الموجى للضوء البنفسجى بالرمز ل ى وكان

$$\frac{\text{ا ع ب ع}}{\text{ل ع}} = \frac{\text{ا ى ب ى}}{\text{ل ى}}$$

تطابقت الهدب الحمراء والهدب البنفسجية . واذا فرضنا عند توافر الشرط المذكور أن نسبة البعد بين أى جزء من أجزاء الطيف ا ع ا ى وبين صورة هذا الجزء الى الطول الموجى له ، يساوى النسبة المذكورة ، تتطابق جميع الهدب المضيئة ذات الالوان المختلفة فيتكون من تطابقها هدب لا لونية . غير أن الفرض الاخير لا ينطبق بالضبط فى حالة الطيف المتكون بوساطة المنشور فلا تكون الهدب لا لونية على وجه التمام

٢٢٢ — تحول الهدب عن مواضعها

اذا فرضنا أن ا ى ب (شكل ١٩١) مصدران متداخلان فى طور واحد من الحركة ، وأن نقطة ح موضع الهدبة المركزية ، حيث يكون ا ح ى ب ح متساويين ، وتكون نقطة ح موضع تقابل القمتين الصادرتين من ا ى ب فى وقت واحد ، وموضع تقابل



(شكل ١٩١)

القرارين الصادرين منهما فى وقت واحد ، ثم حدث لسبب ما أن القمة الصادرة من ا تخلفت فى أثناء انتقالها نحو حـ عن القمة الصادرة من ب عند وقت صدور الاولى من ا ، وكان هذا التخلف بمقدار نصف الطول الموجى ، فان نقطة حـ تكون موضع ظلة ، ويكون موضع تقابل القمتين الصادرتين من ا ، ب فى وقت واحد (أو تقابل القرارين الصادرين فى وقت واحد) ، هو الموضع الذى كان عنده يبلغ فرق المسير بين الشعاعين المتداخلين نصف الطول الموجى . واذن يكون موضع الهدبة المركزية عند حدوث هذا التخلف هو الذى كان موضع أول ظلام يلى الهدبة المركزية المضيئة فى الجانب الموجود فيه المصدر ا قبل حدوثه . وكذلك يكون موضع نقطة مثل د يبلغ عندها فرق المسير بين الشعاعين المتداخلين طولا موجياً هو الموضع الذى كان يبلغ لديه فرق المسير قبل حدوث التخلف ثلاثة أنصاف الطول الموجى وهكذا فتكون نتيجة حدوث هذا التخلف أن الهدبة المركزية تزاح الى موضع أول ظلام يليها من الجانب الموجود فيه المصدر ا والهدبة المضيئة الاولى تزاح الى موضع الظلام الذى يليها وهكذا . أى أن مجموعة الهدب كلها تزاح الى الجانب المذكور بحيث تحل الهدبة المضيئة مكان الظلام الذى يليها رأساً

وبالمثل اذا كان التخلف المفروض مساوياً طولا موجياً واحداً ، أزيحت الهدب بحيث تحل المضيئة مكان المضيئة التى تليها . فاذا كان التخلف المفروض مساوياً ن ر أزيحت الهدب أو تحولت عن أمكنتها بحيث تحل المركزية مكان الهدبة المضيئة النونية وتحل أية هدبة مضيئة مكان الهدبة النونية المضيئة التى تليها من الجانب الموجود فيه المصدر ا . وبالمثل اذا تخلفت الموجات الصادرة من ب عن الموجات الصادرة من ا بمقدار ن ر ، فان الهدب تتحول عن أمكنتها بحيث تحل الهدبة المضيئة مكان المضيئة النونية التى تليها من الجانب الموجود فيه المصدر ب . أى أن التحول يحدث نحو الجانب الذى تصدر منه الموجات التى طرأ عليها التخلف .

واذا كان الوسط الذى تنتشر فيه موجات الضوء الصادرة من المصدرين ا ، ب (شكل ١٩١) هو الهواء أو الأثير ، ثم جعلنا فى مسير الضوء الصادر من المصدر ا مثلا لوحاً رقيقاً من مادة أكبر كثافة ضوئية كالزجاج ، فعلى فرض أن سرعة الضوء فى هذه المادة أقل من سرعته فى الهواء ، يستغرق الضوء الصادر من المصدر ا فى اختراق سمك هذا اللوح زمناً أكبر

مما يستغرقه الضوء الصادر من ب فى قطع مسافة فى الهواء تساوى سمك هذا اللوح . فاذا رمز لسمك اللوح بالحرف س ولسرعة الضوء فى الهواء بالحرف هـ ولسرعته فى مادة اللوح بالرمز هَ فان الزمن الذى يستغرقه الضوء الصادر من المصدر ا فى النفاذ خلال اللوح يزيد عن الزمن الذى يستغرقه الضوء الصادر من ب فى قطع مسافة فى الهواء تساوى سمك اللوح بالمقدار

$$\frac{س}{هَ} - \frac{س}{هـ}$$

ويساوى هذا التخلف الزمنى الذى يحدث بين القمتين الصادرتين من ا ، ب فى وقت واحد ، أو بين القرارين الصادرين منهما فى وقت واحد ، وفى خلال هذه الفترة الزمنية تسبق القمة أو القرار الصادر من ب القمة أو القرار الصادر فى الوقت نفسه من ا بمقدار يساوى حاصل ضرب هذه الفترة فى سرعة الضوء فى الهواء ، أى بمقدار

$$(\frac{س}{هَ} - \frac{س}{هـ}) هـ = س (\frac{هـ}{هَ} - ١)$$

وبالرمز لمعامل انكسار الضوء فى مادة اللوح بالحرف م يكون المقدار المذكور مساويا

$$س (م - ١)$$

واذن تأثير وضع اللوح فى مسير الضوء الصادر من ا يجعل الموجات الصادرة من هذا المصدر تتخلف بمقدار س (م — ١) عن الموجات الصادرة من المصدر ب فاذا كان المقدار

$$س (م - ١) = ن ن$$

تحولت الهدب (عند وضع اللوح) عن أمكنتها الاولى بحيث تحل الهدبة المضيئة مكان الهدبة المضيئة النونية التى تليها من الجانب الموجود فيه المصدر ا . فاذا عرف قدر الازاحة الحادثة فى الهدب (أى قيمة ن) عند ما يوضع لوح ذو سمك معين من مادة ما فى مسير الضوء الصادر من أحد المصدرين وعرف الطول الموجى ل للضوء المستعمل ، أمكن من المعادلة المذكورة ايجاد قيمة م . كما أنه اذا عرف معامل انكسار الضوء فى المادة ولم يكن السمك معروفاً ، أمكن ايجاد قيمة س . وكذلك بتعيين الجانب الذى تزاح اليه الهدب ، يمكن معرفة ما اذا كانت سرعة الضوء فى مادة اللوح الموضوع أصغر أو أكبر من سرعته فى الوسط الخارجى

٢٢٣ – تحول الهدب الملونة عن مواضعها

رأينا فيما سبق أن فرق المسير الحادث من جراء وضع لوح من المادة فى سبيل الضوء الصادر من أحد المصدرين المتداخلين هو س (م – ١) فاذا ترتب على هذا أن انتقلت الهدبة المضيئة المركزية مكان الهدبة المضيئة النونية يكون

$$س (م - ١) = ن ل \quad \ldots\ldots \quad (١)$$

ولكن مكان الهدبة المضيئة النونية يبعد عن مكان الهدبة المركزية المضيئة بمقدار

$$و = \frac{ع}{ا} ن ل \quad \ldots\ldots\ldots \quad (٢)$$

ومن المعادلتين (١) ، (٢) يتضح أن المسافة التى تزاح خلالها الهدبة المركزية المضيئة من جراء وضع اللوح فى مسير أحد الشعاعين المتداخلين هى

$$و = \frac{ع}{ا} س (م - ١)$$

ولما كان معامل الانكسار يختلف باختلاف الطول الموجى وهو للبنفسجى أكبر منه للاحمر فان هذه المسافة تكون للهدب البنفسجية أكبر منها للهدب الحمراء

فاذا راعينا التداخل فى الضوء الأبيض حيث تتكون هدبة مركزية لا لونية يحف بها من الجانبين هدب ملونة ، ووضع اللوح فى سبيل الضوء المنبعث من أحد المصدرين المتداخلين ، فان اختلاف ازاحة الهدبة المركزية البنفسجية عن ازاحة الهدبة المركزية الحمراء يجعل الهدب الملونة التى كانت متطابقة من قبل ومحدثة للهدبة المركزية اللالونية، تتشتت عند تحول الهدب عن أمكنتها. كذلك اذا راعينا احدى الهدب البنفسجية قبل حدوث الازاحة (ولتكن الأولى مثلا) . والهدبة الحمراء المقابلة لها (أى الأولى أيضاً) فان الهدبة البنفسجية تكون أقرب الى المركزية من الحمراء ، ولكنها تزاح بمقدار أكبر من ازاحة الحمراء . فمن الجائز اذن أن تكون نتيجة الازاحة أن تقع البنفسجية والحمراء (وكذلك الهدب التى بينهما ذات الألوان الأخرى) فى موضع واحد أو موضع يكاد يكون واحداً ، فتتكون من ذلك هدبة تكاد تكون لا لونية تسمى الهدبة اللالونية فى الهدب المزاحة . واذن تكون نتيجة تحول الهدب عن مواضعها أن الهدبة اللالونية المركزية الأصلية تتشتت الى هدب ملونة منفصلة ، وان هدبا ملونة منفصلة تتطابق أو

تكاد تتطابق فتحدث هدبة لا لونيـة ، فلا تكون الهدبة اللا لونيـة فى الهدب المزاحة هى الهدبة اللالونية الأصلية وقد أزيحت عن مكانها

ولايجاد شرط تكون الهدبة اللالونية فى الهدب المزاحة نفرض أن الهدب ذات الطول الموجى ل قد أزيحت خلال مسافة قدرها ء أى أن كل هدبة من هذه الهدب زاد بعـدها عن الهدبة المركزية بمقدار ء ، فاذا راعينا الهدبة النونية منها فان بعدها عن المركزية كان قبل الازاحة مساوياً $\frac{ع}{ا}$ ن ل ، واذن يصير بعد الازاحة

$$س = \frac{ع}{ا} ن ل + ء$$

$$= \frac{ع}{ا} ن ل + \frac{ع}{ا} س (م - ١) \quad \ldots\ldots\ldots \quad (٣)$$

فاذا كان المقدار المذكور واحداً أو يكاد يكون واحداً لا يختلف باختلاف الطول الموجى ل ، فان الهدب ذات الألوان المختلفة يقع بعضها على الآخر فى موضع على بعد من الهدبة المركزية الاصلية قدره المقدار المذكور واذن شرط حدوث الهدبة اللالونية بعد الازاحة أن يكون

$$\frac{ء س}{ء ل} = \text{صفرا}$$

$$\text{اذن } \frac{ع}{ا} ن + \frac{ع}{ا} \frac{ء}{ء ل} [س (م - ١)] = \text{صفرا} \quad \ldots \quad (٤)$$

والمقدار المحصور بين القوسين الكبيرين دالة للطول الموجى ل . ويمكن تعيين قيمتها بالتقريب اذا رجعنا الى معـادلة تدل على علاقة معامل انكسار الضوء بالطول الموجى تعرف بمعادلة « كوشى »[1] وتنص على أن

$$م = ا + \frac{ب}{ل^٢} + \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٥)$$

حيث تكون المقادير ا ، ب الخ مقادير ثابتة تتوقف على نوع المادة الحادث فيها الانكسار فاذا اكتفينا بالحدين الاول والثانى من الطرف الايسر من معادلة « كوشى » واستبدلنا بالمقدار م فى المعادلة (٤) قيمتها من المعادلة (٥) يتضح أن شرط تكون الهدبة اللالونية يكون

---

(١) Cauchy أنظر الباب الرابع عشر

$$\frac{ع}{ا} ق - ٢ ب \frac{ع\ س}{ا\ ل^{٣}} = \text{صفرا}$$

$$\therefore ق = ٢ ب \frac{س}{ل^{٣}}$$

وبالتعويض فى المعادلة (٣) ينتج أن

$$س = \frac{س\ ع}{ا} \left(\frac{٢ ب}{ل^{٢}} + م - ١ \right)$$

وتكون قيمة س المذكورة هى بعد موضع الهدبة اللالونية (الحادثة عند تحول الهدب عن أمكنتها) عن موضع الهدبة المركزية الأصلية . ويلاحظ فى هذا المقدار أن م معامل انكسار الضوء ذى الطول الموجى ل ، ب الثابت فى معادلة كوشى ، س سمك المادة المحدثة لتحول الهدب ، ا البعد بين المصدرين المتداخلين ، ع بعد الهدب عن المصدرين المتداخلين

وبما أن عرض الهدبة عند ما يكون الطول الموجى للضوء ل هو $\frac{ع}{ا}$ ل ، فان المسافة س المذكورة تشمل عدداً من الهدب ذات الطول الموجى ل يساوى

$$\frac{س}{ل} \left(\frac{٢ ب}{ل^{٢}} + م - ١ \right)$$

أى أنه اذا تكونت الهدب من تداخل ضوء بسيط ذى طول موجى قدره ل فان عدد هدب هذا الضوء المنحصرة بين موضع الهدبة المركزية الأصلية وبين موضع الهدبة اللالونية الحادثة بعد الازاحة يساوى المقدار المذكور

٢٢٤ — تطبيق التداخل فى الضوء الأبيض لقياس الازاحة الحادثة فى الهدب

اذا استعمل ضوء بسيط ذو لون واحد وحصلنا من مصدرين متداخلين مثلا على مجموعة من الهدب ذات اللون الواحد ثم وضعنا فى سبيل الضوء المنبعث من أحدهما لوحاً رقيقاً فأحدث فرقاً فى المسير قدره

$$\text{ن}_{\text{ن}} = (\text{ن} - \text{ن}_{\text{ن}})^{\text{س}}$$

فان الهدبة المضيئة تتحول عن مكانها الى مكان الهدبة النونية التى تليها حيث تكون قيمة ن طبقاً للمعادلة السابقة . ولكن ما لم يحدث هذا التحول ببطء حتى يتيسر متابعته بالعين ، وحصر عدد الهدب المضيئة التى تمر مثلا بالخيط الرأسى فى القطعة العينية التى يستعان بها فى رؤية الهدب وايجاد قيمة ن بهذه الكيفية ، فانه لا يمكن تعيين قيمة ن عملياً لأن الهدب جميعها متشابهة ولا تتميز واحدة منها عن الأخرى بشىء ما . فسواء أكانت الهدب فى أمكنتها الأصلية أم تحولت فحلت احداها مكان الأخرى فمظهرها فى الحالتين واحد حتى اذا تحولت المضيئة مكان المظلمة فانه لا يمكن الجزم بما اذا كانت الازاحة مساوية نصف عرض الهدبة أو ثلاثة أمثال ذلك أو خمسة أمثاله الخ .

ولتعيين قدر الازاحة فى هذه الحالة يستعان بالضوء الأبيض ويحصل على مجموعة الهدب الملونة والهدبة اللالونية المركزية فى وسطها . فاذا وضع اللوح فى سبيل الضوء المنبعث من المصدرين تكونت هدبة لالونية فى موضع آخر غير موضع اللالونية الأولى فاذا عين هذان الموضعان وأعيد تكوين الهدب ذات اللون الواحد ، وحصر عدد ما يقع منها بين هذين الموضعين يتضح مما فى البند السابق أن هذا العدد يكون مساوياً

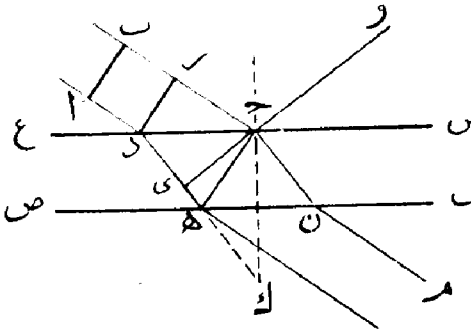
$$\frac{\text{س}}{\text{ل}} \left(\frac{\text{ب}^{٢}}{\text{ل}^{٢}} + \text{ن} - ١ \right)$$

فاذا قدر هذا العدد عملياً وعرفت قيمة الثابت ب والطول الموجى ل وأحد المقدارين س أو م أمكن استخراج قيمة الثانى

٢٢٥ — التداخل فى الأغشية الرقيقة

(أولا) التداخل الحادث بالانعكاس

لنفرض أنه يوجد فى وسط كالهواء أو الاثير غشاء رقيق من مادة شفافة والغشاء محدود بالسطحين



(شكل ١٩٢)

المتوازيين س ع ، ف ص شكل (١٩٢) . فاذا سقط على السطح الأول للغشاء شعاع من الضوء مثل و ح فانه ينقسم بوجه عام قسمين أحدهما ينعكس فى استقامة ح ب ، والآخر ينكسر فى استقامة ح ه فاذا وصل هذا الى نقطة ه فانه هو أيضاً ينقسم قسمين أحدهما ينعكس فى استقامة ه د ، والآخر ينفذ خارجاً من الغشاء . كما أن الشعاع ه د هو أيضاً ينقسم عند د قسمين أحدهما ينفذ خارجاً فى استقامة د ا والآخر ينعكس داخل الغشاء . والشعاعان ح ب ، د ا متوازيان فاذا فرضنا أن ا ب يمثل صدر موجة مستويه تقع على السطح س ع فان المويجة الصادرة من ب وتأخذ المسير ب ح و والمويجة الصادرة من ا وتأخذ المسير ا د ه ح و يكون بينهما فرق فى المسير عند سيرهما فى استقامة ح و . فاذا أسقط من نقطة د العمود د ر على ب ح ، ومن نقطة ح العمود ح ى على د ه ، يتضح من طريقة رسم الشعاع المنكسر طبقاً لقاعدة هيجنز (بند ١٩٤) ، أن المويجة الصادرة من ر تبلغ نقطة ح فى الوسط الأول فى الوقت الذى تبلغ فيه المويجة من د نقطة ى فى الوسط الثانى . فتكون نقطتا ح ، ى فى طور واحد من الحركة . واذن يكون فرق المسير بين المويجتين المذكورتين عند وصولها الى نقطة ح مساوياً المسير ى ه ح فى مادة الغشاء

فاذا أقمنا من ح عمودا على سطحى الغشاء ومددنا المستقيم د ه ليتقابل وهذا العمود فى نقطة ك يتضح أن

ى ه + ه ح = ى ك

فاذا رمزنا لسمك الغشاء بالحرف ء ولزاوية انكسار الشعاع د ه بالحرف ه فان زاوية ى ك ح = ه واذن

ى ك = ٢ ء حتا ه

واذن يكون فرق المسير بين الشعاعين ب ح ، ا د ه ح عند وصولها الى نقطة ح مساوياً ٢ ء حتا ه مقيساً فى مادة الغشاء . ولما كان الزمن الذى يستغرقه الضوء فى قطع مسافة معينة فى

مادة مايساوى الزمن الذى يستغرقه فى قطع مسافة فى الهواء أو الأثير تساوى حاصل ضرب تلك فى معامل انكسار الضوء فى المادة المذكورة يكون فرق المسير بين الشعاعين المذكورين مقيساً فى الهواء أو الأثير هو

٢ ء م حتا هـ

باعتبار أن م معامل انكسار الضوء فى مادة الغشاء

ويتراءى من هذا أول وهلة أن الشعاع حـ و المنعكس عند السطح الأول للغشاء والشعاع الذى يخرج فى استقامة حـ و ولكنه ينعكس عند هـ عند السطح الثانى للغشاء يكون الفرق فى المسير بينهما ٢ ء م حتا هـ . فاذا كان الفرق مساوياً أضعاف الطول الموجى للضوء قوى الشعاعان أحدهما الآخر ، واذا كان مساوياً عدداً فردياً من نصف الطول الموجى أضعف الشعاعان أحدهما الآخر . لولا أن الانعكاس عند أحد سطحى الغشاء يختلف عن الانعكاس عند السطح الآخر ، فأحدهما يحدث والضوء يسقط من وسط أصغر كثافة ضوئية على سطح وسط أكبر كثافة ، والآخر يحدث والضوء يسقط من وسط أكبر كثافة على سطح وسط أصغر كثافة . وكما تبين من تجربة « مرآة لويد » يكون الانعكاس الأول مقروناً بتغير فى الطور قدره ط ، أى أن القمة تنعكس قراراً والقرار ينعكس قمة ، واذن ينتج اذا كان المقدار

٢ ء م حتا هـ = ن ل . . . . . (١)

أن الشعاعين يضعف أحدهما الآخر ، فاذا كان اتساع الاهتزازة فيهما واحداً عدمت الحركة الاهتزازية وحدثت ظلمة . أما اذا كان المقدار

٢ ء م حتا هـ = (٢ ن + ١) $\frac{ل}{٢}$ . . . . . (٢)

فان الشعاعين يقوى أحدهما الآخر

(ثانياً) التداخل الحادث بالانكسار

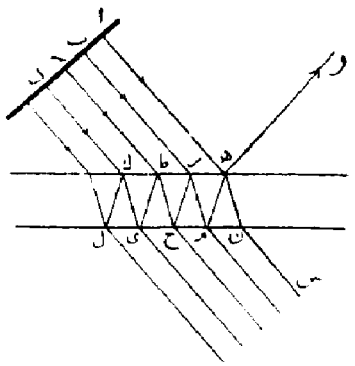
واذا راعينا الضوء النافذ من الغشاء من الجانب الآخر منه يتضح أن الموجة الصادرة من نقطة ب على صدر الموجة المستوية ا ب ، والتى تأخذ المسير ب حـ ن مـ ، والموجة الصادرة من ا والتى تأخذ المسير ا د هـ حـ ن مـ ، يكون فرق المسير بينهما ٢ ء م حتا هـ .

ولكن يلاحظ أن الشعاع الاول ب حـ ن مـ ينفذ خلال الغشاء من غير انعكاس ، وان الشعاع الثانى ينعكس مرتين ، احداهما عند نقطة هـ والأخرى عند نقطة حـ . فاذا كانت مادة الغشاء أكبر كثافة ضوئيـة من الوسط الخارجى لا يكون هذان الانعكاسان مقرونين بتغير ما فى الطور . واذا كانت مادة الغشاء أقل كثافة ضوئية فان كلا منهما يكون مقروناً بتغير فى الطور قدره ط ، واذن يكون تغير الطور الحادث من جراء الانعكاسين ٢ ط ، فكأنه غير موجود .

ويتبين من هذا أنه سواء أكان الغشاء أكبر كثافة ضوئية من الوسط الخارجى أم أقل كثافة فان الشعاعين يقوى أحدهما الآخر اذا توافر شرط المعادلة (١) ويضعف أحدهما الآخر اذا توافر شرط المعادلة (٢)

٢٢٦ — أثر تعدد الانعكاسات الداخلية فى التداخل فى الأغشية الرقيقة

راعينـا فى الحالة الأولى فى البنـد السابق التداخل بين الشعاع المنعكس رأساً عند السطح الأول للغشاء وبين الشعاع المنعكس عند السطح الثانى وراعينا فى الحالة الثانيـة التداخل بين الشعاع الذى ينفذ خلال الغشاء رأساً وبين الشعاع الذى ينفذ بعد أن ينعكس انعكاساً داخلياً مرتين . وفى كلتى الحالتين لا يكون اتساع الاهتزازة فى الشعاعين واحداً . فاذا تداخل الشعاعان وتوافر شرط الظلمة لا يكون التداخل بينهما تاماً ، فلا تعـدم الحركة الاهتزازية من جراء ذلك



(شكل ١٩٣)

ولكن اذا فرضنا أن ا ب حـ د (شكل ١٩٣) صدر موجة مستوية تقع على سطح الغشاء فان الموجة التى تأخذ المسير ا هـ و تتـداخل (أولا) والموجة التى تأخذ المسير ب رمـ هـ و وهذه تنعكس انعكاساً داخلياً مرة واحدة عند مـ (ثانياً) والموجة التى تأخذ المسير حـ ط ح رمـ هـ و وهذه تنعكس انعكاساً داخلياً ثلاث مرات عند ح ى ر ى مـ (ثالثـاً) والموجة التى تأخذ المسير د ك ى ط ح رمـ هـ و ، وهذه تنعكس انعكاساً داخلياً خمس مرات عند ى ى ط ى

ح ، ر ، م ـ . وهكذا فاذا أمكن ايجاد محصلة الاهتزازة الحاصلة بفعل الموجة التى تنعكس انعكاساً داخلياً واحداً و بفعل الموجة التى تنعكس انعكاساً داخلياً ثلاث مرات ، ثم بفعل التى تنعكس خمس مرات وهكذا . فان التداخل الحادث عند هـ يكون نتيجة هذه المحصلة والاهتزازة الحادثة بفعل الموجة التى تنعكس رأساً عند هـ .

ولسهولة البحث فى هـذه المسألة نراعى الحالة التى يكون فيهـا فرق المسير بين الشعاع الواقع من ا على نقطة هـ وبين الشعاع الواصل الى نقطة هـ بعد أن يعانى انعكاساً داخلياً عند مـ هو

٢ ، م حتا هـ = ٢ ل

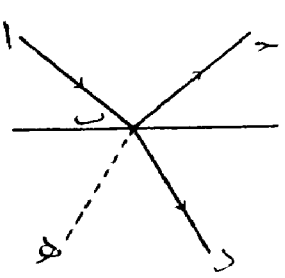
حيث يضعف الشعاعان أحدهما الآخر ولنفرض أن مادة المنشور اكبر كثافة ضوئية من الوسط الخارجى . فعند توافر هـذا الشرط يكون فرق المسير بين الشعاع الاول وبين الشعاع الذى يصل الى نقطة هـ بعد أن يعانى ثلاثة انعكاسات داخليـة ضعف المقدار المذكور ، وبين الشعاع الأول وبين الشعاع الذى يصل الى نقطة هـ بعد أن يعانى خمسة انعكاسات داخلية ثلاثة أمثال المقدار المذكور وهكذا . واذن يكون الفرق بين الشعاع الأول و بين كل واحد من هـذه الأشعة أضعاف الطول الموجى . واذن يكون الفرق بين طور الاهتزازة الحادثة عنـد هـ بفعل الشعاع ا هـ (قبـل الانعكاس) وأطوار الاهتزازة الحادثة بفعل الاشعة الأخرى التى تتعـدد انعكاساتها الداخليـة مساوياً اضعاف ٢ ط ، فيمكن اعتبار أطوارها جميعـاً متحدة . فاذا عرف اتساع هذه الاهتزازات كان اتساع محصلتها مساوياً لمجموع هذه الاتساعات

٢٢٧ — العلاقة بين اتساعات الاهتزازة فى الأشعة المنعكسة والمنكسرة

وكان « ستوكس » [1] أول من قدر العلاقة بين اتساع الاهتزازة فى الشعاع الذى ينعكس عند السطح الأول للغشاء واتساعها فى الأشعة الأخرى التى تتعدد انعكاساتها الداخلية . وطبق فى ذلك قاعدة « قبول العكس »

فاذا فرضنا أن ا ب (شكل ١٩٤) شعاع ساقط ، ب حـ مسير المنعكس ، ب د مسير المنكسر ،

(١) Stokes



ورمزنا لاتساع الاهتزازة فى الشعاع الساقط بالحرف ا وفرضنا أن اتساعها فى المنعكس كسر قدره ـ من اتساعها فى الساقط . واتساعها فى المنكسر كسر قدره هـ من اتساعها فى الساقط . كان اتساع الاهتزازة فى المنعكس ا ـ وفى المنكسر ا هـ

(شكل ١٩٤)

فاذا فرضنا أن الشعاع المنعكس ب حـ قد عكس مسيره فان ذلك يؤدى الى شعاع ينعكس فى استقامة ب ا يكون اتساع الاهتزازة فيه ا ـ٢ . ويؤدى الى شعاع منكسر فى استقامة ب هـ يكون اتساع الاهتزازة فيه ا ـ هـ . كذلك اذا عكس مسير الشعاع ب د ، فان ذلك يؤدى الى شعاع منكسر فى استقامة ب ا وشعاع منعكس فى استقامة ب هـ . غير أن الضوء فى هـذه الحالة يقع من الوسط الثانى الى الأول فتكون نسبة اتساع الاهتزازة فى المنعكس أو المنكسر الى اتساعها فى الساقط غيرها فى الحالة الأولى عند وقوع الضوء من الوسط الأول الى الوسط الثانى . فاذا فرضنا أن اتساع الاهتزازة فى المنكسر عند وقوع الضوء من الوسط الثانى الى الاول كسر قدره هـ من اتساعها فى الساقط ، وأن اتساعها فى المنعكس كسر قدره ء من اتساعها فى الساقط ، يكون اتساع الاهتزازة فى الشعاع المنكسر ب ا الحادث عن عكس مسير ب د هو ا هـ هـ ، ويكون اتساعها فى الشعاع المنعكس ب هـ الحادث عن عكس مسير ب د هو ا هـ ء

وطبقاً لقاعدة قبول العكس فان عكس مسير ب حـ ، مسير ب د يؤدى الى حدوث شعاع كالشعاع الأصلى ا ب ولكن مسيره معكوس . وبما أن اتساع الاهتزازة فى الشعاع الحادث فى استقامة ب ا عن عكس مسير ب حـ هو ا ـ٢ واتساعها فى الشعاع الحادث فى الاستقامة نفسها عن عكس مسير ب د هو ا هـ هـ ، واتساع الاهتزازة فى الشعاع الساقط الأصلى هو ا ، ينتج أن

$$١ = ا ـ^{٢} + ا هـ هـ \quad \therefore \quad ١ = ـ^{٢} + هـ هـ \ldots\ldots (١)$$

كذلك بما أن اتساع الاهتزازة فى الشعاع الحادث فى استقامة ب هـ عن عكس مسير ب حـ هو ا ب هـ واتساعها فى الشعاع الحادث فى الاستقامة نفسها عن عكس ب د هو ا هـ ء ، وبما أنه طبقاً لقاعدة قبول العكس لا يحدث فى هذه الاستقامة شعاع ما عن عكس مسيرى الشعاعين ب حـ ، ب د ينتج أن

$$ا ب + ا ء = \text{صفراً} \quad \therefore \quad ب = - ء \quad \ldots\ldots (٢)$$

ويستدل من المعادلة (٢) على أن اتساع الاهتزازة فى الشعاع المنعكس سواء أوقع الشعاع من الوسط الأول على الثانى أم من الثانى على الأول يكون واحداً فى المقدار . وتفسر الاشارة السالبة بانها دليل التغير الحادث فى الطور عند أحد هذين الانعكاسين

٢٢٨ — التداخل التام فى الأغشية الرقيقة

فاذا رمزنا الآن لاتساع الاهتزازة فى كل من الأشعة ا هـ ى ب ر ى حـ ط الخ (شكل ١٩٣) بالحرف ا فان اتساعها فى الشعاع المنعكس رأساً عند هـ يكون ا ب . واتساعها فى المنكسر ر مـ الحادث عن الشعاع الساقط ب ر يكون ا مـ ، فاذا انعكس ر مـ فى استقامة مـ هـ يكون اتساع الاهتزازة فى المنعكس مـ هـ هو ا مـ ء ، فاذا انكسر الشعاع مـ هـ فى استقامة هـ و يكون اتساع الاهتزازة فى المنكسر ا مـ ء هـ . فيكون هذا المقدار اتساع الاهتزازة فى الشعاع الذى ينفذ خارجاً من السطح الاول للغشاء بعد أن يعانى انعكاساً داخلياً واحداً . وبالمثل يمكن بيان أن اتساع الاهتزازة فى الشعاع الذى يخرج فى استقامة هـ و بعد أن يعانى ثلاثة انعكاسات داخلية هو ا مـ ء^{٣} هـ واتساعها فى الذى يخرج فى الاستقامة نفسها بعد أن يعانى خمسة انعكاسات هو ا مـ ء^{٥} هـ وهكذا

واذن يكون اتساع محصلة هذه الاهتزازات هو مجموع المتوالية الهندسية اللانهائية الآتية

$$ا مـ ء هـ + ا مـ ء^{٣} هـ + ا مـ ء^{٥} هـ + \ldots$$

$$= ا مـ ء هـ (١ + ء^{٢} + ء^{٤} + \ldots)$$

$$= \frac{ا مـ ء هـ}{١ - ء^{٢}}$$

ولكن يتضح فى البند السابق من معادلة (١) أن مـ هـ = ١ — ب^{٢} ومن معادلة (٢) أن ب^{٢} = ء^{٢}

∴ مجموع المتوالية يساوى

$$ا ء = - ا ب$$

اذن اتساع محصلة الاهتزازات الحادثة بفعل الشعاع الذى ينعكس انعكاساً داخلياً واحداً والذى ينعكس انعكاساً داخلياً ثلاث مرات وهكذا ، يساوى اتساع الاهتزازة فى الشعاع الذى

ينعكس رأساً عند السطح الأول . والاشارة السالبة دليل على أن طوريهما متضادان . فيكون التداخل الحادث تداخلا تاماً يؤدى الى عدم الحركة الاهتزازية ويؤدى الى ظلمة تامة

هـذا فيما يتعلق بالتداخل الحادث بالانعكاس . أما فيما يتعلق بالتداخل الحادث بالانكسار فان اتساع الاهتزازة فى الشعاع ن س (شكل ١٩٣) النافذ رأساً خلال الغشاء يكون مساوياً ا حـ هـ . واتساع الاهتزازة فى الشعاع الذى ينفذ فى استقامة ن س بعد أن يعانى انعكاسين داخليين يكون مساوياً ا حـ و^{٢} هـ . واتساع الاهتزازة فى الشعاع الذى ينفذ فى استقامة ن س بعد أن يعانى أربعة انعكاسات داخلية يكون ا حـ و^{٤} هـ وهكذا واذن يكون اتساع محصلتها جميعاً

$$= \text{ا حـ هـ} + \text{ا حـ و}^{٢}\text{هـ} + \text{ا حـ و}^{٤}\text{هـ} + \ldots .$$

$$= \frac{\text{ا حـ هـ}}{١ - \text{و}^{٢}} = ١$$

أى أن نتيجة تداخل جميع الأشعة التى تنفذ خارجة فى استقامة مـ ن ، ان يحدث فى هذا الاتجاه شعاع كأحد الأشعة الأصلية الساقطة على السطح الأول للغشاء

٢٢٩ — هدب التداخل فى الأغشية الرقيقة وألوان هذه الأغشية

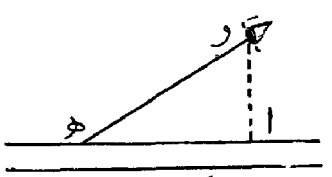
فرضنا فيما سبق أن موجة مستوية صدرها اب حـ د (شكل ١٩٣) تقع على الغشاء . ومن المناسب تفسير هذا الفرض بما يجعله متفقاً والاعتبارات المألوفه . يتضح بالنظر الى شكل (١٩٣) انه اذا لم يكن الغشاء رقيقاً ، فلكى يمكن الحصول على شعاع ينفذ فى استقامة هـ و بعد أن يعانى انعكاسات داخلية عدة يجب أن يكون صدر الموجة المستوية ذا اتساع كبير . ولكن اذا كان الغشاء رقيقاً جداً فانه يكفى لتكرار تعدد الانعكاسات الداخليـة أن يكون صدر الموجة المستوية ذا مساحة صغيرة . فاذا أضىء سطح الغشاء بضوء صادر من مصدر معتاد فان أية نقطة من المصدر يمكن اعتبارها مركزاً تنتشر منه موجات كرية . فاذا وقعت موجة كرية منها على الغشاء وروعى جزء صغير من سطحها أمكن اعتباره مستوياً فيصح بالنسبة اليه ما سبق ذكره عن الموجة المستوية . والجزء الصغير من صدر الموجة الكرية الواقع على الغشاء هو بمثابة حزمه ضوئية ضيقة اتجاهها عمودى على الجزء المذكور من صدر الموجة . اذن يكفى لحدوث

التداخل فى الأغشية الرقيقة بالكيفية التى سبق ذكرها أن تقع عليها حزمة ضيقة جداً من الأشعة ، أو كما يقال بايجاز أن يقع عليها شعاع من الضوء صادر من مصدر أياً كان

ويمكن النظر الى الظاهرة من وجهة أخرى . فاذا فرضنا أن و ه (شكل ١٩٣) شعاع ساقط على سطح الغشاء وانعكس منه جزء فى استقامة ه ا ثم نفذ جزء خارجا فى استقامة ر ب بعد أن ينعكس انعكاساً داخلياً واحداً عند مـ ثم آخر فى استقامة ط حـ بعد أن ينعكس ثلاثة انعكاسات داخلية وهكذا ، تكون جميع هذه الأشعة متوازية ومستمدة من شعاع واحد فى الأصل هو وه ، وتكون اذن قابلة للتداخل حيث تكون نتيجة هذا التداخل متوقفة على ما بينها من فروق المسير . ونظراً لأن اتساع الاهتزازة فى هذه الأشعة يقل كلما تعدد الانعكاس يتضح أن مسيرات الأشعة التى يكون لها تأثير يذكر تكون متقاربة جداً تكاد تكون متطابقة اذا كان سمك الغشاء صغيراً جداً فيتسنى فى هذه الحالة وقوعها جميعها على العين وحدوث التداخل الذى سبق ذكره بين الضوء المنعكس عند السطح الأول والضوء المنعكس عند السطح الثانى للغشاء

بعد هذا التوضيح يسهل شرح كيفية حدوث الظواهر المتعلقة بالتداخل التى ترى اذا نظر الانسان الى غشاء رقيق فى ظروف خاصة . وسنراعى فيما يلى حالتين : —

الاولى حالة غشاء رقيق منتظم السمك يقع عليه ضوء صادر من مصدر منبسط عريض . ولنفرض أولا أن الضوء بسيط ذو لون واحد . فاذا كانت العين فى نقطة مثل و (شكل ١٩٥) ووجهت بحيث ترى نقطة مثل ه ، أو بالأحرى مساحة تفاضلية من سطح الغشاء ، فنظراً لضيق انسان العين ، فان الحزمة الضوئية الواقعة عليها تكون ضيقة لاسيما اذا كانت العين على بعد مناسب من الغشاء ، واذن لسهولة الشرح يمكن اعتبار الرؤية حادثة عن وقوع الشعاع المفرد ه و على العين



(شكل ١٩٥)

ففى التداخل بالانعكاس تكون نقطة ه من السطح مضيئة اذا توافر شرط المعادلة

$$٢ \text{ ، } م \text{ حتا } \theta = (ن ٢ + ١) \frac{ل}{٢}$$

باعتبار أن ، رمز لسمك الغشاء ، م لمعامل انكسار الضوء فيه ، θ لزاوية الانكسار ، ل للطول الموجى ، وباعتبار أن ن تكون لها احدى القيمات الآتية : صفر او ١ او ٢ او ٣ الخ .

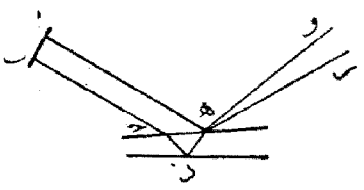
فاذا تحددت قيمة ن فالنقط التى مثل ه حيث تكون قيمة زاوية الانكسار عندها واحدة واذن قيمة زاوية السقوط واحدة ، المحل الهندسى لها محيط دائرة مركزها نقطة ا ، مسقط العمود الواقع من و على سطح الغشاء . فترى العين اذن مناطق مضيئة من السطح على هيئة دوائر و بينها بعضها والآخر ظلمة . فترى العين هدباً مستديرة كحلقات وتكون هذه الحلقات هى المحل الهندسى للنقط التى تكون فيها زاوية الانكسار واحدة ، واذن زاوية السقوط واحدة

كذلك اذا روعى التداخل بالانكسار فان العين ترى هدباً على هيئة حلقات مركزها نقطة تقابل العمود الواقع من العين مع سطح الغشاء . وحيث يتوافر شرط المعادلة المذكورة آنفاً تكون الظلمة

أما إذا أضيء سطح الغشاء بضوء أبيض صادر من مصدر منبسط كما يحدث اذا وقع على سطح الغشاء ضوء السماء ، فان الهدب التى ترى تكون ملونة . ويتضح من بند (٢٢٠) انه لكى ترى الهدب يجب أن يكون سمك الغشاء صغيراً جداً حتى لا يكون فرق المسير بين شعاعين متداخلين كبيراً . ويلاحظ أيضاً انه اذا توافر شرط الظلمة بالنسبة الى ضوء ذى لون معين فان الضوء الواصل الى العين من الجزء المعين من سطح الغشاء يكون لونه متمما للون ذلك الضوء . واذن يكون لون هذا الجزء من السطح اذا وقع على العين الضوء المنعكس ، ولونه اذا وقع عليها الضوء النافذ خلال الغشاء يكون أحدهما متمما للآخر

والألوان الزاهية التى تبدو على الأغشية الرقيقة كغشاء من محلول الصابون أو طبقة رقيقة جداً من زيت السيارات عند ما تتلوث به الطرق بعد رشها بالماء . هذه الألوان ناشئة عن التداخل وتحدث بالكيفية التى تقدم ذكرها . وقد دلت التجارب على أنه اذا كان الغشاء رقيقاً جداً يكاد لا يكون له سمك ، فان لونه الحادث بالانعكاس يعدم أى يظهر سطح الغشاء أسود . وهذا يدل على أن طور الاهتزازة فى الضوء المنعكس عند أحد السطحين مضاد لطورها فى الضوء المنعكس عند الآخر

والحالة الثانية التى نراعيها هنا حالة غشاء رقيق متغير السمك . ولنفرض أن ا ب (شكل ١٩٦) صدر موجة مستوية واقعة على الغشاء . فالشعاع المنعكس عن السطح الأول عند ه فى



(شكل ١٩٦)

استقامة هـ و لاينطبق على الشعاع هـ ر الذي يخرج من الغشاء بعد أن يعاني انعكاساً داخلياً عند د . واذا فرضنا ان الزاوية بين سطحي الغشاء صغيرة جداً كانت الزاوية بين الشعاعين هـ و ، هـ ر صغيرة واذن أمكن وقوعهما معاً على العين وهي تنظر الى نقطة هـ . واذا رمزنا لزاوية سقوط الشعاع حـ د على السطح الأسفل للغشاء بالحرف هـ ولطول العمود الواقع من هـ على هذا السطح بالحرف ع أمكن بيان أن شرط حدوث الضياء في حالة الانعكاس أن يكون

$$٢ ع م \text{ جتا } هـ = (٢ن + ١)\frac{ل}{٢}$$

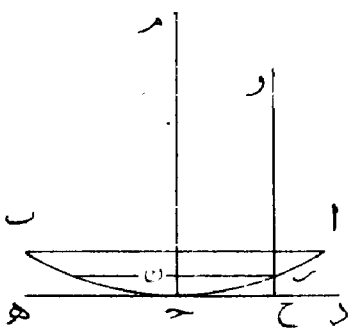
فاذا أضيء سطح الغشاء بضوء ذي لون واحد صادر من مصدر منبسط فاختلاف زوايا سقوط الأشعة المختلفة وتغير سمك الغشاء يجعل المسألة معقدة . ولكن اذا فرضنا أن الضوء يسقط على الغشاء عمودياً عليه ، أي اذا فرضنا أن قيمة هـ صغيرة جداً يكون فرق المسير بين الشعاعين المتداخلين (باغفال تغير الطور الحادث عند أحد الانعكاسين) مساوياً ٢ ع م . فاذا ساوى هذا المقدار ن ل حدث عن التداخل بالانعكاس ظلمة واذا ساوى $(٢ن + ١)\frac{ل}{٢}$ حدث ضياء . فتكون مواضع الظلمة أو الضياء هي التي يكون عندها سمك الغشاء واحداً وتكون الهدب هي المحل الهندسي للنقط التي يكون عندها سمك الغشاء واحداً

٢٣٠ — حلقات نيوتن (١)

من الامثلة المألوفة للتداخل في الاغشية الرقيقة المتغيرة السمك ، التداخل الحادث بفعل طبقة رقيقة من الهواء محصورة بين السطح المحدب لعدسة من الزجاج وبين السطح المستوى للوح من الزجاج يلمس سطحه المستوى السطح المحدب للعدسة . فاذا فرضنا أن ا حـ ب (شكل ١٩٧) السطح المحدب لعدسة محدبة مستوية وهو يلمس في نقطة حـ السطح المستوى د حـ هـ للوح من الزجاج ، وفرضنا أن شعاعاً من ضوء ذي لون واحد مثل ور واقع على ا ب (السطح

(١) Newton's Rings

المستوى للعدسة) عمودياً عليه فان الشعاع الواصل الى نقطة ر يؤدى الى شعاعين أحدهما ينعكس عند هذه النقطة لوقوعه فى مادة الزجاج على السطح الفاصل بينه وبين الهواء ، والآخر ينفذ الى الطبقة الهوائية ويقع على السطح د ح هـ للوح الزجاجى عند نقطة ح فينعكس ويخترق الطبقة الهوائيه مرة أخرى ويقع على السطح المحدب للعدسة نافذاً فيها . فاذا كان تكور السطح ا ح ب صغيراً جداً كاد يكون مسير الشعاع المنعكس عند ر



(شكل ١٩٧)

ومسير الشعاع المنعكس عن السطح د ح هـ عند ح متطابقين ، فيتداخلان ، ويؤدى تداخلهما الى اشتداد الضياء أو محوه تبعاً لمقدار فرق المسير بينهما . وبما أن أحد الانعكاسين يحدث والضوء واقع من الزجاج على الهواء والثانى يحدث والضوء واقع من الهواء على الزجاج ، فان الثانى يكون مقروناً بتغير فى الطور قدره ط ، فاذا كان فرق المسير (ويساوى ٢ ر ح) مساوياً ن ل ، حيث تكون ن صفراً أو ١ أو ٢ الخ حدثت ظلمة أما اذا كان مساوياً (٢ ن + ١) $\frac{ل}{٢}$ حدث ضياء . والمحل الهندسى للنقط التى مثل ح ويكون عندها سمك الطبقة الهوائية واحداً ، محيط دائرة مركزها نقطة التلامس . اذن اذا وقعت عمودياً على السطح ا ب حزمة متوازية من أشعة ذات لون واحد فمواضع الظلمة والضياء تكون حلقات متحدة المركز مركزها نقطة التلامس . وموضع التلامس حيث يعدم سمك الطبقة الهوائية يكون موضع ظلمة

واذا استبدل بالضوء ذى اللون الواحد ضوء أبيض . فان موضع التلامس يظل موضع ظلمة ولكن الحلقات التى تحيط به تكون ملونة . ونظراً لان الطول الموجى للضوء البنفسجى اقصر تكون الحلقة البنفسجية أول حلقة. وللسبب المتقدم فى بند (٢٢٠) فان الحلقات الملونة يضمحل سطوع الوانها بالتدريج كلما بعدنا عن موضع التلامس . فتكاد لا تتميز الحلقات بعد عدد محدود منها حيث يحدث ضوء أبيض .

وتسمى الحلقات الحاصلة بهذه الكيفية حلقات نيوتن . ويمكن الحصول عليها ورؤيتها بسهولة اذا وضعت عدسة محدبة مستوية نصف قطر تكور وجهها المحدب متر أو يزيد بحيث

يلمس هذا الوجه السطح المستوى للوح من الزجاج . فاذا نظر اليها فى ضوء النهار بحيث يصل الى العين ضوء منعكس تيسر بالعين المجردة رؤية الحلقات ؛ وكلما زاد نصف قطر تكور السطح المحدب للعدسة ، كانت الحلقات أكبر وأظهر للعين

وقد يستخدم أحياناً جهاز يتركب من لوحين من الزجاج . قد حدب قليلا احد سطحى أحدهما ، وقعر أحد سطحى الآخر تقعيراً طفيفاً ، بحيث يكون نصف قطر السطح المحدب أصغر قليلا من نصف قطر السطح المقعر . فاذا وضع السطح المحدب على المقعر انحصرت بينهما طبقة رقيقة جداً من الهواء متغيرة السمك . فتكون الهدب التى تحدث بفعلها كبيرة متسعة يسهل رؤيتها بالعين المجردة

ويمكن تعديل التجربة للحصول على جلقات تتحول فيها الحلقات المظلمة الى مضيئة والمضيئة الى مظلمة ، ويكون موضع التلامس ضياء فى التداخل بالانعكاس . فاذا جعل الغشاء الرقيق من مادة شفافة (غير الهواء)، بين نوعين من الزجاج أحدهما من الزجاج الصخرى والآخر من الزجاج التاجى وكان معامل الانكسار فى مادة الغشاء وسطاً بين معامليه فى نوعى الزجاج ، وسار الضوء من الزجاج الصخرى (الاكبر كثافة ضوئية) الى مادة الغشاء ، ومنها الى الزجاج التاجى (الأصغر كثافة ضوئية) فان كلا من الانعكاسين لا يكون مقروناً بتغير ما فى الطور . كما أنه اذا سار الضوء فى الاتجاه المضاد فان كلا منهما يكون مقروناً بتغير فى الطور . واذن شرط حدوث الضياء (بالانعكاس) فى الحالتين أن يكون ٢ ء م (باعتبار أن ء سمك الغشاء ، م معامل انكسار الضوء فيه) مساوياً ن ح وشرط حدوث الظلمة أن يكون ٢ ء م مساويا (٢ ن + ١) $\frac{ل}{٢}$. ويختار لاجراء هذه التجربة نوع من الزيوت معامل انكسار الضوء فيه يقع بين قيمتيه فى نوعى الزجاج

وتتكون أيضاً فى الحالات السابقة حلقات تكون نتيجة التداخل بالانكسار . واذا كان الضوء ذا لون واحد فالحلقة التى ترى مضيئة بالضوء المنعكس ترى مظلمة بالضوء النافذ والعكس بالعكس واذا كان الضوء أبيض فان لونها فى احدى الحالتين يكون المتمم للونها فى الأخرى

٢٣١ — تطبيق حلقات نيوتن لتعيين الطول الموجى

رأينا فى حالة الغشاء الهوائى انه اذا كانت نقطة ر (شكل ١٩٧) موضع ضياء مثلا فى التداخل بالانعكاس وكان طول المستقيم ر ح مساوياً سمك الغشاء عند هذه النقطة فان

$$٢ \overline{ر ح} = (٢ ن + ١) \frac{ل}{٢}$$

حيث تكون للمقدار ن احدى القيمات الآتية : صفر أو ١ أو ٢ أو ٣ الخ . ويلاحظ انه حيث تكون قيمة ن صفراً تتكون أول حلقة مضيئة تلى الظلام المركزى . أما اذا كانت نقطة ر موضع ظلمة فان

$$٢ \overline{ر ح} = ن ل$$

حيث تكون للمقدار ن احدى القيمات الآتية : صفراً أو ١ أو ٢ أو ٣ الخ . ويلاحظ انه حيث تكون قيمة ن صفراً تتكون الظلمة الحادثة عند موضع التلامس

فاذا رسمنا من نقطة التلامس وهى نقطة ح (شكل ١٩٧) نصف قطر السطح المحدب للعدسة وليكن ح مـ فالمستوى المار بنقطة ر عمودياً على ح مـ والسطح المحدب للعدسة يتقاطعان عند محيط دائرة مركزها نقطة ن ، ويمثل محيط الدائرة المحل الهندسى للنقط التى مثل ر حيث يكون سمك الغشاء عندها ثابتاً . وتكون هذه الدائرة بمثابة حلقة مضيئة أو حلقة مظلمة تبعاً لتوافر شرط الضياء او الظلمة

فاذا رمزنا لنصف قطر تكور السطح المحدب للعدسة بالرمز س يتضح من الشكل أن

$$\overline{ح ن} (٢ س - \overline{ح ن}) = \overline{ن ر}^{٢}$$

وبما أن $\overline{ح ن} = \overline{ر ح}$ مقدار صغير ينتج أن

$$\overline{ر ح}^{٢} = \frac{\overline{ن ر}^{٢}}{س}$$

وبالرمز لطول المستقيم $\overline{ن ر}$ وهو نصف قطر الحلقة بالحرف ا يكون

$$\overline{ر ح}^{٢} = \frac{ا^{٢}}{س}$$

فعند حدوث الحلقة المضيئة النونية يكون نصف قطرها $ا_ن$ طبقاً للمعادلة

$$\frac{ا_ن^2}{س} = (٢ن - ١)\frac{ل}{٢}$$

$$\therefore \quad ا_ن^2 = س(٢ن - ١)\frac{ل}{٢} \quad \ldots\ldots (١)$$

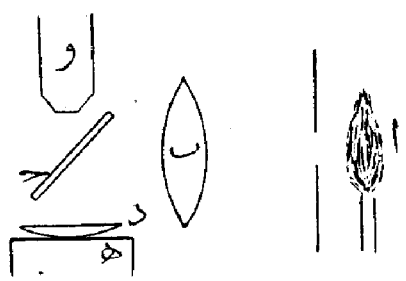
ومن هذه المعادلة يتضح أنه اذا أمكن قياس نصف قطر احدى الحلقات المضيئة وكان نصف قطر تكور السطح المحدب للعدسة معروفاً أمكن استخراج قيمة الطول الموجى للضوء

كذلك اذا رمزنا لنصف قطر الحلقة المظلمة النونية بالرمز $ب_ن$ يكون

$$\frac{ب_ن^2}{س} = ل ن$$

$$\therefore \quad ب_ن^2 = س ن ل \quad \ldots\ldots (٢)$$

ولتطبيق حلقات نيوتن لتعيين الطول الموجى لضوء لهب الصوديوم مثلا ، يتخذ جهاز كالمبين بشكل (١٩٨) يتركب من عدسة لامة ب توجه أشعة متوازية نحو لوح من الزجاج حـ موضوع بحيث يعكس الأشعة المتوازية فتقع عمودياً على السطح المستوى لعدسة محدبة مستوية د ذات سطح محدب تحدباً مناسباً ملامس لسطح مستوى للوح من الزجاج هـ . ولرؤية



(شكل ١٩٨)

الحلقات ولامكان قياس أقطارها يوجد ميكرسكوب متحرك مرموز لطرفه الأسفل فى الشكل بالحرف و . وكثيراً مايجمع الجهاز من أجزاء منفصلة توضع عند الحاجة فى المواضع المذكورة . ولسهولة الحصول على الحلقات يوضع اللوح الزجاجى هـ أفقياً وتوضع فوقه العدسة د . ثم يؤتى بالميكرسكوب ومحور رأسى ويوضع بحيث يكون محوره الرأسى ماراً بنقطة تلامس العدسة باللوح الذى تحتها (على قدر الامكان) وينظر خلاله الى قطعة صغيرة من الورق مثلا توضع بين العدسه وبين اللوح ويهيأ الميكرسكوب حتى ترى بوضوح تام . فيكون مهيأ الى حد ما لرؤية الحلقات

عند تكونها و بعد هذا تزال قطعة الورق المذكورة وتظلم الغرفة ويعد لهب الصوديوم ويوضع عند ا كما هو مبين بالشكل وتوضع العدسة اللامة ب بحيث يكون اللهب على بعد منها يساوى بعدها البؤرى أو يكاد ، ثم يوضع اللوح الزجاجى ح ، وهنا قد يكون من المناسب ازاحة الميكرسكوب فى الاتجاه الأفقى دون رفع أنبوبته أو خفضها، وينظر وخط البصر رأسى مار ماأمكن بنقطة تلامس العدسة د باللوح الذى تحتها و ينظر بهذه الكيفية خلال اللوح ح ، ويغير ميل هذا اللوح حتى يرى سطح العدسة د مضيئاً . فاذا كان نصف قطر السطح المحدب للعدسة د طويلا الطول المناسب أمكن فى هذه الحالة رؤية الحلقات بالعين المجردة ، فيعاد الميكرسكوب الى مكانه الأول ويكون من السهل رؤية الحلقات خلاله مكبرة . أما اذا لم يخول تكور سطح العدسة د ظهور الحلقات للعين المجردة ، فان الميكرسكوب يعاد الى الوضع الذى يصير فيه محوره الرأسى ماراً ما أمكن بنقطة تلامس العدسة د باللوح الذى تحتها لكى يتيسر رؤية الحلقات . وقد يحتاج الأمر فى كلتى الحالتين الى تعديل طفيف فى بعد الميكرسكوب عن العدسة د ، لكى يصل وضوح الحلقات ودقتها الى أقصى حد . والحلقات تزداد دقة اذا حجب اللهب بحاجز معتم به فتحة ينفذ منها الضوء الواقع على العدسة ب و يوضع بحيث تكون الفتحة على بعد من العدسة يساوى بعدها البؤرى . ومتى تم الحصول على الحلقات واضحة دقيقة تقاس أقطارها بوساطة الميكرسكوب المتحرك

هذا من حيث تهيئة الجهاز للحصول على الحلقات ولكن هناك مسألة أخرى يلزم مراعاتها . فى استنباط المعادلتين (١) ، (٢) فرضنا أن موضع تلامس العدسة د باللوح ه نقطة هى مركز الحلقات . ولكن يتبين عملياً أن مركزها دائرة منبسطة مظلمة تزداد اتساعاً كلما زاد التضاغط بين العدسة د واللوح ه . واتساعها طبعاً مقرون باتساع جميع الحلقات، وناشئ عن شىء من التشوه يحدث فى أحد السطحين اللذين يحددان الطبقة الهوائية أو كليهما . ولكى يتلافى الخطأ المترتب على هذا ، يقاس نصف قطر أية حلقة من الحلقات المضيئة ولنرمز له بالرمز $ا_ن$. ثم نصف قطر أية حلقة مضيئة أخرى ولنرمز له بالرمز $ا_م$ فيكون

$$\frac{ل}{٢}(ن ر - م ر) = ا_ن^٢ - ا_م^٢$$

$$= ل(ن - م)$$

ويتبين من هذه المعادلة انه اذا عرف نصف قطر أية حلقة ونصف قطر أية حلقة أخرى وعرف عدد الحلقات التى بينهما أمكن استخراج قيمة ل ، ولا يتطلب ذلك معرفة قيمتى ن ، ن

٢٣٢ — الحصول على هدب عريضة

تبين فيما سبق أن شرط حدوث الظلمة فى التداخل بالانعكاس فى الأغشية الرقيقة منصوص عليه بالمعادلة

$$٢ ء م \text{ حتا } ه = ن ل$$

ومن هذه المعادلة يتضح أن سمك الغشاء فى موضع تحدث فيه ظلمة هو

$$ء = \frac{ن ل}{٢ م \text{ حتا } ه}$$

فلكى ننتقل من هدبة مظلمة الى هدبة مظلمة تليها يجب أن يبلغ سمك الغشاء فى موضع هذه الظلمة المقدار (١)

$$ء' = \frac{(ن + ١) ل}{٢ م \text{ حتا } ه}$$

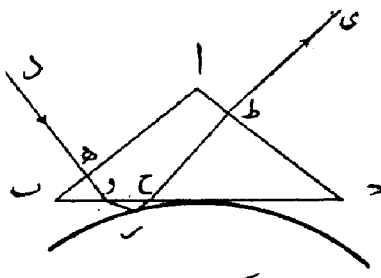
واذن يجب أن يتغير سمك الغشاء بالمقدار

$$ء' - ء = \frac{ل}{٢ م \text{ حتا } ه}$$

فاذا كانت زاوية ه كبيرة كان المقدار المذكور كبيراً . وهذا يعنى أنه كلما كبرت قيمة زاوية ه كان عرض الهدبة اكبر

وتطبق الفكرة المذكورة فى جهاز يصلح للحصول على هدب عريضة يمكن رؤيتها بسهولة بالعين المجردة . والجهاز يتركب من منشور من الزجاج ا ب جـ (شكل ١٩٩) موضوع

(١) هذا باعتبار ثبوت زاوية ه



(شكل ١٩٩)

وسطحه ب ح على سطح محدب من الزجاج بحيث ينحصر بين السطحين طبقه من الهواء متغيرة السمك . فاذا سقط على السطح ا ب شعاع كالشعاع د ه ، ونفذ فى مادة المنشور فى استقامة ه و ، ثم وقع على السطح ب ح وكانت زاوية السقوط عليه قريبة من الزاوية الحرجة ، فانه عند نفوذه الى الطبقة الهوائية فى استقامة و ر تكون زاوية انكساره فى هذه الطبقة كبيرة . فتتوافر الفكرة التى أوردنا هافيما سبق وتصير هدب التداخل التى ترى اذا نظر فى استقامة ى ط ، عريضة . وقد تجعل الزاوية ا الواقعة بين السطحين ا ب ، ا ح بحيث اذا وقعت الأشعة على أحدهما عمودية عليه ، كانت زاوية سقوطها على ب ح أصغر قليلا من الزاوية الحرجة ، وترى الهدب اذا نظر نحو السطح الآخر عمودياً عليه .

وللهدب الحادثة بوساطة الجهاز المذكور خاصة تمتاز بها . وهى أنها تكاد تكون هدباً لا لونية اذا استخدم الضوء الابيض فى تكوينها ، وكانت زاوية السقوط على السطح ب ح قريبة من الزاوية الحرجة . وعلة ذلك أن الاشعة ذات الالوان المختلفة تنشتت عند نفوذها الى الطبقة الهوائية الرقيقة . فتكون زاوية انكسار الشعاع البنفسجى مثلا اكبر من زاوية انكسار الشعاع الاحمر . ويؤدى هذا الى زيادة البعد بين كل هدبتين بنفسجيتين أو زيادة عرض الواحدة منها ، فبدلا من أن تكون هذه الهدب متقاربة بعضها الى الآخر كما لو قوبلت بالهدب الحمراء تكون متباعدة قليلا من جراء هذا . ويساعد تباعدها على جعلها تنطبق على الهدب الحمراء حتى اذا لم يكن الانطباق تاماً ولم تكن الهدب لا لونية على وجه التمام فان عدد الهدب الملونة المرئية يكون اكبر كثيراً مما فى التجارب الاخرى . ويزداد تشتت الاشعة الملونة بعضها عن الآخر عند ما تقرب زاوية السقوط داخل الزجاج من الزاوية الحرجة . فاذا دنت زاوية السقوط من قيمة الزاوية الحرجة كثيراً . فان الهدب البنفسجية تكون أبعد بعضها عن الآخر من الهدب الحمراء وتكون أيضاً أعرض من هذه . فيترتب على ذلك أن الهدب لا تتطابق ويكون ترتيب الالوان فيها معكوساً

٢٣٣ — تطبيق التداخل فى الأغشية الرقيقة لاختبار استواء السطوح

يمكن تطبيق التداخل فى الاغشية الرقيقة لاختبار استواء السطوح . والفكرة العامة فى ذلك أنه اذا تكونت طبقة رقيقة بين سطحين مستويين تمام الاستواء يميل أحدهما على الآخر ميلا طفيفاً فان الهدب التى ترى عند وقوع الضوء عمودياً على السطح تكون مستقيمة موازية لمستقيم تقاطع السطحين أو تقاطع امتداديهما . أما اذا كان أحدهما مستوياً تمام الاستواء والآخر ليس كذلك . فان الهدب تكون بمثابة المحال الهندسية التى يكون عندها سمك الطبقة الرقيقة واحداً وتطبيق هذه الفكرة لاختبار استواء السطح تتضمن تكوين غشاء رقيق بين هذا السطح المراد اختباره وبين سطح آخر مستوى تمام الاستواء واختبار الهدب التى تتكون . ويمكن كما فعل « اللورد رايلى » [1] استخدام السطح الافقى لماء ساكن ، قد عنى بنقائه وتجريده من المواد العالقة فيه ، فيوضع السطح المراد اختباره فى اناء متسع منبسط ويصب فوقه الماء حتى يصير سمك الطبقة التى فوقه حوالى المليمتر أو أقل ويعنى بأن يكون البعد بين أطراف السطح المراد اختباره وبين جدران الاناء كبيراً حتى لا يكون لانحناء سطح الماء بفعل التوتر السطحى أثر ما . فاذا عكست حزمة من الأشعة المتوازية المستمدة من ضوء لهب الصوديوم ، بوساطة لوح من الزجاج مثبت من فوق سطح السائل بحيث تسقط رأسياً على سطح الماء ونظر خلال اللوح بوساطة ميكرسكوب مثلا كما فى تجربة حلقات نيوتن تيسر رؤية الهدب (لا سيما اذا عنى مبدئياً بجعل السطحين متوازيين ما أمكن) ويمكن من أشكالها معرفة ما اذا كان السطح مستوياً

٢٣٤ — التداخل فى الالواح السميكة وهدب هايدنجر

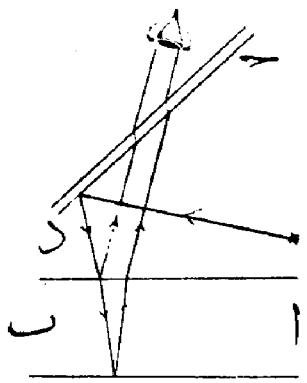
ولو انه لا يوجد نظرياً فرق ما بين التداخل فى الأغشية الرقيقة وبين التداخل فى الالواح السميكة فانه يجور التميز بين التداخلين ، نظراً لأن الحصول على هدب التداخل فى حالة الالواح السميكة يتطلب العناية بأمور خاصة . ويتضح بالرجوع الى شكل (١٩٣) انه لكى ينطبق

---

(١) Lord Rayleigh

الشعاع هـ و المنعكس عند هـ عند السطح الأعلى للغشاء والأشعة الأخرى التى تنعكس عن السطح الاسفل مرة أو أكثر يجب أن يكون صدر الموجة المستوية الساقطة ا ب حـ د متسعاً اتساعاً كافياً اذا كان سمك الغشاء كبيراً واذا كان صدر الموجة متسعا أدى الى عدة أشعة مثل هـ و وموازية له ، فلكى تستقبل العين هذه الأشعة المتوازية يلزم النظر بوساطة تلسكوب . كذلك اذا اعتبرنا أن و هـ (شكل ١٩٣) شعاع ساقط ينعكس جزء منه عند السطح الاعلى فى استقامة هـ ا و ينشأ عن تعدد انعكاساته فى الغشاء الأشعة ر ب ، ط حـ الخ فان هذه الاشعة تكون متباعدة اذا كان سمك الغشاء كبيراً . فلكى تقع جميعها على العين يلزم استقبالها بوساطة تلسكوب أيضاً . وفى كلتى الحالتين اذا لم يكن سمك الغشاء كبيراً جداً فقد يكفى أن ينظر بالعين المجردة وهى مهيأة لرؤية الجسم البعيد أى وهى غير متكيفة . وتحدث فى الالواح السميكة المنتظمة السمك هدب تتكون هى أيضاً من جراء سقوط الاشعة المختلفة من المصدر المنبسط العريض بزوايا مختلفة . و يشترط لرؤية الهدب أن يكون الضوء ذا لون واحد نظراً لان فرق المسير بين الشعاعين المتداخلين كبير (أنظر بند ٢٢٠) ولا يمكن الحصول على هدب ملونة فى الالواح السميكة بتداخل الضوء الابيض وتسمى الهدب الحاصلة فى الالواح السميكة هدب « هايدنجر »[1] نسبة الى كاشفها

ويتضح من شكل (٢٠٠) الفكرة الاساسيه فى طريقة يتسنى بها الحصول على الهدب ورؤيتها . فالضوء يسقط من مصدر ممتد ذى لون واحد كلهب الصوديوم . فينعكس عند سطح لوح من الزجاج حـ د بحيث يسقط عمودياً أو يكاد يكون عمودياً على لوح سميك من الزجاج ا ب قد عنى باستواء سطحيه وتوازيهما . وينظر خلال اللوح الزجاجى حـ د لرؤية الهدب الحادثة عن التداخل بالانعكاس وذلك بتلسكوب معد لرؤية الجسم البعيد أو بالعين المجردة غير المتكيفة اذا لم يكن سمك اللوح ا ب كبيراً جداً . والهدب التى ترى تكون على هيئة حلقات متحدة المركز تمثل الواحدة منها المحل الهندسى للنقط التى تكون زاوية السقوط عندها واحدة .



(شكل ٢٠٠)

(١) Haidinger

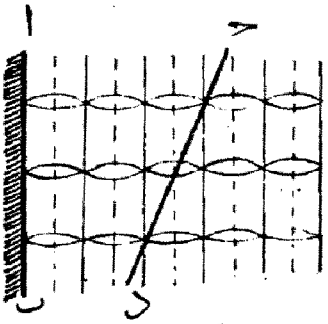
وقد تستبدل باللوح حد مرآة مقعرة فى منتصفها فتحة ينظر خلالها نحو اللوح ا ب ويعمل سطحها العاكس فى توجيه الاشعة عمودية على هذا اللوح . فتكون الحلقات أشد ضياء وسطوعا

٢٣٥ — الموجات الضوئية المستقرة

اذا تداخل قطاران من الموجات يسيران فى استقامة واحدة وفى اتجاهين متضادين وكانت مدة الاهتزازة واتساعها واحداً عدمت الحركة الاهتزازية فى مواضع تسمى العقد ، حيث تجتمع القمة مثلا فى أحد القطارين بالقرار من الآخر ، واشتدت الحركة فى مواضع أخرى تسمى البطون حيث تجتمع القمة مثلا من أحد القطارين بالقمة من الآخر أو القرار بالقرار . ويكون البعد بين عقدتين متتاليتين أو بطنين متتاليين مساوياً نصف الطول الموجى

ومن أمثلة الموجات المستقرة تلك التى تتكون على الاوتار من تداخل الموجات العرضية الساقطة من أحد طرفى الوتر نحو الطرف الآخر والموجات المنعكسة من هذا الطرف نحو الاول أو تلك التى تتكون فى أعمدة الهواء المفتوحة الطرفين أو المغلق أحد طرفيها ، حيث تتداخل الموجات الطولية الهوائية الساقطة والموجات المنعكسة

فاذا كان الضوء حركة موجية ترتب على هذا امكان حدوث الموجات المستقرة فى الضوء أيضاً فاذا سقط ضوء ذو طول موجى معين عمودياً على سطح عاكس مثل ا ب (شكل ٢٠١) فان تداخل الموجات الساقطة والموجات المنعكسة يحدث عقداً و بطوناً وثم موجات مستقرة . واذا كان الضوء واقعاً من وسط لطيف ومنعكس عند سطح وسط كثيف فتغير الطور الحادث عند الانعكاس يجعل القمة مثلا فى



(شكل ٢٠١)

الموجة الساقطة تنعكس قراراً فيكون موضع السقوط ملتقى قمة بقرار أو قرار بقمة ، فتتكون هناك عقدة . واذا كانت أشعة الضوء الساقطة على السطح ا ب متوازية كان توزع العقد والبطون بكيفية كالمبينة بشكل (٢٠١) فتعدم الحركة الاهتزازية فى مستويات موازية للسطح مبينة

بالمستقيمات المتصلة فى الشكل تسمى المستويات العقدية . وتشتد الحركة الاهتزازية فى مستويات مبينة بالمستقيمات المتقطعة تسمى المستويات البطنية . ويكون البعد بين المستويين المتتاليين من تلك أو من هذه مساوياً نصف الطول الموجى

وقد استدل « فينر » على حدوث الموجات المستقرة فى الضوء مستعيناً بغشاء (فلم) فتوغرافى رقيق جداً لا يتجاوز سمكه جزءاً من عشرين جزء من الطول الموجى للضوء وكان الغشاء منبسطاً على سطح لوح من الزجاج . فاذا وضع الغشاء فى استقامة حـ د ووقعت خلال الغشاء أشعة ضوء ذى لون واحد عمودياً على السطح العاكس ا ب وتكونت العقد والبطون فان بعض أجزاء الغشاء ينطبق على مواضع العقد فتعدم عنده الحركة الاهتزازية وبعضها ينطبق على البطون فتشتد لديه الحركة الاهتزازية . فلا يتأثر الغشاء الفتوغرافى الحساس فى المواضع الأولى ويتأثر بشدة فى المواضع الثانية. فاذا عولج الغشاء بالطريقة المعتادة ، فحمض وثبت، وجدت عليه خطوط معتمة يتخللها مناطق شفافة وتكون المواضع المعتمة هى مواضع تلاقى الغشاء بالمستويات البطنية حيث وجد الضوء وكان له أثره الفتوغرافى . وتكون المواضع الشفافة هى مواضع تلاقى الغشاء بالمستويات العقدية حيث عدم الضوء ولم يكن له أثر

ويلاحظ فى هذه التجربة أنه اذا أمكن وضع الغشاء حـ د بحيث ينطبق تماماً على أحد المستويات العقدية فبالرغم من نفوذ الضوء الساقط وكذلك الضوء المنعكس خلاله فانه لا يتأثر لولا أن وضعه بهذه الصفة ليس من الامور المتيسرة عملياً . وقد وضع « فينر » فى تجاربه الغشاء الفتوغرافى قريباً جداً من السطح العاكس بحيث يميل بزاوية صغيرة عليه ، وكان الغشاء الفتوغرافى نفسه (لا اللوح الزجاجى المحضر على سطحه الغشاء) متجهاً نحو السطح العاكس وقد كان نجاح تجاربه متوقفاً على تحضير أغشية فتوغرافية رقيقة جداً حتى يتسنى عند انطباق أحد أجزائها على موضع العقدة أن تعدم الاهتزازة خلال السمك كله عند هذا الموضع

---

(١) Otto Wiener

٢٣٦ — طريقة ليمان فى التصوير الفتوغرافى بالألوان

وقد اتخذت الموجات الضوئيـة المستقرة وسـيلة للتصوير الفتوغرافى بالألوان . وأول من استطاع هذا « ليمان »[1] . وطريقته تتلخص فى أن يوضع لوح فتوغرافى يتركب من لوح من الزجاج مكسو أحد سطحيه بطبقة فتوغرافيـة حساسة ، بحيث تكون الطبقة الحساسة ملامسة سطحاً زئبقياً عاكساً ويكون اللوح الزجاجى متجهاً نحو الجهة التى يقع منها الضوء . فاذا أسقط خلال اللوح الفتوغرافى ضوء ذو طول موجى معين عمودياً على سطح الزئبق حدثت فى الطبقة الفتوغرافية نفسها من جراء تداخل الموجات الساقطة على سطح الزئبق والموجات المنعكسة عنه حدثت الموجات المستقرة فتتكون فى الطبقة الفتوغرافية المستويات العقدية والمستويات البطنية كالمبينة بشكل (٢٠١) . وحيث تكون المستويات البطنية تتأثر المادة الفتوغرافية أشد تأثير وحيث تكون المستويات العقدية لا تتأثر . فاذا عولج اللوح الفتوغرافى فحمض وثبت بالطريقة المعتادة تكونت فى باطن الطبقة الجيلاتينية الفتوغرافية ، مستويات معتمة موازية للسطح العاكس بينها مناطق شفافة . وتتكون تلك المستويات المعتمة حيث كانت المستويات البطنية أى حيث كانت المواضع التى تأثرت فيها المادة الفتوغرافية الحساسة فتحللت مركبات الفضة بفعل الضوء . وان كانت تلك المستويات معتمة شيئاً ما فنظراً لرقتها تكون شفافة الى حد كبير . ويكون طبعاً البعد بين المستويين المتتاليين منها مساوياً نصف الطول الموجى للضوء

فاذا سقط بعد ذلك على اللوح الفتوغرافى عمودياً عليه ضوء من نوع الضوء الأول فان الضوء ينعكس عن الطبقات التى تكونت برسوب الفضة عند المستويات البطنية . والضوء المنعكس عن احدى هذه الطبقات يختلف مسيره عن الضوء المنعكس عن التى تليها بمقدار الطول الموجى (نظراً لأن البعد بين الطبقتين مساوياً نصف الطول الموجى) فيحدث عن تداخل الاضواء المنعكسة عن الطبقـات المختلفة ضياء شديد بالرغم من أن الضوء المنعكس عن الطبقة الواحدة ضعيف . فاذا نظر الى اللوح الفتوغرافى بحيث يصل الى العين الضوء المنعكس رؤى سطحه مضيئاً

---

(١) Lippmann

بشدة واذا وقع عليه ضوء أبيض فان الضوء الذى يكون طوله الموجى مساوياً ضعف البعد بين طبقتين متتاليتين هو الذى يشتد ضياؤه من جراء التداخل المذكور فيغلب اذن فى المنعكس لون هذا الضوء و يظهر سطح اللوح الفتوغرافى ملوناً بلونه بالرغم من أن الضوء الواقع عليه أبيض

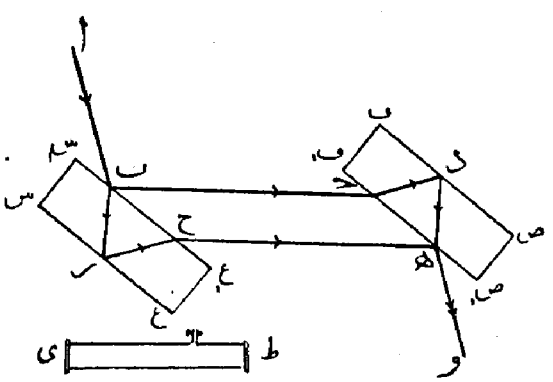
وقد كانت العقبة فى سبيل تحقيق هذا عملياً صعوبة الحصول على طبقات فتوغرافية حساسة تكون حبيباتها دقيقة صغيرة لا تتجاوز أبعادها كسراً صغيراً من الطول الموجى . ويكفى لتطبيق ماذكر عملياً أن يوضع اللوح الفتوغرافى فى آلة التصوير بحيث تكون الطبقة الجيلاتينية الحساسة ملاصقة لسطح زئبقى نظيف . ويكون اللوح الزجاجى متجهاً نحو عدسة الآلة

وقد حضرت مقاطع من الطبقات الجيلاتينية بعد تحميض اللوح وتثبيته ، دل فحصها بوساطة الميكرسكوب على حقيقة وجود الطبقات المعتمة المتوازية التى تدل على وجود المستويات البطنية

٢٣٧ — مقاييس التداخل — مقياس جامن

مقاييس التداخل [١] أجهزة مبنى عملها على ظاهرة التداخل تستعمل للحصول على هدب التداخل ولتطبيق ظاهرة التداخل فى أغراض شتى سيأتى ذكر شىء منها فيما يأتى

والجهاز الذى نذكره هنا منسوب الى مخترعه « جامن »[٢] ويتركب من لوحين سميكين من الزجاج متماثلين مادة وسمكا قد عنى جل العناية باستواء سطحيهما وتوازيهما يبلغ سمك الواحد منهما سنتمتراً أو يزيد ومفضض أحد سطحى كل منهما . واللوحان موضوعان كما هو مبين بشكل (٢٠٢) بحيث يكونان رأسيين متوازيين بالتقريب وبحيث يكون السطح س ع من اللوح س ع ع، س، والسطح ف ص من الآخر السطحين المفضضين ويتصل بأحد اللوحين وليكن ف ص ص، ف، مسماران محويان يتسنى بوساطة أحدهما ادارة اللوح حول محور رأسى عمودى على



(شكل ٢٠٢)

(١) Interferometers

(٢) Jamin

مستوى الورقة و بوساطة الاخر ادارته حول محور أفقى

ولشرح عمل الجهاز نفرض أن ا ب شعاع من ضوء ذى لون واحد أى ذى طول موجى معين يسقط على اللوح س ع ع١ س١ فعند ب ينقسم الشعاع قسمين أحدهما ينعكس فى استقامة ب ح والآخر ينكسر داخل اللوح فى استقامة ب ر ثم ينعكس عند السطح المفضض فى استقامة ر ح و ينفذ جزء منه خارجاً فى استقامة ح هـ . فاذا وقع الشعاع ب ح على اللوح الثانى ينكسر جزء منه فى استقامة ح د فينعكس عند السطح المفضض فى استقامة د هـ ثم ينفذ جزء منه خارجاً فى استقامة هـ و ، كذلك عند وقوع الشعاع ح هـ على السطح الاول من اللوح الثانى ينعكس جزء منه فى استقامة هـ و . فيكون هـ و مسير شعاعين أحدهما ب ح د هـ و والآخر ب ر ح هـ و . وكلاهما مستمد من شعاع واحد فى الاصل هو ا ب . فاذا كان اللوحان متماثلين تمام التماثل ومتوازيين تماماً لا يكون بين الشعاعين فرق فى المسير فيحدث من تداخلهما ضياء فاذا حرف اللوح ف١ ص١ ص ف حدث فرق بين المسيرين ، فاذا بلغ فرق المسير نصف الطول الموجى أو ثلاثة أنصافه وهكذا حدثت من تداخل الشعاعين ظلمة ، أما اذا بلغ فرق المسير الطول الموجى أو أضعافه حدث ضياء .

وعند استعمال الجهاز يتخذ مصدر منبسط من الضوء كفتحة عريضة تضاء بضوء لهب الصوديوم و يوجه الضوء نحو السطح س١ ع١ بوساطة عدسة وينظر الى السطح ف١ ص١ أما بالعين المجردة أو بوساطة تلسكوب . فالأشعة التى تصل الى العين من الأجزاء المختلفة من السطح تكون صادرة من نقط مختلفة من المصدر ، واقعة بزوايا سقوط مختلفة ، فترى عادة هدب وتكون الهدبة المركزية فيها مضيئة ، وهى تحدث من تداخل الأشعة التى يكون فرق المسير بالنسبة اليها معدوماً

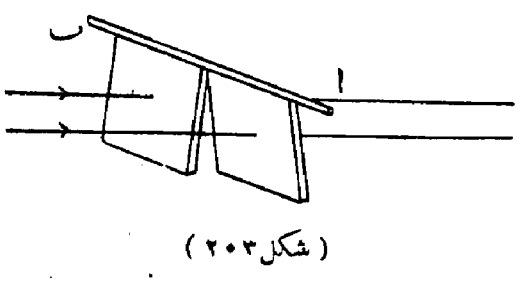
٢٣٨ — تطبيق مقياس چامن لتعيين معامل الانكسار لا سيما فى الغازات

من الاغراض التى استخدم لها مقياس « چامن » ايجاد معامل انكسار الضوء لا سيما فى الغازات المختلفة ، ودراسة تأثير تغير ضغط الغاز ودرجة رطوبته وما الى ذلك فى معامل

انكسار الضوء فيه . ولتطبيقه فى مثل هذا يوجه الضوء من مصدر ذى لون واحد بوساطة عدسة لامة نحو اللوح س ع ع١ س١ ويوضع فى سبيله حاجز به فتحة مستديرة ذات اتساع مناسب لكى تكون الحزمة الضوئية الواقعة على اللوح ضيقة وتكون كذلك من كل الحزمتين السائرتين فى اتجاه ب ح ، ح هـ ، فيتسنى أن يوضع فى مسير أيتهما وقت الحاجة المادة المراد ايجاد معامل انكسارها . فاذا هيىء الجهاز لرؤية الهدب ثم وضع فى مسير احدى الحزمتين المتداخلتين لوح رقيق من المادة تتحول الهدب عن مواضعها . فاذا حلت الهدبة محل الهدبة النونية التى تليها ، ورمزنا لسمك اللوح بالحرف س ، ولمعامل انكسار الضوء فيه بالحرف م ، وللطول الموجى بالحرف ل كان

$$ل ن = (م - ١) س$$

ولايجاد معامل انكسار الضوء فى الغازات يوضع فى مسيرى الحزمتين ب ح ، ح هـ أنبوبتان (كالانبوبة ط ى بشكل ٢٠٢) مسدود طرفا كل منهما بلوح مستوى من الزجاج بحيث تنفذ الحزمة خلال الانبوبة الموضوعة فى مسيرها فى اتجاه محورها فاذا فرغت الانبوبتان من الهواء وهيىء الجهاز للحصول على الهدب وكان أحد الخيطين المتقاطعين فى عينية التلسكوب الذى ينظر به الى الهدب منطبقاً على احدى الهدب المضيئة ثم ملئت احدى الانبوبتين بالغاز رويداً رويدا أخذت الهدب تتحول عن مواضعها فاذا كان تحولها بطيئاً أمكن عد الهدب التى تمر فى مجال النظر بالخيط المذكور حتى تمتلىء الانبوبة بالغاز الى الضغط المطلوب . فيكون هـذا العدد هو الدال على قيمة ن فى المعادلة السابقة وتكون س رمزاً لطول الانبوبة .



(شكل ٢٠٣)

وقد استخدم جامن فى تجاربه جهاز يسمى «المكافىء» يتركب من لوحين متماثلين من الزجاج متساوى السمك مثبتين كما بشكل (٢٠٣) بحيث يميل أحدهما بالنسبة الى الآخر بزاوية صغيرة . ويوضع المكافىء بحيث يكون أحد لوحيه فى مسير احدى الحزمتين المتداخلتين . ويكون الآخر فى مسير الأخرى بحيث يمكن ادارتهما معاً حول المحور الأفقى ا ب ، مع بقاء الزاوية بينهما ثابتة ، بوساطة

مسمار محورى ، فيتسنى بادارة المكافىء تغيير سمك الطبقة التى تخترقها كل من الحزمتين ويحدث تبعاً لهذا فرق فى المسير بينهما ، يترتب عليه أن تتحول الهدب عن مواضعها . واذن يتسنى بادارة المكافىء فى الاتجاه المناسب ابطال التحول الحادث فى الهدب من جراء ادخال الغاز فى احدى الانبوبتين أو تغيير ضغطه . فاذا كان المكافىء معايراً بحيث كان معلوماً تغير المسير بين الحزمتين من جراء ادارته بزاوية معينة أمكن ايجاد فرق المسير الحادث من جراء ادخال الغاز أو بوجه عام من جراء وجود المادة المطلوب ايجاد معامل انكسار الضوء فيها فى مسير احدى الحزمتين

٢٣٩ ـــ تطبيق مقياس جامن لتعيين سمك أغشية الصابون

وقد أجريت تجارب أجراها أولا « رينولد » (١) و « روكر »(٢) طبقا فيها مقياس جامن لقياس سمك أغشية الصابون الرقيقة جداً عند ما تظهر بالانعكاس مظلمة أى عند ما يكون سمكها صغيراً جداً فلا يكون هناك فرق محسوس فى المسير بين الضوء المنعكس عن أحد سطحيها وبين الضوء المنعكس عن الآخر فيحدث من تداخل الضوءين ظلمة ، نظراً لتغير الطور الحادث عند أحد الانعكاسين

ونظرية هذه التجارب كنظرية التجارب السابقة تتلخص فى وضع عدد كاف من أغشية الصابون فى مسير احدى الحزمتين المتداخلتين وتقدير فرق المسير الحادث من جراء ذلك فاذا كان معامل انكسار الضوء فى محلول الصابون وذلك الطول الموجى معروفين أمكن ايجاد السمك الكلى واذن متوسط سمك الغشاء الواحد منها . ولتكوين أغشية الصابون فى هذه التجارب يغمس أحد طرفى أنبوبة من الزجاج فى محلول الصابون ثم تنزع منه فيكون على طرفها هذا غشاء من الصابون فاذا أميلت الانبوبة قليلا أمكن زلق الغشاء الى داخلها . فيغمس طرفها مرة أخرى وهكذا حتى يبلغ عدد الأغشية التى تتكون فى داخلها خمسين أو يزيد . فتوضع الانبوبة بعد ذلك فى مسير احدى الحزمتين

وقد دلت التجارب على أن سمك الغشاء الواحد يساوى ١٠×١٠^{-٧} من السنتيمتر دالا ذلك على أنه قريب من أبعاد الجزىء

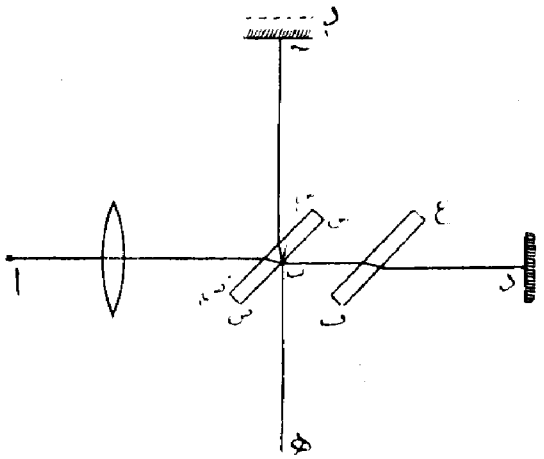
---

(١) Reinold

(٢) Rucker

٢٤٠ – مقيـاس ميكلسن

ومن مقاييس التداخل التى طبقت فى أغراض شتى عدة جهاز اخترعه « ميكلسن »[1] و يعرف باسمه . و الفكرة الأساسية فى هذا الجهاز موضحة بشكل (٢٠٤) اذ يسقط من ا شعاع من ضوء ذى لون واحد بزاوية قدرها ٤٥° على لوح من الزجاج محدود بسطحين مستويين متوازيين س ص ، س ص ، وقد فضض سطحه س ص بطبقة من الفضة تجعل الضوء الواقع عليها ينعكس عنها بقدر ما ينفذ منها . فاذا وصل الشعاع الى نقطة ب على السطح المفضض س ص انقسم قسمين أحدهما ينعكس فيخرج من الوجه س ، ص ، و يسقط عمودياً على سطح مستوى عاكس عند حـ ، والآخر ينفذ خارجا من السطح س ص و يسقط عموديا على سطح مستوى عاكس عند د . فينعكس الأول عن السطح حـ و ينعكس الثانى عن السطح د و يعود الشعاعان سائرين فى مسيريهما الاولين الى نقطة ب . وهنا ينفذ من



(شكل ٢٠٤)

الاول شعاع فى اتجاه ب هـ و ينعكس من الثانى شعاع فى الاتجاه نفسه وهذان الشعاعان مستمدان من شعاع واحد فيكونان قابلين للتداخل . ولكى يكون مسيراهما متماثلين يوضع فى مسير ب د لوح من الزجاج ع ف مواز للاول ومن مادته ومماثل له شكلا وسمكاً فيخترق كل واحد من الشعاعين المتداخلين سمكين متماثلين من الزجاج

ولاستعمال الجهاز يوضع عند ا مصدر منبسط من ضوء ذى لون واحد ، ويوجه الضوء على اللوح س ، ص ، ص س بوساطة عدسة فاذ انظر الى السطح س ص فى استقامة هـ ب بوساطة تلسكوب رؤيت هدب . و يسهل توضيح كيفية تكون هذه الهدب اذا اعتبرنا التداخل فى هذا الجهاز مثـالا من أمثله التداخل فى الأغشية المتساوية السمك . فاذا نظر فى استقامة هـ ب نحو السـطح س ص رؤيت للسطح العاكس د صورة د ، متكونة بالانعكاس ، واذا

(١) Michelson

كان السطحان حـ ، د متعامدين واللوح س ص ص١ س١ يميل على الواحد منهما بزاوية قدرها ٤٥° ، فان الصورة د١ تكون موازية للسطح العاكس حـ ويكون بينهما بعد هو الفرق بين بعد حـ عن ب وبين بعد د عن ب ، واذن يمكن اعتبار التداخل حادثاً بين شعاعين ينعكس أحدهما عن السطح التقديرى د١ وينعكس الآخر عن السطح حـ كما يحدث التداخل بين شعاعين ينعكس أحدهما عند أحد سطحى غشاء منتظم السمك وينعكس الآخر عند السطح الآخر . ويكون الغشاء فى هذه الحالة من الهواء وسمكه هو البعد بين الصورة التقديرية د١ وبين السطح حـ . فبالرمز للسمك بالحرف ء ولزاوية السقوط على السطح حـ أو على السطح التقديرى د١ بالحرف هـ كان الفرق فى المسير الحادث بفعل الغشاء الهوائى مساوياً ٢ ء حتا هـ ولما كان أحد الشعاعين المتداخلين (وهو الواقع على السطح حـ) ينعكس عند ب انعكاساً داخلياً والآخر (وهو المنعكس عند السطح د أو السطح التقديرى د١) ينعكس عند ب انعكاساً خارجياً فانه اذا كان أحد هذين الانعكاسين مقروناً دون الآخر بتغير فى الطور كانت نتيجة التداخل ضياء اذا كان

$$٢ \text{ ء حتا هـ} = (٢ن + ١)\frac{ل}{٢}$$

وكانت نتيجته ظلمة اذا كان

$$٢ \text{ ء حتا هـ} = ن \text{ ل}$$

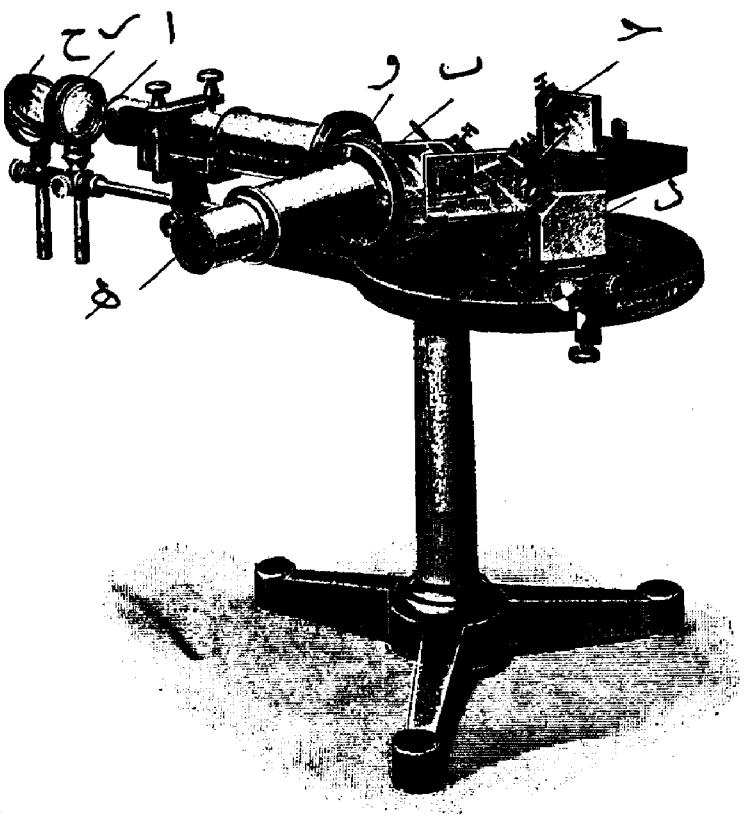
فاذا كان السمك ء ثابتاً واختلفت زوايا سقوط الاشعة المختلفة تكونت هدب تكون مستديرة أو أقواساً من دوائر متحدة المركز .

٢٤١ ــ كيفية اعداد مقياس ميكلسن للاستعمال

يمثل (شكل ٢٠٥) نوعاً بسيطاً من مقياس ميكلسن من صنع معامل « هلجر »[1] نتخذه نموذجاً لبيان كيفية توزع الأجزاء الاساسية فى الجهاز وايضاح كيفية اعداده للحصول على الهدب . فاللوح المفضض أحد سطحيه هو المدلول عليه بالحرف ب ، حـ هو السطح

(١) Adam Hilger

العاكس الذى يقع عليه الضوء المنعكس عن السطح المفضض للوح ﻭ د السطح العاكس الآخر الذى يقع عليه الضوء الذى ينفذ خلال اللوح وبينه وبين هذا اللوح يرى اللوح المكافئ . وكل من السطحين العاكسين ح ﻭ د هو سطح مستوى مفضض للوح من الزجاج موضوع بحيث يقع الضوء على السطح المفضض . ويطلق على كل منهما عادة اسم المرآة . والمرآة ح قابلة للازاحة فى اتجاه عمودى على سطحها وموازٍ لسطح المرآة د وذلك عادة بوساطة لولب دقيق مدرج . والمرآتان واللوحان تتصل بها مسامير محواة لكى يتيسر امالتها بالنسبة الى الرأسى وادارتها قليلا حول محور رأسى . ويوجد فضلا عن هذه الاجزاء الاساسية مجمع يوجه الضوء نحو اللوح ب وهو يتركب من أنبوبة فى أحد طرفيها ا فتحة مستديرة ذات اتساع مناسب يمكن توسيعها وتضييقها على حسب الارادة وبالقرب من هذا الطرف من الانبوبة وعلى سطحها الاسطوانى توجد فتحة أفقية مستطيلة متسعة يتسنى بالنظر خلالها رؤية



(شكل ٢٠٥)

الحاجز الذى به الفتحة المستديرة المذكورة من الخلف . وفى الطرف الآخر للانبوبة توجد عدسة لامة بعدها البؤرى يساوى طول الأنبوبة . كذلك يوجد بالجهاز تلسكوب صغير هو المدلول عليه بالحرف ه لكى ترى الهدب بوساطته . وأمام الفتحة المستديرة للمجمع توجد عدسة لامة ر لتكثيف الضوء على الفتحة ومرآة ح ليتسنى بوساطتها عكس الضوء من المصدر حيث يوضع المصدر لاعلى امتداد محور المجمع بل على امتداد العمود عليه وفى الجانب الآخر منه بالنسبة الى التلسكوب

و يستحسن أن يكون بين المصدر وبين الجهاز حاجز يحول دون وقوع الضوء على أجزاء الجهاز وتسربه الى مجال النظر والا قل جلاء الهدب ووضوحها

ولتهيئة الجهاز لرؤية الهدب توضع أولا المرآتان حـ د وكذلك اللوح ب فى مواضعها على حواملها بحيث يكون البعد بين اللوح و بين كل من المرآتين واحد بالتقريب و بحيث تكون جميعها رأسية على قدر الامكان ثم يزال اللوح ب من موضعه ويؤتى بمصدر ضوء شديد ولا بأس من أن يكون أبيض وتضاء به فتحة المجمع . فيقع الضوء من المجمع على المرآة د رأساً ثم ينعكس عنها فينفذ خلال عدسة المجمع متجمعاً على الحاجز الذى به الفتحة المستديرة حيث يمكن بالنظر خلال الفتحة الموجودة بالسطح الاسطوانى للانبوبة رؤية صورة للثقب المستدير تتكون على ظهر هذا الحاجز لاسيما اذا كان ظهره أبيض . ثم يعدل وضع المرآة د حتى تقع هذه الصورة على الثقب المستدير. وبهذه الكيفية يتحقق الى حد كبير وقوع الأشعة الخارجة من المجمع عمودياً على سطح المرآة د . وبعد هذا يوضع اللوح ب فى مكانه فينعكس جزء من الضوء عن سطحه المفضض نحو المرآة حـ وينعكس عن سطح هذه المرآة نحو السطح المفضض للوح ب ومنه نحو عدسة المجمع فينفذ منها مكوناً صورة أخرى للثقب المستدير على ظهر الحاجز الذى به هذا الثقب فاذا عدل موضع اللوح ب أمكن جعل هذه الصورة واقعة على الثقب المستدير نفسه . وبهذه الكيفية يتحقق أيضاً الى حد كبير وقوع الأشعة عمودياً على سطح المرآة حـ . فاذا نظر خلال التلسكوب وحجبت احدى المرآتين بقطعة من الورق المقوى مثلا (مع الاحتراس بألا تلمس الورقة السطح المفضض) رؤيت خلال التلسكوب صورة للفتحة المستديرة حادثة بالانعكاس عن سطح المرآة الأخرى . واذا كانت المرآتان مكشوفتين رؤيت صورتان تكونان منطبقتين احداهما على الأخرى أو تكادان تكونان كذلك حيث يمكن بتعديل طفيف فى وضع اللوح ب جعلهما منطبقتين . فاذا استبدل بعد ذلك بالضوء الأبيض ضوء ذو لون واحد كضوء لهب الصوديوم ونظر خلال التلسكوب رؤيت عادة الهدب وقد يساعد ازاحة المرآة حـ قليلا فى الاتجاه العمودى على سطحها على رؤية الهدب اذا كان الضوء ضوء لهب الصوديوم وسيتضح السبب فى ذلك فيما بعد

فاذا ماتم الحصول على الهدب بهذه الكيفية وأزيحت المرآة حـ فى الاتجاه العمودى على سطحها

ترتب على ذلك أن يحدث فرق فى المسير بين كل شعاعين متتداخلين فتتحول الهدب عن مواضعها فاذا أزيحت المرآة بمقدار نصف الطول الموجى كان فرق المسير الحادث من جراء ذلك مساوياً الطول الموجى فتحل الهدبة المضيئة مكان المضيئة التى تليها أى تزاح الهدب بمقدار عرض الهدبة الواحدة . وهكذا

وللحصول على الهدب الملونة التى تحدث عند ما يكون الضوء أبيض يجب أن يكون مسيرا الشعاعين المتداخلين متماثلين متساويين فيستعمل اللوح المكافئ وتهيأ المرآة ح حتى يكون مسير الشعاع المنعكس اليها مساوياً مسير الشعاع النافذ الى المرآة د والا فمتى تجاوز فرق المسير بضع مرات الطول الموجى اندمجت الهدب الملونة بعضها فى الآخر وحدث ضياء أبيض مستمر (بند ٢٢٠) ولكى تهيأ المرآة فى الوضع المذكور تزاح قليلا قليلا فى الاتجاه العمودى على سطحها حتى تظهر الهدب كأقواس من دوائر أقطارها كبيرة فيشاهد أن تقوس الهدب ينعكس اتجاهه متى تجاوزت المرآة ح وضعاً معيناً . فاذا عين هذا الوضع واستبدل بالضوء ذى اللون الواحد ضوء أبيض رؤيت الهدب الملونة وقد يكون من اللازم لرؤيتها أن يعدل تعديلا طفيفاً موضع المرآة ح فتزاح ببطء بعيداً عن اللوح أو قريباً منه حتى اذا ما حلت بالوضع المذكور ظهرت الهدب الملونة فى مجال النظر وأمكن تعيين موضع الهدبة المركزية وهى نظراً لتغير الطور الحادث عند انعكاس أحد الشعاعين المتداخلين عن السطح المفضض للوح ب تكون هدبة مظلمة

٢٤٢ — أمثلة من التطبيقات العامة لمقياس ميكلسن

يطبق مقياس « ميكلسن » للاغراض التى يطبق لها مقياس « جامن » بل ان مقياس ميكلسن يفضل على هذا لتعامد مسيرى الحزمتين المتداخلتين ، فيسهل وضع ألواح رقيقة أو ما يقوم مقامها فى سبيل احداهما دون الأخرى . فهو يطبق لايجاد معامل الانكسار ولقياس سمك الأغشية الرقيقة كما سبق بيانه فى مقياس جامن . و يستعان فى هذه الحالات بالضوء الابيض لامكان تمييز الهدبة اللالونية [1] ويفضل الحصول على مجموعة من هدب ذات لون واحد تغشاها مجموعة من

(١) تسمى الهدبة المظلمة المركزية لالونية أيضاً ويراعى ما سبق فى بند (٢٢٤) فيما يختص بالهدبة اللالونية فى الهدب المزاحة

الهدب الملونة . وذلك بوضع مصدر ضوء أبيض قوة اضاءته مناسبة (كشمعة موقدة مثلا) خلف مصدر الضوء ذى اللون الواحد

ومن أسهل ما يستخدم له المقياس تعيين الطول الموجى لضوء ذى لون واحد . ويكفى لذلك الحصول على الهدب والنظر اليها خلال التلسكوب بحيث يقع أحد خيطيه المتعامدين (أو موضع تقاطعهما) على احدى الهدب المضيئة فاذا أزيحت المرآة ح (بادارة رأس اللولب المعد لذلك) بمقدار معلوم وببطء أمكن حصر عدد الهدب التى تمر بالخيط المذكور . فاذا رمزنا لعددها بالحرف ن وللطول الموجى بالحرف ل فان فرق المسير الحادث من جراء ازاحة المرآة يساوى ن ل ويساوى ضعف المسافة التى أزيحت خلالها المرآة

ويطبق المقياس أيضاً فى اختبار ما اذا كان الضوء ذو اللون الواحد ضوءاً بسيطاً (أى ذا طول موجى واحد) حقاً أو هو ضوء مركب مثلا من ضوءين الطول الموجى لاحدهما يكاد يساوى الطول الموجى للآخر ولكنه يختلف عنه قليلا كما هو الحال فى ضوء لهب الصوديوم . ولتوضيح هذا نفرض أن مصدر الضوء يصدر ضوءين الطول الموجى لأحدهما $ل_1$ والطول الموجى للآخر $ل_2$ وليكن $ل_1$ اكبر من $ل_2$. فاذا كان الامر كذلك أمكن ايجاد قيمة للمقدار ن [1] بحيث يكون

$$ن\, ل_1 = ن\, ل_2 + \frac{ل_2}{2}$$

فاذا فرضنا مثلا أن المقياس مهيأ لرؤية الهدبة المركزية ، فان المركزية فى هدب أحد الضوءين والمركزية فى هدب الأخرى تكونان منطبقتين ونظراً لأن الفرق بين الطولين الموجيين صغير تكون الهدب القريبة من المركزية متطابقة أيضاً . فتظهر الهدب بجلاء ووضوح . ولكن اذا أزيحت المرآة ح باستمرار حدث بين الشعاعين المتداخلين فرق فى المسير يترتب عليه تحول الهدب عن مواضعها . فاذا بلغ هذا الفرق المقدار ن $ل_1$ كانت نتيجة التحول أن هدب الضوء ذى الطول الموجى $ل_1$ قد أزيحت فحلت المركزية منها مكان الهدبة

---

(١) فاذا فرضنا مثلا أن $ل_1 = \frac{١٠١}{١٠٠} ل_2$ ، فان $١٠٠\, ل_1 = ١٠٠\, ل_2 + ل_2$ فيكون $٥٠\, ل_1 = ٥٠\, ل_2 + \frac{ل_2}{2}$ حيث تكون قيمة ن هى ٥٠

النونية التى تليها فى حين أن هدب الضوء الآخر قد أزيحت فحلت المركزية لا مكان النونية التى تليها بل فى منتصف ما بين هذه والهدبة التى تليها . واذن تكون نتيجة هذا أن الهدب المضيئة فى أحد الضوءين تقع مكان المظلمة فى الآخر . فاذا كانت شدتا الضوءين متساويتين تبدل بالهدب ضياء مستمر منتظم . واذا لم يكونا بشدة واحدة قل جلاء الهدب ووضوحها ، فاذا استمرت ازاحة المرآة ح حتى يبلغ فرق المسير ضعف المقدار السابق ، تطابقت الهدب المضيئة فى الضوءين فتنبلج الهدب وتستبين وهكذا .

فازاحة المرآة ح بالتدريج وباستمرار تغير مظهر الهدب من وضوح وجلاء الى غموض وضمور الى وضوح وجلاء تغيراً دورياً . فاذا رمز للمسافة التى تزاح خلالها المرآة لكى يتغير مظهر الهدب من جلاء الى ضمور الى جلاء بالحرف س ، فان فرق المسير الحادث من جراء ذلك يكون ٢ س ويشمل هذا المقدار عدداً من الموجات الطويلة أقل بواحد من عدد الموجات القصيرة التى يشملها . فيكون

$$\frac{س٢}{ل_١} = ١ - \frac{س٢}{ل_٢} \quad \therefore \quad \frac{١}{س٢} = \frac{١}{ل_١} - \frac{١}{ل_٢}$$

فاذا عرف الطول الموجى لاحد الضوءين وقيس المقدار س أمكن استخراج الفرق بين الطولين الموجيين

وقد طبق ميكلسن مقياسه على أساس هذه الفكرة لتحليل الأضواء التى تعد ذات لون واحد أى لتحليل أضواء الخطوط الطيفية واختبار ما اذا كانت حقاً أضواء بسيطة

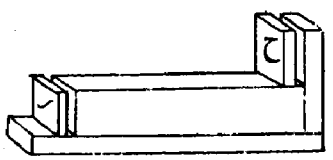
٢٤٣ — تطبيق مقياس ميكلسن لتحديد طول المتر

وطبق ميكلسن مقياسه لاغراض شتى سنأتى هنا بايجاز بمثالين منها . والمثال الأول تطبيقه لتحديد طول المتر . والمتر بعد طولى محدود بعلامتين على قضيب من البلاتين والاريديوم محفوظ فى المكتب الدولى للموازين والمكاييل فى باريز عند ما تكون درجة حرارة القضيب درجة الصفر المئوى . وكانت الغاية من التجارب تحديد هذا البعد بالاضافة الى الطول الموجى لضوء معين فيصير هذا هو المرجع فى تحديد وحدة الاطوال . واتخذ ميكلسن الخط الاحمر والخط

الاخضر والخط الازرق فى طيف الكاديوم الحادث بطريقة القوس الكهربائى [١] أضواء حدد المتر بالاضافة الى أطوالها الموجية نظراً لان هذه الخطوط بسيطة دل اختبارها على أساس الفكرة التى شرحناها فيما سبق على أن لها طولا موجياً معيناً

ولما كان تعيين عدد الموجات الضوئية التى يشملها طول المتر رأساً بالضبط يكاد يكون مستحيلا من الوجهة العملية لان هذا الطول يشمل اكثر من مليون ونصف مليون من الطول الموجى لاطول الموجات المذكورة ، وحصر مثل هذا العدد عملية شاقة لا يمكن الاعتماد على نتيجتها ، توخى ميكلسن طريقة خاصة نوردها فيما يلى

فاتخذ أجهزة تسمى « أتالونات »[٢] يتركب الواحد منها من قضيب من البرونز كالمبين بشكل (٢٠٦) عند طرفيه مرآتان ر ، ح مستويتان تمام الاستواء تمكن تهيئتهما بمسامير محواة بحيث تكونان متوازيتين . وحضر ميكلسن من هذه الاتالونات تسعة جعل فى أطولها البعد



(شكل ٢٠٦)

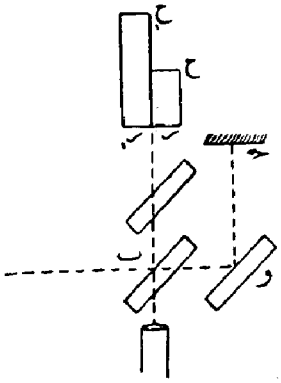
بين المرآتين عشرة سنتيمترات وفى الذى يليه خمسة ثم ٢,٥ وهكذا وكان البعد بين المرآتين فى أقصرها ٠,٣٩ من المليمتر . ونسمى البعد بين المرآتين طول الاتالون . وعدل ميكلسن مقياس التداخل بعض التعديل ، فأضاف اليه لوحاً عاكساً هو المدلول عليه بالحرف و فى شكل (٢٠٧) بحيث ينعكس الضوء عنده الى المرآة ح وهذه قابلة للازاحة بوساطة مسمار لولبى دقيق فى اتجاه عمودى على سطحها . واستبدل بالمرآة الاخرى فى المقياس أتالونين طول أحدهما ضعف طول الآخر موضوعين جنباً الى جنب كما هو مبين بالشكل (٢٠٧) وأحدهما وهو القصير قابل للازاحة بوساطة مسمار لولبى دقيق فى اتجاه يوازى تماماً الاتجاه الذى تزاح فيه المرآة ح . فاذا نظر خلال التلسكوب يرى مجال النظر مكوناً من أربعة أرباع هى أولا سطح المرآة الامامية السفلى للاتالون القصير وهى المدلول عليها بالحرف ر وبجوارها سطح المرآة الامامية السفلى للاتالون الطويل وهى المدلول عليها بالرمز ر١ وفوق المرآة ر يرى سطح المرآة العليا الخلفية للاتالون القصير وهى المدلول عليها بالحرف ح وبجوار هذه يرى سطح المرآة العليا الخلفية

---

(١) انظر الباب الرابع عشر

(٢) Etalons

للاتالون الطويل وهى المدلول عليها بالرمز ح١ . ويرى على هـذا كله صورة المرآة ح وهى الصورة التى تحدث بالانعكاس عند ب



(شكل ٢٠٧)

والفكرة الاساسية التى تقوم عليهـا التجارب تتلخص فيما يأتى :

«اذا أريد ايجاد الفرق بين طول أحد الاتالونات وبين ضعف طول الاتالون الذى يليـه فى القصر ، مقيساً ذلك الفرق بالنسبة الى الطول الموجى لضوء معين تجرى العمليات الآتية

(أولا) يهيأ الجهاز بحيث يكون مسير الضوء من ب الى المرآة ح ومنهـا الى ب مساوياً مسيره من ب الى المرآة ر١ ومنها الى ب حتى اذا استعمل الضوء الابيض حدثت الهدب الملونة فى الربع المشغول بسطح المرآة ر١ فاذا أميل سطح هـذه المرآة قليلا حول محور رأسى بحيث يصير مائلا بزاوية صغيرة بالنسبة الى صورة المرآة ح ، صار التداخل فى الجهاز شبيهاً بالتداخل فى الاغشية المتغيرة السمك ، فتصير الهدب رأسية ، ويمكن تهيئتها حتى يكون موضع الهدبة المركزية (حيث يعدم بتاتاً فرق المسير بين الشعاعين المتداخلين) وهى هدبة مظلمة (كما تبين فيما سبق) عند حرف المرآة ر١ القريب من المرآة ر . وبعد هذا يعدل الاتالون القصير ويعدل وضع مرآته ر ، حتى تظهر فى الربع المشغول بهذه المرآة ، هدب شبيهة بالهدب السابقة وموضع الهدبة المركزية فيها وهى مظلمة عنـد حرف المرآة ر القريب من المرآة ر١ فاذا ما تم هـذا يصير فى النصف الاسفل من مجال النظر هدب رأسية متماثلة ، فى وسطها هدبتان مظلمتان متقاربتان تكادان تتلامسان

(ثانيـاً) تزاح المرآة ح فى اتجاه عمودى على سطحها بعيداً عن اللوح و حتى تصير بالنسبة الى المرآة ح فى وضع شـبيه تماماً لوضعها السابق بالنسـبة الى المرآة ر . وتظهر هدب رأسية فى الربع المشغول بسطح المرآة ح دون الاجزاء الاخرى من مجال النظر

(ثالثـاً) يزاح الاتالون القصير بعيـداً عن اللوح ب حتى تأخذ مرآته الاماميـة السفلى ر وضعاً بالنسبة الى المرآة ح شبيهاً تماماً لوضعها السابق بالنسبة اليها . فتظهر الهدب الرأسية

فى الربع المشغول بسطح المرآة ر

(رابعاً) تزاح المرآة ح بعيداً عن اللوح و حتى تصير بالنسبة الى المرآة ح فى وضع شبيه تماماً لوضعها بالنسبة اليها فى العملية الثانية . فتظهر الهدب مرة أخرى فى الربع المشغول بالمرآة ح

فاذا كان طول الاتالون الطويل ضعف طول القصير بالضبط فان الهدب تظهر فى الوقت نفسه فى الربع المشغول بالمرآة ح١ . ويتحقق هذا فعلا اذا كان طول أحد الاتالونين بالنسبة الى الآخر قد حدد فى مبدىء الامر بالدقة الكافية ، ولكن قد تكون الهدبة المركزية مزاحة قليلا عن موضعها . فاذا قيست هذه الازاحة بالنسبة الى عدد من الهدب المتكونة بضوء ذى لون واحد تعين الفرق بين طول الاتالون الطويل وضعف طول القصير بالنسبة الى الطول الموجى لهذا الضوء »[1]

بمثل هذه الكيفية يتسنى قياس الفرق بين طول كل أتالون وضعف طول الذى يليه فى القصر واذن أمكن معرفة الفرق بين طول أطول الأتالونات وبين ثمانية أمثال طول أقصرها (أى طول الاتالون الذى طوله ٠٫٣٩ من المليمتر مضروباً فى اثنين ثمان مرات) . فاذا أمكن تعيين عدد الاطوال الموجية التى تنحصر بين مرآتى طول القصير ، تحدد بالضبط عدد الموجات الضوئية المنحصرة بين مرآتى أطول الاتالونات . وطريقة تعيين عدد الاطوال الموجية المنحصر بين مرآتى أقصر الاتالونات تتضح فكرتها الاساسية مما يأتى

« يوضع الاتالون القصير فى المقياس فى الوضع رح المبين بشكل(٢٠٧) وبجواره أتالون آخر ر١ ح١ ويهيأ الجهاز بحيث يكون مسير الضوء من ب الى المرآة ح مساوياً مسيره من ب الى المرآة ر . ويمال سطح هذه قليلا حول محور رأسى بحيث تظهر فى الربع المشغول بسطحها الهدب الرأسية كما فى الحالات السابقة . ويهيأ سطح المرآة ر١ بحيث يكون موازياً تماماً لسطح المرآة ح ، وتظهر فى الربع المشغول بالمرآة ر١ هدب مستديرة على هيئة حلقات مركزها مظلم . ثم تزاح المرآة ح بعيداً عن اللوح و ببطء بحيث يتسنى متابعة الهدب الحلقية

---

(١) نقلا بشىء من التصرف عن « Schuster & Nicholson »

وهى تتقلص وتختفى فى المركز من جراء فرق المسير الحادث عن الازاحة ، ويتسنى حصر عددها . غير أن ازاحة المرآة حـ تجعل الهدب الرأسية فى الربع المشغول بالسطح ر تختفى حتى اذا ما صارت المرآة حـ بالنسبة الى المرآة ح فى وضع شبيه تماماً لوضعها السابق بالنسبة الى المرآة ر ظهرت الهدب الرأسية فى الربع المشغول بالمرآة ح وتكون المرآة حـ قد أزيحت خلال مسافة تساوى بالضبط طول الاتالون رح . ويكون عدد الحلقات التى حصر عددها فى أثناء ذلك ، هو عدد الموجات المحصورة بين مرآتى الأتالون رح . ومن اللازم أن يكون الضوء الذى يستعمل للحصول على الحلقات ذا طول موجى معين (هو الطول الموجى الذى يراد تحديد المتر بالنسبة اليه) فى حين أن يكون الضوء الذى يستعمل للحصول على الهدب الرأسية أبيض »[1]

ويبقى بعد ذلك مقابلة المسافة التى تساوى عشر مرات طول أطول الاتالونات بالمتر العيارى ولاجراء هذه العملية يهيأ أحد الخطين أو احدى العلامتين اللتين تحددان المتر العيارى بحيث تكون منطبقة مع علامة أو خط موجود على الاتالون الطويل وينظر اليهما بوساطة ميكرسكوب ويكون الاتالون مهيأ بحيث تظهر الهدب الرأسية فى الربع المشغول بمرآته العليا الخلفية (المرآة ح، مثلا) ثم يزاح الاتالون بعيداً عن اللوح ب مع ثبوت المرآة حـ حتى تظهر الهدب الرأسية فى الربع المشغول بالمرآة السفلى الامامية (المرآة ر، مثلا) . وبعد هذا تزاح المرآة حـ الى الخلف حتى تظهر الهدب الرأسية فى الربع المشغول بالمرآة العليا الخلفية . وتكرر هذه العملية. فاذا كان عشر مرات طول الاتالون مساوياً بالتمام البعد بين العلامتين على المتر العيارى انطبقت العلامة الموجودة على الاتالون بالعلامة الاخرى على المتر العيارى عند اتمام ازاحة الاتالون خلال مسافة طولها يساوى عشرة أمثال البعد بين مرآتيه واذا كان ثمت فرق أمكن قياسه بالنسبة الى الطول الموجى للضوء المعين .

والتجارب التى لخصنا فكرتها الاساسية فيما سبق أجراها ميكلسن فى المكتب الدولى للموازين والمكاييل فى باريس واعانه « بنواه »[2] فى اجرائها . وكانت نتائج التجارب أن المتر يشمل

---

(١) نقلا بشيء من التصرف عن « Schuster & Nicholson »

(٢) Benoit

(أولا) بالنسبة الى الطول الموجى للخط الاحمر من طيف الكاديوم

١ ٥٥٣ ١٦٣,٥ موجة

(ثانياً) بالنسبة الى الطول الموجى للخط الأخضر من طيف الكاديوم

١ ٩٠٠ ٢٤٩,٧ موجة

(ثالثاً) بالنسبة الى الطول الموجى للخط الازرق من طيف الكاديوم

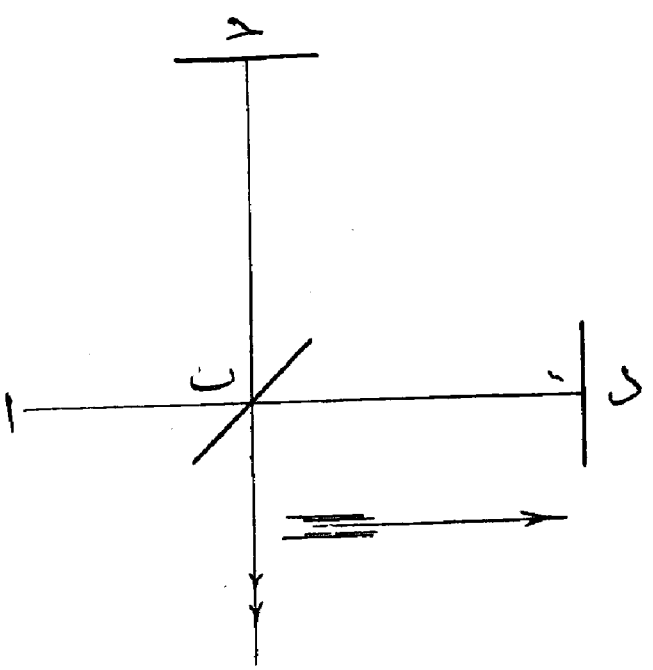
٢ ٠٨٣ ٣٧٢,١ موجة

وذلك عند ما تكون درجة حرارة الجو ١٥ مئوية والضغط الجوى ٧٦ سنتيمتراً من الزئبق ومن اللازم تحديد الضغط ودرجة الحرارة لان معامل انكسار الضوء فى الغاز واذن سرعته واذن طول موجته ، يتوقف على درجة حرارة الغاز وضغطه . ويتضح مبلغ دقة التجارب من أن الاختلاف بين نتائج التجربة اذا أعيدت كان لا يتعدى رقم الآحاد

٢٤٤ — تجربة ميكلسن ومورلى

ومن تطبيقات الجهاز تطبيقه فى التجربة المشهورة التى تعرف بتجربة «ميكلسن ومورلى»(١) ، هى التى كان الغرض منها بيان حركة الارض فى الاثير :

والفكرة الاساسية فى هذه التجربة أنه اذا هيء الجهاز للحصول على الهدب وكان مسير الشعاع ب د (شكل ٢٠٨) منطبقاً على اتجاه حركة الأرض ومسير ب حـ عمودياً عليه ثم ادير الجهاز بمقدار زاوية قائمة بحيث يصير ب حـ منطبقاً على حركة الارض والآخر



(شكل ٢٠٨)

(١) Michelson & Morley's Experiment

عمودياً عليه ، حدث بين الشعاعين المتداخلين فرق فى المسير تكون نتيجته ان الهدب تتحول عن مواضعها

ولتقدير الفرق فى المسير الحادث من جراء هذا الدوران نفرض أن

$$ب\,د = ب\,حـ \quad \text{بالضبط}$$

ولنرمز لهذا البعد مقيساً فى الهواء بالحرف ء فاذا فرضنا أن الارض تتحرك فى استقامة ب د بسرعتها فى فلكها حول الشمس ورمزنا لهذه السرعة بالحرف ع ورمزنا لسرعة الضوء فى الأثير الساكن بالحرف حـ كان الزمن الذى يستغرقه الضوء فى الذهاب من ب الى د هو

$$\frac{ء}{حـ - ع}$$

وكان الزمن الذى يستغرقه فى المجىء من د الى ب هو

$$\frac{ء}{حـ + ع}$$

واذن يكون الزمن الذى يستغرقه فى الذهاب والاياب مساوياً

$$\frac{ء}{حـ - ع} + \frac{ء}{حـ + ع} = \frac{٢\,حـ\,ء}{حـ^{٢} - ع^{٢}}$$

واذن يكون مسير الشعاع السائر فى استقامة حركة الأرض ذهاباً واياباً (وهو البعد الذى يقطعه الضوء) مساوياً

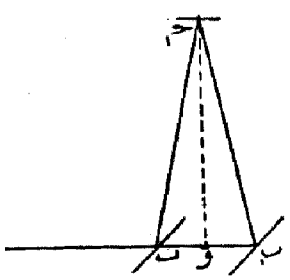
$$\frac{٢\,حـ^{٢}\,ء}{حـ^{٢} - ع^{٢}} = \frac{٢\,ء}{١ - \frac{ع^{٢}}{حـ^{٢}}} = ٢\,ء\left(١ + \frac{ع^{٢}}{حـ^{٢}}\right) \quad \text{بالتقريب}$$

وذلك باهمال الحد الذى يشمل $\frac{ع^{٤}}{حـ^{٤}}$ وما بعده

والشعاع الآخر فنظراً لانعكاسه عند ب عن سطح متحرك فى استقامة ا ب بسرعة الأرض فان زاوية انعكاسه تكون أكبر قليلا من زاوية السقوط (وقد سبق بيان ذلك فى بند١٩٣) واذن يكون مسيره عند الذهاب من ب الى المرآة حـ ليس على استقامة ب حـ كما هو مبين بشكل(٢٠٨) وانما على استقامة ب حـ[١] كما بشكل (٢٠٩) وتكون عودته فى استقامة حـ[١] ب[١] [1] بحيث يكون

(١) ولو أن المرآة حـ[١] تتحرك فى استقامة حركة الارض فان حركتها تكاد تكون عمودية على الشعاع ب حـ[١] الواقع عليها فلا تختلف زاوية الانعكاس عن زاوية السقوط كثيراً

البعد ب ب$_{١}$ هو البعد الذى قطعته الأرض فى البرهة التى يستغرقها الضوء فى الذهاب والاياب فاذا كانت نقطة و هى منتصف ب ب$_{١}$ كان الزمن الذى يستغرقه الضوء فى الوصول من ب الى ح$_{١}$ مساوياً الزمن الذى تستغرقه الارض فى قطع البعد ب و واذن يكون



(شكل ٢٠٩)

$$\frac{\overline{ب\,و}}{\overline{ب\,ح_{١}}} = \frac{ع}{ص}$$

ولكن $\overline{ب\,ح_{١}}^{٢} = \overline{ح_{١}\,و}^{٢} + \overline{ب\,و}^{٢}$

$$\therefore \overline{ب\,ح_{١}}^{٢} = ء^{٢} + \frac{ع^{٢}}{ص^{٢}}\,\overline{ب\,ح_{١}}^{٢}$$

$$\therefore \overline{ب\,ح_{١}} = \frac{ء}{\left(١ - \frac{ع^{٢}}{ص^{٢}}\right)^{\frac{١}{٢}}}$$

$$= ء\left(١ + \frac{١}{٢}\,\frac{ع^{٢}}{ص^{٢}}\right) \quad \text{بالتقريب}$$

واذن مسير الشعاع الثانى فى الذهاب والاياب يساوى

$$٢\,ء\left(١ + \frac{١}{٢}\,\frac{ع^{٢}}{ص^{٢}}\right)$$

فيكون فرق المسير بين الشعاعين مساوياً ء $\frac{ع^{٢}}{ص^{٢}}$ حيث يلاحظ أن مسير الشعاع السابر فى استقامة حركة الأرض وهو ب د أطول

كذلك اذا كانت حركة الارض فى استقامة ب ح (شكل ٢٠٨) يكون مسير هذا الشعاع أطول بالمقدار المذكور

فاذا هيء الجهاز للاستعمال وكان الشعاع ب د فى استقامة حركة الارض ثم أدير الجهاز بمقدار قائمة بحيث جعل ب ح فى استقامة حركة الارض والآخر عمودياً عليها ترتب على ذلك حدوث فرق فى المسير بين الشعاعين المتداخلين قدره ٢ ء $\frac{ع^{٢}}{ص^{٢}}$. ويكون مظهر هذا الفرق أن تتحول الهدب عن مواضعها

ولاجراء التجربة على أساس هذه الفكرة ثبتت أجزاء المقياس على قاعدة من الحجر وجعلت

هذه القاعدة فوق حلقة من الخشب تطفو على سطح زئبق موضوع فى حوض من الحديد . وأدير الجهاز بسرعة منتظمة بطيئة بحيث كان يستغرق فى اتمام الدورة ما لا يقل عن خمس دقائق . وكانت الهدب تراقب والجهاز يدور حتى لا يحدث من جراء ايقافه فجاءة أو ادارته فجاءة انفعال قد يترتب عليه وحده تغير فى مواضع الهدب . وقد كانت نتيجة التجربة سلبية ينفى ظاهرها أنه يوجد بين الأرض والأثير حركة . وكان مما أفضت اليه هذه النتيجة السلبية نشوء نظرية « اينشتين »[1] فى الاضافة [2]

---

(١) Einstein

(٢) Theory of Relativity انظر الفصل الثانى من الباب السابع من كتاب علم الطبيعة نشوءه ورقيه وتقدمه الحديث للمؤلف صفحة ٣٨١