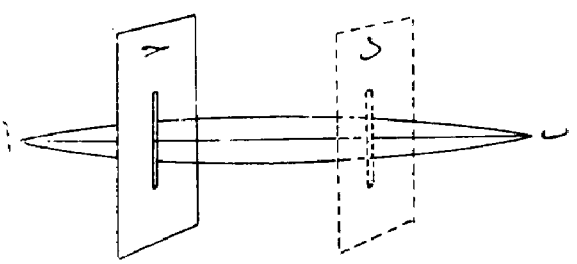
الباب الثانى عشر

الاستقطاب الاستوائى والانكسار المزدوج

٢٨٣ — معنى الاستقطاب الاستوائى

اذا فرضنا أن وتراً مشدوداً مثل ا ب (شكل ٢٤٧) ينفذ من فتحة مستطيلة ضيقة (عرضها اكبر قليلا من قطر الوتر) فى حاجز عند ح ، وأحدثنا على الوتر اهتزازة طولية بدلكه فى اتجاه طوله ، فانه يحدث نغمة حادة . ولا يؤثر وجود الحاجز ذى الفتحة فى اهتزازاته الطولية . أما اذا حدثت على الوتر اهتزازة عرضية ، فان وجود الحاجز قد يؤثر وقد لا يؤثر فيها تبعاً لاتجاه مستوى الاهتزازة بالنسبة الى الفتحة فمثلا اذا كانت الفتحة رأسية ، واهتزازة الوتر فى مستوى رأسى ، أى كانت اهتزازته رأسية أيضاً ، فان وجود الحاجز لا تأثير له فى الاهتزازة أما اذا اهتز الوتر فى مستوى أفقى ، فكانت اهتزازاته عمودية على الفتحة ، فان وجود الحاجز يعوق انتقال هذه الاهتزازة . واذا كانت اهتزازة الوتر مستديرة ، كالاهتزازة التى تحدث اذا تحرك الطرف ا حركة مستديرة مناسبة ، فنظراً لأن الاهتزازة المستديرة يمكن تحليلها الى مركبتين مستقيمتين متعامدتين ، فان وجود الحاجز ذى الفتحة ينفذ المركبة المستقيمة الموازية للفتحة ، ويمنع المركبة العمودية عليها من النفوذ . فتكون الاهتزازة فى الجزء ما بين ح ، ب من الوتر ، فى المستوى الواقعة فيه الفتحة ، واذا دار الحاجز حول الوتر دون أن يبرح مكانه ، دار مستوى الاهتزازة تبعاً لذلك . فاذا فرضنا عند د حاجزاً آخر به فتحة مستطيلة ضيقة كالأولى ، وكانت الفتحتان متوازيتين ، فان وجود الحاجز الثانى لا يؤثر فى الاهتزازة النافذة من الأول .



(شكل ٢٤٧)

أما اذا كانت الفتحتان متعامدتين ، فانه يعوقها

وقد دلت التجارب على أن هناك ظاهرة شبيهة بهذه تحدث فى الضوء . فاذا أسقطنا شعاعاً مثل ا ب (شكل ٢٤٨) من أشعة الشمس أو أشعة مصباح أياً كان على لوح ب من التورمالين[1] ذى سمك مناسب ، نفـــذ شعاع من الضوء خارجاً من اللوح فى استقامة ب د حـ . واذا أدير اللوح ب حول الشعاع الواقع عليه ، لا يكون لذلك تأثير ما فى شدة الضوء النافذ من

(شكل ٢٤٨)

اللوح ، ولـكن اذا وضعنا فى مسير الشعاع ب د حـ لوحاً آخر د من التورمالين وأدرناه حول الشعاع الواقع عليـه ، فانه فى وضع خاص يمنع الضوء الواقع عليه من النفوذ خلاله . واذا أدير بعد ذلك قليلا قليلا أخذت شدة الضوء النافذ منه تزداد حتى اذا أخذ وضعاً عمودياً على وضعه الاول بلغت شدة الضوء نهايتها العظمى . واذا استمر الدوران بعد ذلك أخذت الشدة تقل حتى اذا بلغ الدوران قائمتين امتنع نفوذ الضوء مرة أخرى ، وهكذا

والشعاع ب د حـ النافذ من اللوح التورمالينى ب يختلف عن الشعاع ا ب الساقط عليه فالأول اذا وقع على لوح تورمالينى كاللوح د منعه اللوح وهو فى وضع خاص من النفوذ وتغيرت شدة الضوء النافذ من هذا اللوح تبعاً لتغير وضعه . ولـكى نميز الضوء النافذ من اللوح التورمالينى الأول عن الضوء الواقع عليه يقال أن الاول « مستقطب استقطاباً استوائياً »[2] أو بايجاز أنه «مستقطب» ويقال أن الثانى « طبيعى »[3] . وقياساً على الشرح السابق فيما يختص بالوتر والحاجز ذى الفتحة يمكن أن نعتبر أن اللوح التورمالينى ينفذ خلاله اهتزازة فى اتجاه معين أو فى مستوى خاص (كما أن الفتحة فى الحاجز تنفذ الاهتزازة الموازية لها) فاذا وقع على اللوح التورمالينى شعاع من الضوء الطبيعى ، كانت الاهتزازة فى الضوء النافذ، فى هذا الاتجاه المعين . فاذا وضع اللوح الثانى فى وضع مماثل تماماً للاول أنفذ الاهتزازة التى ينفذها الاول ، ونفذ شعاع الضوء منه ، ولـكن اذا وضع اللوح الثانى فى وضع عمودى صارت الاهتزازة فى الشعاع النافذ

---

(١) بلورة تعرف باسم Tourmaline

(٢) Plane Polarised

(٣) Natural

من الاول والواقع على الثانى ، غير قابلة للنفوذ من الثانى . فيمتنع نفوذ الضوء ووفقاً لهذا الشرح تكون اهتزازة الضوء اهتزازة عرضية ، وتكون الاهتزازة فى الضوء الطبيعى فى جميع الاتجاهات ، وتكون الاهتزازة فى الضوء المستقطب فى اتجاه واحد

ويمكن اجراء تجربة اللوحين التورماليينين باستعمال جهاز بسيط يسمى «ماسك التورمالين» وهو يتركب من لوحين صغيرين ، مقطوعين من بلورة من التورمالين ، ومثبتين فى ماسك كالمبين بشكل (٢٤٩) . فاذا نظر خلال واحد منهما الى ضوء مصباح أو الى ضوء النهار ، نفذ الضوء خلاله ووصل الى العين ، (وان كان الضوء النافذ يكون أصفر ضارباً الى الاخضرار نظراً لأن بلورات التورمالين تمتص جانباً من الضوء) . واذا أدير اللوح لا يكون لذلك تأثير فى شدة الضوء النافذ منه . ولكن اذا نظر خلال اللوحين معاً ، أمكن تهيئتهما بحيث يمنع القريب من العين من النفوذ خلاله الضوء النافذ من الاول ، ويقال أن اللوحين متعامدان . فاذا أدير أحدهما أخذ الضوء ينفذ وأخذت شدته فى الازدياد حتى اذا بلغت زاوية الدوران قائمة بلغت شدة الضوء النافذ نهايتها العظمى ويقال أن اللوحين فى وضعين متماثلين ، ويسمى اللوح التورمالينى الذى يحدث الاستقطاب وهو اللوح الاول الذى يقع عليه الضوء الطبيعى «المستقطب» (١) واللوح الثانى وهو القريب من العين والذى بوساطته يمكن معرفة استقطاب الضوء النافذ من المستقطب يسمى « المحلل » (٢)

(شكل ٢٤٩)

٢٨٤ — الاستقطاب بالانعكاس

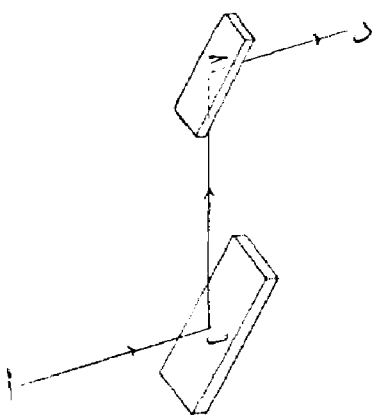
كشف « مالو » (٣) حوالى سنة ١٨٠٨ أن الضوء المنعكس عن سطح لوح من الزجاج ، عند ما تكون زاوية السقوط زاوية معينة ، يكون مستقطباً . فمثلا الشعاع المنعكس عن سطح لوح من الزجاج عند ما تكون زاوية السقوط حوالى ٥٧ درجة ، اذا نفذ فى لوح من التورمالين مثلا وأدير اللوح حول الشعاع الواقع عليه ، فان اللوح يمنع نفوذ الضوء

(١) Polariser (٢) Analyser (٣) Malus

منه فى وضع معين ، وينفذه بشدة فى وضع عمودى على هذا . أو اذا حصلنا بانفاذ الضوء الطبيعى خلال لوح من التورمالين على ضوء مستقطب ، وأسقطنا هذا الضوء المستقطب على لوح من الزجاج وكانت زاوية السقوط حوالى ٥٧ درجة ثم أدرنا اللوح الزجاجى حول الشعاع الساقط عليه بحيث تبقى زاوية السقوط ثابتة ، (أو أدرنا اللوح التورمالينى حول الشعاع الواقع عليه) فانه يشاهد أن اللوح الزجاجى يأخذ بالنسبة الى اللوح التورمالينى وضعاً معيناً ، لا يعكس فيه الضوء الساقط عليه ، فى حين أنه فى وضع عمودى على هذا يعكسه بشدة .

فالانعكاس فى الحالة الاولى يستخدم لاحداث الاستقطاب ويكون اللوح الزجاجى العاكس هو المستقطب ويكون اللوح التورمالينى المحلل . أما فى الحالة الثانية فالاستقطاب حادث بفعل اللوح التورمالينى ، ويستعمل اللوح الزجاجى لبيان هذا الاستقطاب ، فاللوح الزجاجى فى هذه الحالة هو المحلل

ويمكن الحصول على الاستقطاب بالانعكاس وبيانه بالانعكاس دون الاستعانة بلوح من التورمالين فاذا سقط شعاع من الضوء مثل ا ب (شكل ٢٥٠) على لوح من الزجاج عند ب ، ثم سقط الشعاع المنعكس ب حـ على لوح آخر عند حـ موازٍ للاول ، فان اللوح الثانى يعكس جانباً من الضوء الواقع عليه فى اتجاه حـ د . فاذا أدير اللوح الثانى حول الشعاع ب حـ الساقط عليه بحيث يتغير المستوى الذى يشمل الشعاع الساقط والعمود والشعاع المنعكس ، وهو الذى يسمى مستوى السقوط



(شكل ٢٥٠)

دون أن تتغير زاوية السقوط ، شوهد بوجه عام أن شدة الضوء المنعكس عن اللوح الثانى تتغير فتأخذ فى النقص حتى تصل الى نهايتها الصغرى عند ما يبلغ الدوران قائمة ثم تزداد و تصل الى حالتها الاولى عند ما يبلغ الدوران قائمتين وهكذا . فاذا تحدد الوضع الذى تبلغ فيه الشدة نهايتها الصغرى وغيرت زاوية سقوط الشعاع ا ب على اللوح الاول ، أمكن الحصول على قيمة لزاوية سقوط الشعاع ا ب على اللوح الاول يشاهد عندها أن اللوح الثانى يكاد لا يعكس شيئاً ما من الضوء

الواقع عليه . فاذا أعيد اللوح الثانى بعد ذلك الى وضعه الاول بحيث يكون موازياً للوح الاول شوهد أنه يعكس الضوء عن سطحه بشدة . فاذا أدير بالتدريج أخذت شدة الضوء المنعكس عنه فى النقص حتى تعدم او تكاد تعدم ، اذا بلغت زاوية الدوران قائمة ، وفى هذا الوضع يكون مستوى السقوط بالنسبة الى اللوح الاول ومستوى السقوط بالنسبة الى الثانى متعامدين . فاذا استمر الدوران زادت شدة الضوء المنعكس ، حتى اذا بلغت زاوية الدوران قائمتين ، وصلت الشدة الى نهايتها العظمى ، وان كان اللوحان فى هـذا الوضع غير متوازيين ، فان مستوى السقوط يكونان متوازيين أو بالأحرى منطبقين . فاذا استمر الدوران أخذت الشدة تنقص وتعدم او تكاد تعدم عند ما يصير مستويا السقوط متعامدين ، وهكذا .

وتسمى زاوية سقوط الشعاع ا ب على اللوح الاول « زاوية الاستقطاب[1] » وهى زاوية السقوط المعينة التى تجعل الضوء المنعكس مستقطباً والمستوى الذى يشمل الشعاع المستقطب ب حـ الساقط على اللوح الثانى ويشمل العمود المرسوم من نقطة السقوط ويشمل الشعاع المنعكس عند ما تكون شدة الضوء المنعكس عن اللوح الثانى عند نهايتها العظمى ، يسمى مستوى الاستقطاب[2]

ويجدر هنا الاشارة الى ان التجارب العملية تدل على انه اذا كان مستويا السقوط على اللوحين ب ، حـ متعامدين وكانت زاوية سقوط الشعاع ا ب على اللوح الاول مساوية زاوية الاستقطاب وزاوية سقوط ب حـ على الثانى مساوية زاوية الاستقطاب أيضاً فان شدة الضوء المنعكس عن اللوح الثانى لا تعدم بتاتاً ، بل تكون عند نهايتها الصغرى دالا ذلك على أن الشعاع المنعكس عند ما تكون زاوية السقوط مساوية زاوية الاستقطاب ، لا يكون مستقطباً تام الاستقطاب[3] . لذلك نرى أنه اذا أخذت زاوية السقوط تزداد من الصفر بالتدريج ، يبلغ استقطاب الضوء المنعكس نهايته عند ما تبلغ زاوية السقوط قيمة معينة ، هى التى تسمى زاوية الاستقطاب

---

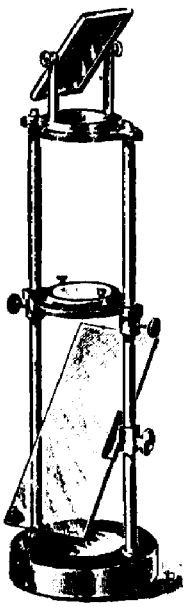
(١) Polarising Angle (٢) Plane of Polarisation

(٣) قد يكون السطح العاكس مغطى بطبقة رقيقة من الرطوبة أو بغشاء دهنى أو بمتخلفات المواد التى استخدمت لصقله مما يكون سببا فى هذا

وبالجدول الآتى قيمة زاوية الاستقطاب لبعض المواد

الزجاج التاجى	٥٦,٥	درجة
الماء	٥٣,٠	»
الكوارتز	حوالى ٥٧,٥	»
الماس	» ٧٠	»

٢٨٥ — بولارسكوب نورنبرج



(شكل ٢٥١)

ومن الأجهزة البسيطة التى تستعمل لدراسة الاستقطاب بالانعكاس جهاز يسمى البولارسكوب اخترعه « نورنبرج » ويعرف باسمه[1]، والجهاز يتركب كما بشكل (٢٥١) من قاعدة افقية فى وسطها مرآة مستوية ، ومثبت بالقاعدة قائمان رأسيان يحملان

(أولا) لوحاً من الزجاج وهو الاسفل بالشكل وهـذا قابل للدوران حول محور أفقى ، ويصوب على سطحه الضوء الطبيعى فيستقطب بالانعكاس ويسمى اللوح المستقطب

(ثانياً) حلقة مستواها أفقى وهى فى أعلى الجهاز ومدرجة ومعدة بحيث يتركب فيها من الداخل حلقة يتصل بهـا قائمان رأسيان يحملان لوحاً من الزجاج قابلا للدوران حول محور أفقى . والحلقة الداخلية نفسها قابلة للانزلاق بالنسبة الى الاول بحيث يصير اللوح الزجاجى قابلا للدوران حول محور رأسى أيضاً . وهذا اللوح الزجاجى يسقط عليه الضوء المنعكس عن المستقطب ، ويستعمل لاختبار الاستقطاب ويسمى المحلل

(ثالثاً) حلقة مستواها أفقى بين المستقطب والمحلل مركب عليها لوح من الزجاج معد لحمل الواح بلورية اذا أريد استخدام الجهاز لأغراض اخرى كقياس دوران مستوى الاستقطاب أو اختبار ألوان الالواح الرقيقة وسيجىء ذكر ذلك فيما بعد ، وليست له فائدة فيما نحن بصدده هنا

(١) Norrenberg's Polariscope

ولاستعمال البولارسكوب يهيأ المستقطب بحيث يميل على الرأسى بزاية قدرها ٣٣ درجة بالتقريب ، وتصوب حزمة متوازية من ضوء الشمس او ضوء مصباح على المستقطب بحيث تكون زاوية السقوط على سطحه المتجه الى اسفل حوالى ٥٧ درجة فينعكس الضوء رأسياً الى اسفل ويسقط على سطح المرآة الموجودة بقاعدة الجهاز ثم ينعكس راسيا الى اعلى ويخترق المستقطب واقعا على المحلل . فاذا كان سطح المحلل يميل على الراسى بزاوية قدرها ٣٣ درجة فان بعض الضوء ينعكس عن سطحه . فاذا نظر نحو هذا السطح فى الوضع المناسب رؤيت صورة المصباح او صورة الشمس متكونة بالانعكاس ولكن اذا ادير الحلقة التى تحمل المحلل فى داخل الحلقة المدرجة فان شدة الضوء المنعكس عن المحلل تتغير ، حتى اذا صار مستوى السقوط بالنسبة الى المحلل عموديا على مستوى السقوط بالنسبة الى المستقطب فان الصورة تكاد تختفى

٢٨٦ — قانون بروستر

بين « بروستر » [1] بتجارب مختلفة فى الأستقطاب بالانعكاس وجود علاقة بين زاوية الاستقطاب وبين معامل انكسار الضوء فى المادة العاكسة . فاذا رمز لمعامل الانكسار بالحرف م ولزاوية الاستقطاب بالحرف ن ، فان

$$\text{ظا ن} = \text{م}$$

ويعرف هذا بقانون بروستر

واذا رمزنا بالحرف ر لزاوية الانكسار عندما تكون زاوية السقوط مساوية زاوية الاستقطاب فان

$$\frac{\text{حا ن}}{\text{حا ر}} = \text{م} = \frac{\text{حا ن}}{\text{حتا ن}}$$

$$\therefore \quad \text{ن} + \text{ر} = \text{قائمة}$$

وبما ان زاوية السقوط مساوية زاوية الانعكاس ، فان الشعاع المنعكس المستقطب والشعاع المنكسر يكونان متعامدين

---

(١) Brewster

واذا سقط الضوء على لوح محدود بسطحين متوازيين وكانت زاوية السقوط مساوية زاوية الاستقطاب فان الضوء المنعكس انعكاساً داخلياً عن السطح الثانى يكون هو أيضاً مستقطباً . فباستعمال الرموز السابقة تكون زاوية السقوط على السطح الثانى للوح مساوية ر و زاوية الانكسار عند خروج الضوء من هذا السطح الى الهواء مساوية ن فيكون معامل الانكسار من مادة اللوح الى الهواء مساوياً

$$\frac{\text{حا ر}}{\text{حا ن}} = \frac{\text{حا ر}}{\text{حتا ر}} = \text{طا ر}$$

ويترتب على قانون بروستر أن زاوية الاستقطاب تختلف فى المادة الواحدة تبعا لاختلاف الطول الموجى للضوء ، لان معامل الانكسار يختلف باختلاف الطول الموجى ، فاذا استعمل ضوء أبيض وكانت زاوية السقوط مساوية زاوية استقطاب الضوء البنفسجى مثلا وجعل المستقطب والمحلل كما فى جهاز نورنبرج مثلا متعامدين ، فان البنفسجى يمتنع انعكاسه عن المحلل أو يكاد ، فى حين أن استقطاب الضوء الأحمر لا يكون تاماً وينعكس جزء منه . كذلك اذا كانت زاوية السقوط مساوية زاوية استقطاب الاحمر فان الضوء الاحمر يمتنع انعكاسه عن المحلل أو يكاد فى حين أن الضوء البنفسجى ينعكس بعضه ، فيكون الضوء المنعكس فى الحالة الاولى ضارباً الى الاحمرار وفى الحالة الثانية ضارباً الى الزرقة وتسمى هذه الظاهرة أحياناً ظاهرة تشتت زاوية الاستقطاب (١) واختلاف معامل الانكسار باختلاف اللون فى الحالات المألوفة كما فى حالة الزجاج أو الماء صغير يكاد لا يكون له التأثير المذكور . ولذلك تلاحظ الظاهرة المذكورة فى حالة المواد التى تكون شديدة التشتيت للضوء ومن هذه المواد مادة عضوية تسمى «نتروزوديميثيل انيلين» (٢) بين « وود » أن شدة تشتيتها للضوء كبيرة جداً ، وتظهر الظاهرة المذكورة بجلاء وكذلك مادة عضوية أخرى تسمى « نتروزو بنزيل اثيل انيلين » (٣)

---

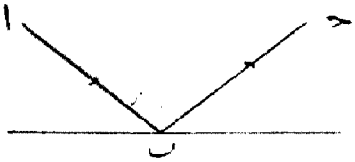
(١) Dispersion of the Angle of Polarisation

(٢) Nitroso--dimethyl aniline

(٣) Nitroso-benzyl aethyl aniline

٢٨٧ — تعيين اتجاه الاهتزازة فى الضوء المستقطب بالانعكاس

ذكرنا فيما سبق ان الاستقطاب فى الضوء معناه أن الاهتزازة فى اتجاه واحد أو متصورة على مستوى واحد ، ولكننا لم نعين اتجاه هذه الاهتزازة . وقد كان فيما مضى مذهبان متناقضان فى تعيين اتجاه الاهتزازة فى الضوء المستقطب بالانعكاس . أحدهما مذهب « فرسنل » وهذا يعد اتجاه الاهتزازة فى الضوء المستقطب بالانعكاس عمودياً على مستوى الاستقطاب . فاذا هيء اللوحان المستقطب والمحلل فى جهاز نورنبرج مثلا بحيث يكونان متوازيين وكانت زاوية سقوط الاشعة على المستقطب هى زاوية الاستقطاب ، فان الضوء المنعكس عن المحلل والذى تكون شدته عند نهايتها العظمى تكون الاهتزازة فيه على حسب مذهب فرسنل عمودية على المستوى الذى يشمل الشعاع الساقط على المحلل والعمود والشعاع المنعكس وهو المستوى المعروف بمستوى الاستقطاب . أو بايجاز اذا سقط شعاع من الضوء مثل ا ب على لوح من الزجاج وكانت زاوية السقوط مساوية زاوية الاستقطاب فان الشعاع المنعكس ب حـ يكون مستقطبا ويكون اتجاه الاهتزازة فيه على حسب مذهب فرسنل عمودية على مستوى الورقة . وقد وضع فرسنل نظرية



(شكل ٢٥٢)

فى انعكاس الضوء المستقطب وانكساره ، ذهب فيها هذا المذهب فى تعيين اتجاه الاهتزازة وتوصل منها الى نتائج حققتها الى درجة ما التجارب العملية

أما المذهب الثانى فهو مذهب « نويمان » (١) و « ماكولاج » (٢) وعلى حسبه يعد اتجاه الاهتزازة فى الضوء المستقطب فى مستوى الاستقطاب لا عمودياً عليه . فقد وضعا هما أيضاً نظرية توصلا منها الى نتائج خاصة بانعكاس الضوء المستقطب وانكساره تختلف عن نتائج فرسنل فى أن ما توصل اليه هذا فيما يختص بشدة الضوء المنعكس اذا كان اتجاه اهتزازاته عمودياً على مستوى الاستقطاب ، يتفق وما توصل اليه « نويمان » و « ماكولاج » فيما يختص بشدة الضوء المنعكس اذا كان اتجاه اهتزازته فى مستوى الاستقطاب ، والعكس بالعكس. وكذلك فيما

---

(١) Neumann (٢) Mac Cullagh

يختص بشدة الضوء المنكسر [١] . ولم يكن وقتئذ دليل عملى يرجح أحد المذهبين على الآخر ولكن لما جاءت « النظرية المغناطيسية الكهربائية » اتضح أن الاهتزازة فى الموجة الضوئية باعتبار أنها مغناطيسية كهربائية ، نوعان أحداهما اهتزازة كهربائية ، وهذه عمودية على مستوى الاستقطاب والأخرى اهتزازة مغناطيسية وهذه فى مستوى الاستقطاب . وسنتبع فى هذا الكتاب مذهب فرسنل .

ويجدر هنا الاشارة دفعاً للالتباس الى التعبير المتبع فى الكتب الأجنبية فى هذا الشأن . فاذا قيل أن شعاعاً من الضوء مستقطب فى مستوى معين ، فيعنى بذلك أن مستوى استقطابه هو هذا المستوى ، ويكون على حسب مذهب فرسنل اتجاه الاهتزازة عموديا على المستوى المذكور

٢٨٨ — مجموعة الألواح والاستقطاب بالانكسار

يتبين مما سبق أنه اذا سقطت حزمة من الاشعة المتوازية من الضوء الطبيعى على سطح لوح من الزجاج مثلا وكانت زاوية السقوط مساوية زاوية الاستقطاب ، كان الضوء المنعكس مستقطباً ، ولكن مقدار الضوء المنعكس صغير بالنسبة الى ما ينفذ خلال اللوح الزجاجى . فاذا وضعت عدة ألواح متوازية بعضها فوق بعض تتعدد الانعكاسات فتزداد كمية الضوء المستقطب المنعكس وفى كل مرة يحدث انعكاس يتجرد الضوء النافذ خلال اللوح عن كمية من الضوء المستقطب فى مستوى السقوط ، فاذا تعددت الانعكاسات مرات عدة تجرد الضوء النافذ تجرداً تاما عن هذا الضوء ، فيكون اذن مستقطباً ويكون استقطابه عموديا على مستوى السقوط ، أى طبقاً لمذهب فرسنل يتجرد الضوء النافذ عن الضوء الذى اهتزازته عمودية على مستوى السقوط فيكون هو اذن مستقطبا واهتزازته فى مستوى السقوط . ونظراً لأن نفوذ الضوء خلال الألواح مصحوب بالامتصاص فانه يكفى عادة لتجريد الضوء النافذ عن الاهتزازة العمودية على مستوى السقوط ، أن يكون عدد الألواح ثمانية . وزيادة الألواح اكثر من اللازم تضعف شدة الضوء

---

(١) لا يسمح مجال هذا الكتاب بالتوسع فى هذه النظريات واذا أراد القارىء الوقوف عليها فليراجع كتاب Preston مثلا فى الباب الثانى عشر والباب الثالث عشر

النافذ من جراء الامتصاص .

والجهاز الذى يتركب من عدة ألواح متوازية بعضها فوق بعض يسمى «مجموعة الألواح»[1] وهو جهاز بسيط سهل التركيب اذا كانت زاوية سقوط الضوء عليه زاوية الاستقطاب كان الضوء المنعكس مستقطبا واتجاه الاهتزازة فيه عمودى على مستوى السقوط ، وكان الضوء النافذ مستقطبا واتجاه الاهتزازة فى مستوى السقوط

٢٨٩ — قانون مالو

اذا فرضنا أن شعاعا من الضوء يسقط على سطح لوح من الزجاج مثلا وزاوية السقوط مساوية زاوية الاستقطاب وكان اتجاه الاهتزازة فى الشعاع الساقط عموديا على مستوى السقوط فان نسبة معينة من الطاقة الضوئية تنعكس والباقى ينكسر . فاذا رمزنا لاتساع الاهتزازة فى الشعاع الساقط بالحرف ا ، وكان اتساعها فى المنعكس كسراً من ا نرمز له بالحرف ك فان اتساع الاهتزازة فى المنكسر يكون ك ا . ولكن اذا كان اتجاه الاهتزازة فى الشعاع الساقط فى مستوى السقوط ، فان الشعاع لا ينعكس بل ينكسر كله و يعدم اتساع الاهتزازة فى المنكسر

فلذا راعينا حالة ما يكون اتجاه الاهتزازة فى الشعاع الساقط يميل بزاوية قدرها هـ على العمود على مستوى السقوط ، أو بتعبير آخر حالة ما تكون الزاوية بين مستوى الاستقطاب وبين مستوى السقوط هى هـ أمكن تحليل الاهتزازة فى الشعاع الساقط الى مركبتين احداهما عمودية على مستوى السقوط واتساعها ا حتا هـ والأخرى فى مستوى السقوط واتساعها ا حاهـ والأولى ينعكس منها جزء و يكون اتساع الاهتزازة فى الشعاع المنعكس ك ا حتا هـ . والثانية لا تنعكس بتاتا

فيتضح من هذا أن اتساع الاهتزازة فى الشعاع المنعكس يتناسب وجيب التمام للزاوية بين اتجاه الاهتزازة فى الشعاع الساقط و بين العمود على مستوى السقوط ولما كانت شدة الضوء متناسبة و مربع اتساع الاهتزازة ينتج أن شدة الضوء المنعكس تتناسب و مربع جيب التمام لهذه

---

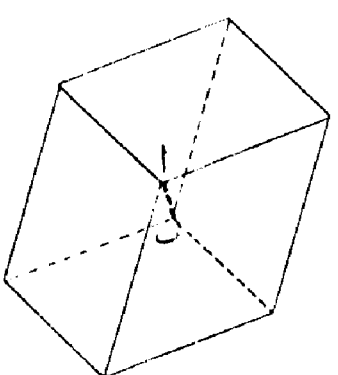
(١) Pile of Plates

الزاوية و يعرف هذا بقانون مالو

فاذا عدنا الى بولارسكوب نورنبرج مثلا ، وجعلنا اللوحين المستقطب والمحلل متوازيين وأسقطنا شعاعا من الضوء الطبيعى على المستقطب بحيث تكون زاوية السقوط مساوية زاوية الاستقطاب كان الضوء الواقع على المحلل مستقطباً ، وزاوية سقوطه مساوية زاوية الاستقطاب ، واتجاه الاهتزازة فيه عمودى على مستوى السقوط ، فتنعكس نسبة معينة من الضوء الساقط عليه ولنرمز لشدة الضوء المنعكس بالحرف س هـ . فاذا أدرنا المحلل حول الشعاع الساقط عليه بزاوية قدرها هـ ، صارت الزاوية بين مستوى السقوط ومستوى الاستقطاب أو الزاوية بين اتجاه الاهتزازة فى الشعاع الساقط وبين العمود على مستوى السقوط هى هـ واذن تكون شدة الضوء المنعكس س هـ حتا^{٢} هـ حتى اذا صارت الزاوية قائمة صارت الشدة صفراً

٢٩٠ — الانكسار المزدوج

وظاهرة الاستقطاب التى هى موضوع هذا الباب مرتبطة بظاهرة تعرف بظاهرة الانكسار المزدوج[١] كان أول من كشفها بارثولينوس[٢] سنة ١٦٧٠ فى نوع من البلورات يعرف « بسبات اسلندا »[٣] وبلورة سبات اسلندا هى بلورة كربونات الكلسيوم وهى ذات أشكال مختلفة ولكنها تتفلق فى مستويات يميل بعضها على الآخر بزوايا معينة فتتحول بالتفلق الى متوازى متوازيات الاضلاع كالمبين بشكل (٢٥٣) وتكون البلورة فى هذه الحالة ذات ستة أوجه كل منها على شكل متوازى أضلاع وزاويتان من زوايا متوازى الاضلاع منفرجتان تبلغ كل منهما ١٠٢° بالتقريب والاخريان حادتان تساوى كل منهما ٧٨° بالتقريب وتوجد زاويتان مجسمتان متقابلتان أحداهما عند ا والاخرى عند ب محدود كل منهما بثلاث منفرجات نسميهما ركنى البلورة

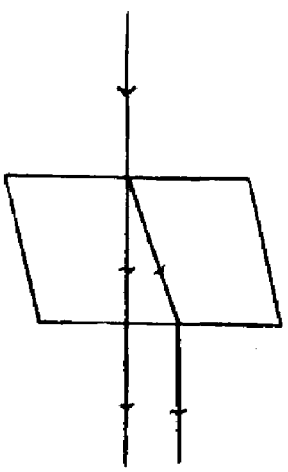


(شكل ٢٥٣)

(١) Double Refraction (٢) Bartholinus (٣) Iceland Spar

واذا رسم مستقيم مار باحد الركنين يميل بالتساوى على الاضلاع الثلاث للبلورة أى يصنع معها ثلاث زوايا متساوية سمى هذا المستقيم المحور البلورى[١] فاذا كانت البلورة متساوية الاضلاع كان المحور البلورى المستقيم الواصل بين ركنيها ا ، ب

فاذا أخذت بلورة من هذا القبيل ووضعت وأحد وجوهها على سطح قطعة من الورق عليها نقطة سوداء ونظر خلال البلورة الى هذه النقطة رؤيت لها صورتان لا صورة واحدة كما لو استبدل بالبلورة متوازى مستطيلات من الزجاج مثلا . واذا أديرت البلورة وهى فى هذا الوضع شوهد أن احدى الصورتين تبقى أو تكاد تبقى ثابتة والاخرى تدور حولها . واذا أخذت البلورة وأسقط عمودياً على أحد وجوهها شعاع من الضوء كما فى شكل (٢٥٤) فانه ينفذ من البلورة شعاعان أحدهما على استقامة الشعاع الساقط والآخر موازله ، ويكون مسيره فى البلورة كما هو مبين تخطيطياً بالشكل . فاذا أديرت البلورة حول الشعاع الساقط عليها دار الشعاع الآخر حول الأول حيث يرى أن الشعاع الذى ينفذ فى استقامته ينقاد لقانونى الانكسار المعروفين ويسمى الشعاع المعتاد[٢] والثانى يشذ عن ذلك ويسمى الشعاع الغير المعتاد[٣] وقد درس هيجنز هذه الظاهرة فى بلورة سبات اسلندا ووجد أن هذا الانكسار المزدوج يحدث اذا اخترق الشعاع الساقط البلورة فى اى اتجاه ما عدا الاتجاه الموازى للمحور البلورى ويسمى أى مستقيم مرسوم داخل البلورة موازياً للمحور البلورى « المحور الضوئى »[٤] ولذلك يرى ان ظاهرة الانكسار المزدوج هذه تحدث اذا اخترق الضوء البلورة فى اى اتجاه الا اذا اخترقها فى اتجاه المحور الضوئى



(شكل ٢٥٤)

وان كانت ظاهرة الانكسار المزدوج درست بادىء الامر فى سبات اسلندا فقد وجد بعد ذلك انها ظاهرة عامة تحدث فى البلورات ما عدا البلورات المكعبة ،وان احد الشعاعين المنكسرين فى بعض البلورات كما فى سبات اسلندا ينقاد دائماً لقانونى الانكسار ، كما انه لوحظ فى بعض

---

(١) Crystalline Axis (٢) Ordinary Ray (٣) Extraodinary Ray

(٤) Optical axis

البلورات أن هنالك اتجاهاً واحداً و هو المحور الضوئى اذا اخترق الضوء البلورة فيه لا يحدث الانكسار المزدوج و يطلق على هذا الفريق اسم البلورة ذات المحور[١] الضوئى الواحد أو الاحادية المحور وأن فى بعض البلورات اتجاهين اذا اخترق الضوء البلورة فى أحدهما لا يحدث الانكسار المزدوج ، ويطلق على هذا الفريق اسم البلورة الثنائية المحور[٢]

٢٩١ — استقطاب الشعاعين وتحديد اتجاه الاهتزازة فى كل منهما

الشعاعان المعتاد وغير المعتاد الحادثان عند الانكسار المزدوج فى بلورة من سبات اسلندا اذا أمرا خلال لوح من التورمالين مثلا رؤى أنه فى وضع خاص للوح ينفذ أحدهما دون الآخر . فاذا أدير اللوح التورمالينى قليلا أنفذ الشعاع الثانى أيضاً ، ولكن شدة الضوء فى هذا تكون قليلة فاذا زاد الدوران زادت هذه الشدة وقلت شدة الضوء فى الشعاع الأول حتى اذا بلغ الدوران قائمة امتنع نفوذ الأول و بلغت الشدة فى الثانى نهايتها العظمى واذا زاد الدوران بعد ذلك انعكس الحال حتى اذا بلغ قائمتين نفذ الاول مرة أخرى دون الثانى وهكذا . وبهذه الكيفية يستدل على أن الشعاعين المعتاد وغير المعتاد مستقطبان وعلى أن اتجاه الاهتزازة فى أحدهما عمودى على اتجاهها فى الآخر

وقد كان هيجنز أول من كشف استقطاب الشعاعين وكان بهذا الكشف أول من كشف ظاهرة الاستقطاب فى الضوء . وجاء هذا الكشف عقب ملاحظة « بارثولينوس » لحدوث الانكسار المزدوج فى سبات اسلندا فابتدأ هيجنز دراسة ما يحدث عند نفوذ الشعاعين المعتاد وغير المعتاد فى بلورة أخرى من سبات اسلندا . فرأى انه اذا كانت البلورة الثانية فى وضع مماثل تماماً للاولى فان الشعاع المعتاد ينفذ فى الثانية كمعتاد وغير المعتاد ينفذ فيها كغير معتاد . ويكون تأثير البلورة الثانية كما لو استبدلت بالاولى بلورة سمكها مجموع السمكين . ولكن اذا دارت البلورة الثانية قليلا أدى نفاذ المعتاد من الاولى الى شعاعين فيها ، احدهما معتاد والآخر غير معتاد وأدى

---

(١) Uniaxal crystal　　(٢) Biaxal crystal

نفاذ غير المعتاد من الاولى الى شعاعين فيها ايضاً احدهما غير معتاد والآخر معتاد . ولكن شاهد أن غير المعتاد من المعتاد الأول ، والمعتاد من غير المعتاد الاول تكون شدة الضوء فيهما صغيرة . فاذا استمر دوران البلورة أخذت شدتاهما فى الازدياد وقلت شدتا الآخرين حتى اذا بلغ الدوران قائمة عدم الآخران وأحدث نفاذ المعتاد الأول فى البلورة الثانية شعاعاً غير معتاد ، ونفاذ غير المعتاد الأول فى البلورة الثانية شعاعاً معتاداً . فاذا زاد الدوران بعد ذلك ينعكس الحال ، حتى اذا بلغ قائمتين أدى نفاذ المعتاد الأول فى البلورة الثانيـة الى شعاع معتاد و نفاذ غير المعتاد الى شعاع غير معتاد ، وهكذا

فكان هيجنز بمشاهدته الاختلاف بين خواص شعاع من الضوء الطبيعى الذى اذا نفذ فى البلورة أدى نفوذه الى معتاد وغير معتاد . و بين خواص كل من هذين الشعاعين اللذين يؤدى كل واحد منهما عند نفوذه فى البلورة أحياناً الى شعاع من نوعه ، وأحياناً الى شعاع من نوع الآخر ، وأحياناً الى شعاعين أحدهما من نوعه والآخر من نوع الآخر ، كان بمشاهدته ذلك أول من كشف ظاهرة الاستقطاب

ولتحديد اتجاه الاهتزازة فى كل من الشعاعين المعتاد وغير المعتاد يستعان بالاستقطاب الحادث بالانعكاس فاذا أسقط الشعاعان المعتـاد وغير المعتاد اللذين يحدثان بالانكسار المزدوج فى بلورة سبات اسلندا على مجموعة ألواح بحيث تكون زاوية السقوط مساوية لزاوية الاستقطاب وأديرت البلورة حول الشعاع الساقط عليها أو أديرت مجموعة الالواح حول محور على امتداد هذا الشعاع شوهد انه فى وضع معين تأخذه البلورة بالنسبة الى مجموعة الالواح ينعكس الشعاع المعتاد عن مجموعة الالواح ، و ينفذ خلالها غير المعتاد ، وفى وضع عمودى على هذا ينعكس غير المعتاد وينفذ المعتاد ، وهذا يدل على أنهما مستقطبان فى اتجاهين متعامدين فى حين أنه فى أى وضع آخر يحدث انعكاسهما وانكسارهما معاً . و يحدد اتجاه الاهتزازة بالنسبة الى البلورة نفسها بالاسناد الى مستوى خاص يرسم فى البلورة يسمى «المستوى الرئيسى»[1] والمستوى الرئيسى هذا هو المستوى المرسوم عمودياً على سطح البلورة الواقع عليه الضوء وماراً بالمحور الضوئى . فمثلا اذا كان الشعاع

---

(١) Principal Plane

واقعاً على أحد أوجه البلورة ورسم العمود على هذا الوجه من نقطة السقوط فالمستوى الذى يشمل هـذا العمود والمحور الضوئى يكون مستوى رئيسياً . فاذا قوبل المستوى الرئيسى هـذا بمستوى السقوط على مجموعة الألواح عند انعكاس الشعاع المعتـاد وحده ، شوهد أن المستوى الرئيسى يكون موازياً لمستوى سقوط المعتاد ، أى يكون موازياً لمستوى استقطاب المعتاد ، فيكون طبقاً لمذهب فرسنل اتجاه الاهتزازة فى المعتاد عمودياً على المستوى الرئيسى

وكذلك يشاهد أنه عند انعكاس الغير المعتاد وحده يكون المستوى الرئيسى عمودياً على مستوى الاستقطاب فتكون طبقاً لمذهب فرسنل ، اهتزازة الغير المعتاد فى المستوى الرئيسى

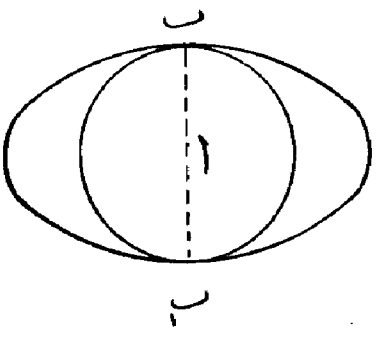
٢٩٢ — نظرية هيجنز فى شرح الانكسار المزدوج فى البلورات الاحادية المحور

نظراً لأن الشعاع المعتـاد ينقاد لقانونى الانكسار ، وانكساره اذن لا يختلف عن الانكسار خلال الأوساط المألوفة كالزجاج أو الماء رأى هيجنز أن صدر الموجة التى تنتشر خلال البلورة ويؤدى انتشارها الى حدوث الشعاع المعتـاد كرى أما صـدر الموجة التى يؤدى انتشارها الى حدوث الشعاع غير المعتـاد فمدور القطع الناقص[1] ، وهو الشكل الحادث من دوران القطع الناقص حول أحد محوريه أو قطريه الاساسيين . فعند سقوط شعاع من الضوء الطبيعى على أحد أوجه البلورة ينتشر داخل البلورة من نقطة السقوط موجة صدرها كرى ، وأخرى صدرها مدور القطع الناقص ، حيث يكون مركز الكرة ومدور القطع الناقص نقطة السقوط ولما كان الانكسار المزدوج لا يحدث اذا اخترق الضوء البلورة فى اتجاه المحور الضوئى ، رأى هيجنز أن الكرة ومدور القطع الناقص يتلامسان فى نقطتين يكون المستقيم الواصل بينهما هو المحور الضوئى . فاذا فرضنا أن نقطة ا (شكل ٢٥٥) مركز اضطراب داخل البلورة فطبقاً لنظرية هيجنز ينتشر من هـذه النقطة موجتان احداهما صدرها كرى ، والاخرى صدرها مدور القطع الناقص حيث يتلامس الصدران فى نقطتى ب ، ب، ويكون المستقيم ب ب،

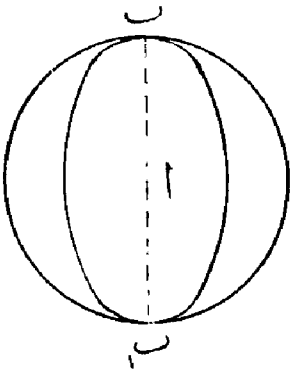
---

(١) Ellipsoid of Revolution

المحور الضوئى . فاذا كان مدور القطع الناقص خارج الكرة (شكل ٢٥٥) تكون سرعة مويجة غير المعتاد بوجه عام أكبر من سرعة مويجة المعتاد ، وتسمى البلورة سالبة أما اذا كانت الكرة خارج مدور القطع الناقص (شكل ٢٥٦) كانت سرعة مويجة غير المعتاد بوجه عام أقل وتسمى البلورة موجبة . ويلاحظ



(شكل ٢٥٥)

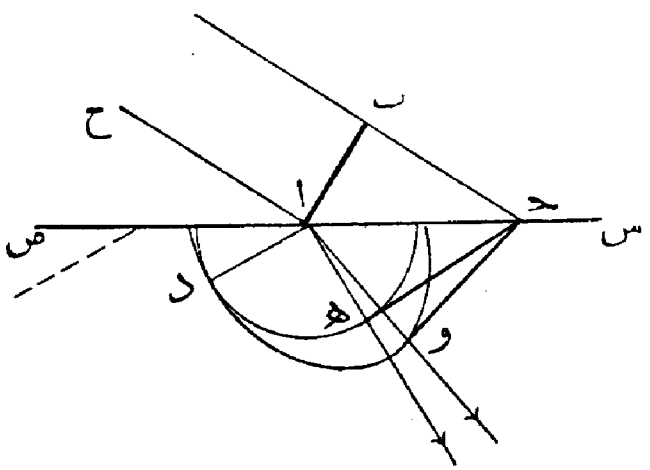


(شكل ٢٥٦)

فى كل حالة أن سرعة المويجتين تكون واحدة فى اتجاه المحور الضوئى . ومن أمثلة البلورات السالبة سبات اسلندا ومن أمثلة الموجبة الكوارتز

٢٩٣ — تطبيق نظرية هيجنز لرسم مسيرى الشعاعين

لتطبيق نظرية هيجنز المذكورة نفرض أن س ص (شكل ٢٥٧) سطح بلورة محورها البلورى المستقيم المتقطع . ولنفرض أنها سالبة وان سطحها عمودى على مستوى الورقة وان ا ب موجة صدرها مستوى تسقط على هذا السطح ففى أثناء وصول المويجة من ب الى نقطة حـ تكون قد انتشرت من ا داخل البلورة مويجتان احداهما صدرها كرى ، والأخرى صدرها مدور القطع الناقص بحيث يتلامس الصدران عند د ويكون المحور الضوئى



(شكل ٢٥٧)

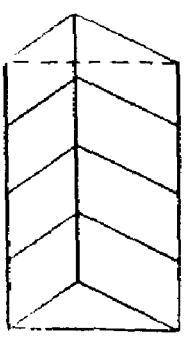
ا د موازياً المحور البلورى . فاذا رسمنا من نقطة حـ مماساً للكرة وليكن حـ هـ (وهو أيضاً مستوى عمودى على مستوى الورقة) كان هو صدر الموجة المعتادة عند الانكسار داخل البلورة واذا رسمنا من حـ المماس حـ و لمدور القطع الناقص كان حـ و (وهو ايضاً مستوى عمودى

على سطح الورقة) صدر الموجة غير المعتادة فاذا كان ح ا شعاعاً ساقطاً كان ا ه الشعاع المعتاد داخل البلورة و ا و الشعاع غير المعتاد

ويلاحظ ان نقطة تلامس المستوى ح ه بسطح الكرة اى نقطة ه المبينة فى الشكل واقعة فى مستوى الورقة وهو الواقع فيه الشعاع الساقط ح ا . اما نقطة تلامس المستوى ح و بمدور القطع الناقص فانها لا تكون فى مستوى الورقة الا اذا كان المحور الضوئى فى مستوى الورقة كما هو مبين فعلا بالشكل (أو عمودياً عليه كما سيتبين فيما بعد)

ومن هذا يتبين أن الشعاع غير المعتاد لا يكون بوجه عام فى المستوى الذى يشمل الشعاع الساقط والعمود المرسوم من نقطة السقوط . فهو لا ينقاد بوجه عام للقانون الاول . ونظراً لأن الموجة التى تؤدى الى حدوثه لا تنتشر بسرعة واحدة فى جميع الجهات لا تكون هناك علاقة ثابتة بين سرعة انتشار الموجات فى الهواء او الاثير وسرعتها فى البلورة فى جميع الجهات . واذن لا تكون النسبة بين جيب زاوية السقوط وجيب زاوية انكسار الشعاع الغير المعتاد ثابتة . ولا ينقاد الشعاع بوجه عام للقانون الثانى فى الانكسار . ولا يكون لمعامل انكسار الشعاع الغير المعتاد قيمة ثابتة فى جميع الجهات

وللتحقق من هذا يركب منشور ثلاثى كما بشكل (٢٥٨) من قطع من سبات اسلندا مقطوعة فى جهات مختلفة بالنسبة الى المحور ، ومرصوعة بعضها فوق الآخر بالكيفية المبينة بالشكل . ويستعمل هذا المنشور المركب فى السبكتروميتر مثلا حيث تضاء فتحته بضوء ذى لون واحد فالاشعة المتوازية التى تسقط على سطح المنشور يؤدى نفوذها فى كل قطعة الى حزمتين احداهما حزمة الاشعة المعتادة وهذه تنحرف فى جميع القطع بمقدار واحد ويؤدى نفوذها منها جميعاً الى طيف واحد أو صورة واحدة للفتحة والأخرى حزمة الاشعة الغير المعتادة وهذه تنحرف فى القطع المختلفة بمقادير مختلفة فتحدث كل قطعة طيفاً أو صورة للفتحة وترى هذه الاطياف والصور فى مواضع مختلفة


(شكل ٢٥٨)

ويتبين من شكل (٢٥٧) أن سرعة انتشار الموجة المستوية الغير المعتادة (وهى ح و) تتناسب وطول العمود الواقع من ا على صدرها ، ولكن نقطة و على الشعاع الغير المعتاد ا و تنتقل

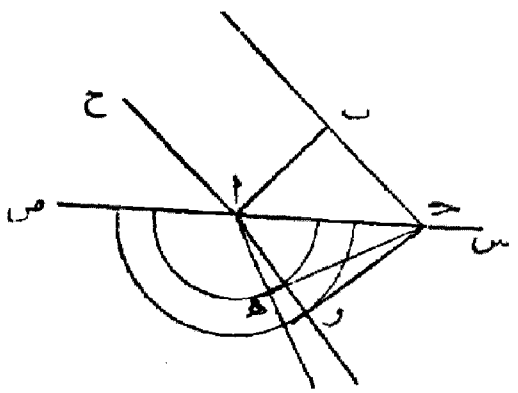
فى استقامة هذا الشعاع بسرعة تتناسب والبعد ا و . لذلك يجب التمييز بين ما يسمى السرعة الموجية وبين ما يسمى السرعة الشعاعية فى حالة الشعاع الغير المعتاد

٢٩٤ — تطبيق نظرية هيجنز فى حالات خاصة

ولزيادة توضيح نظرية هيجنز نراعى حالات خاصة يكون فيها سطح البلورة الواقع عليه الضوء مقطوعاً فى اتجاهات معينة بالنسبة الى المحور الضوئى . وسنفرض هنا أن البلورة سالبة

الحالة الأولى : *المحور الضوئى موازٍ للسطح الواقع عليه الضوء وعمودى على مستوى السقوط*

نفرض أن س ص هو سطح البلورة ومستواه عمودى على سطح الورقة ، وأن مستوى الورقة يمثل مستوى سقوط الضوء ، وليكن المحور الضوئى عمودياً على مستوى الورقة وليكن ا ب صدر الموجة المستوية ، ح ا شعاعاً فى مستوى الورقة يقع على السطح س ص



(شكل ٢٥٩)

فبما أن المحور عمودى على مستوى الورقة يكون مقطع صدر الموجة الغير المعتادة ، أى مقطع مدور القطع الناقص (شكل ٢٥٥) دائرة نصف قطرها نصف قطر المحور الاطول للقطع الناقص ، ويكون مقطع صدر الموجة المعتادة دائرة نصف قطرها يساوى نصف قطر المحور الاقصر للقطع الناقص فاذا رسمنا الدائرتين حول المركز ا (شكل ٢٥٩) بحيث يكون نصف قطر الواحدة مساوياً المدى الذى تصل اليه الموجة من ا داخل البلورة فى الوقت الذى تصل فيه الموجة من ب الى نقطة ح الوسط الخارجى ورسمنا من نقطة ح المماسين ح و ، ح هـ ، كان ا و مسير الشعاع الغير المعتاد ، ا هـ مسير الشعاع المعتاد ، وكلاهما فى مستوى الورقة . ويلاحظ فى هذه الحالة أن الشعاع الغير المعتاد كالمعتاد ينقاد لقانونى الانكسار . وله فى هذه الحالة معامل انكسار ثابت لا يختلف باختلاف زاوية السقوط ، ما دام الشعاع الساقط واقعاً فى مستوى الورقة أى فى مستوى عمودى على المحور فاذا رمزنا لسرعة الضوء فى الأثير أو فى الهواء بالحرف ص ولسرعة الشعاع المعتاد بالرمز ص

ولمعامل انكساره بالرمز م$_{١}$ ولسرعة غير المعتاد فى الحالة التى نراعيها بالرمز ع$_{٢}$ ولمعامل انكساره بالرمز م$_{٢}$ يتبين من الشكل أن

$$\frac{\text{ع}_{١}}{\text{م}_{١}} = \frac{\text{ب ح}}{\text{ا هـ}} = \text{م}_{١}$$

$$\frac{\text{ع}_{٢}}{\text{م}_{٢}} = \frac{\text{ب ح}}{\text{ا و}} = \text{م}_{٢}$$

$$\therefore \frac{\text{م}_{١}}{\text{م}_{٢}} = \frac{\text{ا و}}{\text{ا هـ}} = \frac{\text{ا}}{\text{ب}}$$

باعتبار أن ا نصف قطر المحور الأطول ، ب نصف قطر المحور الأقصر فى القطع الناقص الذى ينشأ عن دورانه صدر الموجة الغير المعتادة

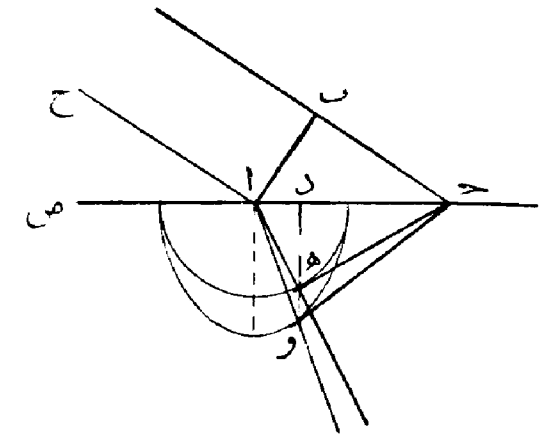
ويلاحظ هنا أن المستقيم ا و يمثل أطول مدى تصل اليه الموجة الغير المعتادة فى البلورة واذن تكون قيمة م$_{٢}$ أصغر قيمة يمكن أن تبلغها نسبة زاوية السقوط الى زاوية الانكسار فى الشعاع الغير المعتاد واذا قيل فى العادة معامل انكسار الشعاع الغير المعتاد فيقصد بذلك قيمة م$_{٢}$ هذه

وللتحقق من أن الشعاع الغير المعتاد ينقاد فى هذه الحالة لقانونى الانكسار ولايجاد قيمة م$_{٢}$ يقطع من البلورة منشور ثلاثى بحيث يكون حرفه الحارف فى اتجاه المحور الضوئى ، فالانكسار الحادث عند وجهيه المتقابلين فى هذا الحرف الحارف يكون كالانكسار الذى راعيناه فى هذه الحالة ، وان كان الشعاع النافذ خلال المنشور ينقسم الى شعاعين المعتاد وغير المعتاد فكلاهما يرى منقاداً لقانونى الانكسار ، ويمكن ايجاد معامل انكسار كل منهما على حدته ، واذن يمكن ايجاد نسبة المحور الاطول الى المحور الاقصر فى القطع الناقص

الحالة الثانية : المحور موازٍ للسطح الواقع عليه الضوء وفى مستوى السقوط

فى هذه الحالة يكون المحور موازياً للسطح س ص (شكل ٢٦٠) فاذا فرضنا أن مستوى الورقة يمثل مستوى السقوط نرى أن مقطع مدور القطع الناقص بمستوى الورقة يكون قطعاً ناقصاً ومقطع الكرة طبعاً دائرة ، ويكون القطع الناقص والدائرة متلامسين فى نقطتين

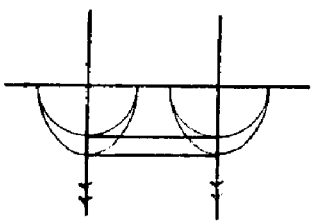
على السطح س ص . فبتطبيق النظرية المتبعة لايجاد صدر الموجة المنكسرة ومسير الشعاع المنكسر يتضح كما هو مبين بالشكل أن ا هـ يكون مسير الشعاع المعتاد ، ا و مسير الغير المعتاد



(شكل ٢٦٠)

وبما أن الدائرة والقطع الناقص متلامسان يمكن من الخواص الهندسية للدائرة والقطع الناقص اثبات أن المستقيم و هـ يتقابل والمحور الأقصر في نقطة د بحيث يكون عمودياً عليه ويكون

$$\frac{\text{د و}}{\text{د هـ}} = \frac{\text{ا}}{\text{ب}}$$ باعتبار أن ا نصف المحور الاطول ، ب نصف الاقصر ، فاذا رمزنا لزاوية انكسار الشعاع المعتاد بالرمز θ_1 ولزاوية انكسار الشعاع غير المعتاد بالرمز θ_2 يتبين من الشكل أن



(شكل ٢٦١)

$$\text{ط} \theta_1 = \frac{\text{ا د}}{\text{د هـ}} \text{ ، ط} \theta_2 = \frac{\text{ا د}}{\text{د و}}$$

$$\therefore \frac{\text{ط} \theta_1}{\text{ط} \theta_2} = \frac{\text{د و}}{\text{د هـ}} = \frac{\text{ا}}{\text{ب}} = \frac{\text{م}_1}{\text{م}_2}$$

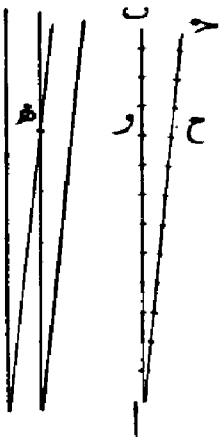
∴ نسبة ظلى الزاويتين تكون ثابتة لا تختلف باختلاف زاوية سقوط الشعاع ما دام الشعاع يسقط فى مستوى الورقة وتساوى هذه النسبة النسبة بين معاملى الانكسار

ويلاحظ فى هذه الحالة أنه اذا كانت زاوية سقوط الاشعة على السطح س ص صفراً فان الشعاعين المعتاد والغير المعتاد ينفذان على استقامة الشعاع الساقط ، ولكن تكون سرعتاهما مختلفتين كما هو مبين بشكل (٢٦١)

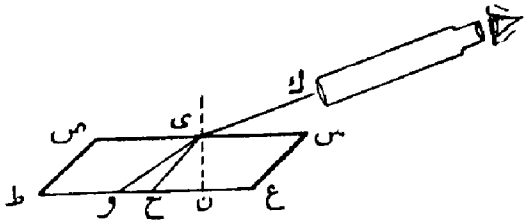
٢٩٥ — تجربة مالو

لتحقيق النتيجة المذكورة أجرى مالو تجربة جعل فيها خطين مستقيمين مدرجين مثل ا ب ، ا حـ (شكل ٢٦٢) مخدوشين على سطح معدنى مصقول بحيث تكون الزاوية بينهما صغيرة

وجعل شرط تداريج كل من المستقيمين عمودية عليه . ثم جعل السطح المصقول أفقياً ووضع عليه لوحاً من سبات اسلندا س ص ط ع (شكل ٢٦٣) مقطوعاً ومحوره مواز للسطح س ص أو ع ط بحيث يكون المحور عمودياً على المقياس أو المستقيم ا ب (فيكون المقياس ا ب عمودياً على مستوى (شكل ٢٦٣) فاذا نظر الى المقياسين ا ب ، ا ح بحيث يكون مستوى سقوط الضوء رأسياً



(شكل ٢٦٢)



(شكل ٢٦٣)

ماراً بالمحور (كمستوى سطح الورقة) رؤيت لكل من المستقيمين صورتان حادثتان بالانكسار المزدوج كما هو مبين بشكل (٢٦٢) ورؤيت نقطة مثل ه تتقابل عندها احدى صورتى المستقيم ا ب والصورة المخالفة لها فى النوع للمستقيم ا ح فاذا نظر الى هذه النقطة وحدد موضعها على المقياس ا ب وليكن موضعها نقطة و ، دل ذلك على أن الشعاع المعتاد الصادر من نقطة و والغير المعتاد الصادر من نقطة ح (وهى نقطة تقابل العمود المرسوم من و على ا ب والمستقيم ا ح) عند نفوذهما الى خارج البلورة يكون مسيرهما واحداً فترى العين النقطة المشتركة ه ويكون مسير الاول و ى ومسير الآخر ح ى داخل البلورة ، ومسيرهما معاً خارج البلورة ى ك أو اذا وقع الضوء فى استقامة ك ى على سطح البلورة يكون مسير المعتاد ى و ومسير الآخر ى ح داخلها

فاذا رمزنا لزاوية سقوط الشعاع ك ى بالحرف ن ولزاوية انكسار ى ح وهو الغير المعتاد بالرمز $ر_2$ ولزاوية انكسار ى و وهو المعتاد بالرمز $ر_1$ ورمزنا لسمك البلورة بالحرف ا يكون

$$\text{ط} ر_1 = \frac{\text{و ن}}{\text{ى ن}} \text{ ، ط} ر_2 = \frac{\text{ح ن}}{\text{ى ن}}$$

$$\text{ط} ر_1 - \text{ط} ر_2 = \frac{\text{و ح}}{\text{ى ن}} \quad \ldots\ldots (١)$$

ولكن $\frac{\text{طا}_{\text{ر}_1}}{\text{طا}_{\text{ر}_2}}$ = معامل انكسار الشعاع المعتاد = م_1

فاذا قيست زاوية θ وعلمت قيمة م_1 أمكن تقدير ر_1 واذن قيمة $\text{طا}_{\text{ر}_1}$ كما أن المقدار و ح يمكن قياسه رأساً على المقياسين واذن من المعادلة (١) يمكن استخراج قيمة $\text{طا}_{\text{ر}_2}$

والتحقق من أن نسبة $\frac{\text{طا}_{\text{ر}_1}}{\text{طا}_{\text{ر}_2}}$ = النسبة بين معاملى الانكسار

وقد استعمل مالوتلسكوباً كالمبين بالشكل يدور حول دائرة مدرجة رأسية فتكون زاوية θ هى الزاوية بين التلسكوب والخط الرأسى

٢٩٦ – نظرية فرسنل فى الانكسار المزدوج فى البلورات الثنائية المحور :

الفروض الأساسية

يتبين من بند (١٩٠) أن سرعة انتشار الموجة المستوية الحادثة فى الوسط من جراء التعوج أو القص تساوى $\sqrt{\frac{\text{ن}}{\text{ث}}}$ باعتبار أن ن رمز لمقياس المتانة ، ث رمز للكثافة فاذا اختلفت مرونة الوسط باختلاف الاتجاه وكانت الكثافة ثابتة ، فان الموجة تنتقل فى الاتجاهات المختلفة بسرع مختلفة وقد وضع فرسنل نظرية عامة لشرح الانكسار المزدوج بناها على هذا الفرض وذهب الى أنه يوجد فى الوسط الذى يحدث فيه الانكسار المزدوج ثلاثة اتجاهات متعامدة ، تكون فيها قوة المرونة التى تعود بالدقائق المزاحة الى مواضعها الأصلية ، تكون فيها تلك القوى فى استقامة الازاحة الحادثة ، وتسمى مقاييس المرونة فى هذه الاتجاهات المقاييس الأساسية للمرونة الضوئية [1] ويسمى كل مستوى يشمل اتجاهين من هذه الاتجاهات المستوى الرئيسى

فاذا اعتبرنا القوة التى توثر فى الدقيقة اذا كانت ازاحتها الوحدة مقياساً للمرونة واعتبرنا الاتجاهات الثلاثة المذكورة هى المحاور الثلاثة السينى والصادى والطائى ، ورمزنا لمقاييس المرونة فى هذه الاتجاهات بالمقادير ا^2 ، ب^2 ، ح^2 بالترتيب ينتج أنه اذا كانت الازاحة فى

(١) Principal Optical Elasticities

اتجاه المحور السينى تكون سرعة انتشار الموجه المستوية $\sqrt{\frac{ا^٢}{ث}}$ واذا كانت فى اتجاه المحور الصادى تكون $\sqrt{\frac{ب^٢}{ث}}$ واذا كانت فى اتجاه المحور الطائى تكون $\sqrt{\frac{ح^٢}{ث}}$

ونسبة السرعة فى الأثير الى الواحدة من هذه السرع تسمى المعامل الاساسى للانكسار (١)

أما اذا كانت الازاحة فى اتجاه آخر يميل على هذه المحاور الثلاثة ، ورمزنا لجيوب تمام زوايا ميلها على هذه المحاور بالرموز $س_١$ ، $ص_١$ ، $ط_١$ بالترتيب وفرضنا ان الازاحة قدرها الوحدة كانت مركباتها فى الاتجاهات الثلاثة ، أى فى الاتجاهات الموازية للمحاور ، هى $س_١$ ، $ص_١$ ، $ط_١$ بالترتيب . واذن تكون القوة المؤثرة فى استقامة المحور السينى $س_١ ا^٢$ والمؤثرة فى استقامة المحور الصادى $ص_١ ب^٢$ والمؤثرة فى استقامة المحور الطائى $ط_١ ح^٢$. وتكون محصلة هذه القوى

$$\sqrt{س_١^٢ ا^٤ + ص_١^٢ ب^٤ + ط_١^٢ ح^٤}$$

وبالرمز لهذه المحصلة بالحرف ق يتضح أن اتجاهها يعمل مع المحور السينى زاوية جيب تمامها $\frac{س_١ ا^٢}{ق}$. ويعمل مع المحور الصادى زاوية جيب تمامها $\frac{ص_١ ب^٢}{ق}$ ومع المحور الطائى زاوية جيب تمامها $\frac{ط_١ ح^٢}{ق}$ واذن فاتجاه هذه المحصلة غير منطبق على اتجاه الازاحة ومركبة هذه المحصلة فى اتجاه الازاحة هى قوة المرونة التى تعمل فى ارجاع الدقيقة الى موضعها الاول وهى التى تدخل فى تقدير سرعة الموجة العرضية الحادثة ، والتى تنتشر فى الاتجاه العمودى على اتجاه هذه الازاحة . أما مركبة القوة العمودية على اتجاه الازاحة فيغفل أمرها نظراً لان الموجات الطولية لا وجود لها فى الضوء

وللحصول على سطح الموجة ، أى على هيئة انتشارها داخل البلورة اذا اعتبرنا مصدر الموجة نقطة فى الداخل ، ذهب فرسنل الى تصور موجات صدورها مستوية ، مارة بتلك النقطة فى الاتجاهات المختلفة . وقدر سرعة كل واحدة منها . وذهب الى أن الغلاف لصدور هذه الموجات المستوية فى وقت ما هو سطح الموجة التى مركزها تلك النقطة فى ذلك الوقت

---

(١) Principal Refractive Index

وعلى أساس هذه الفروض . بنى فرسنل نظريته فى الانكسار المزدوج

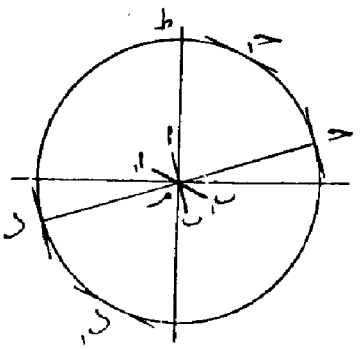
٢٩٧ ــ مقاطع سطح الموجة بالمستويات الرئيسية

ولبيان بعض النتائج الهامة التى يمكن استنباطها من نظرية فرسنل ، نراعى هنا حالات خاصة

(أولا) مقطع سطح الموجة بالمستوى س ط

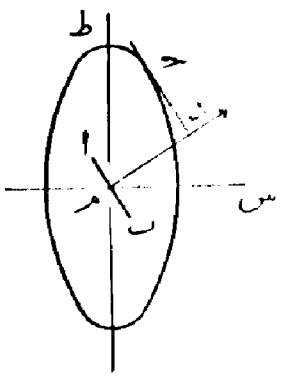
لنفرض أن سطح الورقة يمثل المستوى الذى يشمل المحورين السينى والطائى بحيث يكون المحور الصادى عمودياً على مستوى الورقة . ولنفرض أن مقاييس المرونة فى استقامة هذه المحاور هى كما سبق ا^{٢} ، ب^{٢} ، حـ^{٢} بالترتيب ، وأن ا > ب > حـ

ولنبحث أولا عن الموجة التى تكون اهتزازتها عمودية على مستوى الورقة أى موازية للمحور الصادى . فهذه الموجة تنتشر فى المستوى الذى يشمل المحورين السينى والطائى أى فى المستوى س ط بسرعة قدرها $\sqrt{\frac{ا^{٢}}{ن}}$ ولنرمز لها بالرمز ع$_{م}$ فاذا فرضنا أن موجة مستوية ا ب (شكل ٢٦٤) تمر بنقطة الاصل مـ ، فهى تنتشر فى مستوى الورقة فى الاتجاه حـ د العمودى على ا ب بسرعه قدرها ع$_{م}$ فاذا أخذنا نقطتين مثل حـ ، د بحيث يكون مـ حـ = مـ د = ع$_{م}$ مثلا يتضح أن صدر الموجة ا ب يصل الى حـ اذا سار فى اتجاه مـ حـ أو الى د اذا سار فى اتجاه مـ د ، بعد وحدة الزمن . وبالمثل يتضح أن أى موجة مستوية أخرى مارة بنقطة مـ ، صدرها مثل ا$_{١}$ ب$_{١}$ تصل بعد وحدة الزمن الى مدى يبعد عن مـ بمقدار ع$_{م}$. فيأخذ صدرها بعد وحدة الزمن أحد الوضعين حـ$_{١}$ أو د$_{١}$. واذن يتضح أن صدور الموجات المستوية المختلفة المارة بنقطة مـ فى الاتجاهات المختلفة يكون الغلاف لها جميعاً فى وقت ما محيط دائرة فى مستوى الورقة مركزها مـ . واذن يمثل محيط هذه الدائرة هيئة انتشار الموجة الصادرة من مـ فى المستوى س ط عند ما تكون الاهتزازة عمودية على مستوى الورقة



(شكل ٢٦٤)

ثم لنبحث عن الموجة التى تكون اهتزازتها فى مستوى الورقة . ولنفرض أن اتجاه الاهتزازة هو ا ب (شكل ٢٦٥) فهذه الموجة تنتشر فى مستوى الورقة فى استقامة مـ د العمود على ا ب فاذا رمزنا للزاوية بين هذا العمود وبين المحور السينى بالحرف هـ وراعينا ازاحة فى استقامة ا ب قدرها الوحدة كانت مركبتها على المحور السينى حا هـ ، وعلى الطائى حتا هـ . واذن تكون القوة المؤثرة فى استقامة الاول ا^{٢} حا هـ وفى استقامة الثانى ص^{٢} حتا هـ ولا تكون محصلة القوتين منطبقة على اتجاه الازاحة (ا ب) ويتضح أن القوة المؤثرة فى استقامة ا ب هى



(شكل ٢٦٥)

$$\text{ا}^{٢}\ \text{حا}^{٢}\ \text{هـ} + \text{ص}^{٢}\ \text{حتا}^{٢}\ \text{هـ}$$

وتكون هى القوة المؤثرة فى استقامة الازاحة (ا ب) عند ما يكون قدر هذه الازاحة الوحدة فهى طبقاً للاعتبار فى البند السابق مقياس للمرونة . فتعتبر قيمتها مساوية مقياس المرونة الذى يدخل فى تقدير سرعة انتشار الموجة . واذن تكون سرعة انتشار الموجة فى استقامة مـ د (العمود على ا ب) هى

$$\sqrt{\frac{\text{ا}^{٢}\ \text{حا}^{٢}\ \text{هـ} + \text{ص}^{٢}\ \text{حتا}^{٢}\ \text{هـ}}{\text{ث}}} \qquad \ldots\ldots\ (١)$$

وبالرمز لسرعة انتسار الموجة التى اهتزازتها موازية للمحور السينى بالرمز ع$_{س}$ فان

$$\text{ع}_{س} = \sqrt{\frac{\text{ا}^{٢}}{\text{ث}}}$$

وبالرمز لسرعة انتشار الموجة التى اهتزازتها موازية للمحور الطائى بالرمز ع$_{ص}$ فان

$$\text{ع}_{ط} = \sqrt{\frac{\text{ص}^{٢}}{\text{ث}}}$$

حيث يلاحظ أن ع$_{س}$ تدل على سرعة انتقال الموجة فى استقامة المحور الطائى ، ع$_{ط}$ تدل على سرعة انتقال الموجة فى استقامة المحور السينى . ويلاحظ أيضاً أن ع$_{ص}$ > ع$_{س}$ > ع$_{ط}$.

وبالتعويض فى المقدار (١) ينتج أن الموجة التى اهتزازاتها موازية للمستقيم ا ب تنتقل فى مستوى الورقة فى استقامة مـ د العمود على ا ب بسرعة قدرها

$$\sqrt{ع_س^{٢}\,حا^{٢}\,هـ + ع_ط^{٢}\,حتا^{٢}\,هـ} \quad \ldots\ldots (٢)$$

فاذا أخذنا على مـ د نقطة د بحيث يكون مـ د مساوياً المقدار (٢) ورسمنا عند د المستقيم د حـ موازياً المستقيم ا ب ، ثم كررنا هـــذه العملية بالنسبة الى موجات أخرى صدورها تميل بزوايا مختلفة بالنسبة الى المحورين ، فان الغلاف للمستقيمات التى تكون مثل د حـ يمثل سطح الموجة فى المستوى س ط بعد مضى وحدة الزمن ونظراً لان سرعة انتقال الموجة فى استقامة المحور السينى حيث تكون هـ صفراً هى المرموز لها بالرمز ع ط وقيمتها صغيرة ، وسرعة انتقال الموجة فى استقامة المحور الطائى حيث تكون هـ قائمة هى ع س وقيمتها اكبر يتضح أن الغلاف المذكور يكون قطعاً ناقصاً كالمبين بشكل (٢٦٥)

ويمكن ايجاد معادلة الغلاف بالطريقة الآتية . فالمستقيم د حـ العمودى على مـ د معادلته هى

$$س\,حتا\,هـ + ط\,حا\,هـ = مـ\,د$$

$$= \sqrt{ع_س^{٢}\,حا^{٢}\,هـ + ع_ط^{٢}\,حتا^{٢}\,هـ}$$

ويمكن وضع هذه المعادلة فى الصورة الآتية

$$(ط^{٢} - ع_س^{٢})\,حا^{٢}\,هـ + ٢\,س\,ط\,حتا\,هـ\,حا\,هـ + (س^{٢} - ع_ط^{٢})\,حتا^{٢}\,هـ = \text{صفراً}$$

وبالقسمة على $(ط^{٢} - ع_س^{٢})\,حتا^{٢}\,هـ$ يمكن تحويلها الى الصورة الآتية

$$ط^{٢}\,هـ + \frac{٢\,س\,ط}{ط^{٢} - ع_س^{٢}}\,ط\,هـ + \frac{س^{٢} - ع_ط^{٢}}{ط^{٢} - ع_س^{٢}} = \text{صفراً}$$

ومن هذه المعادلة يتضح أن الغلاف هو المنحنى الذى معادلته (١)

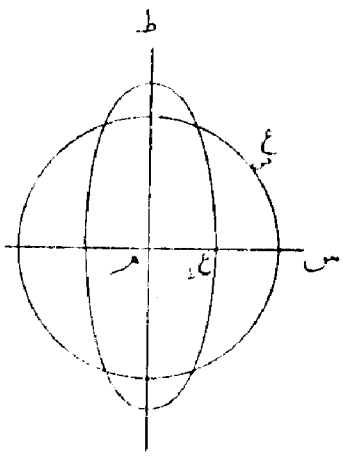
$$\left(\frac{٢\,س\,ط}{ط^{٢} - ع_س^{٢}}\right)^{٢} = ٤\,\frac{س^{٢} - ع_ط^{٢}}{ط^{٢} - ع_س^{٢}}$$

---

(١) انظر كتاب Diffeneutial Calculus by Edwards صفحة ١٦٤

$$\text{أو } \frac{س^{٢}}{ع_{ط}^{٢}} + \frac{ط^{٢}}{ع_{س}^{٢}} = ١$$

ويتبين من شكل (٢٦٥) أن الموجة المستوية التى اهتزازتها موازية للمستقيم ا ب تنتقل فى المستوى س ط فى اتجاه مـ د فى حين أن المستقيم الواصل بين نقطة مـ ونقطة تلامس د حـ بالقطع الناقص أى المستقيم مـ حـ يمثل مسير الشعاع . فلا يكون الشعاع عمودياً على صدر الموجة ، ولا تكون السرعة الموجيـة مساوية السرعة الشعاعية أما الموجة التى اهتزازتهـا عمودية على المستوى س ط كالموجة التى صدرها ا ب (شكل ٢٦٤) فان الشعاع مـ حـ يكون عمودياً على صدرها

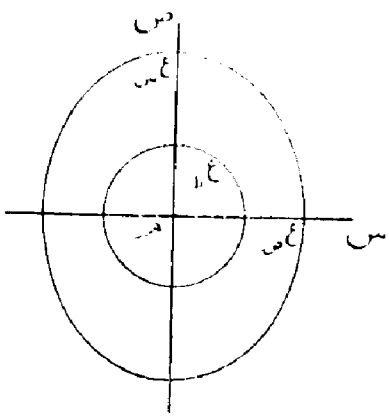


(شكل ٢٦٦)

ويستنبط مما سبق أن مقطع سطح الموجة بالمستوى س ط يكون كالمبين بشكل (٢٦٦) حيث تمثل الدائرة هيئة انتشار الموجة التى اهتزازتها عمودية على المستوى ويمثل القطع الناقص هيئة انتشار الموجة التى اهتزازتها فى المستوى المذكور . ونظراً لأن $ع_{س} > ع_{ص} > ع_{ط}$ فرضاً يكون المحور الأطول للقطع الناقص أكبر من قطر الدائرة وهذا أكبر من المحور الاقصر . ويترتب على ذلك تقاطع الدائرة والقطع الناقص فى أربع نقط كما هو مبين بالشكل

(ثانياً) مقطع سطح الموجة بالمستوى س ص

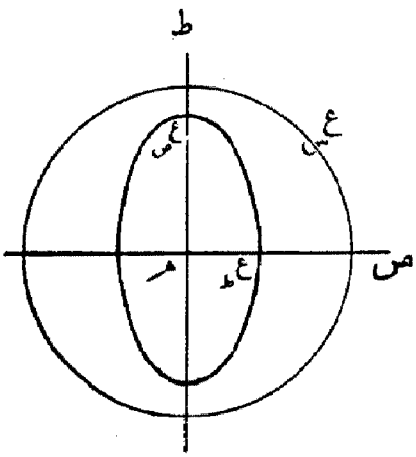
نبحث كما سبق فى حالتين ، الاولى حالة الموجة المستوية التى اهتزازتهـا عمودية على المستوى س ص ، أى فى اتجاه يوازى المحور الطائى . فهذه تنتقل فى المستوى المذكور بسرعة قدرها $ع_{ط}$ كيفما كان اتجاه صدرها . ويمكن كما فى الحالة السابقة



(شكل ٢٦٧)

بيان أن الغلاف لصدور هـذه الموجات بعد مضى زمن ما يكون محيط دائرة واذن تكون هيئة انتشار الموجة التى اهتزازتها عمودية على هـذا المستوى دائرة نصف قطرها يمثل المقدار $ع_{ط}$ كما هو مبين بشكل (٢٦٧) . والحالة الثانية الموجات المستوية التى اهتزازتها فى المستوى س ص

ويتبين فى هذه الحالة أنه اذا كان صدرها موازياً للمحور السينى فهى تنتشر فى استقامة المحور الصادى بسرعة ع ص ، واذا كان صدرها موازياً المحور الصادى فهى تنتشر فى استقامة المحور السينى بسرعة ع س ويمكن كما سبق بيان أن صدور مثل هذه الموجات يكون الغلاف لها قطعاً ناقصاً محوره الاطول منطبق على المحور الصادى ونصفه يمثل المقدار ع ص ، ومحوره الاقصر منطبق على المحور السينى ونصفه يمثل المقدار ع س . ويكون هذا القطع الناقص هو الدال على هيئة انتشار الموجة التى اهتزازتها فى المستوى س ص واذن يكون مقطع سطح الموجة بالمستوى س ص كالمبين بشكل (٢٦٧)



(شكل ٢٦٨)

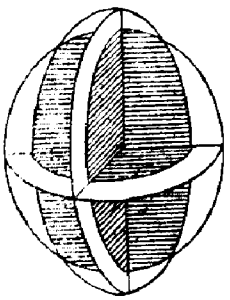
(ثالثاً) مقطع سطح الموجة بالمستوى ص ط

نراعى هنا أيضاً حالتين الاولى حالة الاهتزازة العمودية على المستوى ص ط وهى الموازية للمحور السينى . وهذه تنتقل فى هذا المستوى بسرعة ع س ويمكن كما فى الحالات السابقة بيان أن هيئة انتشارها تكون دائرة نصف قطرها يمثل المقدار ع س . والحالة الثانية الاهتزازة المنطبقة على المستوى ص ط ويمكن كما سبق بيان أن هيئة انتشارها تكون قطعاً ناقصاً محوره الاطول منطبق على المحور الطائى ونصف طوله يمثل ع س ومحوره الأقصر منطبق على المحور الصادى ونصف طوله يمثل ع ط ويكون المقطع كما هو مبين بشكل (٢٦٨)

٢٩٨ — السطح العام للموجة

والمقاطع المذكورة هى مقاطع السطح العام للموجة بالمستويات الرئيسية . ومتى تعينت أشكالها كما سبق ، أمكن رسمها على الورق المقوى وقطعها وتظليل الأجزاء الداخلية منها كالجزء المشترك بين الدائرة والقطع الناقص فى المقطع س ط وكذلك الدائرة فى المقطع س ص والقطع الناقص فى المقطع ص ط تظليل هـذه الاجزاء من الجانبين ثم لصق المقاطع بعضها بالآخر بوساطة قطع صغيرة من الورق المصمغ ، بحيث ينطبق المحوران السينيان من المقطعين س ط

ى س ص والمحوران الصاديان من المقطعين س ص ى ص ط والمحوران الطائيان من المقطعين س ط ى ص ط وتكون المحاور الثلاثة متعامدة . فيتكون هيكل السطح العام للموجة ويتيسر بالتأمل فيه ، تبين أن السطح العام مزدوج يتكون فى الحقيقة من منبسطين أحدهما داخلى وهو الذى يحيط بالاشكال الداخلية المظللة . والآخر خارجى . ويتبين أن المنبسطين يتلامسان فى أربع نقط هى نقط تقاطع القطع الناقص بالدائرة فى المقطع س ط ، وحول كل واحدة من هـذه النقط الأربع هزمة كهزمة التفاحة حول موضع اتصالها بالعود . ومبين بشكل (٢٦٩) منظر هيكل السطح العام ومواضع الهزمات الأربع فيه



(شكل ٢٦٩)

ومتى تحدد السطح العام للموجة امكن تطبيق قاعدة هيجنز لايجاد موضع صدر الموجة داخل البلورة فى لحظة ما . فاذا فرضنا مثلا أن موجة صدرها مستوى تنتقل داخل البلورة ، اعتبرت كل نقطة مصدر اضطراب غير أن الموجة التى تنتشر منه لا تنتشر على هيئة كرة كما فى الاوساط التى من قبيل الزجاج والماء والتى تكون متجانسة الاجزاء متشابهة الخواص فى جميع الاتجاهات ، ولا على هيئة مدور القطع الناقص كما يحدث فى البلورات الاحادية المحور فى حالة الشعاع غير المعتاد ، وانما تنتشر على هيئة سطحين أحدهما المنبسط الداخلى والآخر المنبسط الخارجى المذكورين آنفاً . فاذا رسمت هذه المنبسطات التى تمثل هيئة انتشار الموجات كان الغلاف للمنبسطات الداخلية صدراً لاحدى الموجتين والغلاف للمنبسطات الخارجية صدراً للموجة الاخرى ، فيكون الانكسار داخل البلورة بوجه عام انكساراً مزدوجاً

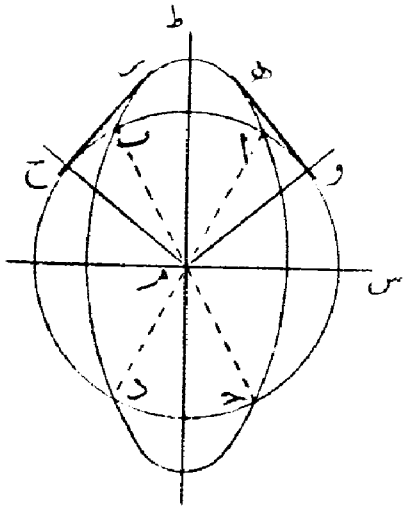
ويمكن تعيين العلاقة بين اتجاه الشعاع واتجاه انتقال صدر الموجة (المستوية) واتجاه الاهتزازة قياساً على ما سبق ذكره بخصوص المقطع س ط فى البند السابق فاذا رسم من أية نقطة موجودة على سطح الموجة مماس للسطح ، فان المستقيم الواصل بين المركز مـ (مركز الاضطراب) وهذه النقطة يمثل الشعاع ، والعمود المقام من المركز مـ على المستوى المماس يمثـل اتجاه انتقال الموجة المستوية وطوله يمثل سرعتها كما أن مسقط الشعاع على المستوى المماس يمثل اتجاه الاهتزازة

وتجدر الاشارة هنا الى أن سطح الموجة فى نظرية فرسنل يعتبر السطح العام . أما السطحان

الكرى ومدور القطع الناقص اللذان سبق ذكرهما فى البلورات الأحادية المحور فهما حالة خاصة يتحول اليهما السطح المزدوج الذى نحن بصدده ، عند ما يكون اثنان من مقاييس المرونة الثلاثة متساويين ، فتكون اثنتان من السرع ع س ، ع ص ، ع ط متساويتين . فمثلا اذا كان ا = ب > حـ فان ع س = ع ص > ع ط وفى هذه الحالة يتحول كل من المقطعين س ط (شكل ٢٦٦) ، ص ط (شكل ٢٦٨) الى دائرة خارجية وقطع ناقص داخلى ، متلامسين فى نقطتين ، و يتحول المقطع س ص (شكل ٢٦٧) الى دائرتين متحدتى المركز . فيكون السطح العام فى هذه الحالة عبارة عن كرة خارجية فى داخلها مدور القطع الناقص كما سبق ذكره فى البلورات الأحادية المحور الموجبة

٢٩٩ - المحوران الضوئيان — محورا السرعة الموجية الواحدة

اذا رسم المستقيم هـ و مماساً مشتركا للدائرة والقطع الناقص فى المقطع س ط (شكل ٢٧٠) يتبين مما تقدم أن مـ و يمثل سرعة انتشار الموجة التى اهتزازتها عمودية على المستوى ، ويمثل أيضاً سرعة انتشار الموجة التى اهتزازتها فى المستوى المذكور وموازية للمستقيم هـ و ، وان كان المستقيم هـ و يمس القطع الناقص والدائرة كلا فى نقطة ، فان المستوى المار بالمستقيم هـ و عمودياً على مستوى الورقة (س ط) يلمس السطح العام للموجة حول محيط دائرة قطرها هـ و (كما تلمس صفحة مستوية من الورق ، موضوعة على هزمة تفاحة ، سطح هذه التفاحة حول محيط دائرة) والموجة التى صدرها هذا المستوى المماس تنتشر فى اتجاه مـ و بسرعة واحدة كيفما كان اتجاه الاهتزازة (أى سواء أكان اتجاهها عمودياً على المستوى س ط أم موازياً للمستقيم هـ و ، أم موازياً لأى مستقيم آخر واقع فى المستوى المماس) . ولذلك يسمى الاتجاه مـ و فى البلورة محور السرعة الموجية الواحدة [1] ، ويسمى أيضاً محور البلورة . و بالمثل يتضح



(شكل ٢٧٠)

(١) Axis of single wave velocity

أن مـ ح محور آخر. ويلاحظ أن المحورين يمتدان على جانبي نقطة مـ

ويمكن ايجاد ميل كل من محورى البلورة على المحورين س ، ط (وهما اتجاهان من الاتجاهات الثلاثة للمقاييس الاساسية للمرونة). فبالرمز للزاوية بين و ه والمحور الطائى بالحرف ه ، يتضح مما سبق فى بند (٢٩٧) أن سرعة انتقال الموجة التى اهتزازتها موازية للمستقيم ه و ، فى المستوى س ط هى

$$\sqrt{ع_س^2 \, حا^2 \, ه + ع_ط^2 \, حتا^2 \, ه}$$

وسرعة انتقال الموجة التى اهتزازتها عمودية على المستوى س ط هى $ع_س$

وبما أن السرعتين متساويتان ينتج أن

$$ع_س^2 = ع_س^2 \, حا^2 \, ه + ع_ط^2 \, حتا^2 \, ه$$
$$= ع_س^2 \, حا^2 \, ه + ع_ط^2 - ع_ط^2 \, حا^2 \, ه$$

ومنه ينتج أن

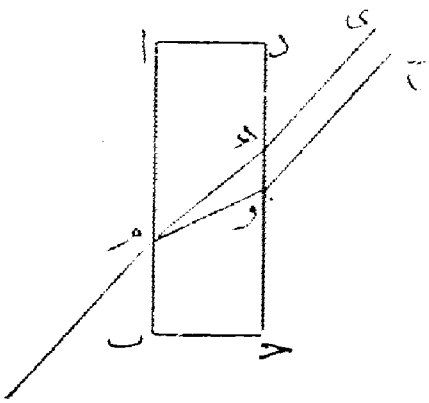
$$حا^2 \, ه = \frac{ع_س^2 - ع_ط^2}{ع_س^2 - ع_ط^2}$$

وتكون قيمة ه المدلول عليها بهذه المعادلة هى الزاوية بين كل من محورى البلورة والمحور السينى

٣٠٠ — الانكسار المخروطى الداخلى

تبين فيما سبق أن الموجة المستوية ه و (شكل ٢٧٠) تنتقل فى اتجاه محور البلورة مـ و ، بسرعة واحدة كيفما كان اتجاه الاهتزازة (مادامت الموجة عرضية والاهتزازة موازية لمستوى صدرها)، وأن المستوى المماس يلمس السطح العام للموجة حول محيط دائرة ، والمستقيمات الواصلة بين مـ والنقط المختلفة من محيط هذه الدائرة تمثل الأشعة . فاذا أخذ لوح بلورى مثل ا ب حد (شكل ٢٧١) مقطوع بحيث يكون سطحه ا ب موازياً للمحور الطائى (شكل ٢٧٠) أى موازياً لمنصف الزاوية بين المحورين البلوريين وكان مستوى الشكل ا ب حد منطبق على المستوى س ط فى البند السابق ، فان الموجة المستوية التى يكون صدرها داخل البلورة عمودياً على المحور

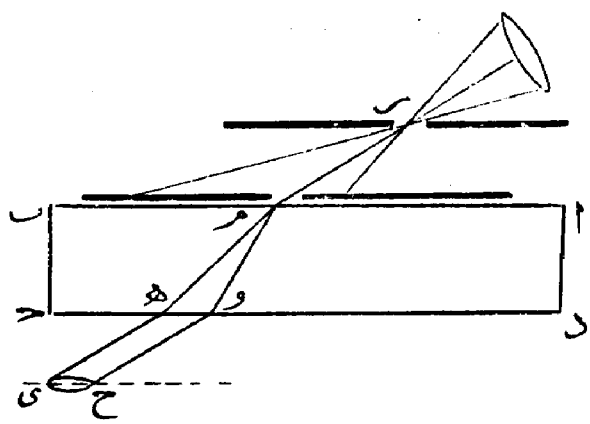
البلورى تنتقل فى اتجاه المحور بسرعة واحدة كيفما كان اتجاه الاهتزازة ، ولكن الشعاع الذى تكون اهتزازته عمودية على المستوى س ط (مستوى الورقة) يمثله المستقيم مـ و المنطبق على المحور أو الموازيه ، (انظر شكل ٢٧٠) والشعاع الذى تكون اهتزازته فى المستوى س ط وعمودية على مـ و (انظر شكل ٢٧٠) يمثله المستقيم مـ هـ . والأشعة الاخرى التى تكون الاهتزازة فيها مائلة بزوايا مختلفة على مستوى الورقة (ولكنها موازية لمستوى صدر الموجة) تمثل بالمستقيمات التى تصل بين نقطة مـ والنقط المختلفة من



(شكل ٢٧١)

محيط الدائرة ، التى يلمس عندها صدر الموجة السطح العام للموجة . واذن يتكون من هذه الاشعة سطح مخروط رأسه عند مـ . ونظراً لأن سرعة انتقال الموجة المستوية واحدة داخل البلورة فان هذه الأشعة اذا بلغت السطح حـ د (شكل ٢٧١) تنكسر خارجة فى الهواء فى امتدادات خطوط مستقيمة متوازية

وتسمى هذه الظاهرة « الانكسار المخروطى الداخلى »[1] وقد حققها « لويد » بتجربة اتخذ فيها لوحاً من « الأراغونيت »[2] ا ب حـ د (شكل ٢٧٢) بحيث يكون سطحاه المتوازيان ا ب ، حـ د عموديين على المحور الطائى (شكل ٢٧٠) الذى يكون مقياس المرونة فى اتجاهه أصغر ما يمكن وجعل أشعة الشمس تلم بوساطة عدسة لامة لدى ثقب صغير ر (شكل ٢٧٢) فى حاجز معتم . ثم تقع الأشعة على حاجز آخر به ثقب صغير عند مـ وهذا الحاجز موضوع على السطح ا ب للوح البلورى ، ويمكن تحريكه عليه حتى يأخذ الوضع



(شكل ٢٧٢)

المناسب الذى يصير فيه صدر الموجة المنكسرة داخل البلورة عمودياً على المحور . واذن تخرج

---

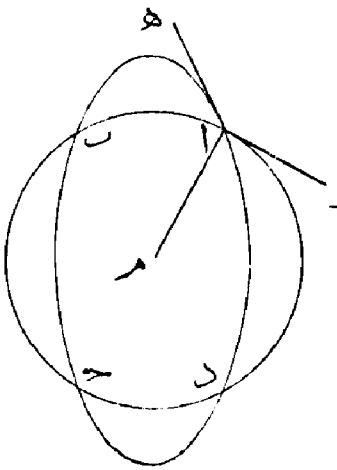
(١) Internal Conical Refraction

(٢) Aragonite

الحزمة الضوئية من السطح حـ د على هيئة حزمة اسطوانية يتكون من وقوعها على حاجز أبيض حلقة مستديرة من الضوء لا يختلف اتساعها تبعاً لاختلاف بعد الحاجز عن اللوح البلورى

٣٠١ — محورا السرعة الشعاعية الواحدة — الانكسار المخروطى الخارجى

رأينا فيما سبق أن مقطع السطح العام للموجة بالمستوى س ط يتكون من دائرة وقطع ناقص متقاطعين فى أربع نقط ا ، ب ، حـ ، د (شكل ٢٧٣) . والمستقيم مـ ا هو مسير الشعاع الضوئى للموجة المستوية التى صدرها المماس ا و للدائرة ، وهو أيضاً مسير الشعاع للموجة المستوية التى صدرها المماس ا هـ للقطع النـاقص . فاذا راعينا السطح العام للموجة يتضح أن المستقيم الواصل بين المركز مـ وموضع تلامس المنبسطين أى مركز الهزمة الموجودة على و السطح العام ، هو مسير شعاع ضوئى واحد لموجات مستوية لا نهاية لعددها تلمس صدورها السطح العام للموجة فى تلك النقطة وان كان الشعاع واحداً لها جميعاً فان هـذه الموجات المستوية فضلاعن اختلاف ميولها بعضها بالنسبة الى الآخر تنتقل بسرع مختلفة داخل البلورة ، فهى اذا انكسرت خارجة منها ترتب على ذلك حدوث أشعة منكسرة فى الهواء لا نهاية لعددها ، تمثل بزوايا مختلفة بالنسبة الى سطح البلورة الذى يحدث عنده الانكسار والاتجاه مـ ا فى البلورة يسمى « محور السرعة الشعاعية الواحدة »[1] ، وبالمثل يسمى الاتجاه مـ ب أيضاً محور السرعة الشعاعية الواحدة .



(شكل ٢٧٣)

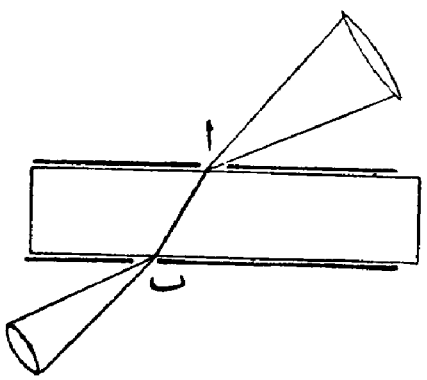
ويتضح من هذا أنه اذا نفذ شعاع داخل البلورة فى استقامة محور السرعة الشعاعية الواحدة أى فى استقامة مـ ا مثلا فانه عند الانكسار الى الخارج يكوّن حزمة جوفاء مخروطية الشكل ، رأس المخروط فيها موضع سقوط الشعاع على سطح البلورة وتعرف هذه الظاهرة « بالانكسار المخروطى الخارجى »[2]

---

(١) Axis of single ray velocity

(٢) External Conical Refraction

وقد حققها عمليـــا « لويد » فأخذ لوحاً من الاراغونيت كما فى البند السابق وجعل على سطحيه حاجزين معتمين فى كل منهما ثقب صغير مثل ا ، ب (شكل ٢٧٤) والحاجزان قابلان للانزلاق على سطحى اللوح . فاذا لمت الأشعة الضوئية بوساطة عدسة لامة لدى الثقب ا أمكن تهيئة موضع كل من الثقبين بحيث ينفذ الشعاع ا ب داخل اللوح البلورى فى استقامة محور السرعة الشعاعيـة الواحدة . فينبسط الشعاع ا ب عنـد انكساره خارجاً من البلورة الى الهواء الى حزمة مخروطيـة جوفاء كالمبين بالشكل ، بحيث اذا وقعت على حاجز أبيض تكونت عليه حلقة من ضوء يزداد اتساعها كلما بعد الحاجز عن اللوح البلورى



(شكل ٢٧٤)

٣٠٢ — منشور نِـكُل

للحصول عملياً على ضوء مستقطب يمكن استخدام ظاهرة الانكسار المزدوج والتخلص من أحد الشعاعين بوسيلة ما فيبقى الآخر ويكون مستقطباً فى اتجاه معروف

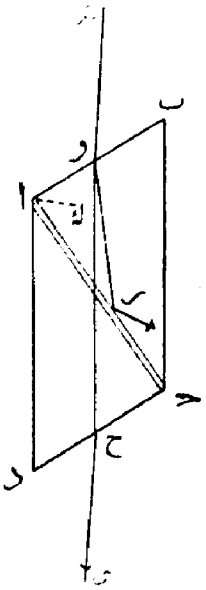
والطريقة المتبعة عادة فى ذلك انفاذ الضوء الطبيعى فيما يسمى منشور نِكل[1] وكيفية صنع المنشور أن تقطع بلورة من سبات اسلندا ذات طول مناسب الى نصفين بمقطع مار بالركنين المحدودين بثلاث منفرجات وعمودى على المستوى الرئيسى . ويصقل سطحا النصفين ثم يلصقان مرة أخرى وبينهما طبقة من بلسم كندا[2] فاذا فرضنا أن ا ب حـ د (شكل ٢٧٥) يمثل المستوى الرئيسى و ا حـ يمثل المقطع ومستواه عمودى على مستوى الورقة . وكان ا ك محور البلورة وفرضنا أن شعاعاً من الضوء الطبيعى مثل هـ و يسقط على السطح ا ب فانه ينفصل الى شعاعين أحدهما و ر المعتاد ، والآخر الغير المعتاد ، ويمكن ايجاد مسيريهما كما فى بند (٢٩٣) وبما أن معامل انكسار المعتـاد فى البلورة يساوى ١,٦٥ ومعامل انكسار الضوء فى بلسم كندا

---

(١) Nicol Prism

(٢) Canada Balsam

يساوى ١,٥٥ فان الشعاع المعتاد اذا سقط من البلورة على طبقة بلسم كندا كان ذلك بمثابة سقوطه من وسط كثيف الى وسط لطيف . واذن اذا كانت زاوية سقوطه على طبقة البلسم أكبر من الزاوية الحرجة فانه ينعكس انعكاساً كلياً كما هو مبين بالشكل



(شكل ٢٧٥)

لذلك تنتقى عند تركيب المنشور بلورة ذات طول مناسب حتى يخول ميل المقطع ا ح بالنسبة الى السطح ا ب سقوط المعتاد على البلسم بزاوية سقوط أكبر من الزاوية الحرجة فينعكس انعكاساً كلياً فى حين أن الغير المعتاد ينفذ خلال البلسم والنصف الآخر من البلورة ويخرج من الوجه د ح فى استقامة ح ى . وكما أنه يجوز ألا يكون ميل المقطع ا ح كافياً لعكس المعتاد يلاحظ أنه من الجائز أيضاً أن يكون ميل المقطع ا ح كافياً لعكس الشعاع الغير المعتاد فان معامل انكسار الغير المعتاد يتراوح تبعاً لاتجاه نفوذه فى البلورة بين معامل انكسار المعتاد ونهاية صغرى تساوى ١,٤٩ بالتقريب هى التى يعبر عنها عادة (كما سبق بيانه) بمعامل انكسار الغير المعتاد

وتنتقى البلورة بحيث يكون وجهاها الطرفيان أى سطحاها الممثلان فى شكل (٢٧٥) بالمستقيمين ا ب ، ح د على هيئة معين ويكون طولها ا د ثلاثة أمثال طول أحد أضلاع المعين ، ويسوى الوجهان ا ب ، ح د بحيث اذا وقع الشعاع الساقط على أحدهما موازياً لأحد حروف المنشور (كالحرف ا د مثلا) نفذ من الوجه الآخر ويكون مسيره موازياً لهذا الحرف

ولما كان مستوى استقطاب الغير المعتاد عموديا على المستوى الرئيسى ، أو اتجاه اهتزازة الغير المعتاد فى المستوى الرئيسى يكون اتجاه اهتزازة الضوء المستقطب الذى يحدث بانفاذ الضوء الطبيعى خلال منشور نكل يكون اتجاه اهتزازته فى المستوى الرئيسى أى يكون اتجاه الاهتزازة فى الشعاع ح ى النافذ من المنشور فى مستوى الشكل فاذا نظرنا الى الوجه ح د وخط البصر منطبق على استقامة الضوء النافذ من المنشور ظهر الوجه أمام العين كمعين ويكون اتجاه اهتزازة الشعاع النافذ موازيا لقطره القصير

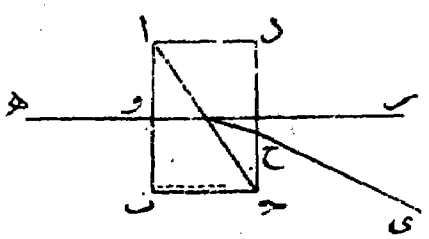
ويوضع منشور نكل عادة داخل أنبوبة اسطوانية لوقايته من الكسر ، وتسود جوانبه الموازية للحرف ا د حتى اذا انعكس المعتاد انعكاسا كليا عن طبقة البلسم ووقع على هذه الجوانب امتصته فلا ينعكس عنها انعكاسا قد يؤول الى نفوذه خلال طبقة الباسم

ويستعمل منشور نكل لبيان استقطاب الضوء كما يستعمل لاحداث الاستقطاب ففى هذه الحالة يسمى مستقطبا وفى تلك يسمى محللا ، فاذا أنفذنا حزمة متوازية من الضوء الطبيعى خلال منشور نكل ثم خلال منشور نكل آخر وأدرنا أحدهما وليكن الثانى حول محور الاشعة الساقطة عليه فانه فى وضع خاص لا ينفذ الضوء خلاله ، وفى هذه الحالة يكون المستويان الرئيسيان فى المنشورين متعامدين ويظهر القطران القصيران للوجهين المعينين متعامدين ، وفى وضع عمودى على هذا يكون الضوء النافذ منه أشده

٣٠٣ — منشور روشون

فى منشور نكل يمتنع نفوذ الشعاع المعتاد ولكن يوجد نوع آخر من المنشورات نحصل منه على الشعاعين المعتاد والغير المعتاد ولكن بحيث يكون الانفراج بينهما كبيراً . ومن هذا النوع منشور يسمى « باسم روشون »[1] وهو يتركب من منشورين ثلاثيين قائمى الزاوية مقطع أحدهما ا ب حـ (شكل ٢٧٦) ومقطع الآخر ا د حـ موضوعين متلامسين بحيث يركبان متوازى مستطيلات مقطعه ا ب حـ د

والمنشوران من سبات اسلندا أو الكوارتز أحدهما ا ب حـ مقطوع بحيث يكون محوره البلورى عمودياً على السطح ا ب الواقع عليه الضوء ، والآخر ا حـ د مقطوع بحيث يكون محوره عمودياً على مستوى الورقة . فاذا سقط شعاع من الضوء الطبيعى مثل هـ و عمودياً على السطح ا ب لايحصل الانكسار المزدوج فى المنشور ا ب حـ لأن الضوء ينفذ فى مادة المنشور فى اتجاه المحور ولكن اذا ما وصل الضوء



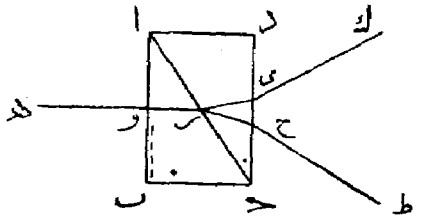
(شكل ٢٧٦)

(١) Rochon

الى السطح ا ح للمنشور ا ح د انفصل الشعاع الى شعاعين أحدهما المعتاد واتجاه الاهتزازة فيه عمودى على المستوى الرئيسى لهذا المنشور ينفذ فى استقامة ه و ر لأن سرعته فى المنشور الأول مثل سرعته فى الثانى فلا يعانى انكساراً والثانى الغير المعتاد واتجاه اهتزازته فى المستوى الرئيسى أى موازٍ للمحور ، عمودى على مستوى الورقة ، وهذا تكون سرعته فى المنشور الثانى اكبر من السرعة المشتركة للشعاعين المعتاد وغير المعتاد فى المنشور الاول اذا كانت البلورة سالبة ، واذن ينحرف هذا الشعاع فى المنشور الثانى كأنه ينكسر من وسط اكبر كثافة الى وسط أقل كثافة ضوئية ، أى ينحرف بعيداً عن العمود نحو الرأس ح للمنشور فاذا وقع على السطح د ح ينحرف انحرافاً آخر من جراء الانكسار من مادة البلورة الى الهواء فيخرج فى استقامة ح ى كما هو مبين بالشكل . أما اذا كانت البلورة موجبة فان سرعة الغير المعتاد فى المنشور ا ح د تكون أقل من السرعة المشتركة للمعتاد وغير المعتاد فى المنشور ا ب ح ، واذن يكون انكسار الشعاع الغير المعتاد عند نفوذه من ا ب ح الى ا ح د كأنه ينكسر من وسط أقل كثافة الى وسط أكبر كثافة فينحرف نحو العمود أى نحو السطح ا د من المنشور ا ح د فاذا وقع على السطح ح د ، عانى انحرافاً آخر فيخرج منحرفاً نحو ا د أى فى الجانب الآخر من ر

٣٠٤ — منشور وولاستون

يتركب منشور «وولاستون» كمنشور «روشون» غير أن المحور فى المنشور ا ب ح (شكل ٢٧٧) يكون موازياً للسطح ا ب وهو الواقع عليه الضوء ، فى حين أنه فى المنشور ا ح د كما فى الحالة السابقة يكون موازياً للحرف الحارف أى عمودياً على مستوى الورقة . فاذا وقع شعاع من الضوء الطبيعى فى استقامة ه و عمودياً على السطح ا ب فسير الشعاعين المعتاد وغير المعتاد واحد فى المنشور ا ب ح ولكن سرعة الغير المعتاد تكون اكبر من سرعة المعتاد اذا كانت البلورة سالبة واهتزازة المعتاد تكون عمودية على المستوى الرئيسى أى عمودية على مستوى الورقة ، واهتزازة الغير المعتاد تكون فى مستوى الورقة ، وعند وصول المعتاد الى السطح ح ينفذ فى المنشور ا ح د كشعاع غير معتاد لأن اهتزازته بالنسبة الى هذا



(شكل ٢٧٧)

المنشور فى المستوى الرئيسى أى موازية لحرف المنشور ا حـ د ، وعمودية على مستوى الشكل . فاذا رمزنا لسرعة المعتاد بالرمز ع١ ولسرعة الغير المعتاد بالرمز ع٢ فان الشعاع الذى اهتزازته عمودية على مستوى الشكل تكون سرعته فى المنشور ا ب حـ هى ع١ وتصير سرعته فى المنشور ا حـ د مساوية ع٢ وتكون ع٢ > ع١ لأن البلورة سالبة فرضاً فكأن الشعاع ينفذ من وسط اكبر كثافة الى وسط أقل كثافة فينحرف بعيداً عن العمود نحو الرأس حـ ويأخذ المسير ر حـ ثم يعانى انحرافاً آخر فينفذ فى استقامة حـ ط . أما الغير المعتاد فى المنشور ا ب حـ وهو الذى تكون اهتزازته فى مستوى الورقة فانه عند وصوله الى المنشور ا حـ د ينفذ فيه كشعاع معتاد لأن هذه الاهتزازة تكون عمودية على المستوى الرئيسى فى هذا المنشور أى عمودية على الحرف الحارف وهو اتجاه المحور فى هذا المنشور ، واذن ينفذ هذا الشعاع بسرعة ع١ فى المنشور ا حـ د فى حين أن سرعته فى المنشور ا ب حـ تكون ع٢ ، واذن يكون كأنه ينكسر من وسط أقل كثافة الى وسط اكبر كثافة فينحرف نحو العمود آخذاً المسير رى ثم ينحرف انحرافاً آخر فى استقامة ى ك

واذن يكون الانفراج بين الشعاعين النافذين من الوجه حـ د فى حالة منشور وولاستون أكبر منه فى حالة منشور روشون

ويلاحظ أنه اذا كانت البلورة موجبة يكون الشعاع الخارج فى استقامة حـ ط هو المعتاد فى المنشور ا حـ د أى الذى تكون اهتزازته فى مستوى الورقة عمودية على محور هذا المنشور فى حين أن الشعاع الخارج فى استقامة ى ك يكون الغير المعتاد أى الذى تكون اهتزازته عمودية على مستوى الورقة أوموازية لمحور هذا المنشور

---

(١) Wollaston

٣٠٥ — الاستقطاب الحادث بفعل التورمالين

من أبسط الوسائل للحصول على ضوء مستقطب استقطابا استوائياً أن ينفذ الضوء الطبيعى خلال لوح من التورمالين . كما أن لوح التورمالين من أبسط الوسائل لاختبار الاستقطاب . ولقد ابتدأنا فى هذا الباب دراسة ظاهرة الاستقطاب ، بالاستقطاب الحادث بفعل التورمالين ولكننا لم نتعرض الى كيفية حدوثه . والبحوث التى أجريت دلت على أن بلورة التورمالين تحدث الانكسار المزدوج ، وأن شعاع الضوء النافذ فى البلورة ينقسم شعاعين أحدهما معتاد والآخر غير معتاد . غير أن للبلورة خاصة امتصاص الشعاع المعتاد بشدة ، حتى اذا اخترق الشعاع سمكا لا يتجاوز مليمترين امتص دون الآخر امتصاصاً تاماً ، فيكون الشعاع النافذ خلال اللوح هو الشعاع الغير المعتاد على حدته

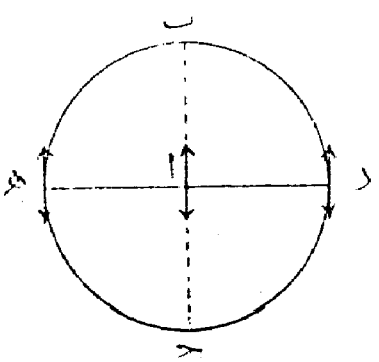
وقد أشرنا فيما قبل الى أن الضوء النافذ من التورمالين اذا كان الساقط عليه ضوءاً أبيض لا يكون أبيض بل يكون أصفر ضارباً الى الاخضرار فالتورمالين يمتص أيضاً جزءاً كبيراً من ضوء الشعاع الغير المعتاد . فألواح التورمالين وان صلحت لدراسة المبادىء فى ظاهرة الاستقطاب فانه يفضل عليها كثيراً منشور نكل ، والطرق الأخرى التى سبق ذكرها لاحداث الاستقطاب واختباره لا سيما اذا كانت شدة الضوء صغيرة

٣٠٦ — الضوء المستطير واستقطابه

لنفرض لسهولة الشرح أن جسماً صغيراً موجود فى باطن وسط متموج . فاذا كانت موجات الوسط طويلة ومدة الذبذبة كبيرة فان الجسم الصغير قد يعلو مع القمة ، ويهبط مع القرار ، فينقاد لهذه الموجات عند مرورها به ولا يعوقها عن الانتشار . أما اذا كانت الموجات قصيرة ومدتها صغيرة فالجسم لا يكاد يطلب الصعود مع القمة حتى يغشاه القرار فيطلب الهبوط وهكذا ، فيظل ساكناً ويصير لوجوده تأثير فى انتشار الموجات . ولكن بالرغم من وجود الجسم ومما ينجم عن

وجوده من التأثير يمكن أن نتصور وجود قوى دورية مناسبة عند موضع هذا الجسم تؤثر فى الوسط فى اتجاه الاهتزازة الاصلية ويزول بفعلها تأثير وجود الجسم ، فتنتشر الموجات كما لو لم يكن الجسم موجوداً . فاذا صح هذا الفرض ينتج أن وجود الجسم يترتب عليه وجود قوى دورية مضادة لتلك القوى ، تؤثر فى الوسط عند موضع وجود الجسم . واذن ينشأ بفعلها موجات يكون مركزها هذا الجسم وتنتشر من هذا المركز على هيئة كرات .

واذا حدث مثل هذا من جراء وقوع الضوء على دقيقة صغيرة فى سبيله فان الضوء الذى ينتشر من مكان هذه الدقيقة بالصفة المذكورة يسمى « الضوء المستطير »[1]



(شكل ٢٧٨)

فاذا فرضنا أن شعاعا من الضوء المستقطب استقطابا استوائيا يمر بدقيقة عند ا (شكل ٢٧٨) فى اتجاه عمودى على الشكل وكانت الاهتزازة فيه موازية للمستقيم ب ح فان وجود الدقيقة يعوق سير الموجات فى استقامة الشعاع . فاذا فرضنا أن تأثير وجود الدقيقة يزول اذا أثرت عند ا قوى دورية مناسبة فى اتجاه الاهتزازة الاصلية ، ينتج أن تأثير وجود الدقيقة هو كما لو أثرت قوى دورية مضادة فى الاتجاه لتلك القوى . فتحدث من جراء وجود الدقيقة اهتزازة تكون فى اتجاه ب ح وتنتشر من المركز ا . واذن الضوء السائر فى الاتجاه العمودى على مستوى الشكل مارا بالدقيقة ا يستطير جانب منه فى الاتجاه العمودى على مسيره الاصلى . ونظراً لأن الموجات الطولية لا وجود لها فى الضوء يتضح أن الضوء المستطير يزول فى استقامة ب ح أى فى استقامة الاهتزازة الاصلية . واذا رسمنا كرة مركزها ا فالاهتزازة تعدم عند تقابل ب ح بسطح هذه الكرة وتكون أشدها على محيط الدائرة الحادثة من تقاطع هذه الكرة والمستوى المار بالمستقيم د ه عمودياً على مستوى الورقة وبالمثل يتضح أنه اذا كان اتجاه الاهتزازة فى الشعاع المستقطب موازياً للمستقيم د ه فان الضوء المستطير يعدم فى هذه الاستقامة ويكون أشده عند محيط الدائرة الحادثة من تقاطع الكرة التى مركزها ا والمستوى المار بالمستقيم ب ح عمودياً على مستوى الورقة

---

(١) Scattered Light

ويستنبط من هـذا أنه اذا كان الشعاع الاصلى شعاعاً من الضوء الطبيعى الغير المستقطب فلم تكن الاهتزازة مقصورة على الاتجاه ب حـ وحده أو الاتجاه د هـ وحده بل كانت فى جميع الاتجاهات ، فان الضوء المستطير فى اتجاه د هـ تمتنع فيه الاهتزازة فى هذا الاتجاه فيكون مستقطباً استقطاباً استوائياً واتجاه الاهتزازة فيه مواز للمستقيم ب حـ . كذلك يكون الضوء المستطير فى اتجاه ب حـ يكون مستقطباً استقطاباً استوائياً واتجاه الاهتزازة فيه مواز للمستقيم د هـ

٣٠٧ — علاقة شدة الضوء المستطير بالطول الموجى

وقد توصل « اللورد رايلى » بالبحث فى ابعاد المقادير التى تتوقف عليها شدة الضوء المستطير الى استنباط علاقة هذه الشدة بالطول الموجى فاتساع الاهتزازة المستطيرة ولنرمز له بالحرف ا يتناسب واتساع الاهتزازة فى الشعاع الأصلى ولنرمز له (أى اتساع الاهتزازة بالحرف ب) ، ويتناسب أيضاً وعكس البعد مقيساً من موضع الدقيقة ولنرمز له بالحرف ء ، ويمكن أن نعده متناسباً وحجم الدقيقة التى تحدث الاستطارة من جرائها ولنرمز له بالحرف ح ، واذن يكون

$$ا = \frac{ب \, ح}{ء} \cdot ك$$

حيث يكون ك مقداراً ثابتاً . ولكى تصح هـذه المعادلة يجب أن يكون طرفاها متماثلين من حيث الابعـاد . ولا يتأتى ذلك الا اذا كان لمقلوب المقدار الثابت ك ، أبعـاد المساحة أى بعد [الطول]^{2}

والمقدار الطولى الوحيد الذى له علاقة أو ارتباط بالاستطارة هو الطول الموجى واذن نرى أن تماثل الأبعاد فى طرفى المعادلة يتطلب أن يكون اتساع الاهتزازة فى الضوء المستطير متناسباً عكسياً ومربع الطول الموجى

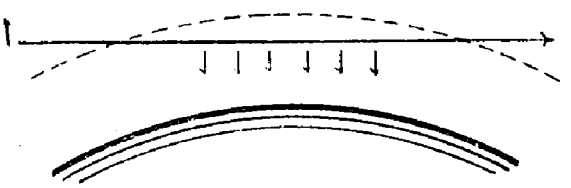
ولمـا كانت شدة الضوء تتناسب ومربع اتساع الاهتزازة ينتج أن شدة الضوء المستطير تتناسب عكسياً والطول الموجى مرفوعاً الى الأس الرابع

فاذا كان الضوء الأصلى أبيض ، فانه وفقاً لهـذه النتيجة لا تستطير الأضواء ذات الأطوال الموجية المختلفة بنسبة واحدة ، بل يغلب فى الضوء المستطير فى الاتجاه العمودى على مسير الضوء

الأصلى ، يغلب فيه الموجات القصيرة ، فيكون لونه اذن أزرق ، ويتجرد الضوء النافذ فى الاستقامة الاصلية من هذه الموجات القصيرة فتغلب فيه الحمرة

٣٠٨ – زرقة السماء والظواهر المرتبطة بها

اذا تذكرنا أن فى الجو دقائق صغيرة قد تكون نقعاً معلقاً فيه أو قد تكون قطيرات صغيرة من الماء أو قد تكون دقائق صغيرة من الملح أو قد تكون جزيئات الهواء نفسه[1]، فنفوذ أشعة الشمس خلال الهواء الذى يحتوى على هذه الدقائق ، يؤدى الى استطارة الضوء بالكيفية التى سبق شرحها فاذا راعينا الاشعة الصادرة من الشمس فى اتجاه ا ب (شكل ٢٧٩) فان وجود الدقائق الصغيرة فى سبيلها يؤدى الى



(شكل ٢٧٩)

استطارة الضوء فى الاتجاه العمودى على ا ب ، حيث يغلب فى هذا الضوء المستطير الموجات القصيرة ، فيغلب فيه اللون الأزرق . والى هذا يرجع السبب فى زرقة السماء . هذا والضوء النافذ فى استقامة ا ب يتجرد من الموجات القصيرة وكلما زادت الطبقة الهوائية التى يخترقها الضوء سمكا ، زاد تجرده من هذه الموجات ، فتغلب الحمرة فى هذا الضوء ، فاذا كانت الشمس عند الافق وقت الشروق أو الغروب ، فأشعتها الواصلة الى العين تنفذ خلال طبقة سميكة من الهواء فتستطير الاضواء ذات الاطوال الموجية القصيرة فى الاتجاه العمودى ، وتغلب فى الاشعة الواصلة الى العين الاضواء ذات الاطوال الموجية الطويلة ، كالضوء الاحمر والاصفر مثلا . والى هذا يرجع السبب فى احمرار الشمس عند الشروق أو الغروب

وقد شوهد اكثر من مرة [2] فى كثير من أنحاء العالم أن مناظر الشروق والغروب تبلغ عقب انفجار البراكين من بهاء الالوان وجمالها حداً غير مألوف . وذلك من جراء انتشار الرماد

---

(١) ذهب « اللورد رايلى » فى تعليل زرقة السماء الى استطارة الضوء بفعل دقائق صغيرة كدقائق الهباء أو الملح ثم بين أن جزيئات الهواء نفسه تكفى لاحداث الاستطارة

(٢) أنظر كتاب Worlds in the Making تأليف Svante Arrhenius

فى الجو ولبوث دقائقه الصغيرة معلقة تذروها الرياح فى الجهات المختلفة

ومما يعزز تعليل زرقة السماء بالكيفية المذكورة أن ضوء السماء مستقطب (الى حد ما) استقطاباً استوائياً. فاذا نظر الى السماء خلال منشور نكل لا سيما اذا وجه المنشور فى اتجاه عمودى على أشعة الشمس وأدير المنشور فان الضوء النافذ منه يتغير من شدة الى ضعف الى شدة، ويدل هذا على أن ضوء السماء مستقطب، ولو أن استقطابه غير تام لامتزاج الضوء الواصل الى منشور نكل بأضواء من أجزاء أخرى من السماء تنعكس نحو المنشور، ولوجود دقائق لا تبلغ من الصغر الحد الذى تتطلبه ظاهره الاستطارة ينعكس بعض الضوء الطبيعى الغير المستقطب عن سطوحها

وينشأ عن استطارة الضوء ظواهر أخرى غير زرقة السماء وحمرة الشروق والغروب منها زرقة الدخان لاسيما ما تكون دقائقه صغيرة كالدخان المتصاعد من لفائف (سجاير) الطباق وزرقة الضباب غير الكثيف اذا نظر اليه عن بعد، واليه يرجع السبب فى اصطباغ الجبال البعيدة بلونها الأزرق اللطيف. كذلك زرقة الماء اذا وضع فى اناء من الزجاج وأضيف اليه قليل من اللبن

٣٠٩ — تقليد زرقة السماء وحمرة الشروق والغروب بالتجربة

من التجارب الأولى التى أجريت فى هذا الموضوع تجارب « تندال » وخلاصتها أنه جعل فى أنبوبة طويلة من الزجاج بخاراً يتحلل بفعل الضوء كبخار « يودور الاليل »[1] فاذا ما تحلل البخار تكون داخل الانبوبة ضباب لطيف يرى لونه أزرق فى مبدئ الأمر حيث تكون دقائقه صغيرة ثم يتحول بالتدريج الى اللون الابيض من جراء كبر هذه الدقائق

ومن أبسط التجارب أن يجهز فى اناء من الزجاج محلول مخفف من « الهيبو »[2] الذى يستعمل فى التصوير الضوئى (الفتوغرافية) ويضاف اليه قليل من حامض الكلوردريك المخفف، فيرسب الكبريت على هيئة دقائق صغيرة تأخذ فى الكبر رويداً رويداً. فاذا نفذت خلال المحلول حزمة من الاشعة رؤى الضوء المستطير من الجوانب (فى الاتجاه العمودى على

---

(١) Iodide of Allyl

(٢) Sodium Hyposulphite

مسير الأشعة) أزرق ويرى الضوء النافذ أحمر . ويمكن متابعة تحول الضوء الازرق بالتدريج الى ضوء أبيض تبعاً لكبر الدقائق . ويمكن أيضاً اختبار ما اذا كان الضوء المستطير مستقطباً عند ما يكون الضوء الواقع على المحلول طبيعياً غير مستقطب ، وتحقيق ما سبق ذكره عند ما يكون هذا الضوء مستقطباً استقطاباً استوائياً

٣١٠ – المافوق الميكرسكوب

الدقائق الصغيرة جداً التى تبلغ من الصغر حداً لا يتيح رؤيتها بوساطة الميكرسكوب المعتاد يمكن الاستدلال على وجودها بالاستعانة بظاهرة الاستطارة ، ومثل هذه الدقائق ، الدقائق المعلقة فى الماء من الذهب أو الفضة ، وهى التى تتكون عند ما يحدث تفريغ كهربائى بين قطبين من الذهب أو الفضة مغمورين فى الماء المقطر ، حيث تتطاير الدقائق من القطبين ، وتلبث معلقة فى الماء كما تتعلق دقائق المحلولات الغروية [١] . فتلك الدقائق لا يمكن رؤيتها بالميكرسكوب المعتاد ولكن اذا أمرت خلال الماء حزمة من الضوء الأبيض استطار الضوء بفعل الدقائق فى الاتجاه العمودى ، فاذا كانت الحزمة أفقية استطار الضوء فى المستوى الرأسى . فاذا هيء ميكرسكوب فى وضع رأسى مثلا ، أمكن بوساطته رؤية المواضع الواقعة فى المستوى البؤرى للميكرسكوب التى يستطير منها الضوء فيتعين وجود تلك الدقائق فى هذه المواضع

والميكرسكوب الذى يستعان فيه بظاهرة الاستطارة للاستدلال على وجود الدقائق الصغيرة جداً يسمى «المافوق الميكرسكوب»[٢] ومما تلزم مراعاته فى هذا الجهاز الا يصل الى مجال النظر فى الميكرسكوب غير الضوء المستطير من الدقائق ، وأن تكون شدة الضوء الذى ينفذ خلال المحلول كبيرة لكى تكون شدة الضوء المستطير كبيرة

وشكل (٢٨٠) يوضح طريقة « سيدنتوف »[٣] و « زيغموندى »[٤] فى تركيب الجهاز . وفيه تلم أشعة الشمس أو أشعة قوس كهربائى ، بوساطة عدسة لامة ا على فتحة مستطيلة ضيقة

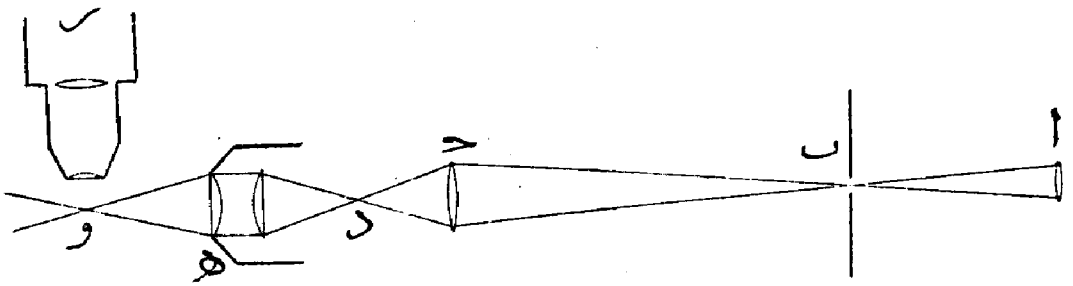
---

(١) Colloidal Solutions

(٢) The Ultra-Microscope

(٣) Siedentoph

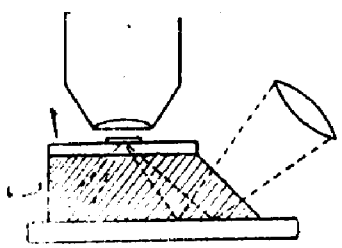
(٤) Zsigmondy



(شكل ٢٨٠)

عند ب ثم تقع بعد ذلك على عدسة لامة حـ تتكون بوساطتها صورة حقيقية مصغرة للفتحة عند د ثم تنفذ الاشعة بعد ذلك خلال قطعة شيئية لميكرسكوب، هى المدلول عليها بالحرف هـ ، تعمل عمل مكثف ، فتخرج الاشعة منها ملمومة عند و . حيث يوضع المحلول الغروى الذى يراد الاستدلال على دقائقه ، وينظر اليه خلال ميكرسكوب ر كالمبين بالشكل

وتوجد طريقة أخرى هى طريقة « كوتون»(٤) يستعان فيها بالانعكاس الكلى لمنع وصول الضوء الواقع على المحلول الى مجال النظر فى الميكرسكوب، والفكرة الاساسية موضحة بشكل(٢٨١) فتوضع قطرة من السائل على لوح ا من الالواح الزجاجية المعتادة التى تستعمل مع الميكرسكوبات ويوضع هـــذا اللوح على كتلة من الزجاج ب بحيث يكون التلامس بين سطحها الاعلى وبين السطح الاسفل للوح ا تلامساً تاماً ، (ويستخدم لهذه الغـاية قطرة من زيت خاص(٥) توضع بينهما) وتغطى قطرة السائل بغطاء الزجاج الرفيع كالاغطية



(شكل ٢٨١)

المعتادة التى تستعمل فى الميكرسكوبات وتصوب حزمة من الاشعة بوساطة عدسة لامة بحيث تنعكس عن السطح الاسفل للكتلة الزجاجية ب ، وتلم فى باطن القطرة ، وتهيأ زاوية سقوطها بحيث تنعكس انعكاساً كلياً عن الغطاء الزجاجى فلا تنفذ خلاله الى أعلى . وينظر الى القطرة بوساطة ميكرسكوب كالمبين بالشكل

---

(١) Cotton

(٢) Cedar oil (زيت شجر الارز)