الباب الثالث عشر

الاستقطاب الدائرى والاستقطاب الاهليلجى والاستقطاب الدورانى

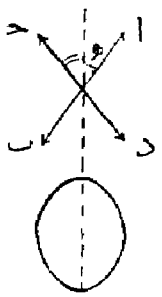
٣١١ – الاستقطاب الدائرى والاستقطاب الاهليلجى

تبين فى الباب السابق أن سرعة الشعاع المعتادوسرعة الشعاع الغير المعتاد مختلفتان بوجه عام وان اتجاه الاهتزازة فى الشعاع المعتاد عمودية على المستوى الرئيسى واتجاهها فى الآخر فى المستوى الرئيسى . فاذا أسقطنا شعاعاً من الضوء المستقطب استقطاباً استوائياً على لوح بلورى محدث للانكسار المزدوج ، ومقطوع من بلورة أحادية المحور ، وكان اتجاه الاهتزازة مائلا بالنسبة الى المستوى الرئيسى بزاوية ، تحللت الاهتزازة الى مركبتين ، احداهما فى المستوى الرئيسى والأخرى عمودية عليه ، وتنتقل هاتان المركبتان خلال اللوح البلورى بسرعتين مختلفتين . فاذا كان اللوح البلورى مقطوعاً بحيث كان محوره موازياً لسطحه وكان الضوء واقعاً عمودياً على السطح ، كان مسير الشعاعين خلال اللوح البلورى واحداً بالرغم من اختلاف السرعتين . فاذا وصلت الاهتزازتان الى السطح الآخر للوح يكون بينهما اختلاف فى الطور يحدث من جراء اختلاف السرعتين .

ويتبين مما سبق فى بند (١٨٠) أنه اذا كان اختلاف الطور الحادث بينهما صفرا أو ٢ ط أو بوجه عام ٢ ن ط فانهما فى هذه الحالة يحصلان اهتزازة مستقيمة موازية للاهتزازة الأصلية ويكون الشعاع النافذ من اللوح مستقطباً استقطاباً استوائياً واتجاه اهتزازته موازٍ لاتجاه الاهتزازة فى الشعاع الاصلى

واذا كان اختلاف الطور بينهما ط أو ٣ ط أو بوجه عام (٢ ن + ١) ط فانهما يحصلان اهتزازة مستقيمة ولكن اتجاهها لا يكون موازياً لاتجاه الأولى وانما يميل على المستوى الرئيسى

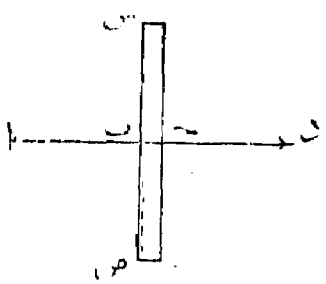
بزاوية تساوى ميل الاهتزازة الاولى ولـكنها فى الجانب الآخر منه . فاذا فرضنا أن المستقيم الرأسى شكل (٢٨٢) يمثل المستوى الرئيسى العمودى على مستوى الورقة وكان المستقيم ا ب دالا على اتجاه الاهتزازة فى الشعاع الاصلى وميله على المستوى الرئيسى بزاوية تساوى ه فان اتجاه المحصلة فى الحالة التى نحن بصددها يكون حـ د ويصنع اتجاهها زاوية قدرها ٢ ه مع اتجاه الأولى . واذن يكون الشعاع النافذ من اللوح البلورى مستقطباً استقطاباً استوائياً ولـكن اتجاه الاهتزازة يصنع زاوية قدرها ٢ ه مع اتجاه الاهتزازة فى الشعاع الاصلى . واذا كان اختلاف الطور الحادث بين الاهتزازتين أى مقدار آخر فان المحصلة تكون قطعاً ناقصاً سنعبر عنه بالاهليلج . ويقال ان الشعاع النافذ من البلورة مستقطب استقطاباً اهليلجياً (١) ، ويلاحظ انه فى حالة ما يكون اختلاف الطور $\frac{\pi}{2}$ أو $\frac{3}{2}\pi$ أو بوجه عام $(2n+1)\frac{\pi}{2}$ واتساع الاهتزازتين المتعامدتين واحد ، يتحول الاهليلج الى دائرة ويقال ان الشعاع النافذ مستقطباً استقطاباً دائرياً (٢)



(شكل ٢٨٢)

٣١٢ — احداث الاستقطاب الدائرى والاستقطاب الاهليلجى

وللحصول على ضوء مستقطب استقطاباً دائرياً يستخدم عادة لوح بلورى يسمى « اللوح الربع الموجى »(٣) وهو لوح من بلورة احادية المحور محدثة للانكسار المزدوج مقطوع بحيث يكون سطحه موازياً للمحور حتى اذا سقط عمودياً على سطحه شعاع من الضوء الطبيعى فان الشعاعين المعتاد والغير المعتاد لا ينفصلان ويظل مسيرهما واحداً ولـكن سرعتيهما لا تكونان متساويتين . ويهيأ سمك اللوح البلورى بحيث يكون فرق المسير الحادث من جراء اختلاف السرعة مساوياً ربع الطول الموجى



(شكل ٢٨٣)

فاذا فرضنا أن شعاعاً مثل ا ب شكل (٢٨٣) يسقط على اللوح البلورى المتوافر فيه الشرطان

---

(١) Elliptically Polarised

(٢) Circularly Polarised

(٣) Quarter-Wave Plate

المذ وران وكان المحور موازياً للسطح س ص الواقع عليه الضوء فان مستوى الورقة يمثل المستوى الرئيسى . فاذا كان الشعاع مستقطباً استقطاباً استوائياً وكان اتجاه الاهتزازة مائلا على مستوى الورقة بزاوية قدرها ٤٥ درجة فان الاهتزازة تتحلل الى مركبتين متساويتى الاتساع احداهما عمودية على مستوى الورقة (الشعاع المعتاد) والأخرى فى مستوى الورقة وموازية للمحور (الشعاع الغير المعتاد) وهاتان تنتقلان خلال اللوح الى ح على مسير واحد ولكن بسرعتين مختلفتين فيحدث فرق فى المسير قدره ربع الطول الموجى واذن يبلغ اختلاف الطور بين الاهتزازتين المتعامدتين عند ح قائمة فيحصلان اهتزازة مستديرة يكون مستواها عموديا على المستوى الرئيسى (مستوى الورقة) وتكون هى الاهتزازة فى الشعاع ح د النافذ من اللوح البلورى

أما اذا كان اتجاه الاهتزازة فى الشعاع ا ب المستقطب استوائياً يميل على المستوى الرئيسى (مستوى الورقة) بزاوية ليست صفراً ولا قائمة ولا ٤٥ درجة ، فان الاهتزازة تتحلل الى مركبتين متعامدتين ليستا متساويتى الاتساع تنتقلان بسرعتين مختلفتين . وعند ح يكون قد بلغ اختلاف الطور بينهما قائمة ، فيحصلان قطعاً ناقصاً ، ويكون الشعاع ح د النافذ من البلورة مستقطباً استقطاباً اهليلجياً ويلاحظ أن مستوى الاهليلج يكون عمودياً على المستوى الرئيسى (مستوى الورقة) ويكون أحد محوريه الرئيسيين موازياً المحور الضوئى فى البلوره

٣١٣ — تقدير سمك اللوح الربع الموجى

لتقدير سمك اللوح الربع الموجى نرمز لمعامل انكسار الشعاع المعتاد بالرمز م$_1$ ولسمك اللوح البلورى بالحرف ء ، فمسير الشعاع المعتاد خلال البلورة مقيساً فى الأثير أو الهواء يكون م$_1$ ء ، وبما أن الضوء ينفذ فى اتجاه عمودى على المحور ويسقط عمودياً على السطح فشكل (٢٦١) يمثل مسير الشعاعين المعتاد والغير المعتاد باعتبار أن البلورة سالبة ، ومنه يتضح أن سرعة الشعاع الغير المعتاد داخل البلورة يمثلها نصف المحور الاطول لمدور القطع الناقص الذى يمثل صدر الموجة للشعاع الغير المعتاد ، واذن تكون النسبة بين سرعة الضوء فى الاثير أو الهواء وسرعة الشعاع الغير المعتاد هى مما سبق أن سميناه معامل انكسار الشعاع الغير المعتاد . فاذا رمزنا

لهذا بالرمز م٢ يكون مسير الشعاع الغير المعتاد داخل البلوراة ، مقيساً فى الاثير أو الهواء ، مساوياً م٢ ء . واذن يكون الفرق فى المسير بين الشعاعين عند ما يخترقان سمك اللوح البلورى هو

$$\text{ء} (م_1 - م_2) = \frac{1}{2} \text{ل}$$

باعتبار أن ل الطول الموجى للضوء مقيساً فى الاثير أو الهواء

واذن

$$\text{ء} = \frac{\text{ل}}{4 (م_1 - م_2)}$$

ويساوى هذا سمك اللوح الربع الموجى بالنسبة الى ضوء ذى طول موجى قدره ل . والضوء الذى يختار عادة لهذا الغرض ضوء لهب الصوديوم .

ويلاحظ أنه اذا كانت البلورة موجبة فان معامل انكسار الشعاع الغير المعتاد يكون اكبر فيتغير المقدار (م١ — م٢) الى (م٢ — م١)

ويصنع اللوح الربع الموجى من الكوارتز وهو من البلورات الموجبة أو الميكا [1] وهو من النوع السالب . وسمك اللوح المصنوع من الميكا ٠٫٠٣٢ من المليمتر بالتقريب

٣١٤ — اختبار الضوء المستقطب استقطاباً دائرياً

منشور نكل ينفذ الاهتزازة الموازية لمستواه الرئيسى ، ويمنع الاهتزازة العمودية على المستوى الرئيسى من النفوذ خلاله . والاهتزازة المستديرة يمكن تحليلها الى مركبتين مستقيمتين متعامدتين متساويتى الاتساع . فاذا أنفذ خلال منشور نكل شعاع من الضوء المستقطب استقطاباً دائرياً فان الاهتزازة المستديرة تتحلل الى المركبتين المذكورتين ، وتكون احداهما فى المستوى الرئيسى للمنشور وهذه تنفذ والاخرى عمودية عليه ، وهذه يمتنع نفوذها . وبما أن المركبتين متساويتان ، فان اتساع الاهتزازة التى ينفذها المنشور يكون واحداً فى جميع أوضاعه ، واذن تكون شدة الضوء النافذ من المنشور ثابتة لا تتغير تبعاً لدوران المنشور حول الشعاع الساقط عليه

(١) ولو أن الميكا من البلورات الثنائية المحور فان بعض أنواعها يكاد يكون أحادى المحور

فمنشور نكل يميز بين الضوء المستقطب دائرياً وبين الضوء المستقطب استوائياً . لان شدة الضوء النافذ منه عند ما يكون الضوء الواقع عليه مستقطباً استقطاباً استوائياً تتغير من العدم الى نهاية عظمى الى العدم وهكذا تبعاً لدوران المنشور

ولكن المنشور لا يميز بين الضوء الطبيعى غير المستقطب وبين الضوء المستقطب دائرياً لان شدة الضوء النافذ منه اذا كان الضوء الساقط عليه طبيعياً غير مستقطب تظل هى أيضاً ثابتة لا تتغير . فدفعاً لهذا الالتباس ينفذ الضوء المستقطب دائرياً خلال لوح ربع موجى . فان الاهتزازة المستديرة تتحلل الى المركبتين المستقيمتين المتعامدتين المتساويتى الاتساع اللتين يوجد بينهما اختلاف فى الطور قدره قائمة . وتكون احداهما فى المستوى الرئيسى للوح الربع الموجى والاخرى عمودية عليه فاذا ما اخترقتا اللوح الربع الموجى حدث بينهما اختلاف فى الطور قدره قائمة . فأما يزول ما كان بينهما من الاختلاف ، واما يبلغ اختلاف الطور بينهما قائمتين . وفى كلتى الحالتين تكون محصلتهما اهتزازة مستقيمة . فيتحول الشعاع المستقطب دائرياً بفعل اللوح الربع الموجى الى شعاع مستقطب استوائياً . فاذا اختبر هذا بوساطة منشور نكل تغيرت شدة الضوء النافذ خلاله من الصفر الى نهاية عظمى الى الصفر وهكذا تبعاً لدوران المنشور . أما انفاذ الضوء الطبيعى الغير المستقطب خلال اللوح الربع الموجى فلا يحوله الى ضوء مستقطب استقطاباً استوائياً

٣١٥ — اختبار الضوء المستقطب استقطاباً اهليلجياً

والاهتزازة الاهليلجية يمكن تحليلها الى مركبتين مستقيمتين متعامدتين بينهما اختلاف فى الطور قدره قائمة ، ولكنهما غير متساويتى الاتساع . فاذا أنفذ خلال منشور نكل شعاع من الضوء المستقطب اهليلجياً أنفذ المنشور المركبة الموازية لمستواه الرئيسى . واتساع هذه المركبة ليس ثابتاً . فاذا كان المستوى الرئيسى موازياً للمحور الاطول لاهليلج الاهتزازة كان اتساعها أكبر ما يمكن واذا كان المستوى الرئيسى موازياً للمحور الاقصر لاهليلج الاهتزازة كان اتساعها أصغر ما يمكن . فدوران منشور نكل حول الشعاع الساقط عليه يجعل اتساع مركبة الاهتزازة

التى ينفذها تتغير من نهاية عظمى الى صغرى ليست صفراً الى نهاية عظمى وهكذا ، فتتغير شدة الضوء من كبر الى صغر الى كبر تبعاً لذلك . فشدة الضوء النافذ خلال المنشور لا تبقى ثابتة كما لو كان الضوء الساقط على المنشور مستقطباً استقطاباً دائرياً أو كان ضوءاً طبيعياً غير مستقطب ولا تعدم فى وضع من أوضاع المنشور كما لو كان الضوء الساقط عليه مستقطباً استقطاباً استوائياً فيمكن التمييز بهذه الكيفية بين الضوء المستقطب اهليلجياً و بين الضوء الغير المستقطب أو المستقطب دائرياً أو المستقطب استوائياً . ولكن لا يكفى هذا للتمييز بين الضوء المستقطب اهليلجياً و بين مزيج من الضوء الطبيعى الغير المستقطب والضوء المستقطب استوائياً ، فانه اذا أنفذ مثل هذا المزيج خلال منشور نكل وأدير المنشور فان شدة الضوء النافذ منه تتغير من كبر الى صغر الى كبر تبعاً لدوران المنشور

فدفعاً لهذا الالتباس ينفذ الضوء المستقطب اهليلجياً فى لوح ربع موجى، فاذا كان مستواه الرئيسى موازياً للمحور الاطول أو المحور الاقصر لاهليلج الاهتزازة تحللت الاهتزازة الاهليلجية الى مركبتين مستقيمتين متعامدتين بينهما اختلاف فى الطور قدره قائمة وغير متساويتى الاتساع ، وتكون احداهما موازية للمستوى الرئيسى للوح والأخرى عمودية عليه[1] . فعند نفوذهما فى اللوح يحدث بينهما اختلاف جديد فى الطور قدره قائمة . فاما يزول ما كان بينهما من الاختلاف واما يبلغ اختلاف الطور قائمتين . فتتحول الاهتزازة الاهليلجية الى اهتزازة مستقيمة ، أى يتحول الضوء المستقطب اهليلجياً الى ضوء مستقطب استوائياً . فاذا أنفذ هذا خلال منشور نكل فان المنشور يمنع نفاذه فى وضع و ينفذه بشدة فى وضع عمودى

٣١٦ — تعيين اتجاه الاهتزازة المستديرة فى الاستقطاب الدائرى

(أولا) عند احداث الاستقطاب الدائرى بفعل اللوح الربع الموجى

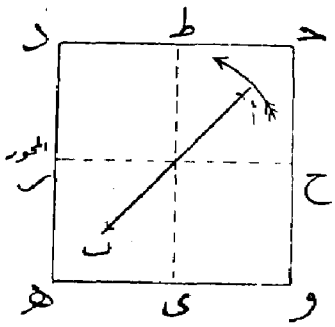
يمكن تعيين اتجاه الاهتزازة المستديرة بملاحظة وضع المستقطب بالنسبة الى اللوح الربع

---

(١) الاهتزازة الاهليلجية هى محصلة اهتزازتين مستقيمتين متعامدتين بينهما اختلاف ما فى الطور الا فى حالات خاصة (أنظر بند ١٨٠) واذن يمكن تحليلها الى مركبتين مستقيمتين متعامدتين لا يكون فرق الطور بينهما قائمة الا اذا كانت احداهما موازية لاحد المحورين الرئيسيين لاهليلج الاهتزازة والأخرى موازية للآخر

الموجى ونوع البلورة المصنوع منها هذا اللوح .

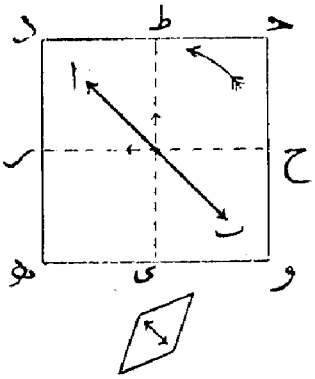
لنفرض أن المستقطب منشور نكل وأن ضوءاً طبيعياً يسقط على هذا المنشور فينفذ الضوء منه مستقطباً استقطاباً استوائياً ثم يسقط هذا الضوء على لوح ربع موجى موضوع فى الوضع المناسب فيخرج منه مستقطباً استقطاباً دائرياً . ولنفرض أنه ينظر الى منشور نكل فى اتجاه الضوء الواقع عليه ، وان القطر القصير للوجه الواقع عليه الضوء فى اتجاه موازٍ للمستقيم ا ب (شكل ٢٨٤) . وليكن حدهو سطح اللوح الربع الموجى الذى يقع عمودياً عليه الضوء المستقطب النافذ من المنشور والذى اتجاه اهتزازته موازٍ المستقيم ا ب . فلكى يتحول بفعل اللوح الضوء المستقطب استوائياً ، الى ضوء مستقطب دائرياً يجب أن يكون الاتجاه ا ب مائلا على المستوى الرئيسى للوح بزاوية قدرها ٤٥ درجة . لذلك لنفرض أن المحور الضوئى هو رح ، فيكون المستوى الرئيسى للوح عمودياً على مستوى الورقة ومارّاً بالمستقيم رح . فالاهتزازة ا ب تتحلل بفعل اللوح الى مركبتين متساويتى الاتساع احداهما موازية للمستوى الرئيسى أى فى اتجاه رح ، والأخرى عمودية عليه اى فى اتجاه ط ى . وهاتان المركبتان تنفذان خلال اللوح بسرعتين مختلفتين ، ويبلغان الوجه الآخر للوح وبينهما اختلاف فى الطور قدره قائمة ، فاذا كان اللوح من بلورة سالبة ، فان الاهتزازة الموازية للمستوى الرئيسى أى التى فى اتجاه رح تكون السابقة . فاذا اعتبرنا أن الازاحة فى المركبة الموازية للمستقيم رح عند السطح الاول للوح صفر والحركة نحو اليمين فهى فى المركبة الموازية للمستقيم ط ى تكون صفراً أيضاً وتكون الحركة الى أعلى . ولكن عند وصول الاهتزازتين الى السطح الثانى للوح فانه عند ما تكون الموازية للمستقيم ط ى ازاحتها صفر واتجاه الحركة الى أعلى تكون الأخرى قد سبق طورها (عما كان) بمقدار قائمة أى تكون عند نهاية ازاحتها نحو اليمين . فعند تحصيل الحركتين تكون الدقيقة المهتزة عند ح ومتحركة الى اعلى واذن يكون اتجاه الحركة المستديرة فى عكس اتجاه حركة عقربى الساعة بالنسبة الى من ينظر فى اتجاه الضوء الواقع على اللوح الربع الموجى



(شكل ٢٨٤)

(ثانياً) عند اختبار الاستقطاب الدائرى بوساطة لوح ربع موجى ومنشور نكل

لنفرض أن الضوء المستقطب استقطاباً دائرياً اتجاه اهتزازته المستديرة فى عكس حركة عقربى الساعة بالنسبة الى الناظر بحيث يقع الضوء على عينه . ولنفرض انه وضع فى سبيل الضوء لوح ربع موجى ومنشور نكل بحيث يخترق الضوء أولا اللوح الربع الموجى ثم المنشور ثم يقع على العين . ولنفرض أن ح د هـ و (شكل ٢٨٥) يمثل اللوح الربع الموجى (بالنسبة الى الناظر بالكيفية المذكورة) وليكن محوره ر ح وليكن المستوى الرئيسى عمودياً على مستوى الشكل مارا بالمستقيم ر ح . فعند وصول



(شكل ٢٨٥)

الاهتزازة المستديرة الى سطح اللوح تتحلل الى مركبتين مستقيمتين متساويتى الاتساع احداهما موازية للمستوى الرئيسى أى فى اتجاه ر ح والأخرى عمودية عليه أى فى اتجاه ط ى ويكون بين المركبتين اختلاف فى الطور قدره قائمة ، ووفقاً للاتجاه المفروض يتضح أنه عند ما تكون الازاحة فى المركبة الموازية للمستقيم ط ى صفراً واتجاه الحركة الى أعلى ، تكون الازاحة فى المركبة الموازية للمستقيم ر ح عند نهايتها العظمى الى اليمين . فاذا كان اللوح من بلورة سالبة فان سرعة الثانية خلال اللوح تكون أكبر فى أثناء وصول الاهتزازتين الى الوجه الثانى للوح يتقدم طور الثانية بمقدار قائمة . واذن عند ما تكون الازاحة فى المركبة الموازية للمستقيم ط ى صفراً واتجاهها الى أعلى لا تكون الازاحة فى المركبة الأخرى عند نهايتها العظمى الى اليمين كما لو لم يحدث اختلاف جديد فى الطور بينهما ، بل تكون ازاحتها صفراً وحركتها نحو اليسار ، لتقدم طورها بمقدار قائمة . فتحصل المركبتان حركة مستقيمة فى اتجاه ا ب ولكى ينفذ منشور نكل هذه الاهتزازة يكون القطر القصير لوجهه موازيا للمستقيم ا ب ، فيكون وجه المنشور بالنسبة الى الناظر كما هو مبين بالشكل

فباتباع مثل الخطوات السابقة يمكن تعيين اتجاه الحركة المستديرة فى الاستقطاب الدائرى سواء أكان ذلك عند احداث الاستقطاب الدائرى أم عند اختباره

٣١٧ — معين فرسنل

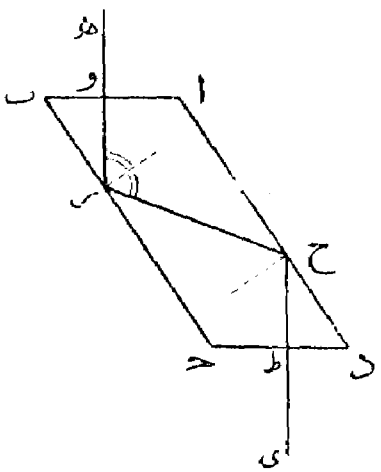
وكثيراً ما يستخدم للحصول على ضوء مستقطب استقطاباً دائرياً جهاز يعرف « بمعين فرسنل »[1] استنبط فرسنل الفكرة الاساسية التى بناه عليها من بحوث نظرية فى انعكاس الضوء المستقطب استقطاباً استوائياً وانكساره . فاستدل من هذه البحوث على أنه عندما ينعكس الضوء المستقطب استوائياً ، انعكاساً كلياً يحدث تغير فى الطور ، وقيمة هذا التغير عندما يكون الضوء مستقطباً فى مستوى السقوط (أى عندما تكون اهتزازته عمودية على مستوى السقوط) غيرها عندما يكون مستقطبا عموديا عليه . فاذا كان الضوء مستقطباً فى اتجاه يميل بزاوية ما على مستوى السقوط ، أى كانت الاهتزازة مائلة على مستوى السقوط ، وليست موازية له ولا عمودية عليه ، تحللت الاهتزازة الى مركبتين ، احداهما موازية لمستوى السقوط والأخرى عمودية عليه ، فيتغير طور احداهما بمقدار يختلف عن المقدار الذى يتغير به طور الأخرى ، فيحدث بينهما اختلاف فى الطور ، فتكون محصلتهما بعد ذلك حركة اهليلجية . وقد استنبط من بحوثه النظرية ان اختلاف الطور بين المركبتين الاختلاف الذى يحدث عند الانعكاس الكلى فى الزجاج يبلغ $\frac{\pi}{8}$ اذا كانت زاوية السقوط حوالى ٥٥ درجة . فاذا عانى الضوء انعكاسين كليين بلغ اختلاف الطور $\frac{\pi}{4}$ أى بلغ زاوية قائمة . فاذا كانت المركبتان المتعامدتان متساويتى الاتساع تحولت المحصلة من الاهليلج الى الدائرة

وللتحقق عمليا من هذه النتائج النظرية اتخذ كتلة من الزجاج على شكل متوازى متوازيات الأضلاع وجوهها متماثلة وكل واحد منها على شكل متوازى أضلاع زاويته المنفرجة ١٢٥ درجة وزاويته الحادة ٥٥ درجة فاذا فرضنا أن ا ب حـ د (شكل ٢٨٦) يمثل مقطع متوازى متوازيات الأضلاع وسقط على السطح ا ب عموديا عليه الشعاع هـ و فانه ينفذ فى استقامته حتى يسقط على السطح ب حـ عند ر وتكون زاوية سقوطه عليه ٥٥ درجة ، فينعكس انعكاسا كليا ويسقط

---

(١) Fresnel's Rhomb

على السطح ا د عند ح وزاوية سقوطه ٥٥ درجه أيضا فينعكس انعكاسا كليا مرة أخرى و ينفذ خارجاً من كتلة الزجاج فى استقامة ح ط ى . فاذا كان الشعاع هـ و مستقطباً استقطاباً استوائياً واتجاه اهتزازته مائل على مستوى الورقة (مستوى السقوط) فانه طبقاً للنتائج المذكورة آنفاً يكون الشعاع ط ى النافذ من كتلة الزجاج مستقطباً استقطاباً اهليلجياً بوجه عام . واذا كانت زاوية ميل الاهتزازة على مستوى الورقة ٤٥ درجة كان الشعاع مستقطباً استقطاباً دائرياً . وقد حقق فرسنل هذه النتائج ، واتخذ الجهاز من بعده وسيلة للحصول على ضوء مستقطب استقطاباً دائرياً



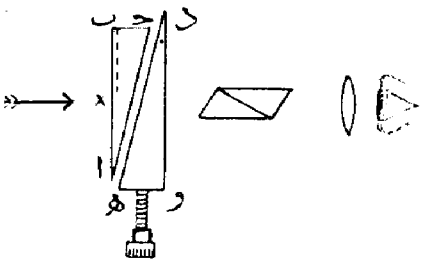
(شكل ٢٨٦)

ويتضح مما سبق أنه اذا كان الشعاع الساقط على الوجه ا ب مستقطباً استقطاباً دائرياً . حدث من جراء الانعكاسين الكليين بين المركبة المستقيمة الموازية لمستوى السقوط ، و بين المركبة المستقيمة العمودية عليه ، اختلاف فى الطور قدره قائمة ، واذن يتحول الاستقطاب الدائرى الى استقطاب استوائى . كذلك اذا كان الضوء الساقط مستقطباً استقطاباً اهليجياً ، وكان أحد المحورين الاكبر أو الأصغر لاهليلج الاهتزازة فى مستوى السقوط ، والآخر عمودياً عليه تحول الاستقطاب الاهليجى الى استقطاب استوائى

فمعين فرسنل اذن يقوم من جميع الوجوه مقام اللوح الربع الموجى بل هو يمتاز عن اللوح الربع الموجى فى أن تغير الطور الحادث لا يتوقف على الطول الموجى فيصلح عند ما يكون الضوء أبيض ، خلافاً للوح الربع الموجى الذى يستخدم لضوء خاص ذى لون واحد

٣١٨ — مكافئ بابنت

جهاز يستخدم فى دراسة الاستقطاب الاهليلجى والاستقطاب الدائرى ، ويتركب من منشورين من الكوارتز ، كالمنشورين ا ب حـ د هـ و (شكل ٢٨٧) زاويتاهما ا حـ د صغيرتان ، والمنشوران موضوعان كما بالشكل بحيث تتجه احدى هاتين الزاويتين فى الاتجاه المضاد



(شكل ٢٨٧)

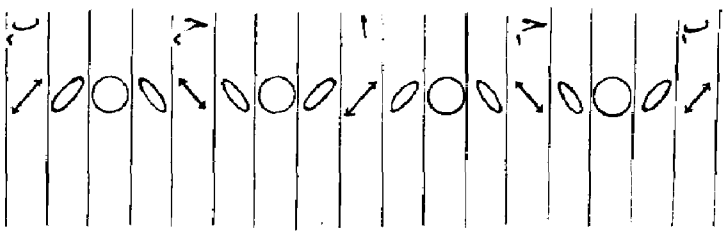
للاخرى ، والمنشور ا ب ح الذى يقع عليه الضوء مقطوع بحيث يكون محوره موازيا للسطح ا ب الواقع عليه الضوء ويصوب اليه الضوء بحيث يكون هـذا المحور فى مستوى السقوط والمنشور الثانى د هـ و محوره عمودى على هذا المستوى ويسمى الجهاز «مكافئ بابنت»(١) نسبة الى مخترعه فاذا سقط على السطح ا ب شعاع من ضوء ذى لون واحد وكان مستقطباً استقطابا استوائيا واتجاه اهتزازته يميل بزوايا قدرها هـ على المستوى الرئيسى للمنشور ا ب ح (أى على مستوى الورقة) تحللت الاهتزازة المستقيمة الى مركبتين احداهما عمودية على المستوى الرئيسى (عمودية على مستوى الورقة) وهذه تكون اهتزازة الشعاع المعتاد والأخرى فى المستوى الرئيسى وهذه تكون اهتزازة الشعاع الغير المعتاد ، فتنتقل الاهتزازتان خلال المنشور الاول على مسير واحد بسرعتين مختلفتين . ونظراً لأن المنشور من الكوارتز تكون سرعة الأولى أكبر . واذن طور هـذه عند نفوذها من المنشور الاول يكون سابقاً . واذا وصلت الاهتزازتان الى المنشور الثانى كانت الأولى فى مستواه الرئيسى ، والثانية عمودية عليه ، فتكون سرعة الاولى أصغر . فالمسرعة فى المنشور الاولى تبطىء فى الثانى ، والمبطئة تسرع . فاذا اخترق الضوء سمكين متساويين كان التقدم الحادث فى طور احداهما (بالنسبة الى طور الأخرى) من جراء نفوذها فى المنشور الأول مساويا التخلف الحادث من جراء نفوذها فى الثانى فتصل الاهتزازتان الى السطح د و فى طور واحد ، فتكون محصلتهما اهتزازة مستقيمة موازية للاهتزازة الاولى فى الشعاع الاصلى الواقع على السطح ا ب ، فيصنع اتجاهها زاوية قدرها هـ مع مستوى الورقة ، أما اذا اخترق الضوء سمكين مختلفين حدث اختلاف فى الطور بين الاهتزازتين ، فاذا بلغ اختلاف الطور ٢ ن ط كانت المحصلة مستقيمة موازية للاتجاه المذكور . واذا بلغ اختلاف الطور (٢ ن + ١) ط كانت المحصلة مستقيمة أيضا ولكنها تصنع مع الاتجاه الاول زاوية قدرها ٢ هـ أنظر (شكل ٢٨٢). أما فيما عدا ذلك فتكون المحصلة بوجه عام اهليلجية ، وتتحول الى الاستدارة عندما تكون

---

(١) Babinet's Compensator

هـ = ٤٥ درجة ويكون اختلاف الطور (٢ ن + ١) $\frac{ط}{٢}$

فاذا فرضنا أن الاشعة المستقطبة استقطابا استوائيا ، الواقعة على السطح ا ب ، حزمة متوازية واتجاه الاهتزازة فيها يصنع ٤٥ درجة مع المستوى الرئيسى للمنشور الاول ، كانت هناك مواضع على السطح د و يخرج منها ضوء مستقطب استقطاباً استوائياً واتجاه اهتزازته فى اتجاه اهتزازة الضوء المستقطب الساقط على السطح ا ب ، وأخرى يخرج منها ضوء مستقطب استقطاباً استوائياً ولكن اتجاه الاهتزازة فيه يميل بزاوية قدرها ٢ × ٤٥ = ٩٠ درجة على الاتجاه المذكور ، ومواضع يخرج منها ضوء مستقطب استقطاباً اهليلجياً وأخرى يخرج منها ضوء مستقطب استقطاباً دائرياً . فاذا نظر الى الوجه د و . كانت هذه المواضع كالمبينة تخطيطياً بشكل (٢٨٨) ، فاذا فرضنا أن العمود ا يمثل الموضع الذى يكون عنده السمكان متساويين فلا يحدث اختلاف فى الطور بين الاهتزازتين ، يكون الموضعان ب$_١$ ، ب$_٢$ الموضعين اللذين يبلغ اختلاف الطور عندهما



(شكل ٢٨٨)

٢ ط ، ويكون الموضعان ح$_١$ ، ح$_٢$ اللذين يبلغ اختلاف الطور عندهما ط وهكذا . فاذا نظر الى الوجه د و خلال منشور نكل ، وكان المنشور فى وضع يمنع نفوذ الضوء المستقطب الساقط على السطح ا ب ، فان المواضع المرموزها بالرموز ا ، ب$_١$ ، ب$_٢$ والمواضع الأخرى التى يبلغ عندها اختلاف الطور ٤ ط ، ٦ ط الخ تظهر مظلمة . واذن تظهر مجموعة هدب مظلمة فى هذه المواضع ، يتخللها ضياء . فاذا أدير المنشور بمقدار قائمة ظهرت مجموعة أخرى من الهدب المظلمة عند ح$_١$ ، ح$_٢$ والمواضع الأخرى التى يبلغ فيها اختلاف الطور ٣ $\frac{ط}{٢}$ ، ٥ $\frac{ط}{٢}$ الخ ويتخلل هذه ضياء

٣١٩ — تطبيق مكافئ بابنت فى دراسة الاستقطاب الاهليلجى

ولمكافئ بابنت تطبيقات هامة ، أخصها تحديد محورى اهليلج الاهتزازة فى الضوء المستقطب استقطاباً اهليلجياً ، وتعيين اختلاف الطور بين المركبتين المتعامدتين للاهتزازة الاهليلجية ،

وايجاد النسبة بين المحورين الاكبر والاصغر لاهليلج الاهتزازة

وعند استعمال المكافئ لهذه الغايات ، يجعل المنشور ا ب ح (شكل ٢٨٧) ثابتاً ، والآخر د هـ و متصلا بطرف لولب دقيق مدرج ، بحيث اذا أدير رأس اللولب انزلق المنشور على المنشور الأول ، وأزيح بقدر معلوم . ويثبت عادة أمام السطح ا ب (فى الجانب الذى يقع منه الضوء على هذا السطح) خيطان متقاطعان ينظر اليهما من الجانب الآخر ، خلال قطعة عينية ومنشور نكل كما هو مبين بشكل (٢٨٧) . فاذا سقطت عمودياً على السطح ا ب حزمة متوازية من ضوء ذى لون واحد مستقطب استقطاباً استوائياً ، وهيئ منشور نكل المحلل بحيث كان مستواه الرئيسى عمودياً على اتجاه الاهتزازة فى الضوء الساقط ، فان مجموعة الهدب المظلمة التى ترى عند النظر خلال المنشور تبين المواضع التى يبلغ فيها اختلاف الطور بين الاهتزازتين اللتين ينفذان خلال المكافئ ٢ ن ط . فاذا أدير اللولب المتصل بالمنشور د هـ و حتى يجعل الخيطان المتعامدان منطبقين على منتصف احدى الهدب المظلمة ، ثم أدير حتى يجعل الخيطان منطبقين على منتصف الهدبة المظلمة التى تليها ، أمكن ايجاد الازاحة التى تقابل اختلافاً فى الطور قدره ٢ ط أو فرقاً فى المسير قدره الطول الموجى ، وكذلك أجزاء هذا ومضاعفاته . وبهذه الكيفية يعاير اللولب المدرج الموجود بالجهاز

ويمكن تحديد الموضع الذى لا يحدث فيه اختلاف ما فى الطور ، ويكون السمكان اللذان يخترقهما الضوء متساويين ، باستعمال الضوء الابيض ، فيكون هذا الموضع هو موضع الهدبة اللالونية المظلمة الوحيدة عند ما ينظر خلال منشور نكل ومستواه الرئيسى عمودى على اتجاه الاهتزازة فى الضوء الساقط . فى حالة الضوء الابيض تختلف المواضع التى يبلغ فيها اختلاف الطور مقداراً معيناً باختلاف الطول الموجى ، فحيث يمتنع نفوذ الضوء الاحمر مثلا خلال المنشور يكون لون الضوء النافذ متمما للاحمر وهكذا

فلاستخدام المكافئ لايجاد اختلاف الطور بين المركبتين المتعامدتين لاهليلج الاهتزازة فى الضوء المستقطب استقطاباً اهليلجياً يعاير الجهاز ويعين الموضع الذى يتساوى فيه السمكان وتجعل نقطة تقاطع الخيطين منطبقة عليه فاذا سقط الضوء المستقطب اهليلجياً على السطح ا ب

(شكل ٢٨٧) تحللت الاهتزازة الاهليلجية الى مركبتين متعامدتين احداهما موازية للمستوى الرئيسى لأحد المنشورين والاخرى موازية للمستوى الرئيسى للآخر . أى احداهما موازية للمحور الضوئى لاحد المنشورين والاخرى موازية للمحور الضوئى للاخر . وان كان لا يحدث اختلاف فى الطور بين هاتين المركبتين من جراء نفوذهما خلال المنشورين عند ما يكون السمكان متساويين فان بينهما فى الاصل اختـــلافاً فى الطور ، فلا يكون موضع تساوى السمكين موضع الهـدبة المظلمة الوسطى . وانمـا يكون موضع هـذه الهدبة حيث يحدث بين المركبتين من جراء نفوذهما فى المنشورين اختـلاف فى الطور يتعادل والاختـلاف الموجود بينهما فى الاصل . فاذا حدد الموضع الذى تظهر فيـه هذه الهدبة كان البعد بين الموضعين مقيساً بوساطة اللولب هو المقابل لاختـلاف الطور الموجود فى الاصل بين المركبتين ، فاذا كان اللولب معايراً أمكن ايجاد قيمة هذا الاختلاف

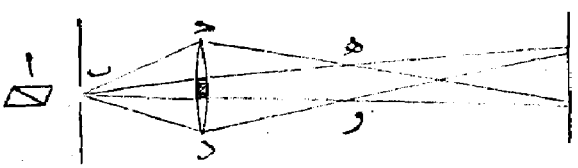
ولتعيين اتجاه كل من المحور الاطول والمحور الاقصر لاهليلج الاهتزازة تهيأ نقطة تقاطع الخيطين فى الموضع الذى يكون فيه السمكان متساويين ، ثم يدار اللولب بالمقدار المناسب بحيث تجعل نقطة تقاطع الخيطين فى الموضع الذى يبلغ فيه اختلاف الطور قائمة . فاذا أسقط بعد ذلك على السطح ا ب الضوء المستقطب استقطاباً اهليلجياً . تحللت الاهتزازة الاهليلجية الى مركبتين متعامدتين احداهما موازية للمحور الضوئى فى أحد المنشورين والاخرى موازية للمحور الضوئى فى الآخر فاذا كان المحوران الرئيسيان (الأطول والاقصر) لاهليلج الاهتزازة موازيين للمحورين الضوئيين المذكورين كان اختلاف الطور بين المركبتين فى الاصل قائمة وحيث ينفذ الضوء فى الموضع المحدود بالخيطين المتعامدين يحدث بفعل المنشورين اختلاف فى الطور قدره قائمة ، فاذا تعادل هذا والاختلاف الاصـلى بحيث يزول الاختلاف فى الطور بتاتاً ، رؤيت الهدبة المظلمة الوسطى ونقطة تقاطع الخيطين منطبقة على منتصفها . أما اذا لم يكن المحوران الرئيسيان لاهليلج الاهتزازة موازيين للمحورين الضوءيين ولم يحصل هـذا التعادل فانه يمكن ادارة المكافئ حتى يهيأ فى الوضع الذى تظهر فيـه الهدبة المظلمة عنـد نقطة تقاطع الخيطين فيكون المحوران الضوئيان فى المنشورين موازيين للمحورين الرئيسيين لاهليلج الاهتزازة

ولايجاد النسبة بين طولى المحورين الرئيسيين لاهليلج الاهتزازة يهيأ المكافئ فى الوضع السابق بحيث يكون المحوران الضوئيان مواز يين للمحورين الرئيسيين لاهليلج الاهتزازة و يلاحظ وضع منشور نكل المحلل عند ما تكون مواضع الهدب المظلمة التى ترى خلاله هى المواضع التى يبلغ فيها الاختلاف الكلى فى الطور بين المركبتين (أى الاختلاف الأصلى مضافاً اليه ما يحدث بفعل المكافئ) صفراً أو ٢ ط أو ٤ ط الخ أو بوجه عام ٢ ن ط ، فالمركبتان تحصلان فى هذه الحالة حركة مستقيمة يكون ظل الزاو ية بين اتجاهها و بين احدى المركبتين مساوياً النسبة بين اتساعى هاتين المركبتين أى يكون ظل الزاو ية بين اتجاهها و بين اتجاه أحد المحورين الضوئيين مساو ياً تلك النسبة ، وهى تساوى النسبة بين المحورين الرئيسيين لاهليلج الاهتزازة . ونظراً لأن منشور نكل يمنع المحصلة من النفوذ فاتجاه هذه المحصلة يكون عمودياً على المستوى الرئيسى لمنشور نكل

٣٢٠ – التداخل فى الضوء المستقطب استقطاباً استوائياً

توضيح العوامل التى يتوقف عليها حدوث التداخل فى الضوء المستقطب من المسائل التى بحثها « فرسنل » « واراجو »[1] وعززت القول بأن موجات الضوء موجات عرضية فاذا كان اتجاه الاهتزازة فى الشعاع الضوئى عمودياً على اتجاه سير الموجة أى على اتجاه الشعاع فانه لاينتظر حدوث تداخل بين شعاعين بحيث يمحو ضوء أحدهما ضوء الآخر فى موضع ما الا اذا كان اتجاه الاهتزازة فيهما واحداً . أما اذا كان اتجاه الاهتزازة فى أحدهما مائلا على اتجاهها فى الآخر ، فان الاهتزازتين تحصلان بوجه عام حركة اهليلجية ، فلا يحدث تداخل بالمعنى المعروف

ويمكن دراسة موضوع التداخل فى الضوء المستقطب استقطاباً استوائياً بالكيفية المبينة تخطيطياً بشكل (٢٨٩)



(شكل ٢٨٩)

فيتخذ مستقطب ا كمنشور نكل أو لوح تورمالينى ، بحيث يقع الضوء المستقطب بفعله على

(١) Arago

فتحة مستطيلة ضيقة عند ب ، فيسقط بعض الضوء النافذ منها على عدسة لامة مقسمة نصفين حـ ى د قد فصل أحدهما عن الآخر بحاجز معتم فتتكون بفعل النصف الأول صورة حقيقية للفتحة عند هـ ، وبفعل النصف الثانى صورة حقيقية عند و ، وتكون هاتان الصورتان بمثابة المصدرين المتداخلين بحيث يحدث من تداخل ضوءيهما هدب تداخل كالمعتاد

فاذا وضع عند هـ ى و لوحان تورماليفيان مثلا بحيث كان مستوياهما الرئيسيان متوازيين ، حدثت هدب تداخل . أما اذا كان مستوياهما متعامدين فالهدب تنمحى

واذا استبدل باللوحين التورماليفيين لوحان من سبات اسلندا ، ووضعا بحيث كان مستوياهما الرئيسيان متوازيين ، وكان اتجاه الاهتزازة فى الضوء المستقطب الواقع على الفتحة موازياً لهما أو عمودياً عليهما حدثت هدب تداخل حيث يلاحظ فى الحالة الاولى أن الأشعة النافذة من اللوحين البلوريين هى الغير المعتادة ، وفى الثانية المعتادة . أما اذا كان اتجاه الاهتزازة فى الضوء المستقطب الواقع على الفتحة مائلا على المستويين الرئيسيين ، فان الاشعة النافذة من كل من اللوحين تنقسم قسمين أشعة معتادة واتجاه الاهتزازة فيها عمودى على المستوى الرئيسى ، وأشعة غير معتادة ، واتجاه الاهتزازة فيها موازٍ للمستوى الرئيسى . فتتداخل الأشعة المعتادة من أحد اللوحين والأشعة المعتادة من الآخر ، وكذلك الأشعة الغير المعتادة من أحدهما والأشعه الغير المعتادة من الآخر دون أن تتداخل الأشعة المعتادة من أحدهما والأشعة الغير المعتادة من الآخر واذن تحدث مجموعتان من الهدب تقع احداهما فوق الأخرى . واذا أدير أحد اللوحين بحيث يصير المستوى الرئيسى لأحدهما عمودياً على المستوى الرئيسى للآخر ، صار اتجاه الاهتزازة فى الأشعة المعتادة من أحد اللوحين موازياً لاتجاهها فى الاشعة الغير المعتادة من الآخر ، فتتداخل الأشعة المعتادة من أحدهما والأشعة الغير المعتادة من الآخر فتحدث مجموعتان من الهدب أيضاً ونظراً لأن سرعة الأشعة غير المعتادة فى البلورة السالبة اكبر من سرعة المعتادة ، فانه يوجد بوجه عام فرق فى المسير بينهما يترتب عليه أن كلا من مجموعتى الهدب فى هذه الحالة تتحول من موضعها فى الحالة الأولى ، فتزاح بوجه عام احداهما فى الاتجاه المضاد للازاحة الحادثة فى الاخرى

واستنبط فرسنل وأراجو من بحوثهما فى هذا الموضوع النتائج الآتية

(أولا) أن الشعاعين المستقطبين فى اتجاهين متعامدين لا يتداخلان بحيث يمحو ضوء أحدهما ضوء الآخر كما يتداخل شعاعان من الضوء الطبيعى

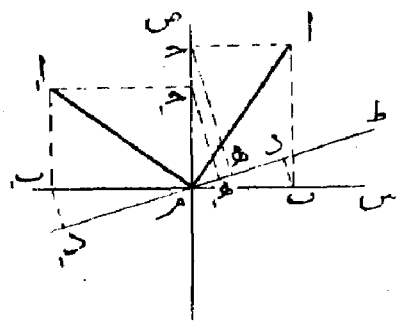
(ثانياً) أن الشعاعين المستقطبين فى اتجاه واحد يتداخلان كما يتداخل شعاعان من الضوء الطبيعى

ولكن من التجارب التى أجريناها ما استدلا منه على أنه اذا كان الشعاعان المستقطبان مستقطبين فى اتجاهين متعامدين ثم جعل استقطابهما فى اتجاه واحد (أى كانت اهتزازتاهما متعامدتين ثم جعلتا فى اتجاه واحد) فانهما قد لا يكتسبان بالرغم من هذا خاصة امكان تداخلهما كما يتداخل الشعاعان من الضوء الطبيعى ، الا اذا كان هذان الشعاعان مستمدين فى الأصل من شعاع واحد مستقطب استقطاباً استوائياً ، ونظراً لما يبدو فى هذه النتيجة من الغرابة بادىء الامر ، ولارتباطها بنظرية فى ماهية الاهتزازة فى الضوء الطبيعى الغير المستقطب نزيدها تفصيلا فيما يأتى

فالتجربة التى استدلا بها على هذه النتيجة ، جعلا فيها المصدرين المتداخلين فتحتين متشابهتين كما فى تجربة « ينج » (بند ٢١٢) أضيئت احداهما بضوء ينفذ من مجموعة من ألواح الميكا ، وأضيئت الاخرى بضوء ينفذ من مجموعة أخرى ، بحيث كان مستوى السقوط بالنسبة الى احداهما عمودياً على مستوى السقوط بالنسبة الى الاخرى . فنظراً لان هذا الضوء الصادر من الفتحتين يكون فى هذه الحالة مستقطباً واهتزازة الضوء الصادر من احداهما عمودية على اهتزازة الضوء الصادر من الاخرى ، فانه لا يحدث هدب تداخل . ولكن اذا وضع فى مسير الضوء الواقع على الفتحتين بينهما وبين مجموعة الألواح ، لوح من التورمالين مثلا ، بحيث يميل مستواه الرئيسى بزاوية قدرها ٤٥ درجة على أحد مستوى السقوط ، فان هذا اللوح ينفذ المركبة الموازية لمستواه الرئيسى ، واذن يكون اتجاه الاهتزازة فى الضوء الواقع على الفتحتين واحداً ، فالمنتظر فى هذه الحالة أن تحدث هدب تداخل ، ولكن الهدب لا تحدث .

وتعلل هذه النتيجة على اعتبار أن الاهتزازة فى شعاع من الضوء الطبيعى ليست مقصورة على اتجاه واحد بل هى فى جميع الاتجاهات العمودية على الشعاع ، أى على اعتبار أن شعاع الضوء

الطبيعى كانه شعاع من ضوء مستقطب استقطاباً استوائياً ولكن اتجاه اهتزازته يتغير على الدوام بسرعة كبيرة جداً ، فمثلا اذا فرضنا أن اتجاه الاهتزازة فى الضوء الطبيعى الساقط على ألواح الميكا ، كان فى لحظة ما فى استقامة مـ ا (شكل ٢٩٠) وكان طول المستقيم مـ ا ممثلا اتساع الاهتزازة . وكانت الاهتزازة التى تنفذها احدى مجموعتى الالواح هى الموازية للمحور مـ س والاهتزازة التى تنفذها المجموعة الاخرى هى الموازية للمحور مـ ص ، اتضح ان اتساع الاهتزازة النافذة من المجموعة الاولى تمثل بطول المستقيم مـ ب ، واتساع الاهتزازة النافذة من المجموعة الثانية يمثل بطول المستقيم مـ حـ .



(شكل ٢٩٠)

فاذا كان المستوى الرئيسى للوح التورمالينى موازياً للمستقيم مـ ط ، فانه ينفذ من الاهتزازة مـ ب المركبة مـ د ، وينفذ من الاهتزازة مـ حـ المركبة مـ هـ ، فيكون اتجاه الاهتزازتين اللتين ينفذهما واحدا واذن تكونان قابلتين للتداخل ، غير أن هذه الحالة لا تدوم ، فاتجاه الاهتزازة فى شعاع الضوء الطبيعى يتحول سريعاً من مـ ا الى مـ ا' فى الاتجاه العمودى على مـ ا . فتنفذ فى هذه اللحظة احدى مجموعتى الالواح المركبة مـ ب' وتنفذ الاخرى المركبة مـ حـ' ، فينفذ لوح التورمالين المركبة مـ د' ، والمركبة مـ هـ' فيكون اتجاه الاهتزازتين اللتين ينفذهما واحداً ، فتكونان هما أيضاً قابلتين للتداخل ، ولكن الاهتزازة الواقعة على احدى الفتحتين يكون طورها فى هذه اللحظة مضاداً لطور الواقعة على الأخرى ، فتكون مواضع الضياء مثلا فى الهدب الحادثة فى هذه اللحظة واقعة على مواضع الظلمة فى الهدب الحادثة فى اللحظة الأولى . ونتيجة حدوث مثل هذا باستمرار وبسرعة أن تختفى معالم الهدب بتاتاً

أما اذا لم يكن اتجاه الاهتزازة فى الضوء الساقط على مجموعتى الألواح متغيرا بل كان منطبقا على مـ ا ، حدثت هدب تداخل

ونستنبط مما سبق النتيجتين الآتيتين

(أولا) عند الحصول من الضوء الطبيعى على شعاعين مستقطبين فى اتجاهين متعامدين

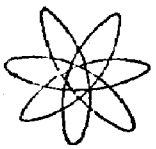
فان هذين الشعاعين اذا جعل استقطابهما فى اتجاه واحد لا يتداخلان ، كما يتداخل شعاعان من الضوء الطبيعى

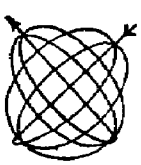
(ثانياً) عند الحصول من الضوء المستقطب استقطاباً استوائياً على شعاعين مستقطبين فى اتجاهين متعامدين ، فان هـذين الشعاعين اذا جعل استقطابهما فى اتجاه واحد ، يتداخلان ، كما يتداخل شعاعان من الضوء الطبيعى

٣٢١ — ماهية الاهتزازة فى الضوء الطبيعى

يتضح مما سبق أنه اذا اعتبرنا الاهتزازة فى الضوء المستقطب استقطاباً استوائيـا فى اتجاه واحد فان اتجاهها فى الضوء الطبيعى الغير المستقطب يتغير بسرعة كبيرة جداً ، ومن المعلوم أنه اذا سقط الضوء الطبيعى على منشور نكل فان الضوء النافذ منه يكون مستقطباً استقطاباً استوائياً واتجاه اهتزازته مواز للمستوى الرئيسى للمنشور . فاذا أدير المنشور بسرعة حول نفسه ، بحيث يكون محور الدوران موازياً لاتجاه وقوع الضوء عليـه ، فان الضوء النـافذ منه يكون مستقطباً استقطاباً استوائيـاً ، واتجاه اهتزازته يكون متغيراً بسرعة تبعاً لدوران المنشور . ويمكن الاستدلال على أن الضوء النافذ من المنشور الدائر بسرعة تشبه خواصه خواص الضوء الطبيعى الغير المستقطب . فهو ينفذ فى منشور نكل دون أن تتغير شـدته من كبر الى صغر تبعاً لدوران هذا المنشور ، وينفذ فى لوح ربع موجى دون أن يتحول الى ضوء مستقطب استقطاباً استوائياً واذا وقع على لوح بلورى يحدث الانكسار المزدوج كلوح من سبات اسلندا مثلا انقسم مسيره قسمين أشعة معتـادة وأشعة غير معتادة ، وتبقى شدتاهما واحدة لا تتغير تبعاً لدوران اللوح البلورى . وهـذا يعزز اعتبار الضوء الطبيعى الغير المستقطب كأنه ضوء مستقطب استقطاباً استوائياً واتجاه اهتزازته يتغير تغيراً سريعاً مستمراً . ونظراً لأن الاهتزازة المستقيمة هى حالة خاصة من الاهتزازة الاهليلجية ، يمكن تعميم هذه الفكرة واعتبار الضوء الطبيعى كأنه ضوء مستقطب استقطاباً اهليلجياً ، واتجاه المحورين الاطول والاقصر لاهليلج الاهتزازة بل والنسبة بين طوليها يتغيران تغيراً سريعاً مستمراً . وشكل (٢٩١) يبين اجمالا مثالا لما تؤول اليـــه

الاهتزازة الاهليلجية اذا تغير اتجاه محورى الاهليلج تغيراً منتظماً وشكل (٢٩٢) يبين اجمالا مثالا لما تؤول اليه الاهتزازة الاهليلجية اذا تغيرت النسبة بين طولى محورى الاهليلج تغيراً منتظما . فاذا فرضنا أن هذا الشكل الأخير كان تغيره من الاستقامة الى الاستدارة الى الاستقامة أكثر تدرجا ، وكان فى أثناء ذلك يدور بسرعة واستمرار حول محور عمودى عليه مار بمركزه ، فانه يمثل بوجه عام الاهتزازة فى شـــعاع الضوء الطبيعى الغير المستقطب على حسب الاعتبار المذكور


(شكل ٢٩١)


(شكل ٢٩٢)

ولـكن من المعلوم أن الحركتين الدوريتين المتعامدتين المختلفتى التردد ، تحصلان حركات تكون مسيراتها أشكالا كالمبينة فى شكلى (٢٩١ ، ٢٩٢) . فاذا راعينا حالة خاصة واعتبرنا للسهولة الاهتزازة مستقيمة يتغير اتجاهها باستمرار كما يحدث فى حالة الضوء النافذ من منشور نكل الداثر ، فانها يمكن تحصيلها من مركبتين مستديرتين متضادتى الاتجاه ومختلفتى التردد . فاذا كان من الممكن تحليل الاهتزازات فى الضوء الطبيعى الغير المستقطب الى مركبات مختلفات التردد كان معنى ذلك أن الضوء الطبيعى الغير المستقطب لا يمكن أن يكون ضوءاً بسيطاً ذا لون واحد وقد كان « جورج ايرى » [1] أول من تنبه الى هذه النتيجة واستخاص منها أن النظرية المذكورة فى ماهيـة الاهتزازة فى الضـوء الطبيعى تنفى امكان الحصول على ضوء طبيعى غير مستقطب يكون بسيطاً ذا لون واحد ، الا اذا كان التغير الحادث فى اهليلج الاهتزازة تغيراً فجائياً لا مستمراً بمعنى أن الاهتزازة تحتفظ بشكل ثابت (اهليلجى مثـلا) مدة من الزمن تحدث فيها آلاف من الاهتزازات ، ثم يتغير فجأة الى صورة أخرى واتجاه آخر ويلبث ذلك ثابتاً مدة من الزمن تحدث فيها آلاف من الاهتزازات وهكذا . ولـكن يلاحظ أنه اذا كان التغير الطارىء على الاهتزازة بطيئاً جدا بالقياس الى مدة الاهتزازة ، فيكاد يكون اتجاهها مثـلا ثابتاً لا يتغير برهة من الزمن تحدث فيها آلاف من الاهتزازات ، أمكن اعتبار الضوء بسيطاً ، لان اختلاف التردد يكون طفيفاً جدا ليس من المتيسر الاستدلال عليه ، ومما يعزز بقاء الاهتزازة محتفظة

---

(١) George Airy

بشكلها واتجاهها مدة من الزمن يحصل فيها آلاف من الاهتزازات ، التجارب التى أجريت فى التداخل ، فباستعمال مقياس ميكلسن فى التداخل يمكن الحصول على هدب فى حالات يبلغ فيها فرق المسير بين الاشعة المتداخلة آلاف الطول الموجى . وقد حصل ميكلسن فى تجاربه على هدب تداخل حيث بلغ فرق المسير نصف مليون مرة الطول الموجى دالا ذلك على أن الاهتزازة تتكرر هذا العدد من المرات دون أن يتغير شكلها أو اتجاهها ، والا لما حصلت الهدب . وان كان هذا العدد كبيراً ، فان المدة التى تحدث فيها هـذه الاهتزازات صغيرة فاذا اعتبرنا الطول الموجى للضوء ٦ × ١٠$^{-٥}$ من السنتمتر وسرعة الضوء ٣ × ١٠^{١٠} سنتمتراً فى الثانية ، فان التردد أى عدد الاهتزازات فى الثانية يكون مساويا ٥ × ١٠^{١٤} . فتكون المدة التى يحدث فيها نصف مليون اهتزازة مساوية ١٠$^{-٩}$ من الثانية . واذا كان الضوء الطبيعى يلبث مستقطبا استقطابا استوائيا أو اهليلجيا مدة من الزمن تبلغ من الصغر هـذا القدر ، فانه من المحال الاستدلال على ذلك عمليا

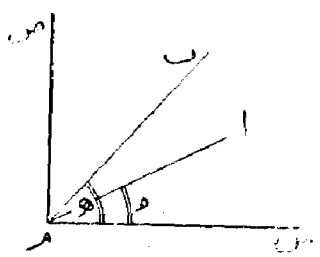
٣٣٢ — ألوان الالواح البلورية الرقيقة — حالة الاشعة المتوازية

اذا نفـذ الضوء المستقطب استقطابا استوائيـا خلال لوح من بلورة أحادية المحور ، فان الاهتزازة تتحلل بوجه عام الى مركبتين متعامدتين تنتقلان خلال اللوح بسرعتين مختلفتين . فاذا كان سمك اللوح صغيراً بحيث يكاد لا يكون ثمت انفصال بين الاهتزازتين أو اذا كان الضوء نافذاً فى اتجاه عمودى على المحور الضوئى فان الاهتزازتين تحصلان عند نفوذهما من اللوح اهتزازة تكون بوجه عام اهليلجية ، فاذا كان الضوء أبيض كان اختلاف الطور بين المركبتين مختلفا تبعا لاختلاف الطول الموجى . فقد يبلغ مثـــلا ٢ ط لطول موجى معين ، فتكون محصلة الاهتزازة فى هذا الضوء مستقيمة موازية للاهتزازة الاصلية فى حين أن الاهتزازة فى ضوء آخر قد تكون عمودية عليها أو تكون بوجه عام اهليلجية فاذا اختبر الضوء النافذ من اللوح البلورى خلال منشور نكل موضوع بحيث يكون مستواه الرئيسى عموديا على اتجاه الاهتزازة الاصلية فانه يمنع من النفوذ الضوء الاول . وينفذ الثـانى أو بوجه عام ينفذ مركبة

الاهتزازة الاهليلجية فى الاتجاه الموازى لمستواه الرئيسى من الأضواء الأخرى . واذن يكون الضوء النافذ منه ملوناً . واذا أدير بمقدار قائمة نفذت الأضواء التى امتنع نفوذها فى الوضع الاول وامتنع نفوذ ما كان نافذا .

ويتضح من هذا الشرح العام أن الضوء الذى ينفذه المنشور يكون ملوناً ويتغير لونه تبعاً لدوران المنشور .

وزيادة فى التفصيل نراعى هنا أولا حالة ما تكون أشعة الضوء الواقع على اللوح البلورى متوازية ، ولنفرض أنهـا تقع عمودياً على اللوح ، ولنفرض أن المحورين مـ س ، مـ ص (شكل ٢٩٣) يمثلان اتجاهى المركبتين المتعامدتين اللتين تتحلل اليهما الاهتزازة عند وقوعهـا على اللوح البلورى ، ولنفرض أن مـ ا يمثل اتجاه الاهتزازة فى الضوء المستقطب الواقع على اللوح وان مـ ب يمثل اتجاه الاهتزازة التى ينفذها المحلل الذى يختبر الضوء النافذ خلال اللوح البلورى بوساطته ، ولنرمز للزاوية بين مـ ا والمحور السينى بالحرف ه وللزاوية بين مـ ب والمحور السينى بالحرف هـ . فمثلا اذا كان المستقطب الذى يحدث إستقطاب الضوء الواقع على اللوح منشور نكل يكون مـ ا موازياً لمستواه الرئيسى واذا كان المحلل الذى يختبر الضوء النافذ من اللوح البلورى بوساطته منشور نكل أيضاً يكون مـ ب موازيا لمستواه الرئيسى ، أما الاتجاهان مـ س ، مـ ص فيكون أحدهما موازيا للمستوى الرئيسى للوح البلورى والآخر عموديا عليه .



(شكل ٢٩٣)

فاذا فرضنا أن الاهتزازة فى الضوء الواقع على اللوح البلورى ازاحتها فى لحظة ما ا حا (ه) كانت هذه الازاحة فى استقامة مـ ا . واذن تكون مركبتها الموازية للمحور السينى ا حا (ه) حتا هـ ومركبتها الموازية للمحور الصادى ا حا (ه) حا هـ ، وبما أن هاتين المركبتين تنتقلان فى اللوح البلورى بسرعتين مختلفتين ، وهما عند النفوذ منه يكون بينهما اختلاف فى الطور ، لنفرض أن المركبة الموازية للمحور الصادى طورها يسبق طور الأخرى بزاوية قدرها ى ، أى لنفرض أن الازاحة فى اتجاه المحور السينى عند وقوع الضوء على المحلل تكون ا حا (ه) حتا هـ

فى حين أن الازاحة فى الاتجاه الموازى للمحور الصـــادى تكون فى اللحظة نفسها ا حا (ر ن + ى) حا م . فتكون مركبة الأولى فى الاتجاه الموازى للمستقيم م ب هى ا حا ر ن حتا م حتا ه ، ومركبة الثانية فى الاتجاه نفسه هى ا حا (ر ن + ى) حا م حا ه .

ويكون مجموع هاتين المركبتين مساوياً الازاحة فى الاهتزازة التى ينفذها المحلل . حيث تكون هذه الاهتزازة محصلة المركبتين المذكورتين وهما فى استقامة واحدة . فاذا رمزنا لاتساع هذه المحصلة بالحرف ع ، يتضح بالرجوع الى المعادلة (٤) فى بند (١٨١) أن

ع^{٢} = ا^{٢} حتا^{٢} م حتا^{٢} ه + ا^{٢} حا^{٢} م حا^{٢} ه + ٢ ا^{٢} حتا م حتا ه حا م حا ه حتا ى

∴ ع^{٢} = ا^{٢} [حا^{٢} م حا^{٢} ه + حتا^{٢} م حتا^{٢} ه

+ ٢ حا م حا ه حتا م حتا ه (١ − ٢ حا^{٢} ق/٢)]

= ا^{٢} [(حا م حا ه + حتا م حتا ه)^{٢} − ٤ حا م حا ه حتا م حتا ه حا^{٢} ق/٢]

= ا^{٢} [حتا^{٢} (ه − م) − حا ٢ م حا ٢ ه حا^{٢} ق/٢]

ومربع اتساع الاهتزازة مقياس لشدة الضوء ، اذن المقدار المذكور يمثل شدة الضوء النافذ من المحلل باعتبار أن له طولا موجياً معيناً . أما اذا كان الضوء أبيض فان قيمة ى تختلف تبعاً لاختلاف الطول الموجى ، وبما أن شدة الاضواء ذات الأطوال الموجية المختلفة التى يتركب منها الضوء الابيض ليست واحدة ، فان اتساع الاهتزازة الأصلية ، وهو المقدار ا ، يختلف هو أيضاً باختلاف هذه الأضواء . واذن الشدة الكلية للضوء النافذ من المحلل تمثل بالمقدار الجبرى الآتى

حتا^{٢} (ه − م) × ∫ ا^{٢} − حا ٢ م حا ٢ ه × ∫ ا^{٢} حا^{٢} ق/٢ : . . . (١)

وهذا المقدار يتركب من حدين ، الاول لا علاقة له باحداث الألوان ، لأن المقدار ∫ ا^{٢} يمثل مجموع شدات الأضواء ذات الألوان المختلفة التى يتركب منها الضوء الابيض فهو يمثل شدة الضوء الابيض المستقطب الواقع على اللوح البلورى . وتغير قيمتى الزاويتين ه ، م لا يغير من شدات الاضواء ذات الالوان المختلفة التى يتركب منها الضوء الابيض ، بعضها دون الآخر ، ولا يغير من نسبها بعضها الى الآخر ، وانما يغير من مجموعها ، فيبقى المجموع ضوءاً

ابيض وانما تتغير شدته تبعا لتغير زاويتى هـ ﻭ مـ . أما الحد الثانى فيتضمن اختلاف الطور الحادث بين مركبتى الاهتزازة فى كل واحد من الاضواء التى يتركب منها الضوء الابيض ، وهذا الاختلاف فى الطور ليس واحداً لها جميعاً . واذن فهذا الحد هو الذى يترتب عليه أن يكون الضوء النافذ من المحلل ملوناً

فاذا جعلنا المستقطب والمحلل ثابتين فى موضعيهما وأدرنا اللوح البلورى ، فان الاتجاهين مـ ا ﻭ مـ ب يبقيان ثابتين ، ويكون تأثير ادارة اللوح البلورى أن يدور المحوران السينى والصادى ، فتبقى قيمة (هـ - مـ) ثابتة ولكن تتغير قيمة كل من مـ ﻭ هـ . فاذا راعينا الحالة التى تأخذ فيها قيمة مـ فى الازدياد من الصفر حتى تصير قيمة هـ قائمة ، فان حا ٢ مـ ﻭ حا ٢ هـ تكون قيمتاهما موجبتين ، وتكون اشارة الحد الثانى من المقدار الجبرى المذكور سالبة ، واذن يكون الضوء النافذ من المحلل ضوءاً أبيض ، قد أنقصت منه أضواء ذات ألوان مختلفة ، بمقادير يختلف بعضها عن الآخر ، فيكون ذلك الضوء النافذ ملوناً بلون خاص . واذا أدير اللوح بعد ذلك حتى تصير قيمة مـ قائمة فان حا ٢ هـ تكون قيمتها سالبة ، وتكون اشارة الحد الثانى موجبة ، ويكون الضوء النافذ من المحلل ضوءاً أبيض قد أضيفت اليه أضواء ذات ألوان مختلفة بمقادير يختلف بعضها عن الآخر ، فيكون الضوء النافذ ملوناً أيضاً . ثم يتكرر هذا تبعاً لاستمرار الدوران(١) . ولكن يلاحظ فى كلتى الحالتين أن اختلاف الطور الحادث بين المركبتين يبقى ثابتاً لا يتغير بدوران اللوح البلورى (على فرض أن الضوء يقع عمودياً على سطح اللوح وأن اللوح يدور حول محور موازٍ لاتجاه وقوع الضوء عليه) نظراً لان سمك اللوح البلورى ثابت . واذن فقيمة المقدار مـ ٢ حا ٢ ﻭ تبقى ثابتة (على فرض أن شدة الضوء الاصلى الواقع على اللوح ثابتة) واذن يكون مزيج الالوان الذى يمثله الحد الثانى من المقدار الجبرى ، والذى

---

(١) لسهولة تتبع الحالات التى يكون فيها الحد المذكور موجبا أو سالبا يستحسن أن يرسم الخطان مـ ا ، مـ ب على قطعة من الورق المعتاد ، ثم يرسم المحوران السينى والصادى على قطعة من الورق الشفاف . وتوضع الثانية على الاولى بحيث تقع نقطة تقاطع الخطين على نقطة تقاطع المحورين ويمرر بهذه النقطة دبوس ، فيدنى بادارة احدى القطعتين بالنسبة الى الاخرى تعيين الحالات المختلفة التى يكون فيها حا ٢ مـ أو حا ٢ هـ موجبا أو سالبا

نعتبره قد أنقص مرة من الضوء الابيض (الذى يمثله الحد الاول) ، وأضيف اليه مرة أخرى هذا المزيج تكون مركباته هى هى لا تتغير ، وتكون نسبة هذه المركبات بعضها الى الآخر ثابتة ، ويكون أثر تغير قيمتى هـ ، م أن تتغير قيمة المجموع دون أن تتغير نسبة تلك المركبات بعضها الى الآخر . فيبقى اللون من حيث نقبته (أنظر بند١١٤) واحداً فى كل حالة على حدتها ولكنه يكون مشوباً بضوء أبيض ، ويكون تأثير ادارة اللوح البلورى أن يتغير صفاء هذا اللون أى مبلغ تجرده من الضوء الابيض أو اختلاطه به . وتبلغ قيمة الحد الاول نهايتها العظمى عند ما يكون (هـ — م) صفراً (أى عند ما يكون المستقطب والمحلل فى وضعين متماثلين) وفى هذه الحالة تبلغ شدة الضوء الابيض الذى يشوب اللون المذكور نهايتها العظمى ، فيبلغ بهق اللون حده الاعلى . أما اذا كان المقدار (هـ — م) مساوياً قائمة (أى كان المستقطب والمحلل متعامدان) فان الحد الاول يعدم فتعدم شدة الضوء الابيض الذى يشوب اللون ، فيعدم البهق ، ويكون اللون صافيا

وبما أن الاتجاه م ـ ب (شكل٢٩٣) مواز للمستوى الرئيسى للمحلل ، م ـ ا مواز للمستوى الرئيسى للمستقطب (باعتبار أن كلا منهما منشور نكل) ، فان ادارة أحدهما دون الآخر بمقدار قائمة يغير الحد الاول من المقدار الجبرى المذكور الى

$$\text{حا}^{٢}(\text{هـ} - \text{م})\, \text{ح}_{١}^{٢}$$

ويغير اشارة الحد الثانى منه أى يتحول المقدار المذكور الى الصورة الآتية

$$\text{حا}^{٢}(\text{هـ} - \text{م})\, \text{ح}_{١}^{٢} + \text{حا}^{٢}\,\text{م}\;\text{حا}^{٢}\,\text{هـ}\;\text{ح}_{١}^{٢}\,\text{حا}^{٢}\,\pi \quad . \quad . \quad (٢)$$

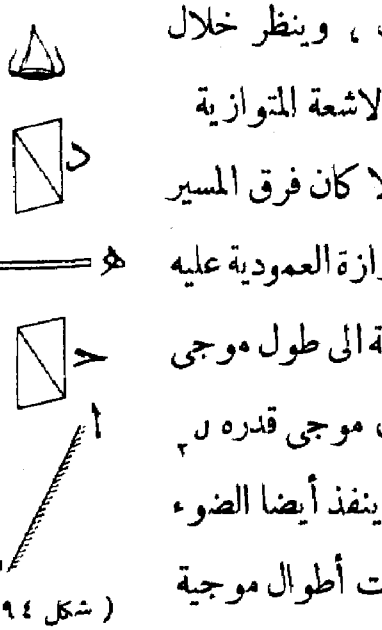
وبما أن مجموع المقدارين (١) ، (٢) يساوى

$$\text{ح}_{١}^{٢}$$

أى يساوى شدة الضوء الابيض الواقع على اللوح البلورى ، يتضح أن الضوء النافذ من المحلل فى الوضع الاول يكون هو والضوء النافذ منه فى الوضع الثانى ضوءين متتامين

ولاختبار الظاهرة التى شرحناها فيما سبق يستعمل عادة بولارسكوب نورنبرج (أنظر بند٢٨٥) ويوضع اللوح البلورى فوق اللوح الزجاجى المثبت فى الجهاز بين المستقطب وبين المحلل ،

ويفضل أن يكون المحلل المستعمل لهذا الغرض منشور نكل . ومن الممكن استعمال بولارسكوب يكون فيه المستقطب أيضاً منشور نكل . وشكل (٢٩٤) يوضح تركيب جهاز من هذا القبيل ، وهو يتركب من مرآة مستوية ا ب ومنشور نكل حـ يستخدم كمستقطب ، وآخر د يستخدم كمحلل ويوضع اللوح البلورى هـ و بينهما . ولاستعمال الجهاز يصوب ضوء السماء مثلا بالانعكاس عن سطح المرآة ا ب نحو المستقطب ، وينظر خلال المحلل والعين غير متكيفة . حيث تكون معدة لاستقبال الاشعة المتوازية



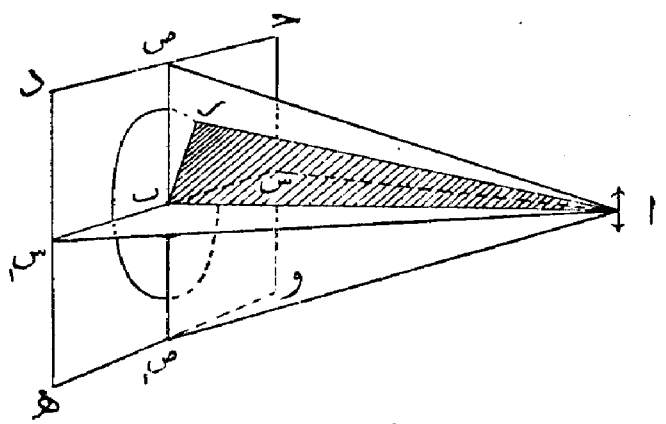
(شكل ٢٩٤)

ويلاحظ فيما سبق أن يكون اللوح البلورى رقيقاً والا كان فرق المسير الحادث بين الاهتزازة الموازية للمستوى الرئيسى وبين الاهتزازة العمودية عليه كبيراً ، وفى هذه الحالة قد يساوى هذا الفرق ن $_1$ بالنسبة الى طول موجى قدره ل $_1$ ، ويساوى (ن + ١) ل $_2$ بالنسبة الى طول موجى قدره ل $_2$ وهكذا . فاذا أنفذ المحلل الضوء ذا الطول الموجى ل $_1$ فهو ينفذ أيضا الضوء ذا الطول الموجى ل $_2$ وهكذا . واذن تنفذ أضواء عدة ذات أطوال موجية مختلفة فيكون الضوء النافذ أبيض . ويشبه ما يحدث فى هذه الحالة ، ما سبق ذكره فى التداخل عند استعمال الضوء الابيض ، وعند ما يكون فرق المسير بين الشعاعين المتداخلين كبيراً

٣٢٣ — ألوان الألواح البلورية الرقيقة — حالة الاشعة الملمومة

فى هذه الحالة نراعى ما يحدث عند ما تكون الاشعة الساقطة على اللوح البلورى على هيئة حزمة مخروطية الشكل ، وليست متوازية كما فى الحالة السابقة ، ولنفرض أن اللوح البلورى من بلورة أحادية المحور ، وانه مقطوع بحيث يكون محوره عموديا على سطحه ، ولنفرض أن الضوء المستقطب الواقع على اللوح ذولون واحد ، وانه على هيئة حزمة مخروطية الشكل صادرة من نقطة مثل ا (شكل ٢٩٥) ، وان الحزمة الضوئية تقع على اللوح البلورى حـ د هـ و ، وهو موضوع فى وضع رأسى وسطحه الواقع عليه الضوء عمودى على المحور الضوئى ، وان المستقيم ا ب (وهو محور الحزمة الضوئية) ينطبق امتداده على المحور الضوئى

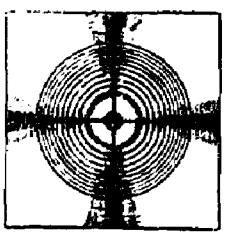
ولنفرض أن اتجاه الاهتزازة فى الضوء الواقع على اللوح البلورى رأسى ، كالمبين بالشكل . فالأشعة التى تكون اهتزازتها فى المستوى الرئيسى أو عمودياً عليه ، تنفذ خلال اللوح البلورى دون أن يطرأ على اتجاه اهتزازتها تغير ما . وبما أن الأشعة التى تقع فى المستوى الرأسى ا ص ب ص١ يكون هذا المستوى بالنسبة اليها جميعاً هو المستوى الرئيسى ، واهتزازتها جميعاً واقعة فى هذا المستوى ، اذن تنفذ جميعها دون أن يحدث تغير ما فى اتجاه اهتزازتها . وبما أن الاشعة التى تقع فى المستوى الأفقى ا س ب س١ ا ، يكون هذا المستوى بالنسبة اليها هو المستوى الرئيسى ، واهتزازتها عمودية عليه ، فهى أيضاً تنفذ دون أن يحدث تغير ما فى اتجاه اهتزازتها . واذن فالاشعة الواقعة فى هذين المستويين اذا أنفذت ، بعد نفوذها من اللوح البلورى ، خلال منشور نكل يستعمل كمحلل ، وكان مستواه الرئيسى رأسياً ، فانه ينفذها جميعها ، أما اذا كان مستواه الرئيسى أفقياً فانه لا ينفذها .



(شكل ٢٩٥)

واذا راعينا شعاعا ليس واقعا فى أحد المستويين المذكورين كالشعاع ا ر ، فان المستوى الرئيسى بالنسبة اليه يكون المستوى ا ب ر ، وبما أن الاهتزازة رأسية ، فهى تتحلل الى مركبتين احداهما فى هذا المستوى والاخرى عمودية عليه ، وهاتان تنفذان فى اللوح البلورى فى اتجاه لا ينطبق على المحور الضوئى . فهما تنتقلان خلاله بسرعتين مختلفتين ، فاذا وصلتا الى السطح الآخر للوح البلورى ، كان بينهما اختلاف فى الطور . والاختلاف الحادث فى الطور بين المركبتين يتوقف على ميل الشعاع ا ر بالنسبة الى العمود ا ب ، فالمحل الهندسى للنقط التى مثل ر والتى يكون اختلاف الطور الحادث لديها واحدا ، هو محيط دائرة مركزها ب . والسمك الذى يخترقه شعاع مثل الشعاع ا ر يزداد كلما بعدت نقطة ر عن نقطة ب . وزيادة السمك يترتب عليه زيادة اختلاف الطور .

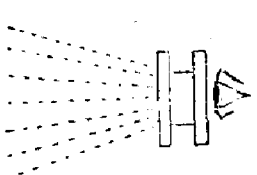
واذن اذا كان الضوء بسيطا ذا طول موجى واحد فان هنـاك دائرة مركزها ب يبلغ اختلاف الطور بين مركبتى الاهتزازة للاشعة الصادرة من ا والتى تقع عند محيط هذه الدائرة ٢ ط ، فتحصلان اهتزازة مستقيمة فى اتجاه الاهتزازة الاصلية ، وحول هـذه الدائرة دائرة أخرى يبلغ اختلاف الطور بين مركبتى الاهتزازة للاشعة التى تقع عند محيطها ٤ ط ، فتحصلان أيضا اهتزازة مستقيمة فى اتجاه الاهتزازة الاصلية ، وهكذا . فاذا اختبر الضوء النافذ من اللوح البلورى بوساطة منشور نكل يستعمل كمحلل ، وكان موضوعا بحيث لا ينفـذ الاهتزازة الاصلية ظهرت حلقات متحدة المركز من ضياء وظلمة كما هو مبين بشكل (٢٩٦) تدل مواضع الظلمة فيها على الحالات التى يبلغ فيها اختلاف الطور بين مركبتى الاهتزازة ٢ ط ، ٤ ط الخ حيث يكون اتجاه الاهتزازة النـافذة من اللوح موازيا لاتجاه الاهتزازة الاصلية ، وعلاوة على هذه الحلقات يظهر صليب كالمبين بالشكل ضلعاه مظلمان هو الحادث من امتناع نفوذ الاشعة الواقعة فى المستويين ا ص ب ص١ ، ا س ب س١ (شكل ٢٩٥) واذا أدير المحلل بمقدار قائمة تبدلت مواضع الظلمة ضياء ومواضع الضياء ظلمة



(شكل ٢٩٦)

أما اذا كان الضوء أبيض ، فنظراً لان السمك اللازم لاحداث اختلاف فى الطور قدره ٢ ط مثلا للاشعة البنفسجية غيره للاشعة الحمراء ، فان الحلقات تكون ملونة ، أما الصليب فيبقى لا لونيا . وتسمى الحلقات التى تتكون فى هذه الظاهرة « هدبا » وتسمى أحيانا المنحنيات ذات اللون الواحد

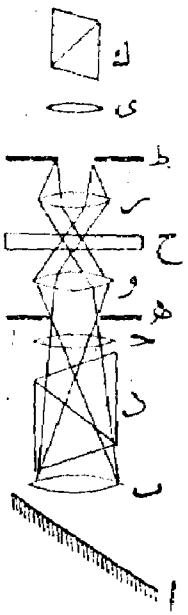
ومن أبسط الاجهزة لرؤية الحلقات والصليب جهاز ماسك التورمالين (بند٢٨٣) حيث يوضع اللوح البلورى (ويكون محوره عموديا على سطحه) بين اللوحين التورماليذين ، وينظر خلالهما الى ضوء السماء والعين قريبـة جدا من اللوحين . فى هذه الحالة تكون الاشعة الواقعة على انسان العين على هيئة حزمة مخروطية زاوية المخروط فيها متسعة كما هو مبين بشكل (٢٩٧)



(شكل ٢٩٧)

ويستعمل عادة بولارسكوب كالمبين بشكل (٢٩٨) وفيه ا

مرآة مستوية تعكس ضوء السماء نحو الجهاز ، فتلم الاشعة بوساطة العدستين ب ، حـ عند فتحة مستديرة فى الحاجز هـ ، وتنفذ فى أثناء ذلك خلال منشور نكل مستقطب هو المدلول عليه بالحرف د . والفتحة المستديرة فى الحاجز هـ ، موضوعة فى المستوى البؤرى لعدسة لامة و . فالاشعة المتجمعة فى النقط المختلفة من الفتحة المذكورة تنفذ خارجة من هذه العدسة متوازية فتخترق اللوح البلورى ح فى اتجاهات مختلفة ثم تلم بعد ذلك بوساطة عدسة لامة ر على فتحة مستديرة فى حاجز ط . وبالجهاز عدسة أو قطعة عينية ى لتكبير الصورة الحادثة عند ط ومحل ك .



(شكل ٢٩٨)

٢٣٤ — دوران مستوى الاستقطاب

اذا هيء مستقطب ومحلل كمنشورى نكل أو كلوحين من التورمالين ، بحيث كانا متعامدين فيمنع المحلل الضوء المستقطب من النفوذ خلاله ، ثم أتى بلوح من الكوارتز مثلا ، مقطوع بحيث يكون سطحه عمودياً على المحور الضوئى ، ووضع اللوح بين المستقطب والمحلل بحيث يقع الضوء عمودياً على سطحه فينفذ فيه فى اتجاه المحور ، فانه يشاهد أن المحلل ينفذ بعض الضوء خلاله ، حتى اذا كان الضوء ذا لون واحد ، وأدير المحلل بزاوية معينة امتنع نفوذ الضوء فيه مرة أخرى

ونفوذ الضوء خلال اللوح البلورى فى اتجاه المحور الضوئى لا يكون مصحوباً بانكسار مزدوج . وامتناع الضوء النافذ من اللوح البلورى من النفوذ خلال المحلل بعد أن يدار بزاوية معينة ، يدل على أن الضوء النافذ من اللوح البلورى لا يزال ضوءاً مستقطباً استقطاباً استوائيا ولكنه يختلف عنه قبل وقوعه على اللوح فى أن اتجاه الاهتزازة أو مستوى الاستقطاب قد تغير . ولذلك تسمى الظاهرة ظاهرة « دوران مستوى الاستقطاب »[1] وتسمى أحياناً ظاهرة « الاستقطاب الدورانى »[2] . والزاوية التى يدور خلالها مستوى الاستقطاب ، أو اتجاه

---

(١) Rotation of the Plane of Polarisation (٢) Rotary Polarisation

الاهتزازة ، تسمى « زاوية الدوران »[١]، وتساوى الزاوية بين المستوى الرئيسى للمحلل عند منعه الضوء المستقطب من النفوذ قبل وضع اللوح ، وبين المستوى الرئيسى له عند منعه الضوء المستقطب من النفوذ بعد وضع اللوح

وأول من كشف هذه الظاهرة « اراجو » وذلك فى سنة ١٨١١ وهى تحدث فى بعض البلورات كالكوارتز ولا تحدث فى بلورات اسبات اسلندا مثلا . وتسمى البلورات التى تحدث فيها « البلورات ذات الفعل الضوئى » أو بايجاز « البلورات الفعالة »[٢] . ودلت التجارب على أن اتجاه الدوران يختلف فى بعض البلورات عنه فى الأخرى . فاذا نظر خلال البلورة الى المصدر الصادر منه الضوء، وكان الدوران فى عكس اتجاه حركة عقربى الساعة تسمى البلورة « يمنى »[٣] ويقال عن الدوران أنه يمينى أو موجب . أما اذا كان فى الاتجاه المضاد فان البلورة تسمى « يسرى »[٤] ويقال عن الدوران أنه « أيسر » أو « سالب » . وقد دلت التجارب على أن ضربا من بلورات الكوارتز أيمن وضربا منها أيسر . والدوران الحادث بفعل لوح بلورى سمكه مليمتر يسمى أحيانا « الدوران النوعى »[٥] للبلورة

٢٣٥ — قوانين دوران مستوى الاستقطاب

ودرس « بيو »[٦] ظاهرة دوران مستوى الاستقطاب ، واستنبط من بحوثه العملية ثلاثة قوانين ، تعرف بقوانين دوران مستوى الاستقطاب ، أو بقوانين بيو

والقانون الأول ينص على أن زاوية دوران مستوى الاستقطاب تتناسب وسمك اللوح البلورى الفعال أى سمك المادة الفعالة التى يخترقها الضوء

والقانون الثانى ينص على أن الزاوية الكلية للدوران الحادث بفعل عدة ألواح من بلورات

---

(١) Angle of Rotation (٢) Optically Active crystals ومن أمثلة البلورات الفعالة بلورات الـ Cinnabar وبلورات Sulphate of Strychnia وبلورات Sulphate of Aethylendyamin

(٣) Right-Handed أو Dextrogyrate (٤) Left-Handed أو Levogyrate

(٥) Specific Rotation (٦) Biot

مختلفة تساوى المجموع الجبرى لزوايا دوران هذه الالواح (كل لوح منها على حدته)

والقانون الثالث ينص على أن زاوية الدوران تكون أكبر كلما كان الطول الموجى أقصر ، وتدل نتائج التجارب دلالة تقريبية على أن زاوية الدوران تتناسب عكسياً ومربع الطول الموجى

٣٢٦ — تشتت مستوى الاستقطاب

والقانون الثالث من قوانين بيو يترتب عليه أنه اذا استعمل ضوء أبيض وهيء المستقطب والمحلل بحيث كانا متعامدين ، ثم وضع اللوح الفعال بينهما ، فان دوران مستوى الاستقطاب للضوء ذى اللون الاحمر يكون أقل منه للضوء ذى اللون البنفسجى . فاذا أدير المحلل لكى يمنع نفوذ الضوء ، فانه يبلغ الوضع الذى يمنع عنده نفوذ الاحمر قبل أن يبلغ الوضع الذى يمنع عنده نفوذ البنفسجى . ففى الوضع الاول يمتنع نفوذ الاحمر وتنفذ الاضواء الاخرى الى حد ما ، فيكون لون الضوء النافذ من المحلل ضارباً الى الزرقة . وفى الوضع الثانى يمتنع نفوذ البنفسجى ، وتنفذ الاضواء الاخرى الى حد ما ، فيكون لون الضوء النافذ ضارباً الى الحمرة . أما فيما بين هذا وذاك فيمنع المحلل نفوذ الجزء الاوسط فيما بين الاحمر والبنفسجى من الطيف وينفذ الى حد ما الطرفين ، فيكون لون الضوء النافذ قرمزياً أو بنفسجياً أغبر[1]. وتسمى هذه الظاهرة أحياناً « تشتت مستوى الاستقطاب »[2]

وقد وجد بيو أن اللون القرمزى المذكور يحدث فى وضع معين للمحلل ، بحيث اذا أدير المحلل قليلا تحول هذا اللون بسرعة الى الحمرة ، أو اذا أدير فى الاتجاه المضاد تحول إلى الزرقة . فيمكن اذن تحديد وضع المحلل عند حدوث هذا اللون تحديداً دقيقاً . ولذلك نسمى اللون المذكور « النقبة المحسوسة »[3]. ومما يلاحظ عند حدوث « النقبة المحسوسة » إن شدة الضوء النافذ من المحلل تكون صغيرة ، لأن الجزء الاوسط من الطيف ، وهو الأصفر الاخضر ، الذى هو أشد أجزاء طيف الضوء الأبيض استضاءة ، يمتنع نفوذه

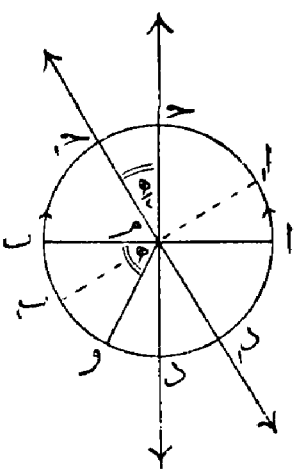
---

(١) Grayish Violet (٢) Dispersion of the plane of Polarisation

(٣) سماه بيو « teinte sensibl » ويسمى بالانجليزية The tint of passage

٢٣٧ — نظرية فرسنل فى دوران مستوى الاستقطاب

تبين فى بند (١٨٥) أن الحركة الدورية البسيطة (التوافقية البسيطة) يمكن تحليلها إلى حركتين مستديرتين متساويتى المدة والاتساع وفى اتجاهين متضادين، كما أن الحركتين اللتين من هذا القبيل تحصلان حركة دورية بسيطة. ولشرح ظاهرة دوران مستوى الاستقطاب ذهب فرسنل إلى أن الاهتزازة المستقيمة فى الضوء الواقع على اللوح الفعال تتحلل الى مركبتين مستديرتين فى اتجاهين متضادين، تنتقلان فى اتجاه المحور بسرعتين مختلفتين. فاذا ما وصلتا إلى السطح الثانى للوح يكون بينهما اختلاف فى الطور، فتحصلان اهتزازة مستقيمة، ولكن اتجاهها يكون مائلا بالنسبة الى اتجاه الاهتزازة الاولى. فاذا فرضنا أن نقطتى ا ، ب (شكل ٢٩٩) تدوران حول محيط الدائرة التى مركزها مـ بسرعتين متساويتين فى اتجاهين متضادين، وابتدأت احداهما من أحد طرفى القطر ا ب، وابتدأت الاخرى من الطرف الآخر فان محصلتهما تكون حركة مستقيمة فى استقامة القطر حـ د العمودى على ا ب، ويكون اتساعها مساوياً ضعف نصف قطر الدائرة (أنظر بند ١٨٥)



(شكل ٢٩٩)

فاذا فرضنا أن الحركة المستديرة التى فى عكس اتجاه حركة عقربى الساعة قد سبق طورها طور الاخرى بزاوية ما قدرها ه فكانت النقطة التى تتحرك الحركة الاولى عند ا مثلا فى حين أن الاخرى عند و، حيث تكون الزاوية ب مـ و مساوية ه، ورسمنا مـ ب، منصفاً للزاوية ب مـ و، ومددنا ب، مـ حتى يقطع محيط الدائرة عند ا، فان النقطة التى تتحرك فى عكس اتجاه حركة عقربى الساعة تكون عند ا، فى حين أن الاخرى تكون عند ب، واذن تكون محصلتهما حركة مستقيمة فى اتجاه القطر حـ، د، حيث تكون الزاوية حـ مـ حـ، مساوية ½ ه، ويكون اتساع هذه المحصلة مساوياً ضعف نصف قطر الدائرة

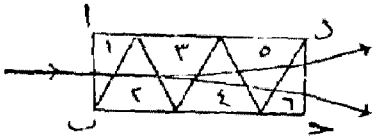
ويتضح من هذا أن الحركة المستقيمة التى فى اتجاه حـ د اذا حللت الى المركبتين المستديرتين

المتضادتى الاتجاه ، وحدث أن تقدم طور المركبة التى فى عكس اتجاه حركة عقربى الساعة بزاوية ما قدرها ه ، فان المركبتين تحصلان حركة مستقيمة ، اتجاهها قد أدير (بالنسبة الى اتجاه الحركة المستقيمة الاولى) فى عكس اتجاه حركة عقربى الساعة بزاوية تساوى نصف ه وبالمثل يتضح أنه اذا تقدم طور المركبة التى فى اتجاه حركة عقربى الساعة ، فان اتجاه الحركة المستقيمة يدور فى اتجاه حركة عقربى الساعة بمقدار نصف الزاوية

واذا اعتبرنا أن اتجاه الاهتزازة فى الضوء المستقطب الواقع على عين الناظر قبل نفوذه فى اللوح الفعال هو حـ د ثم تحول من جراء نفوذه فى اللوح الى الاتجاه حـ ١ د ١ ، فنظراً لان العين تنظر الى مصدر الضوء خلال اللوح ، فان الدوران على حسب القاعدة المذكورة فى بند (٢٣٤) يعتبر أيمن ، والبلورة تعتبر يمنى ، وتكون المركبة المستديرة التى فى عكس اتجاه حركة عقربى الساعة هى السابقة فى الطور . ونستنبط من هذا أنه على حسب نظرية فرسنل تكون المركبة المستديرة التى ينطبق اتجاهها على اتجاه الدوران الحادث فى مستوى الاستقطاب ، هى التى يكون طورها سابقاً ، أى هى التى تنتقل داخل اللوح البلورى فى اتجاه المحور بسرعة أكبر . أى أن سرعة انتقال المركبة المستديرة اليمنى فى اتجاه المحور أكبر فى البلورة اليمنى ، وسرعة انتقال المركبة المستديرة اليسرى فى اتجاه المحور أكبر فى البلورة اليسرى

٣٢٨ — تحقيق نظرية فرسنل عملياً

وقد استطاع فرسنل تحقيق نظريته فى أن المركبتين المستديرتين المتضادتى الاتجاه تنتقلان فى اتجاه المحور فى البلورة الفعال بسرعتين مختلفتين . واتخذ لذلك متوازى مستطيلات ا ب حـ د (شكل ٣٠٠) مركباً من عدة منشورات من الكوارتز كما هو مبين بالشكل ، أحدها أيمن والذى يليه أيسر . والمنشورات مقطوعة بحيث تكون محاورها الضوئية عمودية على السطح ا ب



(شكل ٣٠٠)

الذى يصوب عليه الضوء . فاذا فرضنا أن المنشورات المرقومة بالارقام ١ ، ٣ ، ٥ هى من الكوارتز الايمن والمنشورات المرقومة بالارقام ٢ ، ٤ ، ٦ من الكوارتز الأيسر وسقط شعاع من الضوء

المستقطب استقطاباً استوائياً عمودياً على السطح ا ب فان سرعة المركبة المستديرة التى فى عكس اتجاه حركة عقربى الساعة بالنسبة الى الناظر خلال المتوازى المستطيلات نحو مصدر الضوء تكون أكبر من سرعة الاخرى فى البلورة اليمنى وأقل من سرعتها فى البلورة اليسرى . فبالنسبة الى المركبة المستديرة التى فى عكس اتجاه حركة عقربى الساعة يكون انكسار الضوء عند نفوذه من المنشور (١) الى المنشور (٢) من قبيل الانكسار عند نفوذه من وسط لطيف (أى السرعة فيه أكبر) الى وسط كثيف (أى السرعة فيه أقل) ، فينحرف مسير الشعاع قليلا نحو قاعدة المنشور (٢) . أما بالنسبة الى المركبة المستديرة التى فى اتجاه حركة عقربى الساعة فان انكسار الضوء يكون من قبيل الانكسار عند نفوذه من وسط كثيف (السرعة فيه أقل) الى وسط لطيف (السرعة فيه أكبر) . فينحرف المسير قليلا نحو رأس المنشور (٢) . وعندنفوذ الضوء من المنشور (٢) الى المنشور (٣) ينحرف الشعاع الاول نحو رأس المنشور (٣) وينحرف الثانى نحو قاعدته ، فيزداد الانفراج بين مسيرى الشعاعين حتى اذا تعدد ذلك خرج الشعاعان فى النهاية من السطح حـ د منفصلين ، ويكون كلاهما مستقطبا استقطاباً دائريا واتجاه الحركة المستديرة فى المنحرف الى أسفل (شكل ٣٠٠) فى عكس حركة عقربى الساعة (وذلك بالنسبة الى الناظر خلال متوازى المستطيلات نحو مصدر الضوء)

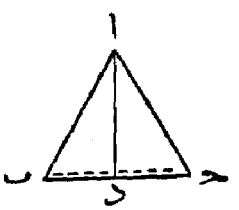
وقد تحقق فرسنل من حدوث الانفصال بين الشعاعين ومن استقطابهما استقطاباً دائريا كل فى الاتجاه المتفق مع الشرح المذكور

٣٢٩ — منشور كورنو

المنشورات المصنوعة من الكوارتز شائعة الاستعمال فى البحوث الطيفية لا سيما ما يتعلق منها بالاشعة المابعد البنفسجية . وبلورة الكوارتز من البلورات المحدثة للانكسار المزدوج ، وهى من هذه الوجهة تشبه بلورة سبات اسلندا (لولا أن الاولى موجبة والثانية سالبة) ، لذلك يقطع المنشور المصنوع من الكوارتز بحيث يكون مقطعه العرضى العمودى على حرفه الحارف مثلثا متساوى الضلعين وبحيث يكون المحور الضوئى موازيا لقاعدة هذا المثلث فعند ما يهيأ المنشور فى الوضع الذى تكون فيه زاوية انحراف الشعاع النافذ فيه عند نهايتها الصغرى ، يكون

مسير هذا الشعاع موازيا للقاعدة ، ويكون اذن مسيره منطبقا على المحور فيبطل الانكسار المزدوج . ونظراً لان اختلاف سرعتى الشعاع المعتاد والشعاع الغير المعتاد فى الكوارتز ليس كبيراً جداً ، فانه اذا مال الشعاع الذى ينفذ فى المنشور ميلا طفيفا على المحور ، فانفصال الشعاعين أحدهما عن الآخر قد يكون طفيفا جداً ليس له أثر محسوس . ولذلك اذا استعمل منشور من الكوارتز مقطوع بالكيفية المذكورة ، فى سبكترسكوب وهيء المنشور فى الوضع الذى تكون فيه زاوية انحراف شعاع من منتصف الطيف عند نهايتها الصغرى فسير هذا الشعاع خلال المنشور ينطبق على المحور فيعدم بالنسبة اليه الانكسار المزدوج ، أما مسير الشعاع من أحد طرفى الطيف مثلا ، فيكون مائلا ميلا صغيراً بالنسبة الى المحور ، وهذا الميل وان كان قد يؤدى الى حدوث انكسار مزدوج محسوس فى بلورة من سبات اسلندا ، فهو عادة لا يترتب عليه أى أثر محسوس فى حالة المنشور الكوارتزى ، فيبطل الانكسار المزدوج بالنسبة الى أشعة الطيف كلها غير أن للمسألة وجها آخر . فبلورة الكوارتز من البلورات الفعالة ، أى التى تدير مستوى الاستقطاب ، فيكون نفوذ شعاع فى اتجاه المحور فى المنشور الكوارتزى مصحوبا بانقسامه قسمين ، كل مستقطب استقطابا دائريا واتجاها الحركة المستديرة فيهما متضادان ، وسرعتا انتقالهما فى اتجاه المحور مختلفتان . فلا يكون معامل انكسار أحدهما مساويا معامل انكسار الآخر واذن لا يكون ثمت وضع واحد تكون فيه زاوية الانحراف عند نهايتها الصغرى

فدفعاً لهذا يركب عادة المنشور الكوارتزى من منشورين ا ب د ، ا حـ د (شكل ٣٠١) زاوية ا فى كل ٣٠ درجة وزاوية د فى كل قائمة ، ويكون أحدهما من الكوارتز الايمن والآخر من الكوارتز الايسر ، والمحور فى كل عمودى على السطح المشترك بينهما وهو ا د . فعند نفوذ الضوء فى المنشور المركب ا ب حـ فى اتجاه يوازى قاعدته ب حـ ، يكون السمك



(شكل ٣٠١)

الذى يخترقه الضوء فى نصفيه واحداً ، والاختلاف الحادث بين السرعتين بفعل أحد النصفين يبطله النصف الآخر . ويعرف المنشور الذى يركب بهذه الكيفية « بمنشور كورنو »(١) نسبة الى مخترعه

(١) Cornu

٣٣٠ — دوران مستوى الاستقطاب بفعل السوائل والابخرة

وقد دلت التجارب على أن خاصة ادارة مستوى الاستقطاب ليست مقصورة على بعض البلورات كالكوارتز ، وانما هى موجودة لدى بعض السوائل كعطر التربنتينا ، وعطر الليمون والنعناع والكراوية ، وبعض المحلولات كمحلول السكر فى الماء ومحلول كبريتات الكينا وغير ذلك وأول من كشف خاصة بعض السوائل والمحلولات فى ادارة مستوى الاستقطاب « بيو » وذلك فى سنة ١٨١٥ وتسمى السوائل والمحلولات التى لها هذه الخاصة بالسوائل أو المحلولات الفعالة

وادارة السوائل والمحلولات لمستوى الاستقطاب صغيرة اذا قيست بادارة الكوارتز مثلا عند ما يتساوى سمك المادة الفعالة فى الحالتين ، ولقياس الدوران الحادث بفعل السوائل أو المحلولات طرق دقيقة سيأتى ذكرها فيما بعد

وقد بينت التجارب أن خاصة ادارة مستوى الاستقطاب فى السائل أو المحلول لا تزول اذا مزج السائل أو المحلول بسائل آخر غير فعال لا يتفاعل واياه تفاعلا كيميائياً ولكن زاوية الدوران تتناسب وكمية المادة الفعالة الموجودة ، وبينت التجارب أن السائل يظل محتفظاً بخاصته حتى اذا تحول الى بخار . لذلك تعد الخاصة ، خاصة جزيئية تنتمى الى جزيئات المادة الفعالة فاذا زاد عدد الجزيئات الفعالة فى السمك الذى يخترقه الضوء كبرت تبعاً لذلك زاوية دوران مستوى الاستقطاب ، واذا قل ، صغرت الزاوية

ودلت التجارب على أنه عند ما يكون المحلول فعالا ، والمذيب غير فعال ، فان المذاب يكون فعالا اذا وجد فى حالة الصلابة ، وكان شفافاً غير متبلور ، لان التبلور عادة مصحوب بالانكسار المزدوج ، وهذا يشوب خاصة الدوران . وقد كانت الوسيلة الى الكشف عن خاصة ادارة بعض الاجسام الصلبة لمستوى الاستقطاب ، أن تذاب هذه الاجسام فى مذيبات مناسبة غير فعالة وتختبر المحلولات

ودلت التجارب على أن الكواتز تزول منه خاصة ادارة مستوى الاستقطاب اذا صهر أو

أذيب فى محلول البوتاسا الكاوية ، وهذا يدل على أن الدوران فى الالواح البلورية الفعالة ينتمى الى الهيئة التى تترتب بها الجزيئات فى البلورة ويزول بزوال هيئة ترتيبها . فى حين أنها فى السوائل أو المحلولات تنتمى الى الجزيئات نفسها

٣٣١ — الدوران النوعى والدوران الجزيئى

واذا كانت إدارة مستوى الاستقطاب فى السوائل والمحلولات خاصة جزيئية تتوقف على عدد الجزيئات الفعالة الموجودة فى السمك الذى يخترقه الضوء ، فان زاوية الدوران فى المحلول الفعال تكون متناسبة وسمك المحلول ، ومتناسبة أيضاً وكتلة المذاب الفعال فى السنتيمتر المكعب من المحلول . وتسمى زاوية الدوران عند ما تكون كتلة المذاب الفعال فى السنتيمتر المكعب من المحلول جراماً واحداً وسمك المحلول ديسيمتراً واحداً تسمى الزاوية فى هذه الحالة الدوران النوعى[1] اللمادة الفعالة فاذا رمزنا لكتلة المذاب الفعال بالحرف ه ولكتلة المذيب غير الفعال بالحرف ك ، فان الجرام الواحد من المحلول يحتوى من المذاب الفعال على كتلة قدرها

$$\frac{ه}{ك + ه} \quad \text{جراماً}$$

فاذا رمزنا لكثافة المحلول بالحرف ث . ونظراً لان الكثافة هى كتلة وحدة الحجوم ينتج أن السنتيمتر المكعب من المحلول يحتوى على كتلة من المذاب الفعال قدرها

$$\frac{ث\ ه}{ك + ه}$$

واذا رمزنا لزاوية الدوران بالحرف د ، ولسمك المحلول أى للسمك الذى يخترقه الضوء مقيساً بالديسيمتر بالحرف س ، فان

$$د \text{ تتناسب } \frac{ث\ ه}{ك + ه} س$$

---

(١) Specific Rotation

$$\therefore \theta = \rho \frac{\text{ث ل}}{\text{ك} + \text{ل}} \text{ س}$$

حيث يكون المقدار ρ هو الدوران النوعى للمادة

أما فى حالة سائل فعال نقى (كعطر التربنتينا) غير ممزوج بآخر ، فان كتلة المادة الفعالة فى السنتيمتر المكعب منه تساوى

$$\frac{\text{ث}}{\text{ك} + \text{ل}}$$

باعتبار أن ث رمز لكثافة السائل

فاذا رمزنا لسمكه مقيساً بالديسمتر بالحرف س ، ولزاوية الدوران بالحرف θ فان

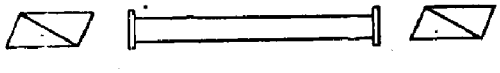
$$\theta = \rho \text{ ث س}$$

حيث يكون المقدار ρ هو الدوران النوعى ويساوى فى هذه الحالة خارج قسمة زاوية الدوران عند ما يكون سمك السائل ديسمترا واحدا على كثافة السائل

وقد دلت التجارب على أن قيمة الدوران النوعى ليست ثابتة تماماً ، فهى بوجه عام تزداد قليلا اذا قلت شدة تركيز المحلول ، كما أنها تختلف باختلاف المذيب . وحاصل ضرب الدوران النوعى فى الوزن الجزيئى للمادة يسمى « الدوران الجزيئى »[1]

٣٣٢ — مقاييس السكر

ويستخدم دوران مستوى الاستقطاب فى الصناعة وفى الطب لايجاد كمية السكر فى المحلولات . وأبسط الاجهزة التى تستخدم لهذه الغاية جهاز يتركب كما بشكل (٣٠٢) من منشورى نكل أحدهما مستقطب والآخر محلل ، موضوعين على استقامة واحدة ، وبحيث يمكن أن توضع بينهما أنبوبة اسطوانية الشكل مسدود طرفاها بلوحين من الزجاج ، وهذه تملأ بالسائل المراد ايجاد شدة دورانه الجزيئى . فاذا استخدم ضوء ذو لون واحد ، وهيئ المتشوران



(شكل ٣٠٢)

(١) Molecular Rotation

بحيث يكون مستواهما الرئيسيان متعامدين ، ووضعت بينهما الانبوبة وه ، فارغة ، أو مملوءة بالماء ظل المحلل غير منفذ للضوء ، ولكن اذا وضعت الانبوبة وهى مملوءة بمحلول السكر مثلا ، أنفذ المحلل بعض الضوء ، ولزمت ادارته بزاوية معينة لكى يمتنع نفوذ الضوء منه . فاذا كان بالمحلل مؤشر يدور حول دائرة مدرجة ثابتة ، أمكن قياس هذه الزاوية

ومما تجب ملاحظته فى هذا الشأن أن الزاوية التى يدار خلالها المحلل قد لا تكون مساوية زاوية دوران مستوى الاستقطاب ، فمثلا اذا أدير المحلل فى عكس اتجاه حركة عقربى الساعة ، بالنسبة الى الناظر خلاله نحو مصدر الضوء ، بزاوية قدرها ه ، فالدوران قد يكون أيمن وقدره ه أو قدره بوجه عام ه + ن ط ، أو قد يكون أيسر وقدره ن ط - ه . فدفعاً للالتباس تعاد التجربة بأنبوبة طولها النصف ، أو تعاد بالانبوبة نفسها وانما يخفف المحلول الى نصف شدة تركيزه فيمكن بالمقابلة دفع الالتباس

ولكن مثل هذا الجهاز ، ليس من الدقة على جانب كبير ، فلا يخول استعماله قياس زاوية الدوران بالدقة التى تتطلبها بعض البحوث الحديثة أو تتطلبها الغاية التى من أجلها يراد تقدير كمية السكر فى السائل ، لذلك اخترعت أجهزة أخرى دقيقة تسمى « بالسكر مترات »[1] نسميها مقاييس السكر ، وقد يطلق عليها أحياناً اسم « البولارمترات »[2] أو مقاييس الاستقطاب سنأتى فيما يلى على وصف نوعين منها .

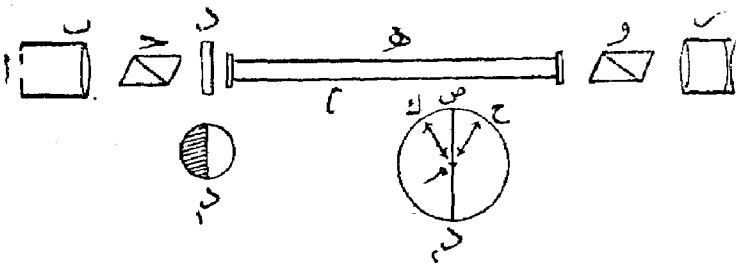
٣٣٣ — مقياس لوران — المقياس ذو اللوح النصف الموجى

يتركب مقياس « لوران »[3] كما هو مبين بشكل (٣٠٣) من مجمع مكون من فتحة مستديرة ا موضوعة على بعد من عدسة لامة ب مساو بعدها البؤرى بحيث اذا أضيئت الفتحة تخرج الاشعة من العدسة متوازية ، فتنفذ خلال منشور نكل حـ هو المستقطب ، ثم خلال قرص مستدير شفاف د أحد نصفيه وليكن الايسر (كما هو مبين عند د) من الكوارتز والنصف الآخر من الزجاج ، ثم ينفذ الضوء خلال الانبوبة ه وهى التى يوضع فيها السائل

---

(١) Saccharimeters (٢) Polarimeters (٣) Laurent

ثم خلال منشور نكل و ، وهو المحلل ، ثم خلال قطعة عينية م تصنع عادة على هيئة تلسكوب قصير من النوع المنسوب الى غاليليه ، فيصل الى العين



(شكل ٣٠٣)

ولوح الكوارتز المركب فى القرص د مقطوع بحيث يكون محوره موازياً لسطحه ، وموازياً للقطر الذى عنده يتصل نصفا القرص . فاذا فرضنا أن شكل (د ٢) يمثل مظهر القرص د بالنسبة الى الناظر خلال الجهاز نحو مصدر الضوء ، وكان نصفه الايسر من الكوارتز ، والايمن من الزجاج ، فان محور اللوح الكوارتزى يكون موازياً لسطح القرص وموازياً أيضاً للمستقيم مـ ص ، واذن يكون مستواه الرئيسى عمودياً على مستوى الشكل (د ٢) وموازياً للمستقيم مـ ص ويثبت هذا القرص فى الجهاز عند د بحيث يكون مـ ص رأسياً . فاذا وقع الضوء المستقطب على القرص ، وكان اتجاه اهتزازته موازياً للمستقيم مـ ح (شكل د ٢) فان الاهتزازة فى الضوء النافذ خلال النصف الكوارتزى تتحلل الى مركبتين مستقيمتين ، احداهما عمودية على المستوى الرئيسى وهذه فى الكوارتز (نظراً لانه من البلورات الموجبة) أسرع ، والاخرى موازية للمستوى الرئيسى ، وهذه أبطأ . فعند وصولهما الى الوجه الآخر للوح الكوارتزى ، يكون بينهما فرق فى المسير أو اختلاف فى الطور ، فاذا هيء سمك اللوح الكوارتزى بحيث يبلغ فرق المسير نصف الطول الموجى أى يبلغ اختلاف الطور ط ، فان المركبتين تحصلان اهتزازة مستقيمة فى اتجاه كالمبين (فى شكل د ٢) بالمستقيم مـ ك . فاذا رمزنا للزاوية بين اتجاه الاهتزازة الاصلية مـ ح ، وبين المستوى الرئيسى للوح الكوارتزى بالحرف ى ، فان الزوية بين مـ ح ، مـ ص (شكل د ٢) تكون ى ، وتكون مساوية الزاوية بين اتجاه محصلة المركبتين المذكورتين عند خروجهما من الوجه الآخر للوح (وهو الاتجاه مـ ك) وبين مـ ص . واذن تكون الاهتزازة فى الضوء النافذ من النصف الكوارتزى قد أميل بالنسبة الى اتجاه الاهتزازة الاصلية بزاوية قدرها ٢ ى . ويسمى اللوح الكوارتزى

الذى يكون سمكه بالقدر الذى يجعل فرق المسير بين المركبتين مساوياً نصف الطول الموجى ، « باللوح النصف الموجى »[1] ، ويعرف أيضاً « بلوح لوران »

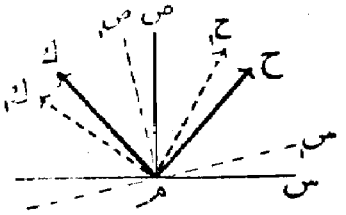
أما الاهتزازة فى الضوء النافذ خلال النصف الزجاجى فلا يتغير اتجاهها ، وفائدة وجود اللوح الزجاجى أن يكون سمكه بالقدر الذى يجعل شدة الضوء النافذ منه مساوية شدة الضوء النافذ من اللوح الكوارتزى ، فتكون شدة الضوء النافذ من نصفى القرص الشفاف د واحدة

فاذا فرضنا أولا أن المادة الفعالة التى تدير مستوى الاستقطاب ، ليست موجودة ، وأدير المحلل حتى يكون مستواه الرئيسى عمودياً على مـ ص ، أو موازياً له ، فان المحلل ينفذ فى الوضع الأول من الاهتزازة مـ ح ، النافذة من النصف الزجاجى المركبة العمودية على مـ ص وكذلك من الاهتزازة مـ ك النافذة من النصف الكوارتزى المركبة العمودية على مـ ص ، وتكون المركبتان متساويتين ، وتكون شدة ما ينفذه من الضوء الواقع عليه من نصفى القرص واحدة . أما فى الوضع الثانى فان المحلل ينفذ من الاهتزازتين المذكورتين المركبة الموازية للمستقيم مـ ص ، وتكون شدة ما ينفذه من الضوء الواقع عليه من نصفى القرص واحدة أيضاً . واذن يظهر فى الحالتين نصفا المجال مضيئين بشدة واحدة ، فاذا أدير المحلل بزاوية صغيرة عن أحد هذين الوضعين زادت شدة الاستضاءة فى أحد النصفين وقلت فى الآخر . ويلاحظ أنه اذا كانت زاوية الواقعة بين اتجاه الاهتزازة النافذة من النصف الزجاجى وبين مـ ص أقل من ٤٥ درجة ، ويمكن تغييرها على حسب الارادة بادارة المستقطب ، فان المركبة التى ينفذها المحلل من كل من الاهتزازتين عند ما يكون مستواه الرئيسى عمودياً على المستقيم مـ ص تكون أصغر اتساعاً من المركبة التى ينفذها عند ما يكون مستواه الرئيسى موازياً لهذا المستقيم ، أى تكون شدة الاستضاءة فى كل من نصفى المجال فى الوضع الاول أصغر منها فى الوضع الثانى وعند المضاهاة بين شدتى الاستضاءة فان من السهل على الانسان أن يدرك ما بينهما من التفاوت الصغير اذا كانت الشدتان صغيرتين . ولذلك يفضل عملياً أن يهيأ المحلل بحيث يظهر نصفا المجال مضيئين بشدة واحدة ولكنها صغيرة

---

(١) Half-wave Plate

فاذا وضعت الانبوبة التى تحتوى على المادة الفعالة فى موضعها المبين بالشكل ، فانها تدير مستوى الاستقطاب ، فيدور الاتجاهان مـ ح ، مـ ك ، مع بقاء الزاوية بينهما ثابتة ، فى اتجاه حركة عقربى الساعة أو عكسها ، فلا تكون مركبتا الاهتزازة اللتان ينفذهما المحلل فى وضعه السابق متساويتين ، فيظهر أحد نصفى المجال أكثر ضياء من الآخر ، فاذا أدير المحلل أمكن جعلهما متساويى الضياء ويتضح هذا بالرجوع الى شكل (٣٠٤) فاذا فرضنا أن كلا من الاتجاهين مـ ح ، مـ ك قد أدير فى عكس اتجاه حركة عقربى الساعة بزاوية ح مـ ح ، = ك مـ ك ، فان مركبتى الاهتزازتين مـ ح ، ، مـ ك ، فى الاتجاه العمودى على مـ ص ، أى فى الاتجاه مـ س الموازى للمستوى الرئيسى للمحلل ، لا تكونان متساويتين . فاذا رسم مـ ص ، بحيث تكون زاوية ص مـ ص ، مساوية ح مـ ح ، ، ورسم



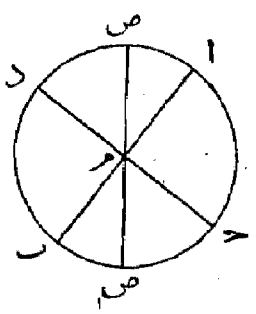
(شكل ٣٠٤)

مـ س ، عمودياً على مـ ص ، فان مركبتى مـ ح ، ، مـ ك ، فى الاتجاه الموازى للمستقيم مـ س ، ، تكونان متساويتين ، أى اذا أدير المستوى الرئيسى للمحلل من وضعه الأول حتى يصير موازياً للمستقيم مـ س ، ، فان مركبتى الاهتزازة اللتين ينفذهما فى هذا الوضع تكونان متساويتين ، وتكون الزاوية س مـ س ، التى يدار خلالها المحلل حتى يعود الضياء فى نصفى المجال الى حالته الأولى هى المقابلة لزاوية دوران مستوى الاستقطاب

ولاستعمال الجهاز تضاء فتحة المجمع بضوء ذى لون واحد ، وهو الذى يكون سمك اللوح الكوارتزى بالنسبة الى طوله الموجى بالقدر المناسب . ويهيأ التلسكوب الصغير ر (شكل ٣٠٣) حتى يرى القرص المستدير د أو بالأحرى الحد الفاصل بين نصفيه واضحاً جلياً . ثم توضع الأنبوبة ه مملوءة بالماء المقطر ويدار المحلل و ، حتى يظهر نصفا المجال مضيئين بشدة واحدة بحيث تكون هذه الشدة صغيرة ليست كبيرة . ثم تملأ الأنبوبة بالسائل أو المحلول الفعال وتوضع مكانها ، ويدار المحلل حتى تعود شدة نصفى المجال الى حالتها الأولى ، فتكون الزاوية التى يدار خلالها المحلل مساوية زاوية دوران مستوى الاستقطاب أو يمكن استخراج قيمة هذه الزاوية منها كما أوضحنا فى البند السابق

٣٣٤ ــ المقياس ذو الكوارتز الثنائى

يستعمل فى هذا المقياس قرص شفاف مركب من نصفين أحدهما من الكوارتز الأيمن والآخر من الكوارتز الأيسر ، مقطوعين بحيث يكون المحور الضوئى فى كل عمودياً على السطح فاذا وقع عمودياً على هذا القرص ضوء مستقطب ، أدير مستوى الاستقطاب فى الضوء النافذ من أحد النصفين جهة اليمين ، وفى الضوء النافذ فى الآخر ، جهة اليسار ، بمقدار يتوقف على سمك اللوح وعلى الطول الموجى للضوء . فاذا جعل سمك اللوح الكوارتزى السمك المناسب بحيث تبلغ زاوية الدوران قائمة بالنسبة الى ضوء من الجزء الأوسط من الطيف (الجزء الأصفر مثلا) ، وفرضنا أن اتجاه الاهتزازة فى الضوء المستقطب الواقع على القرص هو ا ب (شكل ٣٠٥) وكان الضوء أبيض ، وكان النصف الأيمن من القرص يدير مستوى الاستقطاب فى اتجاه حركة عقربى الساعة ، والنصف الأيسر يديره فى عكس اتجاه حركة عقربى الساعة ، فان اتجاه الاهتزازة فى الضوء الأصفر يتحول من جراء نفوذه فى النصف الأيمن الى الاتجاه الموازى للمستقيم م ـ ح ، ويتحول من جراء نفوذه فى النصف الأيسر الى الاتجاه الموازى للمستقيم م ـ د ، حيث يكون المستقيم د م ـ ج عمودياً على ا ب وأما اتجاه الاهتزازة



(شكل ٣٠٥)

فى الأضواء ذات الألوان الأخرى فيدور بمقدار أقل من هذا أو أكبر وفقاً للقانون الثالث من قوانين « بيو » . فاذا أنفذ الضوء النافذ من القرص خلال منشور نكل محلل وكان مستواه الرئيسى عمودياً على الاتجاه ح د ، بحيث يمنع نفوذ الاهتزازة الموازية للمستقيم ح د ، امتنع نفوذ الضوء من الجزء الأوسط من الطيف ، ونفذت الى حد ما الأضواء الأخرى ، فيظهر كل من نصفى المجال بذلك اللون الخاص الذى أطلقنا عليه اسم « النقبة المحسوسة » (بند ٣٢٦) . أما اذا أدير المحلل قليلا عن وضعه هذا ، تحولت النقبة المحسوسة فى أحد النصفين الى الحمرة ، وفى الآخر الى الزرقة

ويسمى اللوح الكوارتزى المركب من نصفين بالكيفية المذكورة « باللوح الكوارتزى

الثنائى »[1]

وبوساطته يتيسر تهيئة المحلل فى وضع يمكن تحديده تحديداً دقيقاً . ويلاحظ أن مستواه الرئيسى فى هذا الوضع يكون موازياً للاتجاه ا ب ، أى لاتجاه الاهتزازة فى الضوء المستقطب الواقع على اللوح الكوارتزى المذكور . ويوضع هذا اللوح اما بين المستقطب والمادة الفعالة ، أى موضع اللوح النصف الموجى د (شكل ٣٠٣) ، أو بين المادة الفعالة وبين الحلل . فاذا هيء المحلل قبل وضع المادة الفعالة بحيث يظهر نصفا المجال بتلك النقبة المحسوسة ، ثم وضعت المادة الفعالة ، وأدير المحلل فى اتجاه الدوران الحادث بفعل المادة الفعالة ، حتى تعود النقبة المحسوسة الى النصفين ، أمكن ايجاد زاوية الدوران بفعل المادة الفعالة

٣٣٥ — ظاهرة فردای — الدوران المغناطيسى

كشف فردای سنة ١٨٤٥ أن الاجسام المتشابهة الخواص فى جميع الاتجاهات ، كالزجاج مثلا ، تكتسب من جراء وجودها فى مجال مغناطيسى شديد ، خاصة ادارة مستوى الاستقطاب عند ما ينفذ فيها الضوء المستقطب فى اتجاه خطوط القوة فى المجال المغناطيسى . ولبيان ذلك يستخدم مغناطيسى كهربائى شديد ، ويكون مقوراً كما هو مبين تخطيطياً بشكل (٣٠٦) فاذا وضع قبل امرار التيار فى ملفات المغناطيسى الكهربائى لوح من الزجاج مثل ا بين قطبى المغناطيس ، وأنفذت حزمة متوازية من أشعة ضوء ذو لون واحد خلال منشور نكل ب يستعمل

(شكل ٣٠٦)

كمستقطب بحيث تنفذ خلال اللوح الزجاجى الى منشور نكل آخر ح يستعمل كمحلل ، وكان المستوى الرئيسى للمحلل عمودياً على المستوى الرئيسى للمستقطب امتنع نفوذ الضوء من المحلل ، ولكن اذا مر التيار الكهربائى فى ملفات المغناطيس شوهد أن المحلل ينفذ بعض الضوء . فاذا قطع التيار امتنع نفوذ الضوء مرة أخرى . واذا أمر التيار وشوهد نفوذ بعض الضوء من المحلل ثم أدير المحلل ، فانه يأخذ وضعاً خاصاً يمتنع فيه نفوذ الضوء منه بالرغم من وجود

---

(١) Bi—quartz Plate

المجال المغناطيسى . و يدل ذلك على أن اتجاه الاهتزازة فى الضوء المستقطب النافذ خلال كتلة الزجاج فى اتجاه خطوط القوة ، يدور بزاوية معينة بفعل المجال المغناطيسى . واذا أعيدت التجربة بحيث يخترق الضوء المستقطب اللوح الزجاجى فى اتجاه عمودى على خطوط القوة شوهد أن الدوران لا يحدث

وتسمى الظاهرة « ظاهرة فرداى » (١) وتعرف أيضاً « بالدوران المغناطيسى » (٢) ، وهى تختلف عن دوران مستوى الاستقطاب بفعل المواد الفعالة ، فاتجاه الدوران فى هذه المواد يتوقف على اتجاه نفاذ الضوء فيها كما سبق ذكره عند تعريف الدوران الأيمن والدوران الأيسر . أما فى ظاهرة فرداى ، فاتجاه الدوران فى المادة الواحدة يتوقف لا على اتجاه الضوء ، وانما على اتجاه خطوط القوة فى المجال المغناطيسى ، بحيث اذا انعكس المجال دون أن ينعكس اتجاه الضوء ، انعكس تبعاً لذلك اتجاه الدوران . كما أنه اذا نفذ الضوء المستقطب خلال المادة ذهاباً فى اتجاه خطوط القوة ثم عكس بطريقة ما ، بحيث ينفذ خلال المادة ايابا فى استقامة خطوط القوة ولكن فى الاتجاه المضاد لها ، فالدوران ذهاباً وايابا يكون فى اتجاه واحد نظراً لأن اتجاه خطوط القوة لم يتغير ، فيتضاعف الدوران

وقد دلت التجارب على أن اتجاه الدوران المغناطيسى فى بعض المواد يختلف عنه فى الآخر . فاذا نظر فى اتجاه خطوط القوة وكان الدوران فى اتجاه حركة عقربى الساعة سمى موجبا واذا كان فى الاتجاه المضاد سمى سالبا . أو اذا اعتبر المجال المغناطيسى حادثاً بفعل تيار كهربائى مار فى ملف لولبى فالدوران الذى ينطبق اتجاهه على اتجاه هذا التيار يسمى موجباً ، والدوران الذى فى الاتجاه المضاد يسمى سالباً

وأجريت تجارب عدة لاختبار حدوث هذه الظاهرة فى المواد المختلفة ، ودلت التجارب على أن الظاهرة عامة تحدث فى الأجسام الصلبة والسائلة والغازات اذا ما كانت شدة المجال المغناطيسى كبيرة بالقدر المناسب ، وان الظاهرة أشد ظهوراً فى المواد الشديدة الحرف للاشعة الضوئية ، أى التى يكون معامل انكسار الضوء فيها كبيراً كالزجاج الصخرى ، وثانى كبريتور الكربون . وان من

---

(١) Faraday's Effect (٢) Magnetic Rotation

المواد ما يحدث فيها الدوران الموجب كالماء والزجاج وثانى كبريتور الكربون والبنزين والاكسجين وغشاء شفاف من الحديد أو النيكل أو الكوبلت ، ومنها ما يحدث فيها الدوران السالب كاملاح الحديد وكرومات البوتاسيوم وثانى كروماته

واذا رمز لشدة المجال المغناطيسى بالحرف ق ولسمك المادة بالحرف س ولزاوية الدوران بالحرف ه فان نتائج التجارب تدل على أن

$$ه = ر\ ق\ س$$

حيث يكون ر مقداراً ثابتاً للمادة الواحدة ويعرف « بثابت ڤرديه » (١) وهو مقدار يتناسب عكسياً ومربع الطول الموجى بالتقريب (الا اذا كانت للمادة مناطق امتصاص ، اذ يشذ المقدار عن الانقياد الى هذا التناسب عند هذه المناطق وبالقرب منها)

كما أن المعادلة المذكورة آنفاً لا تنطبق فى حالة الأغشية الرقيقة من الحديد أو النيكل أو الكوبلت ، حيث لا تكون زاوية الدوران متناسبة وشدة المجال المغناطيسى . وقد وجد فى حالة الحديد أن زاوية الدوران تتناسب وشدة التمغطس وانها تبلغ نهاية عظمى عند ما تبلغ شدة التمغطس نهايتها العظمى (٢)

٣٣٦ — تعليل حدوث الدوران المغناطيسى

اذا فرضنا أن الاهتزازة المستقيمة تتحلل الى مركبتين مستديرتين متساويتين ومتساويتى المدة ولكنهما فى اتجاهين متضادين ، وفرضنا أن سرعتى انتقالها خلال المادة الموضوعة فى المجال المغناطيسى فى استقامة خطوط القوة مختلفتان ، فانه يحدث بينهما اختلاف فى الطور من جراء نفوذهما خلال المادة ، فيحصلان عند خروجهما منها اهتزازة مستقيمة فى اتجاه يميل بزاوية على اتجاه الاهتزازة المستقيمة الأصلية ، فيمكن على النمط الذى اتبعه فرسنل لتعليل دوران مستوى الاستقطاب فى البلورات الفعالة ، تعليل الدوران المغناطيسى أيضاً ، ولكن الأخذ بهذه النظرية

---

(١) Verdet's Constant

(٢) تعرف شدة التمغطس بشدة القطب فى وحدة المساحات وهى تزداد تبعاً لازدياد المجال الممغطس أو المؤثر ولكنها لا تتناسب واياه ، وتبلغ نهاية عظمى حيث يصير الحديد مشبعاً ولايزداد بعده مهما زادت شدة المجال المؤثر

يتطلب بيان أن سرعة انتقال الضوء المستقطب استقطاباً دائرياً خلال المادة الموضوعة فى مجال مغناطيسى، سرعة انتقاله فى استقامة خطوط القوة تختلف تبعاً لاختلاف اتجاه الاهتزازة المستديرة فى الاستقطاب الدائرى ، أى أن معامل انكسار الضوء المستقطب استقطاباً دائرياً عند نفوذه فى استقامة خطوط القوة يكون بالنسبة الى الضوء الذى اتجاه اهتزازته المستديرة فى اتجاه حركة عقربى الساعة ، غيره بالنسبة الى الضوء الذى اتجاه اهتزازته المستديرة مضاد لذلك . وقد أجرى « ريغى »(١) و « بكرل »(٢) كل على حدته ، تجارب حصلا فيها ، باستخدام ضوء مستقطب استقطاباً دائرياً على هدب تداخل ، وجعلا فيها احدى الحزمتين المتداخلتين تخترق كتلة من الزجاج ، موضوعة بين قطبي مغناطيس كهربائى ، فدلت تجاربهما على أن الهدب تتحول عن مواضعها عند امرار التيار فى ملفات المغناطيس ، وأن اتجاه التحول ينعكس اذا عكس اتجاه الاهتزازة المستديرة فى الضوء المستقطب . فتحقق بذلك الفرض الذى تقوم عليه النظرية

٣٣٧ — ظاهرتا كر

(أولا) الظاهرة الكهربائية

كشف « كر »(٣) فى سنة ١٨٧٥ أن للمجال الكهربائى تأثيراً فى الخواص الضوئية للعازلات الشفافة ، المتشابهة الخواص فى جميع الاتجاهات ، كالزجاج وزيت الزيتون مثلا . واتخذ فى تجاربه كتلة من الزجاج ، قور فيها فى استقامة واحدة وفى اتجاهين متضادين ، خرقين طويلين غير متصلين ، وجعل سمك الزجاج الفاصل بينهما ربع البوصة ، ثم أولج فيهما سلكين متصلين بطرفى ملف رمكرف ، ووضع كتلة الزجاج بين منشورى نكل ، أحدهما مستقطب والآخر محلل ، بحيث ينفذ الضوء خلال كتلة الزجاج فيما بين طرفى السلكين فى اتجاه عمودى عليهما ، وهيأ المنشورين بحيث يكون مستواهما الرئيسيان متعامدين ، فيمنع المحلل نفوذ الضوء منه . فشاهد عند تشغيل ملف رمكرف أن الضوء ينفذ من المحلل ، وأن المحلل لا يمنع نفوذ الضوء منه كيفما أدير . ويدل ذلك على أن نفاذ الضوء المستقطب استقطاباً استوائياً خلال كتلة الزجاج ،

---

(١) Righi (٢) Becquerel (٣) Kerr

وهى موضوعة فى مجال كهربائى يجعل الضوء يتحول بوجه عام الى ضوء مستقطب استقطاباً اهليلجيا ، أى أن كتلة الزجاج تكتسب بفعل المجال الكهربائى خاصة احداث الانكسار المزدوج ، فتتحلل الاهتزازة المستقيمة الى مركبتين تنتقلان بسرعتين مختلفتين وتحصلان عند خروجهما اهتزازة تكون بوجه عام اهليلجية . ودلت تجاربه على أن الظاهرة تعدم ، أو تكاد تعدم ، عند ما يكون اتجاه الاهتزازة فى الضوء المستقطب استوائياً النافذ خلال الزجاج ، موازياً لاتجاه المجال الكهربائى بين طرفى السلكين ، أو عمودياً عليه ، وانها تبلغ غايتها فى الوضوح عند ما ينفذ الضوء فى اتجاه عمودى على المجال الكهربائى ويميل اتجاه الاهتزازة بزاوية قدرها ٤٥ درجة على اتجاه المجال ، وانها تستغرق مدة من الزمن فلا تحدث عند أول تشغيل الملف ، أى لا تحدث فجاءة عند أول احداث المجال الكهربائى ، بل تستغرق ما يقرب من ثلاثين ثانية قبل أن تبلغ غايتها . وتسمى هذه الظاهرة « الظاهرة الكهربائية لكر »[1]

(ثانياً) الظاهرة المغناطيسية

اذا سقط على سطح معدنى عاكس شعاع من الضوء المستقطب استقطاباً استوائياً ، أمكن بالتجربة بيان أن الشعاع المنعكس يكون مستقطباً استقطاباً اهليلجيا ، الا اذا كان اتجاه الاهتزازة فى الشعاع الساقط فى مستوى السقوط ، أو عمودياً عليه ، ففى هاتين الحالتين يظل الشعاع المنعكس مستقطباً استقطاباً استوائياً ، ويظل اتجاه الاهتزازة كما كان . وهذا يدل على أنه يحدث عند الانعكاس عن السطح المعدنى اختلاف فى الطور ، وان الاختلاف فى حالة الاهتزازة العمودية على مستوى السقوط غيره فى حالة الاهتزازة الموازية له حتى اذا كان اتجاه الاهتزازة فى الضوء الساقط لا ينطبق على أحد هذين الاتجاهين ، تحللت الاهتزازة الى مركبتين احداهما فى مستوى السقوط والأخرى عمودية عليه ويحدث عند الانعكاس اختلاف فى الطور بينهما ، فيحصلان اهتزازة تكون بوجه عام اهليلجية

وفى سنة ١٨٧٧ كشف « كر » أنه اذا كان اتجاه الاهتزازة فى الشعاع الساقط المستقطب استقطاباً استوائياً فى مستوى السقوط أو عمودياً عليه . ولكنه يسقط على سطح قطب مصقول

---

(١) The Kerr Electric Effect

لمغناطيس كهربائى شديد . فان اتجاه الاهتزازة فى الشعاع المنعكس يكون مائلا بزاوية صغيرة على اتجاه الاهتزازة الأصلية[١]. أى أن الانعكاس فى هذه الحالة يكون مقروناً بدوران مستوى الاستقطاب فى حين أنه اذا قطع التيار عن ملفات المغناطيس الكهربائى فالانعكاس لا يكون مقروناً بهذا الدوران

ويسمى هذه الظاهرة « الظاهرة المغناطيسية لكر »[٢]

٣٣٨ – الانكسار المزدوج الحادث عن الانفعال

قد يكتسب الوسط الشفاف المتشابه الخواص فى جميع الاتجاهات ، خاصة الانكسار المزدوج بفعل الانفعال الحادث عن اجهاد ميكانيكى واقع عليه . ويمكن بيان ذلك بتجربة يستعمل فيها جهاز بسيط كالمبين بشكل (٣٠٧) يتركب من مكبس صغير ، تكبس بوساطته كتلة من الزجاج . فاذا وضعت كتلة الزجاج بين منشور نكل مستقطب وآخر محلل، وكان مستواهما الرئيسيان متعامدين، ثم كبست كتلة الزجاج، شوهد نفوذ الضوء من المحلل، حتى اذا بطل الانفعال[٣] بازالة الاجهاد، عاد المحلل الى عدم انفاذ الضوء. وعند ما يكون الاجهاد شداً بسيطاً أو ضغطاً بسيطاً فان كتلة الزجاج تعمل عمل بلورة أحادية المحور ، ويكون اتجاه الشد أو الضغط مقابلا للمحور الضوئى . فاهتزازة الضوء المستقطب استقطاباً استوائياً تتحلل الى مركبتين مستقيمتين تنتقلان (شكل ٣٠٧) خلال الزجاج بسرعتين مختلفتين ، فيحدث بينهما اختلاف فى الطور ، وتحصلان عند الخروج اهتزازة تكون بوجه عام اهليلجية ، فيتحول بفعل الزجاج ، الاستقطاب الاستوائى الى استقطاب اهليلجى . واختلاف الطور يختلف باختلاف الطول الموجى ، واذن الضوء الذى ينفذه المحلل عند ما يكون الضوء الساقط على المستقطب أبيض ، يكون ملوناً

---

(١) الشعاع المنعكس فى هذه الحالة يوجد فى الحقيقة مستقطبا استقطابا اهليلجيا ، ولكن نسبة طول المحور الاقصر لاهليلج الاهتزازة الى طول المحور الاطول صغيرة ، فيعتبر الضوء بوجه تقريبى مستقطبا استقطابا استوائيا

(٢) The Kerr Magnetic Effect

(٣) من الجائز أن يكتسب الزجاج انفعالا مستمراً ، اذا تجاوز الاجهاد حداً معينا

وأجرى « تندال » تجربة اتخذ فيها لوحاً مستطيلا من الزجاج ، طوله ستة أقدام ، وعرضه بوصتان وسمكه ربع البوصة ، وجعله مثبتاً عند منتصفه ، ووضعه بين منشورى نيكل بحيث ينفذ الضوء خلال اللوح فى سبيله من المنشور المستقطب الى المنشور المحلل ، وجعل المستويين الرئيسيين للمنشورين متعامدين وأنفذ خلال المستقطب منهما ضوءاً أبيض . فاذا دلك اللوح الزجاجى بقطعة مبلولة من القماش اهتز اهتزازاً طولياً ، محدثاً عند منتصفه عقدة . والعقدة هى الموضع الذى يبلغ عنده بالتوالى كل من التضاغط والتخلخل نهايته العظمى . فاذا كان الجزء الأوسط من اللوح هو الواقع بين المنشورين ، أنفذ المحلل ضوءاً ذا لون معين عند حدوث الاهتزازة ، ويمنع نفوذ الضوء عند وقوفها . والضوء النافذ عند حدوث الاهتزازة متقطع ليس بمستمر ، لأن اللوح يعود الى حالته الطبيعية فى كل مرة يتحول فيها التضاغط الى تخلخل أو التخلخل الى تضاغط ، ولكن نظراً لاستمرار تأثر الشبكية برهة بعد انقطاع الضوء ، يبدو الضوء المتقطع كأنه مستمر . ويمكن باستخدام مرآة دائرة التحقق من أنه متقطع

وكما أن الزجاج الحادث فيه الانفعال يحول الضوء المستقطب استوائياً الى ضوء مستقطب اهليلجيا فهو يحول الضوء المستقطب اهليلجيا الى ضوء مستقطب استوائياً اذا وقع عليه اجهاد مناسب

وتطبق الظاهرة لبيان الانفعالات الموجودة فى الزجاج ، كالانفعالات الحاصلة من جراء تسخينه الى درجات عالية ثم تبريده تبريداً غير منتظم . ومن أمثلة ذلك حبات الزجاج التى يطلق عليها اسم « قطرات الأمير روبرت »[1]. ويمكن صنعها باسقاط قطرات من الزجاج المنصهر فى الماء ، فكرات الزجاج التى لا تتهشم فى أثناء هذه العملية يكون فيها انفعال مستمر ، وتكون لها خاصة احداث الانكسار المزدوج

وتطبق الظاهرة لدراسة كيفية توزع الاجهادات والانفعالات فى القضبان ، وهى مسألة فى فن الهندسة لها أهمية كبرى ، ولا يمكن حلها رياضياً الا فى الحالات البسيطة جداً . والفكرة الأساسية تتلخص فى صنع نموذج من الجسم الذى تقع عليه الاجهادات ، ويصنع من « الزيلونيت »[2] وهو وان كان أقل شفيفاً من الزجاج ، فانه أكثر منه قبولا للانضغاط .

---

(١) Prince Rupert's Drops (٢) Xylonite

ويوضع النموذج بحيث ينفذ خلاله ضوء مستقطب استقطاباً استوائياً . وللحصول على هذا الضوء تهيأ عدة مصابيح كهربائية خلف لوح نصف شفاف ، ويستقطب الضوء النافذ من اللوح بعكسه عند سطح لوح اسود من الزجاج . فيمرر هذا الضوء المستقطب بالانعكاس خلال النموذج ، وينظر اليه خلال منشور نكل (محلل) موضوع بحيث يكون مستواه الرئيسى منطبقاً على مستوى الاستقطاب . فأجزاء النموذج الخالية من الانفعال تظهر مظلمة ، والأجزاء الحادث فيها الانفعال تظهر ملونة ، ويختلف لونها تبعاً لاختلاف قدر الانفعال فيها . فاذا ضوهيت الألوان بالألوان الحادثة فى قضيب يقع عليه اجهاد بسيط معلوم ، أمكن التوصل الى معرفة الاجهادات والانفعالات فى النموذج