

البصريّات



جامعة التحدي - سرت

عبد الكاظم ماجود عون

البصريات

Optics

البصريات

د. عبد الكاظم ماجود عون
استاذ مساعد / قسم الفيزياء
كلية العلوم / جامعة التحدي

Optics

Dr. Abdulkadhim M.A.AWN
Physics department
Faculty of Science
Altahady University

الطبعة الأولى: 2002

الوكالة الليبية للترقيم الدولي الموحد للكتاب

دار الكتب الوطنية، بنغازي - ليبيا.

هاتف: 9090509 - 9096379 - 9097074، فاكس: 9096380

ردمك: 9959-805-27-1

رقم الإيداع: 4408

حقوق النشر محفوظة للناس:

جامعة التحدي . سرت . الجماهيرية العظمى .

هاتف: 62694 - 68240، فاكس: 62152 - 54 - 00218

E-mail: tahdi51@hotmail.com

الاحتفاء

إلى انتفاضة الشعب
اللسطيني في عامها الثاني
من أجل الانتصار النهائي
وتحرير كامل الوطن من أيدي
الغزاة الصهاينة.

شكر

انقدم بشكري ومديري لحامعة التحدي على إتاحتها الفرصة لي لكي يدرس كتابي هذا النور الذي يبحث فيه . كما واشكر باعتزاز كلية العلوم على تعصيدها الدائم لي .

بامتنان وحب خاصين اتقدم لعائلتي - زوجتي السيدة دلال الطائي على سهرها الليلي الطوال معي لانجاز الكتاب، متكفلة بالتصحيح اللغوي، واشكر ولدي الحبيب نورس لرسوماته الجميلة، كما واشكر ابنتي أوراس لمساعداتها في مجال اللغات الأجنبية التي كثيراً ما احتجتها شكراً لكل من قدم لي ما كان نافعاً في مجال عملي .

د . عبد الكاظم ماجود عون

سرب نهاية عام

توطئة

مصطلح البصريّات هو اختصار لعبارة «علم الحواس البصرية» والكلمة أصلها إغريقي، وهي حقل الفيزياء الذي تدرس فيه خواص الضوء وانتشاره خلال الأوساط المختلفة، والظواهر المشاهدة عند تفاعله مع المواد. إن التطبيقات التقليدية للضوء، تشتمل على العدسات المعالجة للرؤيا وتشكيل الصورة بواسطة التلسكوبات والمكروسكوبات. أما التطبيقات الحديثة للضوء فهي تشتمل على تخزين المعلومات واسترجاعها، ونقل الإشارة خلال كوابل الألياف البصرية القادرة على نقل أكبر معلوماتية قياساً بأسلاك النحاس وأقل وزناً منها وأرخص كلفة.

في الفصل الأول عرضنا الأمواج الكهرومغناطيسية كتحديد ينتمي إليه الضوء وفي الفصل الثاني كشفنا عن طبيعة الضوء وانتشاره. أما الفصول 3، 4، 5، و6 فكرسنا فيها مفاهيم أن الضوء ينتشر بخطوط مستقيمة ويصادم أجساماً ذات مقاييس كبيرة وله أجهزته وتطبيقاته. وهذا هو عالم البصريّات الهندسية، التي تتضمن دراسة خواص المرايا والعدسات والأجهزة البصرية.

إن مرور الضوء خلال شقوق ضيقة جداً أو حول حواجز محدودة جداً، قد تتقارن أبعادها مع طوله الموجي، يشكل ما يعرف بالبصريّات الفيزيائية (أو البصريّات الموجية)، التي أسست على ظواهر التدخل، الحيود، فكانت هذه موضوعات الفصول 7، 8، و9.

إن الموجة بوصفها ذبذبة (أو هزة) منتشرة في الفضاء (أو في الوسط المادي) تتميز بخصوصية إمتلاكها لمستوى اهتزاز معين (موجة مستوية) أو عدة مستويات (موجة بثلاثة أبعاد)، وهذا ما يعرف بالاستقطاب الذي كرسنا له الفصل العاشر.

ثمة ظواهر عديدة، خصوصاً تلك المتعلقة بعمليات امتصاص وانبعاث الاشعاع الكهرومغناطيسي، تطرح مفهوماً أو نموذجاً للضوء مختلف تماماً عن الطبيعة الموجية التي أكدتها ظواهر التداخل والحيود، ذلك هو المفهوم الكمومي للضوء (للاشعاع الكهرومغناطيسي)، فطاقة الاشعاع الكهرومغناطيسي تنبعث وتمتص بهيئة رزم بمقادير محددة بدقة واحدة لا

تقبل التجزئة، تدعى الفوتونات أو الكمات، تتناسب طاقة الفوتون الواحد منها مع تردد الاشعاع، وفي بعض التجارب يسلك الضوء والاشعاع الآخر مثل تيار من الجسيمات، وهنا يقال إن طاقة الاشعاع مكمنة. لمفهوم البصريات الكمومية كرسنا الفصل الحادي عشر. أما الفصل الحادي عشر، فكرسناه لأهم مبادئ وأسس ثمرة البصريات الكمومية - الليزر.

أمل أن أكون بعلمي المتواضع هذا قد قدمت شيئاً مفيداً لأبنائي طلبة قسم الفيزياء خصوصاً، وطلبة كليات العلوم، الهندسة، الطب، والزراعة عموماً.

د. عبد الكاظم ماجود عون

استاذ مساعد / قسم العلوم التطبيقية

كلية العلوم / جامعة التحدي

الفتاح / سبتمبر ٢٠٠١

الفصل الأول

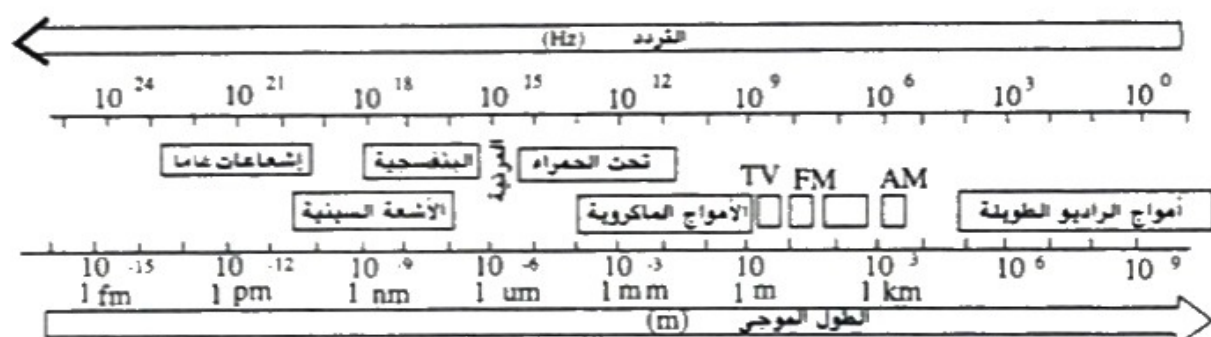
المواد الكهرومغناطيسية

في هذا الفصل نبين كيف أن معادلات الأمواج الكهرومغناطيسية تتبع أو تتحدر من معادلات ماكسويل (Maxwell's equations) ونتناول بالتفصيل صفات الأمواج المحصلة. سنعتبر الأمواج الجيبية ونصفها بعبارات مألوفة، كالسعة، التردد، الطول الموجي، والسرعة الطورية. في هذا الفصل نتناول الأمواج الكهرومغناطيسية بصورة عامة، وفي الفصل الذي يليه نتناول خواص الأمواج الضوئية بتفصيل أكثر، ومن خلال هذين الفصلين ندرس البصريات في الفصول اللاحقة.

(1 - 1) الطيف الكهرومغناطيسي

في زمن ماكسويل لم يكن معروفاً من الاشعاع غير الضوء والأشعة تحت الحمراء وفوق البنفسجية المجاورتين له. واليوم أصبح الطيف الكهرومغناطيسي (شكل 1) يشمل نطاقاً واسعاً من أنواع الاشعاعات المختلفة المتولدة من مصادر متنوعة. ومن نظرية ماكسويل يمكن الاستنتاج أنه بالرغم من أن هذه الاشعاعات تختلف كثيراً في صفاتها، في وسائل انتاجها، وفي طرق مشاهدتها، فهي تتميز بالكثير من الخصائص المشتركة: فجميعها يمكن وصفها بعبارتي المجالين الكهربائي والمغناطيسي، وجميعها تتحرك في الفضاء بنفس السرعة (سرعة الضوء).

ومن حيث الجوهر، فإن جميع هذه الاشعاعات تختلف فقط في طولها الموجي أو ترددها. فليس ثمة طريقة عملية للتمييز بين موجة في المنطقة المرئية من الطيف وأخرى في منطقة الأشعة تحت الحمراء، فالأمواج لها أشكال متطابقة وأوصاف رياضية متطابقة، وليس هناك فواصل أو فجوات في الطيف، بمعنى أن لا حدود حادة بين منطقة طيفية وأخرى مجاورة. (تحدد بعض مناطق الطيف تبعاً لامكانية استغلالها، مثل AM, FM, TV).



شكل 1-1 الطيف الكهرومغناطيسي ويلاحظ فيه أن مقاييس λ و ν لوغاريتمية.

يمكن تناول بعض مناطق الطيف الكهرومغناطيسي بشيء من التفصيل:

1. الضوء: وتمثله المنطقة المرئية من الطيف، وحدوده تمتد من 400 nm (البنفسجي) إلى 700 nm (الأحمر). ينبعث الضوء غالباً عندما تغير الإلكترونات الخارجية (الكترونات التكافؤ) في الذرات والجزيئات حالة حركتها، لهذا السبب تدعى مثل هذه الانتقالات بالانتقالات البصرية. إن لون الضوء يعبر عن بعض الحقائق عن الذرات أو الجسم الذي انبعث منه. ودراسة ضوء الشمس والنجوم البعيدة تعطينا معلومات عن تركيباتها.

2. الأشعة تحت الحمراء: وتقع على يمين الضوء المرئي باتجاه الأمواج الطويلة، وتمتد من $0.7 \mu m$ إلى 1mm تقريباً، وتنبعث غالباً بواسطة الذرات أو الجزيئات عندما تغير حركتها الدورانية أو الاهتزازية. ويظهر هذا التغير غالباً كتغيير في الطاقة الداخلية للجسيم الباعث ويشاهد كتغيير في الطاقة الداخلية للجسيم الذي يكشف الاشعاع. ولهذا، فإن الأشعة تحت الحمراء تغدو وسيطاً هاماً للنقل الحراري وتدعى أحياناً بالاشعاع الحراري، فالحرارة التي نشعر بها عند وضع يدنا بالقرب من مصباح متوهج ناتجة عن الاشعاع تحت الأحمر المنبعث من زجاجة المصباح. وجميع الجسيمات تبعث اشعاعاً كهرو - مغناطيسياً (يعرف بالاشعاع الحراري) بسبب درجة حرارتها. فالجسيمات ذات درجات الحرارة التي تتراوح بين 3K إلى 3000 K تبعث معظم اشعاعها الحراري الأكثر شدة في منطقة الأشعة تحت الحمراء من الطيف الكهرومغناطيسي.

تستخدم الأشعة تحت الحمراء في تصوير المجرات الفضائية واعطاء المعلومات عن مكوناتها.

3 - الأمواج الميكروية: يمكن النظر إلى الأمواج الميكروية كأمواف راديوية قصيرة، بأطوال موجية تتراوح بين 1mm إلى 1m. وهي تنتج عادة بواسطة مذبذبات كهرومغناطيسية في دوائر كهربائية، كما في حالة أفران الميكروويف. تستخدم الأمواج الميكروية غالباً لنقل المحادثات التليفونية.

يمكن كذلك أن تصلنا الأمواج الميكروية من مصادر من خارج الأرض. فالمركبة الأكثر وفرة في الكون هي اشعاع الخلفية الميكروي، الذي يعتقد بأنه الاشعاع الكهرومغناطيسي الذي رافق «الانفجار الأعظم» كرة النار كبداية لميلاد الكون قبل 10^{10} من السنين.

4 - الأمواج الراديوية: أطوالها الموجية أطول من متر، وتنتج من مصادر أرضية بواسطة الالكترونات المهتزة في أسلاك الدوائر الكهربائية. فبالاختيار الدقيق لهندسة هذه الدوائر، كما في الهوائي، يمكن السيطرة على فضاء الاشعاع المنبعث (إذا أثر الهوائي كمرسل) أو حساسية الكاشف (إذا أثر الهوائي كمستقبل).

الأمواج الراديوية الواصلة إلينا من مصادر خارج الأرض، والشمس هي المصدر الرئيسي الذي غالباً ما يتداخل مع الأمواج الراديوية أو أمواج TV المستقبلية على الأرض، وكذلك المشتري. هذه الأمواج تعرف بالأمواج الفلكية. 5. المنطقة فوق بنفسجية: أطوالها الموجية أقصر من الضوء المرئي، تبدأ من 400 nm إلى 1 nm، ويمكن أن تنتج من الانتقالات الذرية للالكترونات الخارجية وكذلك من اشعاع المصادر الحرارية كالشمس. ولأن غلافنا الجوي ماص شديد للأطوال الموجية فوق بنفسجية، فإن القليل من أشعة الشمس عند هذه الأطوال الموجية يصل إلينا.

6. الأشعة السينية: الاشعاعات السينية (وأطوالها الموجية العادية من 0.01 nm إلى 10 nm) يمكن أن تنتج بأطوال موجية متقطعة في انتقالات فردية فيما بين الالكترونات الداخلية للذرة، أو بتبطئة جسيمات مشحونة (كالالكترونات). الأطوال الموجية للأشعة السينية تطابق إلى حد ما الفضاءات بين ذرات الصلب، وبالتالي استطارة الاشعاعات السينية من المواد طريقة مفيدة لدراسة بنية هذه المواد. الاشعاعات السينية قادرة على اختراق الأنسجة الرخوة غير الصلبة ولكنها تتوقف بواسطة العظام والمواد الصلبة الأخرى، لهذا السبب نجد لها استخدامات واسعة في التشخيص الطبي. وهناك أشعة سينية كونية تتبعث من كواكب كثيرة كالشمس.

7. اشعاعات غاما: وهي اشعاع كهرومغناطيسي بأقصر الأطوال الموجية (أقل من 10 pm) وأكثر قدرة على الاختراق من كل الاشعاعات الكهرومغناطيسية،

والتعرض لها عندما تكون شديدة يمكن أن تكون له آثار ضارة على جسم الإنسان، هذه الاشعاعات يمكن أن تنبعث في انتقالات الأنوية الذرية من حالة إلى أخرى ويمكن أن تظهر أيضاً في انحلال جسيمات أولية معينة. فمثلاً، البيون المتعادل يمكن أن ينحل إلى شعاعين غاما طبقاً لـ :

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$$

كذلك الالكتران والبوزترون (ضديد الالكتران) يمكن أن ينحلا إلى شعاعين غاما :

$$e^- + e^+ = \gamma + \gamma$$

هذه العمليات وكل عملية مماثلة لها تبعث اشعاعات غاما وحييدة الطول الموجي، أما اشعاعات غاما الكونية فتسجل كشواهد على عمليات نووية خاصة.

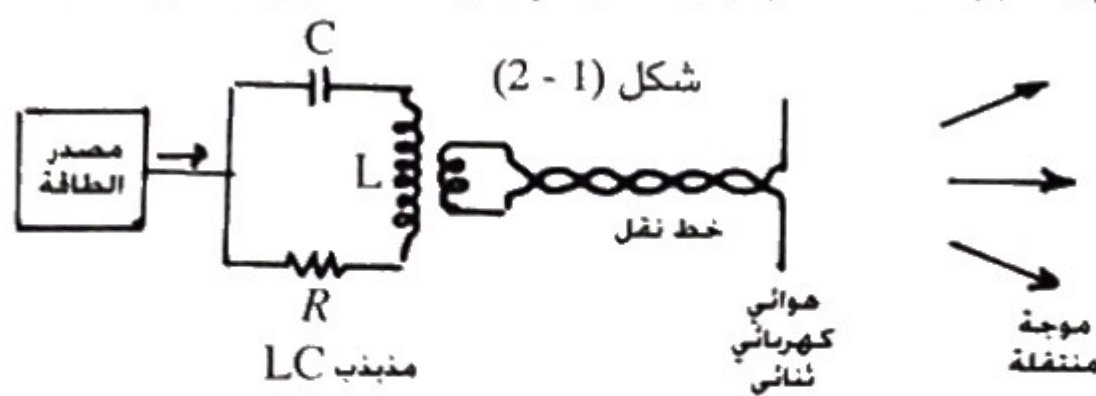
في الختام يمكن أن نصل إلى خلاصة مفادها أن وصف انبعاث الاشعاع الكهرومغناطيسي كظاهرة موجية يركز على مفهوم قائم بذاته ينص على أن ذرات الأنظمة التي تبعث الاشعاعات تسلك سلوكاً تعاونياً؛ فمثلاً، مشاركة الالكترونات من ذرات عديدة ضروري لانبعاث الضوء من الفتيلة الساخنة للمصباح الضوئي. يمكن كذلك دراسة انبعاث الاشعاع الكهرومغناطيسي بواسطة ذرة واحدة، وفي هذه الحالة يجري التركيز على حزمة طاقة كهرومغناطيسية واحدة (وتدعى الكمة)، حيث يتم النظر للاشعاع ليس كموجة متغيرة بصورة إنسيابية، ولكن كحزمة طاقة كهرومغناطيسية، وهذا يساعد بدوره على تفسير بعض التجارب التي لا تبدو منسجمة مع التفسير الموجي للضوء.

(1 - 2) توليد الأمواج الكهرومغناطيسية

تنتج الشحنة الكهربائية الساكنة شكلاً أو نموذجاً لخطوط مجال كهربائي، والشحنة المتحركة بسرعة ثابتة تُنتج شكلاً لخطوط مجال مغناطيسي إضافة لخطوط المجال الكهربائي، وحالما تبلغ الشروط المستقرة (بعد أن تصبح الشحنة في حالة حركة وتستقر خطوط المجال في الفضاء) تنوجد كثافة طاقة في الفضاء مترافقة مع المجالين، الكهربائي والمغناطيسي، وتبقى ثابتة

في الزمن، فلا إشارة كهربائية تنتقل من الشحنة إلى نقاط بعيدة، ولا طاقة أو كمية حركة ولا إشعاع كهرومغناطيسي. هذا من جهة ومن جهة أخرى إذا هزنا الشحنة خلفاً وأماماً، نستطيع بذلك إرسال إشارات إلى أماكن بعيدة تتوفر فيها الأدوات الضرورية لتسجيل التغيرات في المجالين الكهربائي والمغناطيسي. ومع إعادة ترتيب النظام الشفري (الكود) نستطيع إرسال المعلومات بواسطة اهتزاز الشحنة بمعدل معين أو باتجاه معين. في هذه الحالة يمكننا إرسال الإشارات بواسطة الموجات الكهرومغناطيسية. ولإنتاج هذه الموجة من الضروري تسريع الشحنة لأن الشحنات الساكنة والمتحركة بسرعة ثابتة لا تشع؛ إن الشحنات المتسارعة فقط هي التي تشع. بمعنى آخر، إن الحركة المنتظمة للشحنة هي تيار لا يتغير مع الزمن، والحركة المتسارعة لها تطابق تياراً يتغير مع الزمن، وهكذا يمكن وبصورة مكافئة تماماً النظر إلى الإشعاع كما لو أنه منتج بواسطة تيارات متغيرة - زمنياً. عملياً، نجد أن الأسلوب الملائم لتوليد الأمواج الكهرومغناطيسية هو جعل التيار في الأسلاك يتغير مع الزمن.

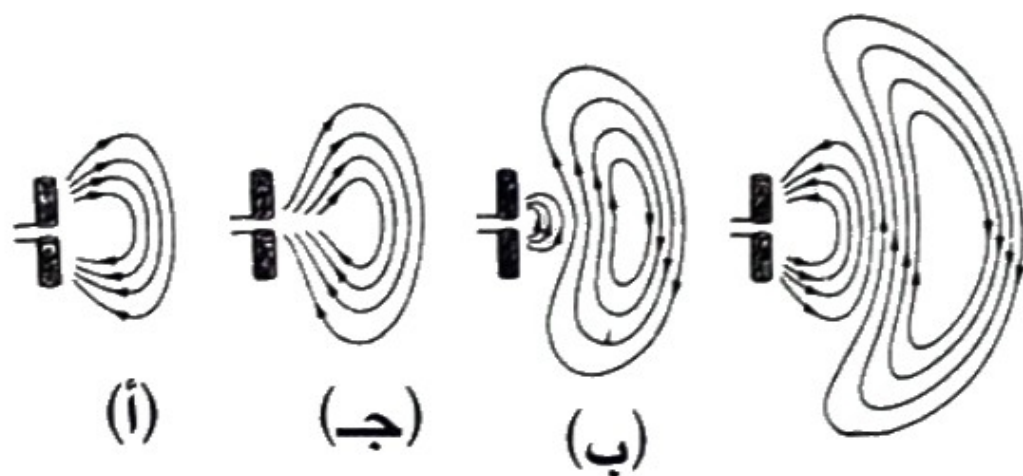
ولتبسيط الأمر نفترض تغيراً زمنياً جيبياً في التيار. ولتحقيق هذا الفرض يمكن الاستعانة بالدائرة الكهربائية الموضحة على الشكل 1 - 2، وهي تتكون من دائرة اهتزازية RLC مع مصدر طاقة خارجي يجدد الطاقة المتبددة في الدارة أو المحمولة بعيداً بواسطة الإشعاع. والتيار في هذه الدارة يتغير جيبياً مع التردد الرنيني الزاوي ω للمرنان الذي يقترب من $1/\sqrt{LC}$ إذا كان الضياع المقاومي (خسارة الطاقة بسبب المقاومة) صغيراً، هذا المذبذب يُزدوج (يُربط) خلال محول إلى خط نقل يُستخدم لحمل التيار إلى الهوائي (سلكين - كبل، متحداً المركز يحملان الإشارات التلفزيونية إلى بيوت عدة).



شكل 1 - 2 ترتيب لتوليد موجة كهرومغناطيسية من نوع الأمواج الراديوية القصيرة.

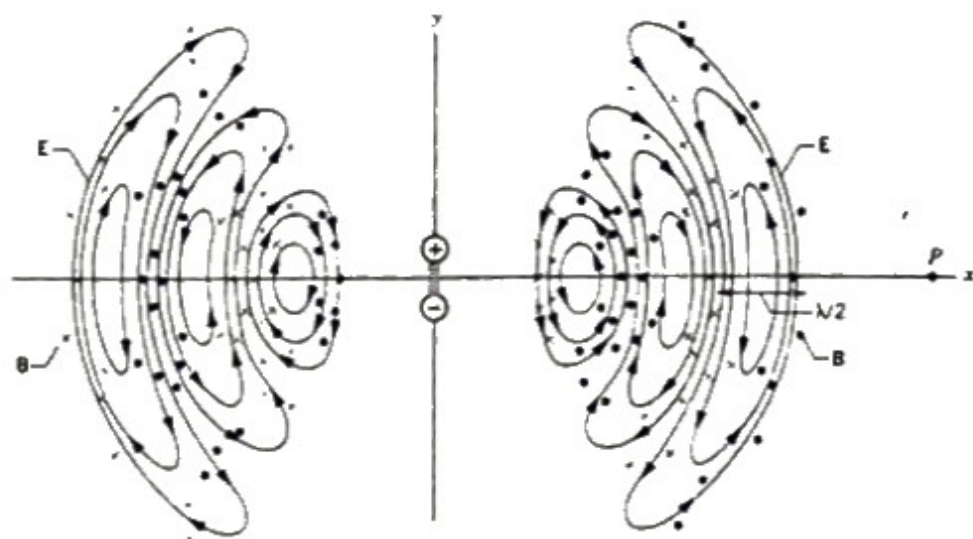
إن هندسة الهوائي تحدد الصفات الهندسية للمجالين المشعّين (الذين تم اشعاعهما) الكهربائي والمغناطيسي. إن الهوائي الثنائي، المبين في الشكل 1 - 2، يمكن اعتباره كموصلين مستقيمين تتزوج فيهما الشحنات أماماً وخلفاً بتردد حر w مندفعة (الشحنات) بواسطة المذبذب. وبالتالي، يمكن اعتباره كثنائي كهربائي هزاز، يحمل أحد فرعيه شحنة آنية q . ويحمل الفرع الآخر $-q$. بتغير الشحنة q جيبياً مع الزمن وتغير اشارتها كل نصف دورة، تتسارع الشحنتان عندما تتحركا أماماً وخلفاً في الهوائي، ونتيجة لذلك يصبح الهوائي مصدراً لاشعاع ثنائي كهربائي. فعند أية نقطة في الفضاء يوجد مجالين، كهربائي ومغناطيسي، يتغيران جيبياً مع الزمن.

يبين الشكل 1 - 3 سلسلة من «اللقطات الفوتوغرافية» التي تعطينا صورة تخطيطية لكيفية اشعاع (تكون) المجال الاشعاعي. ويظهر في الشكل المجال الكهربائي فقط، أما المجال المغناطيسي فيمكن الاستدلال عليه من التيار في الموصلين وفقاً لقاعدة اليد اليمنى.



شكل 1 - 3: المراحل المتعاقبة في انبعاث الموجة المنتقلة. تماماً كما هي من الهوائي 1 - 2، باستثناء، أن أنماط (أو أشكال) المجال الكهربائي أظهرت هنا.

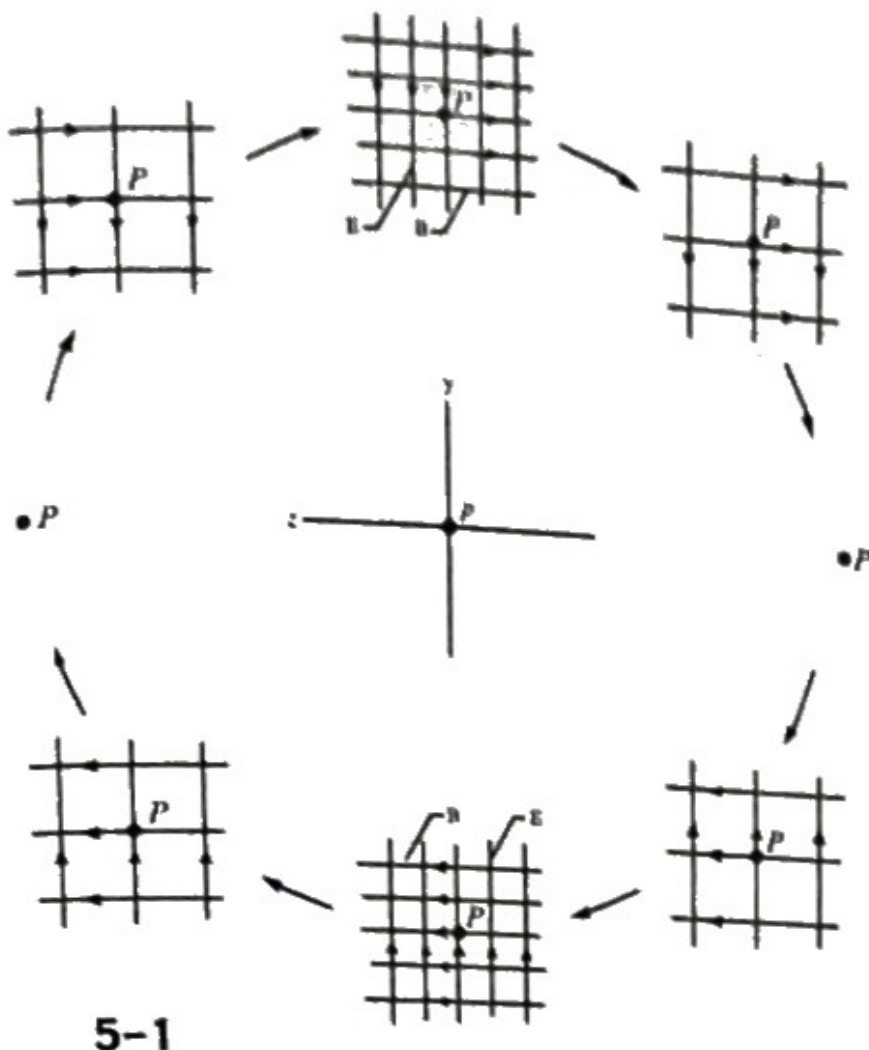
والشكل 4 يعطينا منظراً أكثر اكتمالاً للموجة الكهرومغناطيسية التي يمكن أن تكون متولدة بواسطة الهوائي.



شكل 1 - 4: المجال الكهربائي $\vec{E}$ والمغناطيسي $\vec{B}$ ، المُشعَّان من ثنائي كهربائي ويظهران عند مسافات كبيرة قياساً بأبعاد الثنائي: بحيث أن المشاهد البعيد عن النقطة P يسجل موجة مستوية متحركة في الاتجاه X.

يمثل الشكل 4: شريحة خلال المستوى x, y ، ولكي نحصل على صورة أكثر اكتمالاً للمجال، علينا أن نتخيل دوران الشكل حول محور y . نفرض أننا نشاهد المجال عند مسافات كبيرة من الثنائي قياساً بأبعاده وبالطول الموجي للاشعاع، ومثل هذا المجال المشاهد تحت هذه الشروط يدعى المجال الاشعاعي، عند المسافات الصغيرة، نشاهد مجالاً يدعى «المجال القريب» وهو أكثر تعقيداً ولن نناقشه هنا. يلاحظ هنا أيضاً أن المجال ينفصل عن الهوائي ويشكل حلقات مغلقة خلافاً للمجال الساكن (الاستاتي). للثنائي الكهربائي، الذي تبدأ فيه خطوط المجال من الشحنات الموجبة وتنتهي عند السالبة.

المنظر البديل (أو الخياري) للمجال الاشعاعي يوضحه الشكل 5، الذي يمثل سلسلة من اللقطات الفوتوغرافية للمجالين الكهربائي والمغناطيسي الممسوحين توالياً بواسطة مشاهد متموضع عند النقطة P على محور x .



5-1

شكل 1 - 5: ثمان لقطات (فوتوغرافية) دورية لموجة كهرومغناطيسية مستوية مُشعة من الثنائي الهزاز المبين في الشكل 4، فشاهده من عند النقطة P . إن اتجاه انتشار الموجة (وهو الاتجاه x في الشكل 4) هو خارج مستوى الصفحة، وخطوط المجال $\vec{E}$ رأسية، بينما $\vec{B}$ أفقية.

بافتراض أن المشاهد متموضع بعيداً عن الثنائي بحيث يمكن اعتبار الجبهات الموجية كمستويات، وكما هي الحالة دائماً، فإن كثافة خطوط المجال تشير إلى قوة المجال. ويلاحظ على وجه الخصوص أن $\vec{E}$ و $\vec{B}$ (1) في الطور (كلاهما يبلغان قيمتيهما العظميين عند نفس اللحظة، وكلاهما يصبحان صفراً عند نفس اللحظة)، و $\vec{E}$ و $\vec{B}$ متعامدان الواحد على الآخر. هذه الخلاصة تتبع من تحليل الأمواج الكهرومغناطيسية المنتشرة في فضاء حر باستخدام معادلات ماكسويل، التي سنلخصها في الفقرة اللاحقة. كخاصية إضافية لهذا الإشعاع، والتي سنناقشها لاحقاً في فصل

الاستقطاب، هي أنه مستقطب خطياً، بمعنى أن المتجه $\vec{E}$ متجه بامتداد نفس الخط في كل مكان، وفي الحالة المدروسة باتجاه y . وهذا يبقى حقيقة عند جميع النقاط على محور x . هذا الاتجاه للاستقطاب يتحدد باتجاه محور الثاني. إن الضوء المنبعث من مجموعة فوضوية من الذرات، مثل هتيلة مصباح عادي، هو ضوء غير مستقطب، ففي الحقيقة إن الثنائيات الذرية تتوجه عشوائياً في الفضاء باستثناء الليزر الذي تستحث ذراته على بعث الاشعاع بامتداد محاورها الثنائية المتراصفة، وبالتالي، فإن ضوء الليزر هو ضوء مستقطب.

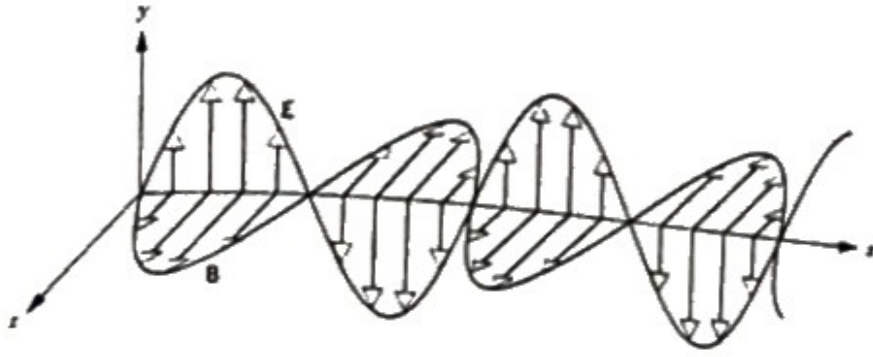
(1 - 3) الموجات المنتشرة ومعادلات ماكسويل

أعطت المناقشة المجرأة في الفقرة السابقة صورة نوعية لنموذج واحد للموجة الكهرومغناطيسية المنتشرة؛ والآن نعتبر الوصف الرياضي للموجة؛ نفرض أن المشاهد في الشكل 1 - 4 كان موجوداً على مسافة كبيرة من الثنائي المهتز بحيث أن جبهات الأمواج المارة بالنقطة P (المبينة في الشكل 5 - 1) تصبح مستوية؛ وخطوط E توازي المحور y ، بينما خطوط B توازي محور Z . نكتب المجالين E و B بالشكل الرياضي التقليدي لموجة جيبية منتقلة:

$$E(x,t) = E_m \sin(Kx - \omega t), \quad (1 - 1)$$

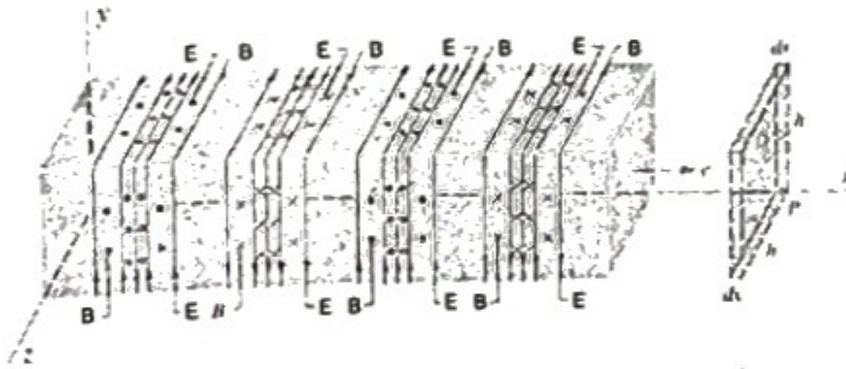
$$B(x,t) = B_m \sin(Kx - \omega t). \quad (2 - 2)$$

حيث ω هنا هو التردد الزاوي المرافق للثنائي المهتز، و K هو العدد الموجي الذي يعني عادة $2\pi/\lambda$. فإذا انتشرت الموجة بسرعة طورية مقدارها c ، فإن ω و K يرتبطان بالعلاقة $C = \omega/K$. ويمكن مشاهدة المجالين $\vec{E}$ و $\vec{B}$ متمثلين في ذبذبة جيبية كدالة لـ x عند لحظة معينة من الزمن على الشكل 1 - 6 أما سعتي المجالين $\vec{E}_m$ و $\vec{B}_m$ فستظهران لاحقاً أنهما ترتبطان الواحدة بالأخرى. ويلاحظ هنا أيضاً أن مقداري المجالين $\vec{E}$ و $\vec{B}$ (أي E و B) في المعادلتين (1 - 1) و (2 - 1) يفترض أنهما في الطور بمعنى أن ثابت الطور في المعادلتين المذكورتين له نفس القيمة. وسيتبين لاحقاً أن هذا الاختيار نابع من معادلات ماكسويل.



شكل 1 - 6 إستقطاب خطي لموجة مستوية متغيرة جيبياً في الاتجاه $+X$. والشكل يمثل لقطات (فوتوغرافية) عند زمن معين.

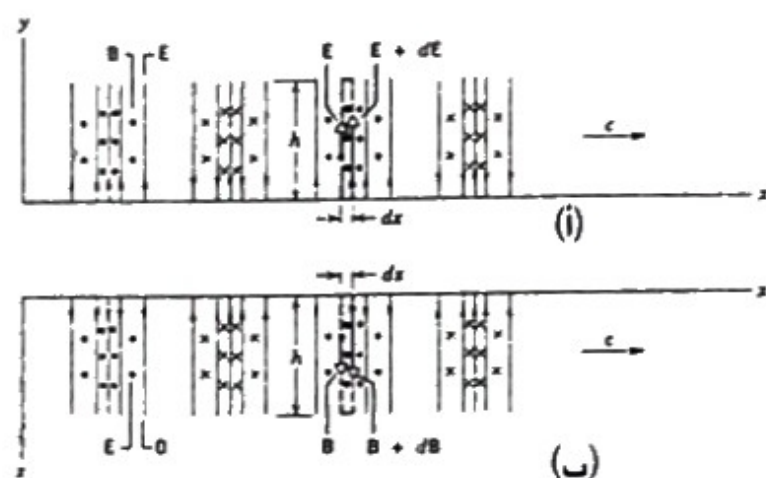
يبين الشكل 1 - 7 لقطات (فوتوغرافية) ثلاثية الأبعاد لموجة مستوية تنتقل بامتداد محور X ؛ وهو يمثل طريقة لظهور نفس الموجة المعروضة في الشكل 6. فلو اعتبرنا الموجة عندما تمر خلال صندوق قائم رقيق عند النقطة P في الشكل 1 - 7 وفي الشكل 1 - 8 رسم مقطعين خلال موجة ثلاثية الأبعاد، أظهر في الجزء (أ) منه مقطعاً موازياً للمتسوى xy ، وفيه تقع خطوط المجال $\vec{E}$ ، بينما تكون خطوط المجال $\vec{B}$ عمودية عليه. وفي الجزء (ب) من الشكل 8 - 1 تقع خطوط المجال $\vec{B}$ في المقطع الموازي للمستوى xz ، وتكون خطوط $\vec{E}$ عمودية عليه.



شكل 7: تمثيل آخر للموجة المستوية المبينة على الشكل 1 - 6 ويظهر فيه أن الطاقة تنتقل خلال صندوق افتراضي رقيق عند النقطة P . يلاحظ أيضاً أن المتجه $\vec{E} \times \vec{B}$ متوجه عند جميع نقاط الموجة في الاتجاه الذي تتحرك فيه الموجة.

عندما تمر الموجة فوق المستطيل الثابت في الشكل 8 - (أ)، يتغير الفيض المغنطيسي خلال المستطيل، ما يكسب المجال الكهربائي المحتث حول

المستطيل زيادة في قيمته طبقاً لقانون فاراداي في الحث. هذا المجال الكهربائي المحث هو ببساطة المجال الكهربائي المرافق للموجة المنتقلة. ولكي نرى ذلك بتفصيل أكثر نطبق قانون لينز (Lenz's law) على العملية الحثية. إن الفيض المغنطيسي Φ_B بالنسبة للمستطيل المظلل في الشكل (1 - 8) (أ) يتناقص مع الزمن، لأن الموجة متحركة خلال المستطيل. إلى اليمين، وإن منطقة المجال المغنطيسي الاضعف تتحرك إلى هذا المستطيل، يعمل المجال المحث ضد هذا التغيير، الذي يعني أنه إذا تخيلنا أن تكون حدود المستطيل المظلل حلقة موصلة، فإن تياراً محتثاً معاكساً لاتجاه عقرب الساعة سوف يظهر فيها. هذا التيار سيحث مجالاً مغنطيسياً $\vec{B}$ يتجه خارج الصفحة، بما يعاكس النقصان في الفيض المغنطيسي Φ_B .



شكل (1 - 8): (أ) الموجه المبينة على الشكل 1 - 7 مشاهدة في المستوى xy. عندما تكتسح الموجة مناطق أبعد، يتغير الفيض المغنطيسي خلال المستطيل المظلل، حاثاً مجالاً كهربائياً. (ب) موجه الشكل 7 وهي مشاهدة في المستوى xz. عندما تكتسح الموجة مناطق أبعد، يتغير الفيض الكهربائي خلال المستطيل المظلل، حاثاً مجالاً مغنطيسياً.

في حقيقة الأمر، ليس هناك ثمة حلقة موصلة، لكن هناك صافي مجال كهربائي محث سيكون متساوياً مع هذا التفسير، لأن المجال الكهربائي الأكبر $E + dE$ على الجانب الأيمن للحلقة سيكسب صافي التيار المعاكس لاتجاه عقرب الساعة زيادة في هذه الاثناء، وهكذا فإن بنية المجال الكهربائي المبينة في الشكل (1 - 8) (أ) تتساوق مع مفهوم أن هذا المجال

محتت بواسطة المجال المغنطيسي المتغير.
وبصورة مماثلة، عندما تمر الموجة فوق المستطيل المظلل في الشكل (1 - 8) (ب)، يتغير الفيض الكهربائي خلال المستطيل، مُكسباً بذلك زيادة في قيمة المجال المغنطيسي المحتت (هذه الظاهرة تعتمد على التيار الإزاحي الذي سنرى أهميته في معادلات ماكسويل).
يمكننا أن نرى أن تغيرات المجالين $\vec{E}$ و $\vec{B}$ تكون مرتبطة الواحدة بالأخرى. فيما يعطينا المجال الكهربائي المتغير $\vec{E}$ ارتفاعاً في قيمة المجال المتغير $\vec{B}$. يُعطي هذا الأخير ارتفاعاً في قيمة المجال المتغير $\vec{E}$ ، وهكذا دواليك، بهذه يغدو مجالاً الموجة $\vec{E}$ و $\vec{B}$ مغزياً أحدهما الآخر خلال الفضاء الخالي، وليس ثمة حاجة للوسط لكي تنتشر الموجة.

الوصف الرياضي للموجة المنتقلة

لتحليل أكثر تفصيلاً، نطبق قانون فاراداي للحث:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \frac{d\phi_B}{dt} \quad (1 - 3)$$

ذاهبين عكس اتجاه عقارب الساعة حول المستطيل المظلل في الشكل (1 - 8) (i) في هذا التكامل لا تساهم قمة المستطيل المظلل (شكل 1 - 8 ب) ولا قاعدته لأن المجال $\vec{E}$ والازاحة $d\vec{s}$ هنا يواجهان عند زوايا قائمة. بمعنى أن الذي يساهم في التكامل زعلاه هو الجانب h فقط من أجل $\vec{E}$ متغيراً من $\vec{E}$ إلى $\vec{E} + d\vec{E}$:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = (E + dE)h - Eh = dEh$$

أما الفيض المغنطيسي لهذا المستطيل، بوصفه حاصل ضرب المجال في المساحة، فيساوي:

$$\phi_B = (B) (dxh),$$

حيث B هو مقدار المجال المغنطيسي $\vec{B}$ عند الشريط المستطيل و dxh هي مساحة الشريط، وبمفاضلة هذا الفيض نحصل على:

$$\frac{d\phi_B}{dt} = h dx \frac{dB}{dt}$$

ومنه، نجد من المعادلة (3 - 1).

$$dEh = -h dx \frac{dB}{dt}$$

أو

$$\frac{dE}{dx} = - \frac{dB}{dt} \quad (1 - 4)$$

بمعنى أن تغير المجال الكهربائي بالنسبة للاحداثي x يتزامن (ويترافق) مع تغير المجال المغنطيسي بالنسبة للزمن. وفي الحقيقة أن كلا المجالات $\vec{E}$ و $\vec{B}$ دالتان في الزمن. فعند تقييم التفاضل dE/dx يفترض أن يكون الزمن t ثابتاً لأن الشكل 1 - 8 (أ) هو لقطة (فوتوغرافية) آنية، كذلك عند تقييم dB / dt يفترض أيضاً أن تكون x ثابتة لأن المطلوب هو المعدل الزمني لتغير $\vec{B}$ عند مكان معين، وهو الشريط في الشكل 1 - 8 (أ). إن التفاضلات تحت هذه الظروف هي تفاضلات جزئية. ولهذا يمكن إعادة كتابة المعادلة (4 - 1) بالصورة.

$$\frac{\partial E}{\partial x} = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (1 - 5)$$

والإشارة السالبة (-) في هذه المعادلة تعني أن $\vec{E}$ تزداد مع x عند موقع المستطيل المظلل في الشكل 1 - 8 (أ)، ويتناقص $\vec{B}$ مع الزمن، وبما أن $E(x,t)$ و $B(x,t)$ هما دالتان معلومتان (لاحظ المعادلتين (1 - 1) و (1 - 2))، فإن المعادلة (1 - 5) تتحول إلى:

$$KE_m \cos(Kx - \omega t) = \omega B_m \cos(Kx - \omega t).$$

فلو كنا قد استخدمنا ثابتين طوريين مختلفين في المعادلتين (1 - 1) و (1 - 2) لكانت عبارتا الجيب تمام في هاتين المعادلتين خارج الطور وبطلت مساواة المعادلتين عند جميع قيم x و t .
إن المعادلة (1 - 5)، التي تتبع مباشرة من تطبيق معادلات ماكسويل، تبين أن E و B يجب أن تكونا في الطور.
باستثناء الجيب تمام من طرفي المتساوية أعلاه، نجد:

$$\frac{E_{\max}}{B_{\max}} = \frac{\omega}{K} = c \quad (1 - 6)$$

حيث C هي سرعة الموجة، وهي نسبة سعتي مركبتي المجالين الكهربائي والمغناطيسي. ومن المعادلتين (1 - 1) و (2 - 1) نلاحظ أن نسبة سعتي المجالين هي كنسبة قيمتيهما اللحظيتين، أي أن:

$$E = CB \quad (1 - 7)$$

الآن نركز انتباهنا على الشكل 1 - 8 (ب)، وفيه نلاحظ أن الفيض الكهربائي E بالنسبة للمستطيل المظلل متناقص مع الزمن عندما تتحرك الموجة خلال المستطيل، وطبقاً للصيغة المحورة لقانون أمبير من قبل ماكسويل (بوضع $i = 0$ لعدم وجود تيار محث في الموجة المنتقلة)، فإن:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt} \quad (1 - 8)$$

هذا الفيض الكهربائي المتغير يحث مجالاً مغناطيسياً عند نقاط حول محيط المستطيل.

إن مقارنة المستطيلين في الشكل 8 تبين أن الفيض الملائم ϕ_B أو ϕ_E يتناقص مع الزمن. ومع ذلك، لو أهمل الدوران بعكس اتجاه عقرب الساعة حول أعلى وأسفل المستطيلين المظللين، لوجدنا أن التكامل $\oint E \cdot ds$ موجباً، في حين أنه سالباً، كما سنرى الآن:

يحسب التكامل في المعادلة (1 - 8) بالدوران عكس اتجاه عقرب الساعة حول المستطيل المظلل في الشكل 8 (ب).

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = -(B + dB)h + Bh = -h dB$$

حيث B هو مقدار $\vec{B}$ عند الحافة اليسرى للشريط و $B + dB$ هو مقدار $\vec{B}$ عند الحافة اليمنى.

أما الفيض الكهربائي خلال نفس الشريط، فهو:

$$\phi_E = (E) (h dx)$$

وتفاضله يعطينا:

$$\frac{d\phi_E}{dt} = h dx \frac{dE}{dt}$$

وهكذا يمكن كتابة قانون أمبير - معادلة (1 - 8)، بالصورة:

$$-h dB = \mu_0 \epsilon_0 (h dx \frac{dE}{dt})$$

أو، بتعويض التفاضل الجزئي، نجد :

$$-\frac{\partial B}{\partial x} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (1 - 9)$$

والإشارة السالبة تشير هنا أيضاً إلى أن B تزداد مع x عند موقع المستطيل المظلل في الشكل 1 - 8 (ب) و E تتناقص مع الزمن.

بتركيب هذه المعادلة مع المعادلتين (1 - 1) و (1 - 2)، نجد :

$$-kB_m \cos(kx - \omega t) = -\mu_0 \epsilon_0 \omega E_m \cos(kx - \omega t)$$

$$\frac{E_m}{B_m} = \frac{k}{\mu_0 \epsilon_0 \omega} = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0 C} \quad (1 - 10)$$

وبمساواة هذه المعادلة مع المعادلة (1 - 6) نجد أن :

$$C = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (1 - 11)$$

وبالتعويض عن μ_0 و ϵ_0 (السماحية المغناطيسية والسماحية الكهربائية في الفراغ) عن قيمتهما، نجد :

$$C = \frac{1}{\sqrt{(4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A}) (8.9 \times 10^{-12} \text{ C/N.m}^2)}} = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$$

التي هي سرعة الضوء في الفضاء. هذا الانبثاق لسرعة الضوء من اعتبارات كهرومغناطيسية خالصة هو قمة إنجاز النظرية الكهرومغناطيسية لماكسويل. فماكسويل صنع نبوءته هذه قبل معرفة الأمواج الراديوية وقبل أن يتم التحقق من أن الضوء هو في حقيقته أمواج كهرومغناطيسية. إن نبوءة ماكسويل هذه قادت إلى مفهوم الطيف الكهرومغناطيسي وإلى اكتشاف الأمواج الراديوية من هنري هيرتز (H.Hertz) في 1890. إنها إذن للبصريات لأن تدرس ك فرع من الكهرومغناطيسية والسماح لقوانينها الأساسية أن تكون مشتقة من معادلات ماكسويل.

لأن μ_0 حُدَّتْ لأن تكون $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/M}$ تماماً، وسرعة الضوء أعطيت الآن قيمة دقيقة وهي $299,792,458 \text{ m/s}$ ، فإن المعادلة (1 - 11) تسمح بقيمة محددة للسماحية المغناطيسية μ_0 :

$$\mu_0 = \frac{1}{C^2 \epsilon_0} = 8.85418782 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N.m}^2$$

من المثير للدهشة، أن ماكسويل نفسه لم ير انتشار الأمواج الكهرومغناطيسية ولا الظواهر الكهرومغناطيسية عموماً، وعلى شاكلة أهل عصره من الفيزيائيين، اعتقد ماكسويل بصورة راسخة، أن الفضاء كان مخترقاً (تخلله) بمادة رقيقة تدعى الأثير وأن الظواهر الكهرومغناطيسية يمكن أن تفسر بواسطة الدوامات الدائرية في هذا الأثير.

وما يسجل من اعجاب واجلال لعبقرية ماكسويل أنه استطاع بمثل هذه النماذج الميكانيكية في عقله أن يستنتج قوانين الكهرومغناطيسية التي اقترنت بشرف اسمه، هذه القوانين، وكما بينت كل البحوث والدراسات اللاحقة، أنها ليست فقط مطلوبة ولم تتغير عندما ظهرت نظرية النسبية الخاصة لاينشتاين على المسرح بعد ثلاثة عقود، بل إنها صحيحة وتعززت بقوة بهذه النظرية. واليوم، ليست ثمة ضرورة للاستعانة بمفهوم الأثير لتفسير انتشار الأمواج الكهرومغناطيسية.

الأمواج الجيبية الكهرومغناطيسية تماثل تماماً الأمواج الميكانيكية المستعرضة المتولدة في الحبل (السلك) المشدود. ففي الموجة الجيبية الكهرومغناطيسية، المجالان $\vec{E}$ و $\vec{B}$ عند أية نقطة في الفضاء هما دالتان جيبيتان للزمن، وعند أية لحظة من الزمن يكون التغير الخاص للمجالين تغيراً جيبياً أيضاً. إن الهيئة الكلية للموجة تتحرك باتجاه الانتشار بسرعة C ، واتجاهها المجالين $\vec{E}$ و $\vec{B}$ في الموجة الجيبية عموديان على اتجاه الانتشار (وعلى بعضهما البعض)، وبالتالي، فإن الموجة الكهرومغناطيسية هي موجة مستعرضة.

يرتبط تردد الموجة f ، طولها الموجي λ ، وسرعتها C بالعلاقة $C = \lambda f$. فإذا كان التردد λ هو تردد خط القدرة 60Hz، فإن الطول الموجي هو:

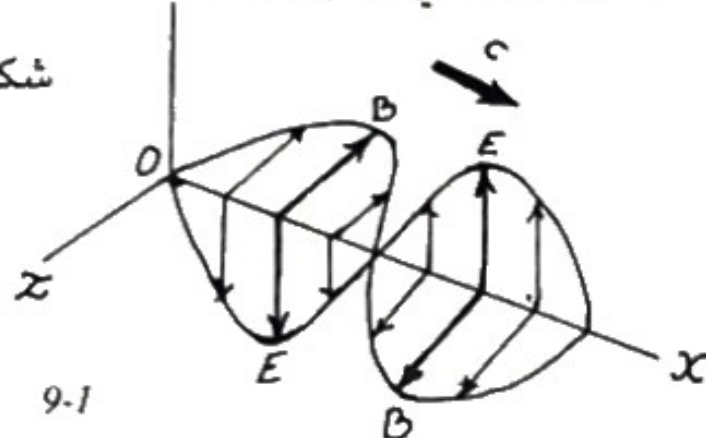
$$\lambda = \frac{C}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{60 \text{ Hz}} = 5 \times 10^6 \text{ m} = 5000 \text{ Km}$$

الذي هو من رتبة نصف قطر الأرض.

يبين الشكل 9 موجة جيبية كهرومغناطيسية منتقلة في الاتجاه $+x$ ؛ وفيه يظهر المجالان $\vec{E}$ و $\vec{B}$ لبعض النقاط على الجانب الموجب لمحور x ، نتصور مستوياً عمودياً على محور x عند نقطة معينة وزمن معين؛ في هذا المستوى يمتلك المجالان نفس القيم عند جميع النقاط. هذه القيم مختلفة في المستويات المختلفة.

ففي المستويات حيث المتجه $\vec{E}$ في الاتجاه $+y$ ، يكون $\vec{B}$ في الاتجاه $+z$ ؛ وحيث $\vec{E}$ في الاتجاه $-y$ ، يكون $\vec{B}$ في الاتجاه $-z$.

شكل (1 - 9)



شكل 1 - 9 تمثيل المجالين المغناطيسي والكهربائي كدالتين لـ x لموجة جيبية كهرومغناطيسية مستوية مستقطبة خطياً. ويظهر فيه طول موجي واحد عند الزمن $t = 0$ اتجاه الانتشار هو الاتجاه $\vec{E} \times \vec{B}$. يشاهد المجالات فقط لبعض النقاط بامتداد محور x .

يمكن وصف الأمواج الكهرومغناطيسية بمساعدة الدالة الموجية، تماماً كما هو الحال بالنسبة للأمواج الميكانيكية على السلك. وأحد أشكال هذه الدالة لموجة مستعرضة منتقلة إلى اليمين بامتداد سلك متوتر هو:

$$y = A \sin (wt - Kx) \quad (1 - 12)$$

حيث y هي الإزاحة المستعرضة للنقطة المهتزة من السلك في اللحظة الزمنية t من موضع إزاتها مع محور x . و A هي الإزاحة العظمى أو سعة الموجة، w هو التردد الزاوي ويساوي $2\pi f$ مضروباً في التردد f ، و K هو العدد الموجي أو ثابت الانتشار ويساوي $2\pi/\lambda$ ، حيث λ هو الطول الموجي.

بالنسبة للموجة الكهرومغناطيسية، ليكن E و B يمثلان القيم الآنية للمجالين الكهربائي والمغناطيسي في الشكل 1 - 9، و E_m و B_m قيمتيهما العظميين أو سعتهما. إن الدالتين الموجيتين لهذه الموجة هما (المعادلتان (1 - 1) و (1 - 2)).

$$\begin{aligned} E &= E_m \sin (wt - Kx), \\ B &= B_m \sin (wt - Kx), \end{aligned} \quad (1 - 13)$$

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \vec{E}_m \vec{j} \sin (wt - Kx), \\ \vec{B} &= \vec{B}_m \vec{k} \sin (wt - Kx). \end{aligned} \quad (1 - 14)$$

وفي الهيئة الاتجاهية:

تمثل المنحنيات الجيبية في الشكل 1 - 9 القيم اللحظية لـ E و B كدالتين لـ x في الزمن $t = 0$ ، لموجة تنتشر نحو اليمين بسرعة C . إن الاهتزازات الجيبية لمتجهي الموجة $\vec{E}$ و $\vec{B}$ عند أية نقطة هي في نفس الطور، وهذا ما تبينه المعادلة (1 - 11). أما سعتهما، فترتبطان بالعلاقة (المعادلة (1 - 6)).

$$E_{\max} = C B_{\max} \quad (1 - 15)$$

عندما تنتشر الموجة في الاتجاه x - (شكل 1 - 9)، ففي النقاط حيث $\vec{E}$ في الاتجاه $+y$ ، يكون $\vec{B}$ في الاتجاه $+z$ ؛ وحيث E في الاتجاه $-y$ ، يكون $\vec{B}$ في الاتجاه $-z$. إن دالتي هذه الموجة هما:

$$\begin{aligned} E &= -E_m \sin (wt + Kx), \\ B &= B_m \sin (wt + Kx). \end{aligned} \quad (1 - 16)$$

وكما في حالة الموجة المنتشرة في الاتجاه $+x$ ، فإن الاهتزازات الجيبية لتجهي المجالين $\vec{E}$ و $\vec{B}$ عند أية نقطة هي في نفس الطور.

وهذه الأمواج الجيبية بنوعيتها (المنتشرة منها في الاتجاه $+x$ وفي الاتجاه $-x$) هي أمواج مستقطبة خطياً في الاتجاه y (لأن E يقع دائماً بامتداد محور y).

مثال 1 ليزر CO_2 يبعث أمواجاً جيبية كهرومغناطيسية تنتقل في الفراغ في الاتجاه $-x$ وبطول موجى $10.6 \mu m$ وكان المجال $\vec{E}$ بامتداد محور Z بسعة مقدارها $1.5 MV/m$. أكتب المعادلة الموجية لـ E و B كدالتين للزمن والموضع.

الحل: بتطبيق المعادلة (16 - 1) مع استبدال اتجاه اهتزاز $\vec{E}$ من محور y إلى محور Z ، مع الانتباه إلى أنه حيث يكون $\vec{E}$ في الاتجاه $+Z$ ؛ يجب أن يكون $\vec{B}$ في الاتجاه $+y$ لكي يكون الضرب الاتجاهي $\vec{E} \times \vec{B}$ الذي هو نفسه اتجاه الانتشار، في الاتجاه $-x$. ومنه، نجد أن الدالتين الممكنتين اللتين تحققان هذا الشرط هما: $\vec{E} = \vec{E}_m \vec{K} \sin(\omega t + Kx)$, $\vec{B} = \vec{B}_m \vec{j} \sin(\omega t + Kx)$ ومن قانون فاراداي (3 - 1) الذي يتطلب أن تكون $E_m = cB_m$ ، نجد:

$$B_m = \frac{E_m}{c} = \frac{1.5 \times 10^6 V/m}{3 \times 10^8 m/s} = 5 \times 10^{-3} T$$

ولفحص انسجام الوحدات، نذكر أن: $1 V = 1 Wb/S$ ، وأن: $1 Wb/m^2 = 1 T$ من قيمة العدد الموجي ($\lambda = 10.6 \times 10^{-6} m$)، نجد أن:

$$K = 2\pi/\lambda = (2\pi rad)/(10.6 \times 10^{-6} m) = 5.93 \times 10^5 \frac{rad}{m}$$

لدينا أيضاً أن:

$$\omega = CK = (3 \times 10^8 m/s)(5.93 \times 10^5 rad/m) = 1.78 \times 10^{14} \frac{rad}{s}$$

نعوض عن هذه القيم في الدالتين الموجيتين $\vec{E}$ و $\vec{B}$ ، نحصل على:

$$\vec{E} = (1.5 \times 10^6 V/m) \vec{K} \sin \left[(1.78 \times 10^{14} \frac{rad}{s})t + (5.9 \times 10^5 \frac{rad}{m})x \right]$$

$$\vec{B} = (5.9 \times 10^{-3} T) \vec{j} \sin \left[(1.78 \times 10^{14} \frac{rad}{s})t + (5.9 \times 10^5 \frac{rad}{m})x \right]$$

وهكذا يمكن إيجاد مجالي الموجة الجيبية عند أي وضع وزمن معينين، بمجرد التعويض بالقيم الخاصة لـ x و t في المعادلتين أعلاه.

مستطبيع لأوجة الكهرومغناطيسية كما في شكل 1-1 من نطل الطاقة من موضع إلى آخر. فمفعول المسماح وعمرارة النار هي أشرطة سالوة للطاقة الحارة بواسطة الأمواج الكهرومغناطيسية. ومعدل هذه الطاقة بوحدة المساحة (أو القدرة الكهرومغناطيسية بوحدة المساحة) هو المقياس المألوف للجريان الطاقى في أوجة الكهرومغناطيسية إلى مقدار واتجاه هذا الجريان بوصف بدلالة متجه يدعى متجه بوينتينج $\vec{S}$

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$

حيث $\vec{E}$ و $\vec{B}$ يعبران لحالي أوجة عند نقطة معينة في الفضاء. و S يشير إلى متجه بوينتينج عند ذات النقطة. ومن قواعد المنهجيات المعروفة. فإن S يجب أن يكون عمودياً على المستوى المتكون بواسطة E و B . واتجاهه يتحدد بقاعدة اليد اليمنى. وهذا يمكن التأكيد منه بالنسبة للموجة المسنوية المسببة في الشكين (1-6) و (1-7).

بلاحظ أيضاً. أنه رغم أن اتجاهي $\vec{E}$ و $\vec{B}$ قد يتغيران. لكن ضربهما بمتجه دائماً باتجاه لا الوجه الذي هو اتجاه انتقال الموجة. هذا يعني أن اتجاه متجه بوينتينج يطابق دائماً اتجاه انتقال الموجة.

يمكن أن توصف أوجة الكهرومغناطيسية بواسطة مجالها الكهربائي المعطى $\vec{E}$ واتجاه انتشاره (الذي هو نفسه اتجاه $\vec{S}$). وبالتالي. فليس من الضروري إعطاء $\vec{B}$. لأن مقدار $\vec{B}$ يتحدد من مقدار $\vec{E}$ وفقاً للمعادلة (1-7) واتجاه $\vec{B}$ يمكن أن يتحدد من اتجاه $\vec{E}$ و $\vec{S}$ اعتماداً على المعادلة (1-17).

أما أبعاد B فهي نفسها أبعاد E/C . ومنه. فإن أبعاد S . بعد تحديد أبعاد E و B . هي قدرة بوحدة مساحة. أي Watt/m^2 بنظام SI.

بالنسبة للموجة الكهرومغناطيسية المسببة على الشكل 1-6. معادلة (1-17) نجد أن

$$S = \frac{1}{\mu_0} EB \quad (1-18)$$

$$S = \frac{1}{\mu_0 C} E^2 \quad (1-19)$$

حيث E، B، و S هي قيم آنية عند نقطة المشاهدة.
مثال 2 مصدر ضوئي قدرته الخارجية P تساوي 250 W، ثمة مشاهد على مسافة 1.8m منه (وهي مسافة أكبر بكثير من أبعاد المصدر).

احسبت القيم rms للمجالين الكهربائي والمغناطيسي عند موقع المشاهدة، مفترضاً أن المصدر يشع بانتظام في جميع الاتجاهات.

الحل: لشدة الموجة I ولتجه بوينتینگ S نفس التحديد: بمعنى أن متجه بوينتینگ S بمعدله الزمني S يعرف بأنه شدة الموجة I، وبالتالي، فإن (انظر المعادلة (1- 19):

$$I = \bar{S} = \frac{1}{\mu_0 C} \overline{E^2} = \frac{1}{\mu_0 C} E_m^2 \overline{\sin^2(Kx - \omega t)}$$

باعتبار أن للمجال في هيئته البسيطة الأولية سلوكاً موجياً، وأن الموجة التي افترضناها هي موجة جيبية (لاحظ الفقرة السابقة)، ولأن المتوسط الزمني للجيب هو $1/2$ ، إذن من المعادلة أعلاه نحصل على:

$$I = \bar{S} = \frac{1}{2\mu_0 C} E_m^2 = \frac{1}{2\mu_0} E_m B_m \quad (1 - 20)$$

(لاحظ المعادلة (1 - 7)).

وقد يُعبّر عن الشدة بدلالة القيمة المتوسطة للجذر التربيعي (rms) لمقداري المجالين الكهربائي والمغناطيسي. وهنا نذكر بأن $E_m = \sqrt{2} E_{rms}$ ، ومنه نحصل على:

$$I = \bar{S} = \frac{1}{\mu_0 C} E_{rms}^2 = \frac{1}{\mu_0} E_{rms} B_{rms} \quad (1 - 21)$$

والآن نجد الشدة بدلالة القدرة من تحديد الشدة بأنها القدرة بوحدة المساحة (أو الطاقة بوحدة المساحة بوحدة الزمن)

$$I(\bar{S}) = \frac{P}{4\pi r^2}, \text{ أو } I(\bar{S}) = \frac{U}{4\pi r^2 t} \quad (1 - 22)$$

ومن المعادلة (1 - 19)، نجد:

$$\frac{P}{4\pi r^2} = \frac{1}{\mu_0 C} E_{rms}^2$$

$$E_{rms} = \sqrt{\frac{\mu_0 C P}{4\pi r^2}} = \sqrt{\frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}) (3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}) (250 \text{ W})}{(4\pi) (1.8 \text{ m})^2}} = 48 \text{ V/m}$$

ومن العلاقة (1-7) نجد أن:

$$B_{rms} = \frac{E_{rms}}{C} = \frac{48V/m}{(3 \times 10^8 m/s)} = 1.6 \times 10^{-7} T = 0.16 \mu T$$

حيث وحدة المجال المغناطيسي بالنظام العالمي للوحدات SI هي التسلا، ويرمز لها بالرمز (T).

(1-6) زخم الإشعاع وضغطه

تحمل الموجات الكهرومغناطيسية، بجانب حملها للطاقة، زخماً خطياً، أي أنها تستطيع أن تسلط ضغطاً (ضغط اشعاعي) على الجسم بواسطة الضوء المشرق عليه. لكن القوى الناتجة عن مثل هذا الضغط هي قوى صغيرة قياساً بالقوى التي نتعامل معها في حياتنا اليومية ولا يمكن ملاحظتها.

فلو سقطت حزمة متوازية من الضوء على جسم لزمن λ ، فإن الضوء الساقط يمكن أن يمتص كلياً من قبل الجسم، وهنا يقوم المجال الكهربائي للموجة الضوئية (بوصفها موجة كهرومغناطيسية) بتحريك الشحنات (الالكترونات) في مادة الجسم في اتجاه مستعرض على اتجاه الحزمة فتتسبب قوة مغناطيسية $q\vec{V} \times \vec{B}$ يسلطها المجال المغناطيسي للموجة الضوئية على الشحنات المتحركة باتجاه الحزمة.

إن إمتصاص الضوء ينقل الزخم بصورة متماثلة في اتجاه الحزمة إلى جسيمات المادة الماصة. فإذا كانت الطاقة الممتصة U ، فإن الزخم P المحرر إلى الجسم خلال هذا الزمن يعطى بالعلاقة:

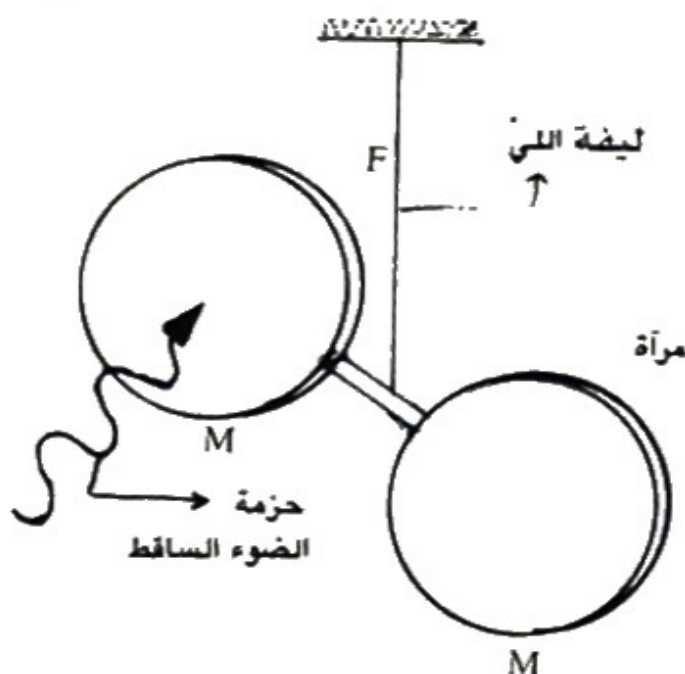
$$P = \frac{U}{C} \quad (1-23) \quad (\text{امتصاص كلي})$$

حيث C هي سرعة الضوء، واتجاه P (الزخم كمتجه) هو اتجاه الحزمة الساقطة. أما إذا عكست الطاقة الضوئية U تماماً، فإن الزخم المحرر سيكون ضعف نظيره عند الامتصاص، أو:

$$P = \frac{2U}{C} \quad (1-24) \quad (\text{انعكاس كلي})$$

والتجربة الموضحة على الشكل 1-10 هي قياس فعلي للضغط الاشعاعي أجراها نيكول (Nichols) وهول (HULL) في 1903، مستخدمين ما يعرف

بتقنية ميزان إللي. فقد سمحاً للضوء أن يسقط على المرآة M، فلاحظنا أن ذراع الميزان قد إلتوى بزاوية مُقاسة θ . فأتلاً معه ليفة اللي F.



شكل (1 - 10) ترتيب نيكول وهول لقياس ضغط الاشعاع.

مثال 3: حزمة ضوئية شدتها $I(S) = L^2W / Cm^2$ تسقط عمودياً على مرآة مستوية عاكسة تماماً مساحتها $1.5 cm^2$. ما هي القوة التي تؤثر على المرآة؟ وما ضغط الاشعاع عليها؟

الحل: من قانون نيوتن الثاني، فإن متوسط القوة التي يسلطها الضوء على المرآة تعطى بالعلاقة:

$$F = \frac{\Delta P}{\Delta t} \quad (1 - 25)$$

حيث P هو الزخم المنتقل إلى المرآة في زمن Δt .
ومن المعادلة (1 - 24) لدينا:

$$P = \frac{2\Delta U}{C}$$

ومن تحديد الشدة (1 - 22)، نحصل على:

$$\Delta P = \frac{2\bar{S}\Delta t}{C} \quad (1 - 26)$$

$$F = \frac{2\bar{S}A}{C} \quad (1 - 27) \quad \text{وبالتالي، فإن القوة:}$$

$$F = \frac{2\bar{S}A}{C} = \frac{2(12 \times 10^4 \text{ W/m}^2)(1.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2)}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 1.2 \times 10^{-7} \text{ N}$$

وهذه قوة صغيرة جداً. تساوي تقريباً وزن حبة ملح طعام صغيرة جداً. أما ضغط الإشعاع فنجد من التحديد بوصفه القوة بوحدة المساحة أو f/A ومنه نجد:

$$\text{الضغط} = \frac{F}{A} = \frac{2\bar{S}}{C} = \frac{2(12 \times 10^4 \text{ W/m}^2)}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 8 \times 10^{-4} \text{ N/m}^2$$

(1 - 7) الأمواج الكهرومغناطيسية في المادة

ما يحصل هنا هو أن سرعة الأمواج الكهرومغناطيسية في المادة ليست كما هي في الفراغ؛ ويرمز لها بالرمز C بدلاً من C ، وتتغير أشكال وعناصر بعض القوانين والمعادلات، فقانون فاراداي (3 - 1) لا يتغير، لكن المعادلة (7 - 1)، المشتقة منه، هي تتغير وتصبح $E = vB$ بدلاً من $E = cB$. وفي قانون أمبير (8 - 1) لا تعطى كثافة تيار الازاحة بـ $\epsilon_0 dE/dt$ بل بـ $K\epsilon_0 dE/dt$. وكذلك الثابت μ_0 في قانون أمبير أيضاً يجب أن يستبدل بـ $K_m \mu_0$. ويترتب على ذلك استبدال المعادلة (10 - 1) بـ $B = \epsilon \mu v E$ وعلى أساس ما تقدم نجد أن سرعة الموجة في المادة v ، وفقاً للمعادلة (11 - 1) تساوي:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{1}{\sqrt{K K_m}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{C}{\sqrt{K K_m}} \quad (1 - 28)$$

بالنسبة لأغلب العوازل الكهربائية باستثناء المواد العازلة العالية الإنفاذية المغناطيسية تكون المنفذية النسبية K_m قريبة جداً من الوحدة ($K_m = 1$). وعندها تحصل:

$$v = \frac{C}{\sqrt{K}}$$

ولأن الإنفاذية الكهربائية K أكبر من الوحدة دائماً، فإن سرعة الموجة الكهرومغناطيسية في المادة غير الموصلة أقل دائماً من سرعتها في الفراغ C بالعامل $1/\sqrt{K}$. والنسبة بين سرعتين (C/v) تعرف بمعامل الانكسار n :

$$n = \frac{C}{v} = \sqrt{K K_m} \equiv \sqrt{K} \quad (1 - 29)$$

مثال 4: موجة كهرومغناطيسية ترددها 100MHz تنتشر في مادة عازلة عالية الانفاذية المغنطيسية بالصفات $K = 10$ و $K_m = 1000$ عند التردد أعلاه. (أ) ما هي سرعة الانتشار؟ (ب) ما الطول الموجي للموجة؟
الحل: من المعادلة (28 - 1)، نجد:

$$v = \frac{C}{\sqrt{KK_m}} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{\sqrt{(10)(1000)}} = 3 \times 10^6 \text{ m/s}$$

(ب) من العلاقة المعروفة $\lambda = \frac{v}{F}$ ، نجد:

$$\lambda = \frac{3 \times 10^6 \text{ m/s}}{100 \times 10^6 \text{ S}^{-1}} = 3 \text{ cm}$$

وطولها في الهواء:

$$\lambda = \frac{C}{F} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{10^8 \text{ S}^{-1}} = 3 \text{ m}$$

عندما يوجد هناك عازل، فإننا نحتاج إلى تحويل التعبير بالنسبة إلى الكثافة الطاقة ومنتجه بوينتینگ؛ ومن ثم فإن الكثافة الطاقة هي:

$$U = \frac{1}{2} \epsilon E^2 + \frac{1}{2\mu} B^2 = \epsilon E^2$$

إن الكثافات الطاقة في المجالين $\vec{E}$ و $\vec{B}$ تبقى متساوية؛ ومن ثم، فإن منتجه بوينتینگ يصبح:

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu} \vec{E} \times \vec{B}$$

$$S = \frac{EB}{\mu} = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} E^2 \quad \text{ومقداره:}$$

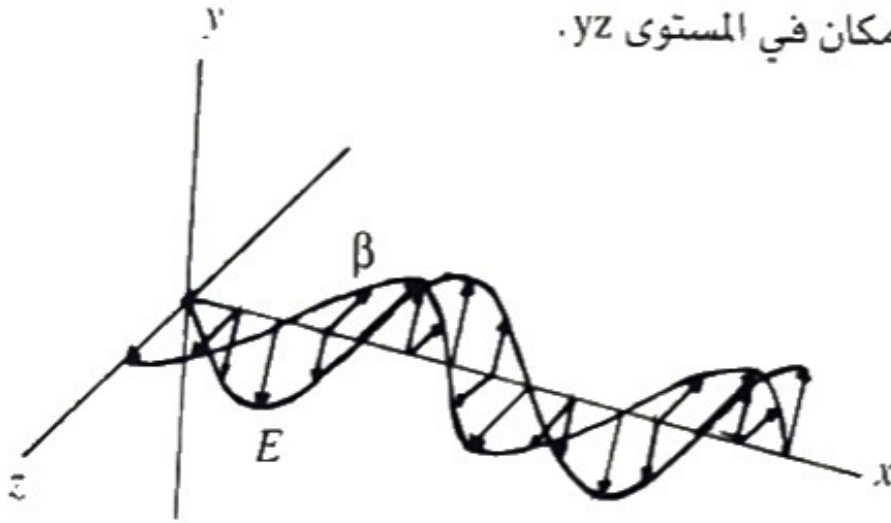
أما شدة الموجة الجيبية I ، فتحصل باستبدال ϵ بـ ϵ_0 و μ بـ μ_0 في المعادلة

$$I = \frac{E_{\max} B_{\max}}{2\mu} = \frac{E_{\max}}{2\mu v} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} E_{\max}^2 = \frac{1}{2} \epsilon v E_{\max}^2 \quad (1-20)$$

لا تستطيع الأمواج الكهرومغناطيسية أن تنتشر لأية مسافة ممكنة في المادة الموصلة لأن المجالين $\vec{E}$ و $\vec{B}$ يحذوان حذو تيارين ليوفرا بذلك آلية تشتيت وإنعكاس طاقة الموجة. وللموصل المثالي ذو المقاومة صفر يجب أن يكون E صفراً في كل مكان داخل المادة. وعندما تصدم الموجة الكهرومغناطيسية هكذا مادة فإنها تنعكس كلياً، والموصل الحقيقي ينفذ جزءاً من الموجة ويعكس الآخر، في حين أن الغشاء المعدني الرقيق جداً يكون شفافاً جزئياً. أما السميك فلا.

يمكن للأمواج الكهرومغناطيسية أن تنعكس، فالسطح الموصل يمكن أن يُستخدم كعاكس، وهنا ينحفظ مبدأ الضم أو التراكب بالنسبة للأمواج الكهرومغناطيسية تماماً مثلما هو الحال بالنسبة لجميع المجالات الكهربائية والمغناطيسية. إن ضم الموجة الساقطة إلى الموجة المنعكسة كلية يشكل ما يعرف بـ «الأمواج الواقفة» تماماً كما يحصل في الأمواج الواقفة الناشئة في الحبل المشدود.

نعتبر صفيحة من موصل مثالي (مقاوميته صفر) وضعت في المستوى yz (شكل 1 - 11) صدمتها موجة كهرومغناطيسية مستقطبة خطياً، وكما نعلم من دراستنا للكهربائية، فإن سطح الموصل هو سطح متساوي الجهد، وبالتالي، فإن E ليس له مركبة موازية لهذا السطح، ويجب أن يساوي صفرًا في كل مكان في المستوى yz .



شكل (1 - 11) تمثيل المجالين الكهربائي والمغناطيسي لموجة كهرومغناطيسية واقفة مستقطبة خطياً عندما $\omega t = \frac{\pi}{4}$ rad.

يحث المجال الكهربائي $\vec{E}$ للموجة الساقطة تيارات جيبية في الموصل تحفظ المجال مساوياً للصفر داخل الموصل وعلى سطحه. وهذه التيارات تنتج موجة منعكسة تسير خارج المستوى في الاتجاه الموجب لمحور x . ومن مبدأ الانضمام، فإن المجال الكلي $\vec{E}$ عند أية نقطة على يمين المستوى هو المجموع الاتجاهي لمجالتي الموجة الساقطة والمنعكسة، والشئ نفسه يحصل بالنسبة للمجال المغناطيسي الكلي $\vec{B}$.

نفرض أن الموجة الساقطة توصف بالدالتين الموجيتين المعبر عنهما في المعادلتين (1 - 16) والموجة المنعكسة - في المعادلتين (1 - 13)، ومن مبدأ الضم الذي ينص على أن المجال الكلي E عند أية نقطة هو مجموع مجالات الأمواج المنفصلة، والشئ نفسه بالنسبة لـ B ، وعليه فإن الدوال الموجية لانضمام موجتين هي:

$$E = E_m [-\sin(\omega t + Kx) + \sin(\omega t - Kx)],$$

$$B = B_m [\sin(\omega t + Kx) + \sin(\omega t - Kx)].$$

ووفقاً لقانون جيب مجموع زاويتين:

$$\sin(A \pm B) = \sin A \cos B \pm \cos A \sin B,$$

نحصل على:

$$E = -2E_m \cos \omega t \sin Kx, \quad (1 - 30),$$

$$B = 2B_m \sin \omega t \cos Kx. \quad (1 - 31).$$

ومنه نلاحظ أنه عند $x = 0$ تكون E صفر دائماً، وهذا مرتبط بطبيعة الموصل المثالي الذي يلعب دور النقطة الثابتة عند نهاية السلك أو الحبل في الأمواج الميكانيكية. صف إلى ذلك أن E يساوي صفرأ في كل الأوقات عند نقاط في المستويات العمودية على محور x يكون بالنسبة $\sin Kx = 0$ ، وهذا

$$\text{يعني أن } Kx = 0, \pi, 2\pi, \dots \text{ أو } x = 0, \frac{\lambda}{2}, \lambda, \frac{3\lambda}{2}, \dots$$

وهذه تدعى بـ (المستويات العقدية للمجال E).

أما المجال المغناطيسي الكلي فيساوي صفرأ في كل الأوقات عند النقاط التي يكون عندها $\cos Kx = 0$ في المستويات المذكورة، وهذا يظهر عندما:

$$x = \frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \frac{5\lambda}{4}, \dots \quad (1 - 33)$$

وهذه هي المستويات العقدية للمجال B .

يبين الشكل 1 - 11 نمط (شكل) موجة واقفة عند لحظة واحدة من الزمن. إن المجال المغناطيسي ليس صفرأ عند سطح الموصل ($x = 0$)، ولا يوجد ثمة سبب أن يكون كذلك. إن التيارات السطحية التي يجب أن توجد لتجعل المجال الكهربائي $\vec{E}$ مساوياً للصفر تماماً هي التي تسبب مجالاً مغناطيسياً عند السطح. وتقع المستويات العقدية لأحد المجالين في المنتصف بين تلك

التي للآخر، إن مستويات كل مجال مفصولة بعضها عن بعض بنصف طول موجي.

من المعادلتين (1 - 30) و (1 - 31) نلاحظ أن المجال الكهربائي الكلي $\vec{E}$ هو دالة جيب تمامية للزمن t ، والمجال المغناطيسي الكلي دالة جيبية للزمن t ، وعليه فإن التغيرات الجيبية للمجالين تكون خارج الطور بزاوية 90° في كل نقطة. ففي الأوقات التي يكون فيها $\cos \omega t = 0$ ، يكون المجال الكهربائي صفراً في كل مكان والمجال المغناطيسي في قيمته العظمى، وعندما يكون $\sin \omega t = 0$ ، يكون المجال المغناطيسي صفراً في كل مكان والكهربائي في قيمته العظمى، وهذا عكس الموجة المتحركة باتجاه واحد، الموصوفة بالمعادلة (1 - 13) أو (1 - 16).

قد يكون مفيداً عمل مقارنة بين الموجة الكهرومغناطيسية المدروسة والموجة الميكانيكية في السلك (الحبل) المشدود: ندخل متسوى موصل ثانٍ مواز للأول (yz) ويبعد عنه بالمسافة L بامتداد محور x ؛ وهذا يماثل السلك المتوتر المشدود عند النقطتين $x = 0$ و $x = L$. فكل المستويان الموصلان يجب أن يكونا مستويين عقديين بالنسبة للمجال $\vec{E}$ ؛ وبالتالي، فإن الأمواج الواقفة يمكن أن توجد فقط عندما يوضع المستوى الثاني عند أحد الأوضاع حيث $E = 0$. وهذا يعني أن L يجب أن تكون مضاعفات صحيحة لنصف الطول الموجي:

$$L_n = n \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \lambda = \frac{2L_n}{n} \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (1 - 34)$$

والترددات المطابقة

$$F_n = \frac{C}{\lambda_n} = n \frac{C}{2L_n} \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (1 - 35)$$

وهكذا يوجد طاقم من الطرز الطبيعية، كل منها يتميز بتردد، شكل موجي، ونمط عقدي، وبقياس المواقع العقدية يمكن عندها قياس الطول الموجي. فإذا كان التردد معروفاً، يمكننا تحديد سرعة الموجة.

السطوح الموصلة ليست هي فقط التي تعكس الأمواج الكهرومغناطيسية، بل تحصل الانعكاسات عند السطح البيني بين مادتين عازلتين بصفات عزل كهربائي ومغناطيسي مختلفة، والمماثل الميكانيكي لذلك هو وصلة سلكين بتوتر متساو وكثافة كتلية خطية مختلفة، وعلى العموم، فإن الموجة الساقطة على مثل هذا السطح الحدودي تنفذ جزئياً داخل المادة الثانية وتنعكس

جزئياً إلى الخلف داخل المادة الأولى.

إن النفاذ الجزئي والانعكاس الجزئي للضوء عند السطح الزجاجي هو ظاهرة مألوفة: فالضوء ينفذ خلال زجاج الشباك، ولكن جزء منه ينعكس أيضاً.

مثال 5: برهن أن شدة الموجة الواقفة المدروسة في الفقرة أعلاه تساوي صفراً.

الحل: نجد أولاً القيمة الآنية لمتجه بوينتینگ $\vec{S}$ باستخدام الدالتين الموجبتين في المعادلتين (30 - 1) و (31 - 1) مع المعادلة (14 - 1):

$$S = \frac{EB}{\mu_0} = \frac{(-2E_m \cos \omega t \sin Kx)(2B_m \sin \omega t \cos Kx)}{\mu_0}$$

ومن قانون جيب ضعف الزاوية

$$\sin 2A = 2 \sin A \cos A$$

يمكن إعادة كتابة القيمة الآنية لـ S بالصورة:

$$S = \frac{E_m B_m \sin 2\omega t \sin 2Kx}{\mu_0}$$

وبما أن القيمة المتوسطة للدالة الجيبية فوق أي عدد صحيح من الدورات تساوي صفراً، فإن متوسط القيمة لـ S عند أية نقطة يساوي صفراً أيضاً، وعليه، فإن الشدة التي هي القيمة المتوسطة لـ $\vec{S}$ تساوي صفراً. وهذا معناه أن كامل الطاقة المنقولة بواسطة إحدى الموجتين تُلفى كلية بواسطة مقدار مساوٍ من الطاقة منقول في الاتجاه المعاكس بواسطة موجة أخرى، لهذا السبب، عندما يُراد نقل القدرة بواسطة الأمواج، يجب تفادي الأمواج الواقفة.

مثال 6. أمواج كهرومغناطيسية واقفة تشكلت في تجويف يستخدم لدراسة الرنين الالكتروني المغزلي. وكان للتجويف جدارين متوازيين عاليًا الموصلية تفصلهما مسافة 1.5 cm.

(أ) احسب أطول طول موجي وأدنى تردد للأمواج الواقفة بين الجدارين. (ب) أين تقع القيم العظمى للمجالين الكهربائي والمغناطيسي في التجويف؟

الحل: أطول طول موجي وفقاً للمعادلة (34 - 1) يطابق $n = 1$:

$$\lambda_1 = \frac{2L}{1} = \frac{2(1.5\text{cm})}{1} = 3.00\text{ cm}$$

والتردد المطابق هو:

$$F = \frac{C}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{3 \times 10^{-2} \text{ m}} = 10^{10} \text{ Hz} = 10 \text{ GHz}$$

ب) عند $n = 1$ يوجد نصف عدد صحيح مفرد بين الجدارين، فالمجال الكهربائي له عقد عند الجدارين ($E = 0$) وبطنون (عندما E_{max}) في منتصف المسافة بينهما، وعلى العكس من ذلك يكون المجال المغنطيسي.

الخلاصة:

- يغطي الطيف الكهرومغنطيسي نطاقاً (مدى) من الترددات من 1 Hz على الأقل إلى 10^{24} Hz، وهذا يطابق مدى واسعاً من الأطوال الموجية، يُشكل الضوء المرئي جزءاً صغيراً منه يمتد من 400 إلى 700 nm.
- المجال الكهربائي تتجه شحنة كهربائية (ساكنة أو متحركة) والمجال المغنطيسي تتجه شحنة كهربائية متحركة بالتوازي مع المجال الكهربائي. ووجوه المجالين المتزامن في الفضاء ينتج كثافة طاقة ثابتة في الزمن.
- تتبأ معادلات ماكسويل بوجود الأمواج الكهرومغنطيسية المنتشرة في الفراغ بسرعة تساوي القيمة المقاسة لسرعة الضوء، وفي الموجة المستوية ينتظم المجالان $\vec{E}$ و $\vec{B}$ فوق أي مستوى عمودي على اتجاه الانتشار، وهنا يتطلب قانون فاراداي أن يكون:

$$E = c B$$

ويتطلب قانون أمبير أن يكون:

$$B = \mu_0 \epsilon_0 c E$$

حيث c سرعة الانتشار وتتحقق بالنسبة للشرطين ب:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

- الأمواج الكهرومغنطيسية هي أمواج مستعرضة، والمجالان $\vec{E}$ و $\vec{B}$ عموديان على اتجاه الانتشار وعلى بعضهما بعض. إن اتجاه الانتشار هو اتجاه المتجه $\vec{E} \times \vec{B}$.

- بالنسبة للموجة الجيبية المستوية، المنتشرة في الاتجاه $+x$ يكون:

$$E = E_{\max} \sin (wt - Kx),$$

$$B = B_{\max} \sin (wt - Kx),$$

$$E_{\max} = CB_{\max}$$

- يُعطى معدل الجريان الطاقى (القدرة بوحدة المساحة) بواسطة متجه بوينتینگ $\vec{S}$:

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$

- والمعدل الزمني للمقدار EB لمتجه بوينتینگ يدعى شدة الموجة I ، وهو للموجة الجيبية،

$$I = S_{av} = \frac{E_{\max} B_{\max}}{2\mu_0} = \frac{E_{\max}^2}{2\mu_0 C} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} = \frac{1}{2} \epsilon_0 C E_{\max}^2$$

- تحمل الأمواج الكهرومغناطيسية زخماً أيضاً؛ معدل انتقاله بوحدة مساحة المقطع العرضي يساوي:

$$\frac{MG}{R^2} = \frac{u^2}{R}$$

- عندما تنتشر الموجة الكهرومغناطيسية خلال المادة، فإن سرعتها تتحدد بـ:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{1}{\sqrt{KK_m}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = \frac{C}{\sqrt{KK_m}}$$

مسائل:

(1 - 1) الطيف الكهرومغناطيسي

1. برهن أن التردد والطول الموجي المعلمين في الشكل 1-1 يخضعان للعلاقة $C = \lambda F$.

2. بالنسبة للأمواج المنتشرة في الهواء، ما هو الطول الموجي بالمتر وبالنانومتر لـ:

(أ) أشعة x ترددها 3×10^{17} HZ

(ب) الضوء البرتقالي وتردده 5×10^{14} HZ (خذ $C = 3 \times 10^8$ m/s).

(1 - 2) توليد الأمواج الكهرومغناطيسية.

3. ما هي الحثية اللازمة مع مكثف سعته 17 PF لبناء مذبذب قادر على توليد أمواج كهرومغناطيسية بطول موجي قدره 550 nm (في حدود الضوء المرئي)؟

(1 - 3) الأمواج المنتشرة ومعادلات ماكسويل

4. موجة مستوية معينة، القيمة العظمى لمجالها الكهربائي هي $321 \mu \frac{V}{m}$.

أوجد القيمة العظمى لمجالها المغنطيسي.

5. مجال كهربائي مترافق مع موجة كهرومغناطيسية مستوية معطاة بـ:

$$E_x = 0, E_y = 0, E_z = E_0 \sin K(x - ct),$$

حيث $E_0 = 2.34 \times 10^{-4} \text{ V/m}$ و $K = 9.72 \times 10^6$ ، والموجة تنتشر في الاتجاه $+x$.

(أ) اكتب تعابير المجال المغنطيسي للموجة.

(ب) أوجد الطول الموجي للموجة.

6. مبتدءً من المعادلتين (1-5) و (1-9)، بين أن مركبتي المجالين الكهربائي

والمغنطيسي $E(x,t)$ و $B(x,t)$ على التوالي لموجة كهرومغناطيسية مستوية

تحققان المعادلتين الموجيتين:

$$\frac{\partial^2 B}{\partial t^2} = C^2 \frac{\partial^2 B}{\partial x^2} \quad \text{و} \quad \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = C^2 \frac{\partial^2 E}{\partial x^2}$$

7. (أ) بين أن المعادلتين (1-1) و (1-2) تحققان المعادلتين الموجيتين المبينتين

في المسألة 6.

(ب) بين أن أي من التعبيرين $E = E_m f(Kx \pm \omega t)$ و $B = B_m f(Kx \pm \omega t)$

حيث $f(Kx + \omega t)$ ترمز إلى دالة عشوائية، يحقق أيضاً الدالتين الموجيتين

أعلاه.

(1 - 4) الأمواج الجيبية

8. ليزر الصبغة يُصدر موجة كهرومغناطيسية جيبية تنتقل في الاتجاه $+y$ بتردد

$F = 6.00 \times 10^{13}$ ومجال مغنطيسي $\vec{B}$ بامتداد محور x سعته $4.00 \times 10^{-4} \text{ T}$. اكتب

المعادلتين الاتجاهيتين $\vec{E}$ و $\vec{B}$ كدالتين للزمن ولـ y .

9. اعتبر موجة جيبية كهرومغناطيسية، مجالها الكهربائي والمغنطيسي

$\vec{E} = E_m \vec{j} \sin(\omega t - Kx)$ و $\vec{B} = B_m \vec{k} \sin(\omega t - Kx + \phi)$ ، حيث $\phi < 2\pi$. بين

أنه إذا كان $\vec{E}$ و $\vec{B}$ يحققان المعادلتين (1-5) و (1-9)، فإن $E_m = cB_m$ ، $\phi = 0$

(عندما $\phi = 0$ ، فهذا معناه أن المجالين يهتزان في الطور).

(1 - 5) نقل الطاقة ومتجه بوينتینگ

10. اعتبر توجهات كل من المجالين الكهربائي والمغناطيسي المعطاة أسفله. ما هي اتجاه انتشار الموجة في كل حالة؟

(أ) $\vec{E} = E\hat{i}$ ، $\vec{B} = B\hat{j}$ (ب) $\vec{E} = -E\hat{j}$ ، $\vec{B} = B\hat{i}$

(ب) $\vec{E} = E\hat{k}$ ، $\vec{B} = -B\hat{i}$ (د) $\vec{E} = E\hat{j}$ ، $\vec{B} = -B\hat{k}$

11. إثبت أن التعابير في المعادلتين (20 - 1) و (21 - 1) متساوية.

12. بالنسبة للموجة الكهرومغناطيسية السائدة في الاتجاه x. - كما هو موصوف في المعادلة (16 - 1)، بين أن متجه بوينتینگ.

(أ) في الاتجاه x:-

(ب) يمتلك متوسط المقدار المعطى بالمعادلة (20 - 1).

13. عند مسافة 50.0 Km من هوائي محطة راديو كانت سعة المجال الكهربائي $E_m = 0.06 \text{ V/m}$.

(أ) ما هو مقدار سعة المجال المغناطيسي عند هذه النقطة؟

(ب) بفرض أن هوائي المحطة يبث بصورة متساوية في جميع الاتجاهات فوق الأرض، ما قدرة خرج المحطة؟

(ج) عند أية مسافة تصبح سعة المجال الكهربائي نصف قيمتها؟

14. بالنسبة لموجة جيبية كهرومغناطيسية في الفراغ، كالموصوفة في المعادلة (13 - 1)، بين أن متوسط كثافة الطاقة في المجال الكهربائي هو نفسه كالذي في المجال المغناطيسي.

15. إذا كان التدفق الطاقى إلى الأرض، المرافق لضوء الشمس، هو 1.4 Kw/m^2 ، فأوجد:

(أ) القيمتين العظمتين لـ E و B لموجة جيبية بهذه الشدة.

(ب) إذا كانت المسافة من الأرض إلى الشمس هي 1.5×10^{11} تقريباً، فما هو متوسط القدرة الكلية المشعة بواسطة الشمس؟ (ملاحظة تساعد على الحل: التدفق الطاقى هنا يأتي بمعنى الشدة).

16. يستطيع ليزر النيرميوم - زجاج اليوم - أن يُظهر قدرة $100 \times 10^{12} \text{ w}$ في نبض استدامته 1ns عند طول موجي $0.26 \mu\text{m}$. ما مقدار الطاقة في النبض الواحد؟

17. برهن، بإيجادك اتجاه متجه بوينتينغ $\vec{S}$ ، أن اتجاهي المجالين الكهربائي والمغناطيسي عند جميع النقاط في الأشكال 1 - 4 - 1.5 - 1.6 - 1.7 - 1.8 متساوية (أو متعاكسة) عند جميع الأزمان بالاتجاهات المفترضة للانتشار.

18. إذا كانت شدة الأشعاع الشمسي المباشر الذي لا تمتصه طبقة الأيونوسفير في أحد أيام الصيف هو 130 W/m^2 ، فما هي أقرب مسافة نجلس عندها أمام مدفأة كهربائية 1.0 Kw لكي نشعر بنفس الشدة؟ بفرض أن المدفأة تشع بانتظام في جميع الاتجاهات.

19. (أ) بين أن متوسط الكثافة، التي هي متوسط الطاقة المنتقلة بوحدة المساحة، في الموجة المستوية الكهرومغناطيسية المنتقلة، تعطى بالعلاقة:

$$\bar{S} = \frac{CB^2 m}{2\mu_0}$$

20. هب أنك سرت 162 m نحو مصباح الضوء في شارع بيتك فوجدت أن شدة الأشعاع الضوئي قد ازدادت إلى مرة ونصف (1.5 مرة) من قيمتها حيث كنت في الأصل.

(أ) كم كنت تبعد أصلاً عن المصباح؟ علماً بأن المصباح يشع بانتظام في جميع الاتجاهات.

(ب) ما هي قدرة خرج المصباح، إذا كنت تستطيع ذلك؟

21. برهن أنه بالنسبة لأية نقطة في الموجة الكهرومغناطيسية، كتلك المبينة على الشكل 1 - 8، تتساوى كثافتا الطاقة المخزونتين في المجالين الكهربائي والمغناطيسي للموجة.

22. يصدم ضوء الشمس الأرض، تماماً خارج طبقة الأيونوسفير، بشدة تساوي 1.38 Kw / m^2 ، احسب (أ) E_m ، و (ب) B_m لضوء الشمس، مفترضاً أنه موجة مستوية.

23. القيمة العظمى للمجال الكهربائي لمصدر ضوئي نقطي على مسافة 11.2 m منه هي 1.96 V/m ، احسب (أ) القيمة العظمى للمجال المغناطيسي، و (ب) الشدة، و (ج) قدرة خرج المصدر.

24. ليزر الهليوم - نيون (He - Ne) يشع بطول موجي 632.8 nm وبقدرة خرج 3.1 mw وزاوية تفريق كاملة $172 \mu\text{rad}$.

(أ) أوجد شدة الحزمة على مسافة 38.2m من الليزر . (ب) كم ستكون قدرة خرج مصدر متمائل المناحي يظهر نفس الشدة عند نفس المسافة؟
 25. طائرة تطير على مسافة 11.3 Km من مرسله راديو وتستلم إشارة شدتها $7.83 \mu W/m^2$. (احسب أ) سعة المجال الكهربائي عند الطائرة الناشئة عن هذه الإشارة؛ (ب) سعة المجال المغنطيسي عند الطائرة؛ (ج) القدرة الكلية المُشعة بواسطة المرسله، بفرض أن المرسله تشع بانتظام في جميع الاتجاهات.

(1 - 6) زخم (كمية الحركة) الاشعاع وضغطه

26. افرض أنك تمددت تحت أشعة الشمس لمدة 2.5h، معرضاً مساحة $1.3m^2$ من جسمك عند زاوية 90° بالنسبة لأشعة الشمس ذات الشدة $1.1KW/m^2$. ما مقدار الزخم الذي يتعرض له جسمك؟

27. برهن أ) أن القوة المبذولة بواسطة أشعة ليزر شدتها I على جسم عاكس تماماً مساحته A عمودية على الحزمة تعطى بـ $F = \frac{2IA}{C}$ و (ب) والضغط $P = 2I/C$.

28. تُستخدم ليزرات القدرة العالية لضغط غاز البلازما بواسطة الضغط الاشعاعي. عاكسية البلازما هي 1 عندما تكون الكثافة الالكترونية عالية بما يكفي، صوب الليزر الذي يولد نبضات اشعاعية بقدرة ذروة مقدارها 1.5 GW على $1.3 mm^2$ على البلازما العالية الكثافة الالكترونية، أوجد الضغط المسلط على البلازما.

29. شدة الاشعاع الشمسي الذي يصدم الأرض هي $1.38 KW/m^2$.

(أ) احسب القوة التي يسلطها الاشعاع الشمسي على الأرض، بفرض أن الأرض تتصرف كقرص مسطح عند زاوية قائمة بالنسبة لأشعة الشمس، وأن كل الطاقة الساقطة يتم امتصاصها.

(ب) قارن هذه القوة مع تلك التي تنشأ عن جاذبية الشمس.

30. موجة كهرومغناطيسية مستوية طولها الموجي 3.18m تنتقل في الفضاء الحر في الاتجاه $x +$ بمتجهها الكهربائي E ذي السعة 288 V/m، المتجه بامتداد محور y .

(أ) ما هو تردد الموجة؟ (ب) ما هو اتجاه ومقدار سعة المجال المغنطيسي المرافق للموجة؟ (ج) إذا كان $E = E_m \sin(Kx - \omega t)$ فما هي قيم K و ω ؟ (د) أوجد شدة الموجة. (هـ) إذ أسقطت الموجة على شريحة ماصة تماماً مساحتها 1.85 m^2 ، فبأي نسبة يوزع الأشعاع إلى الشريحة؟ وما هو الضغط الإشعاعي على الشريحة؟

31. بين أن المتجه $C\epsilon_0 \vec{E} \times \vec{B}$ له أبعاد زخم / (مساحة. زمن)، حيث $\frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$ له أبعاد طاقة / (مساحة. زمن). (قد يستخدم المتجه $C\epsilon_0 \vec{E} \times \vec{B}$ لحساب تدفق الزخم (جريان كمية الحركة) في نفس الأفق الذي يستخدم متجه بوينتينغ $S = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$ لحساب الجريان الطاقى).

32. إشعاع شدته I يسقط عمودياً على جسم يمتص منه الجزء f ويعكس الباقي. ما هو ضغط الإشعاع؟

33. برهن أن الضغط الإشعاعي لموجة مستوية عند سقوطها العمودي على سطح مستو يساوي الكثافة الطاقية في الحزمة خارج السطح. هذه العلاقة صحيحة طالما لم تكن هناك مادة يمكن أن تعكس جزءاً من الطاقة الساقطة.

34. برهن أن ضغط تيار من الرصاصات الصادمة لسطح مستو عند سقوطها العمودي عليه هو ضعف كثافة الطاقة الحركية في التيار فوق السطح، بفرض أن الرصاصات يتم امتصاصها تماماً من قبل السطح.

35. ليزر الهليوم - نيون (He - Ne) من النوع المتواجد غالباً في المعامل الفيزيائية، قدرة خرج حزمته 5.00 mW عند طول موجي 633 nm . تسدد الحزمة بواسطة عدسة على بقعة دائرية قطرها الفعال يعادل 2.10 من الأطوال الموجية. (احسب أ) شدة الحزمة المسددة (المجمعة)، (ب) الضغط الإشعاعي المسلط على كرة صغيرة جداً ماصة تماماً قطرها هو البتقنة البؤرية، (د) التسارع المنقول إلى الكرة، بفرض أن كثافة الكرة 4.88 g/cm^3 .

(1 - 7) الأمواج الكهرومغناطيسية في المادة

36. موجة كهرومغناطيسية ترددها 20.0 MHz تنتشر بسرعة $2.20 \times 10^8 \text{ m/s}$ في قطعة معينة من الزجاج. أوجد: (أ) الطول الموجي في الزجاج، (ب) الطول الموجي للموجة المنتشرة في الهواء بنفس التردد، (ج) معامل انكسار الزجاج n

لموجة كهرومغناطيسية بهذا التردد، د) ثابت العزل الكهربائي للزجاج (ع) عند هذا التردد، بافتراض أن السماحية النسبية هي 1.

(1 - 8) الأمواج الواقفة

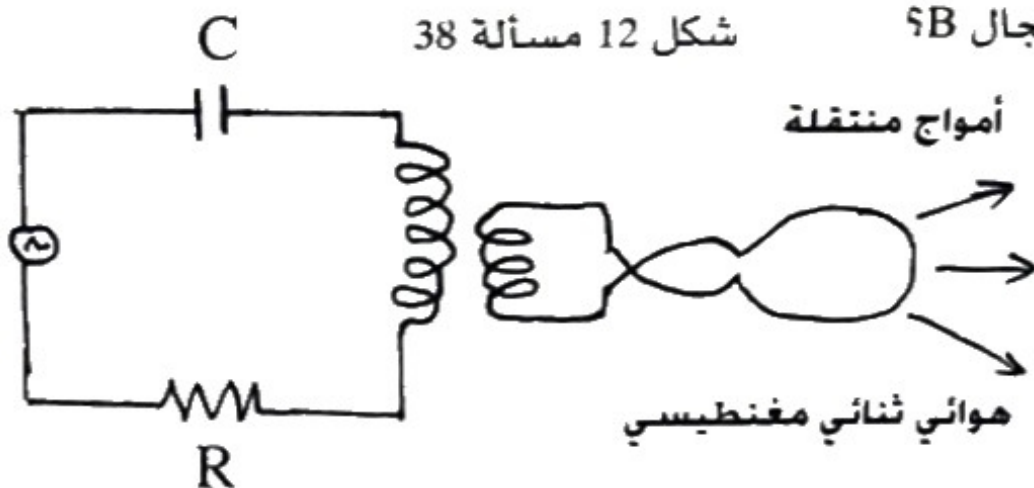
37. موجة كهرومغناطيسية واقفة في الهواء ترددها 4.00×10^{13} Hz.

أ) ما هي المسافة بين المستويات العقدية للمجال $\vec{S}$ و $\vec{E}$

ب) ما هي المسافة بين المستويات العقدية للمجال E والمستويات العقدية

القريبة للمجال B ؟

شكل 12 مسألة 38



مسائل عامة

38. يبين الشكل 12 مذبذب LC موصول بواسطة خط توصيل إلى هوائي ثنائي مغناطيسي.

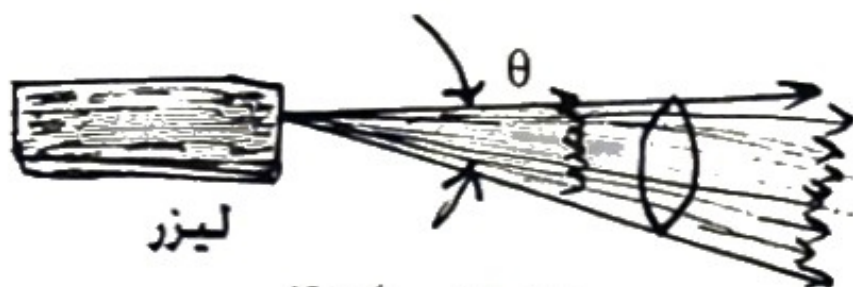
قارن مع الشكل 2، الذي يبين ترتيباً مماثلاً ولكن بشعاع كهربائي للهوائي. أ) ما هي الأسس لإسمي هذين الهوائيين؟ ب) ارسم شكلين يطابقان الشكلين 4 و 5 لتصف الموجة الكهرومغناطيسية التي تسمح منطقة المشاهد عند النقطة P في الشكل 12.

40. يعطى المجال الكهربائي المصاحب للموجة الكهرومغناطيسية المستوية، يُعطى بـ $(E_x = 0, E_y = 0, E_z = E_0 \sin K(x - ct))$ حيث $E_0 = 2.34 \times 10^{-4} \frac{V}{m}$ و $K = 9.72 \times 10^6 m^{-1}$. والموجة تنتشر في الاتجاه $+x$.

أ) اكتب تعابير مركبات المجال المغناطيسي للموجة، أوجد الطول الموجي للموجة.

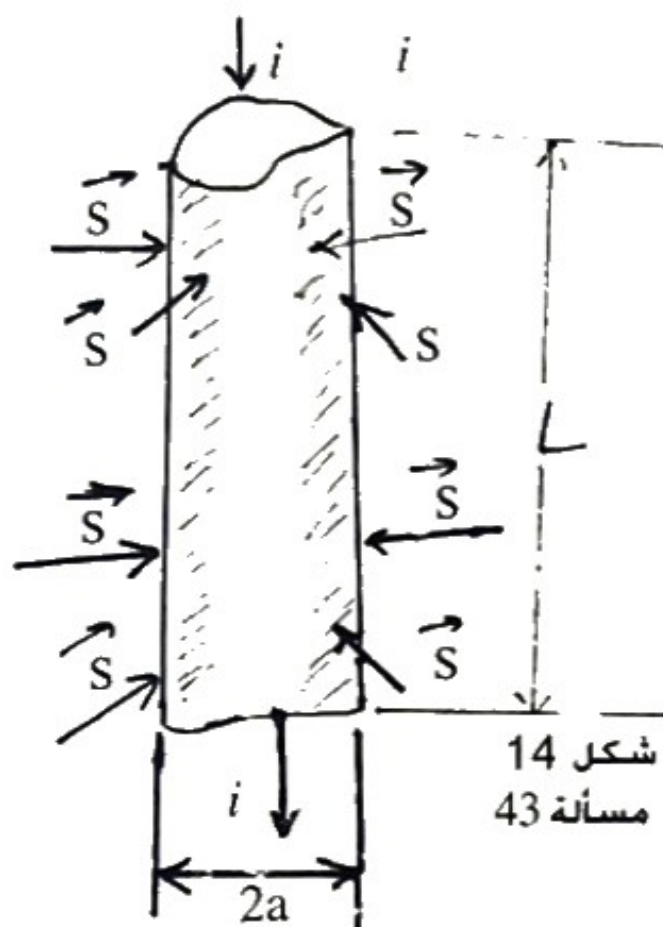
41. موجة كهرومغناطيسية مستوية تسير في الاتجاه السالب لمحور y . في موضع وزمن معينين، كان المجال المغناطيسي بامتداد محور z الموجب ومقداره

28nT. ما مقدار واتجاه المجال الكهربائي في ذلك الموضع وذلك الزمن؟
 42. الاشعاع المنبعث من الليزر هو ليس حزمة متوازية تماماً، بل أنها تتشر (تتسبط) خارجاً بهيئة مخروط دائري المقطع العرضي تدعى زاويته (شكل 13) زاوية تفرق الحزمة الكلية، ليزر أرغون قدرته 3.85 KW يشع عند طول موجي 514.5nm سُدَّ عند القمر في تجربة الشاخص، وكانت زاوية تفرق حزمته 0.880 μ rad أوجد شدة الحزمة عند سطح القمر.



شكل 13 مسألة 42

43. يبين الشكل 14 مقاوم اسطواني طوله L ، نصف قطره a ، ومقاومته P ، يحمل تياراً i بين أن متجه بوينتینگ S عند سطح المقاوم يكون متوجهاً بصورة عمودية نحو السطح في كل مكان.



شكل 14 مسألة 43
 (ب) بين أن المعدل الذي تجري عنده الطاقة الى داخل المقاوم خلال سطحه، المحسوب بواسطة تكامل متجه بوينتینگ فوق هذا السطح، يساوي المعدل الذي تنتج عنده الطاقة؛ أي أن: $\int S \cdot d\vec{A} = i^2 R$ حيث $d\vec{A}$ عنصر مساحة سطح الاسطوانة.

هذا يوحي أنه، طبقاً لمفهوم متجه

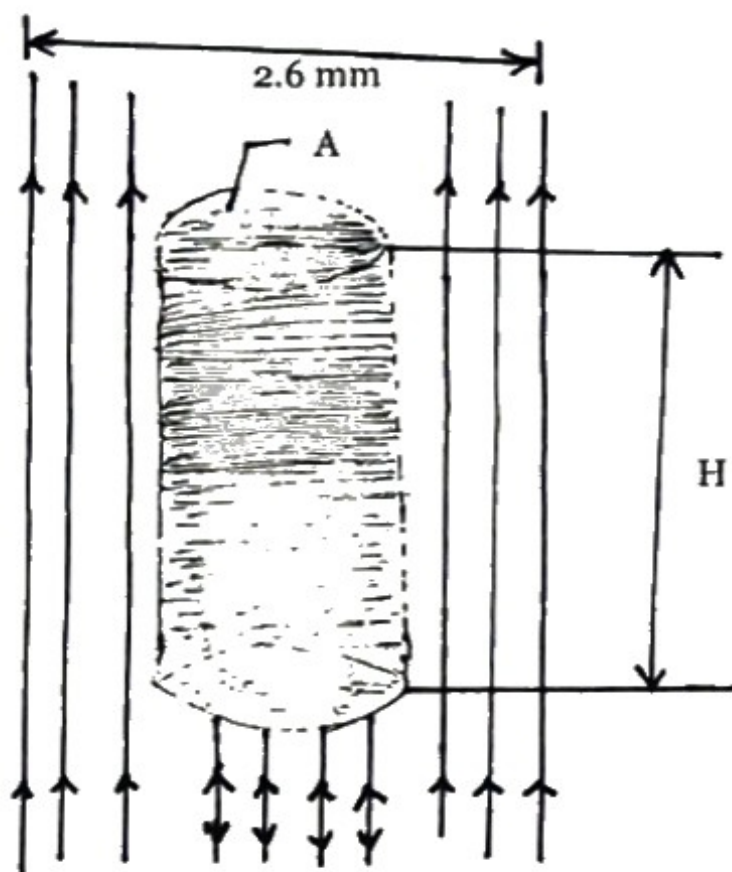
بوينتینگ، فإن الطاقة التي تظهر في المقاوم كطاقة داخلية لا تدخله خلال أسلاك التوصيل ولكن خلال الفضاء المحيط بالأسلاك والمقاوم.

44. (أ) بين أن متوسط شدة الاشعاع الشمسي الساقط عمودياً على سطح خارج الغلاف الجوي الأرضي تماماً هو 1.38 KW/m^2 . (ب) ما هو الضغط الاشعاعي المسلط على هذا السطح، مفترضاً الامتصاص التام لهذا الاشعاع من قبل السطح؟ (ج) كيف تقارن هذا الضغط مع الضغط الجوي الأرضي عند مستوى سطح البحر الذي هو 101 KPa ؟

45. احسب ضغط الاشعاع الوارد من مصباح ضوئي قدرته 500 W على مسافة 1.5 m من المصباح، بفرض أن السطح المسلط عليه الضغط يواجه المصباح وهو ماص كلياً للإشعاع وأن المصباح يشع بانتظام في جميع الاتجاهات.

45. برهن أن الضغط الاشعاعي لموجة مستوية عند السقوط العمودي على سطح مستو يساوي الكثافة الطاقية في الحزمة خارج السطح.

46. ليزر قدرة خرجة 4.6 W وقطر حزمته 2.6 mm ، سدّ رأسياً إلى الأعلى، ما هو ارتفاع الاسطوانة العاكسة كلياً الذي يمكن عنده جعل الاسطوانة تتأرجح بواسطة ضغط الاشعاع المسلط عليها من قبل الحزمة؟ مفترضاً أن كثافة مادة الاسطوانة هي 1.2 g/cm^3 . (شاهد الشكل 14).



الفصل الثاني

طبيعة الضوء وانتشاره

حتى القرن السابع عشر لم يكن ثمة تحديد معين لطبيعة الضوء. فكل الأفكار كانت تتمحور حول النموذج الهندسي للضوء الذي صاغه الإغريق وربما سبقتهم شعوب ما بين النهرين في ذلك. فقد كان لهم باع في علم البصريات يمتد لفترة خمسة آلاف سنة قبل الميلاد. ومن ثم كانت للحسن بن الهيثم (965 - 1039) أفكاراً رائدة أسست لكثير من الحقائق حول طبيعة الضوء وانتشاره في الأوساط الشفافة المختلفة الكثافات الضوئية. فهو الذي صحح الخطأ الشائع آنذاك «بأن الإبصار يتم عن طريق انتقال شعاع ضوئي من العين الى الجسم» مدركاً الحقيقة بقوله «بأن المصادر الضوئية تنير الأجسام ومن بعد ذلك يُكشف عن الضوء الآتي من الجسم بواسطة العين». كانت للحسن بن الهيثم أيضاً أفكاراً جيدة جداً عن آلية عمل بصريات العين وذلك من خلال وصفه لعمل «القمرة المظلمة»، التي شاع اسمها مع الزمن بـ «الكاميرة»، القائم على مفهوم «ثقب الكاميرة»، هذا المفهوم استعان به ونهل منه ليوناردو دافنشي Leonardo da Vinci (1452 - 1519) ليقوم الدليل على حقيقة أن الضوء ينتشر بخطوط مستقيمة.

كل ابن الهيثم أفكاره المتقدمة، بأن افترض محدودية سرعة الضوء، وأن هذه السرعة تكون أصغر في الأوساط الشفافة الأكثر كثافة ضوئية. ولكن لاعتماده (الحسن بن الهيثم) كثيراً على المناظرات الميكانيكية، فإن تصوراته الفيزيائية حول طبيعة الضوء لم تكن دقيقة. فقد كانت لديه فكرة عن الضوء كونه تياراً من جسيمات صغيرة يخضع للقوى السطحية عند الانعكاس والانكسار. فانعكاس الضوء عند الحسن بن الهيثم يحصل خلال الأثير فقط بواسطة تلك القوى الموازية للسطح. ورغم عدم دقة هذا التفسير مقارنة بالنظرية الحديثة لانعكاس الضوء «كونه إعادة إشعاع للأمواج الضوئية الساقطة ومن ثم تداخل هذه الأمواج» لكنه تفسير جد متقدم على عصره.

كانت لدى الحسن بن الهيثم أجوبة صحيحة لكثير من الأسئلة، ولكن لأسباب ومبررات غير صحيحة لم يؤخذ بها. إن نقاط الجدل حول طبيعة الضوء قد حُسمت الآن تقريباً ووجدت الإجابات الصحيحة لكثير من التساؤلات. فليس ثمة ما يميز الضوء بطبيعته الأساسية عن أية موجة كهرومغناطيسية أخرى، فأوصاف الأمواج الكهرومغناطيسية المعروفة تنطبق تماماً على الأمواج

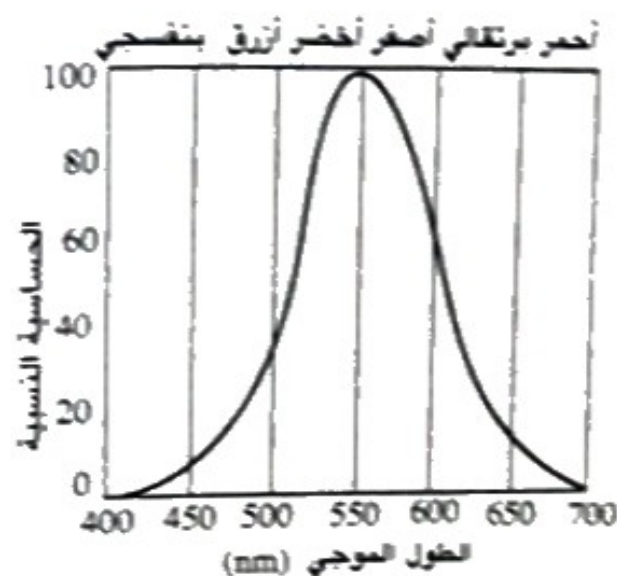
تضوئية. إن الذي يُعبر الضوء عن غيره من الأمواج الكهرومغناطيسية هو أن عين الإنسان حساسة للإشعاع الكهرومغناطيسي في مدى ضيق فقط من الأطوال الموجية يمتد من 400 nm تقريباً (البنفسجي) إلى حوالي 700 nm (الأحمر).

سنعرض في هذا الفصل لبعض ميزات الأمواج الضوئية. بضمنها مصادر الإشعاع المرئي. مقدار سرعة الانتشار في الفراغ وفي المادة. وظاهرة (اثر) دوبلر بالنسبة للضوء التي تظهر عندما يكون المصدر والمُشاهد في حركة نسبية.

(2 - 1) الضوء المرئي

نحدد الضوء المرئي بأنه الإشعاع الكهرومغناطيسي الذي تحسه عيوننا بمدى يتراوح بين 400 nm و 700 nm للإنسان العادي (يقابله مدى ترددي مقداره 4×10^{14} Hz إلى 7×10^{14} Hz).

وداخل هذا المدى تختلف حساسية العين للأطوال الموجية المختلفة. فهي ليست ثابتة للتغيرات في الطول الموجي ضمن المدى المرئي. بمعنى أن العين تستقبل الألوان المطابقة (المقابلة) للأطوال الموجية المرئية بصورة مختلفة والشكل 1 يبين ذلك.



شكل 1 الحساسية النسبية لعين الإنسان كدالة للأطوال الموجية.

إن أقصى حساسية تبديها العين هي للون الأصفر (555 nm) ومقدارها 100%. وتمثل قمة منحنى الحساسية (الشكل أعلاه) ومن ثم تهبط لكلا الأطوال

الموجية الطويلة (يمين المنحني) والقصيرة (يسار المنحني) حتى تبلغ 1% بالنسبة للونين الأحمر (690 nm) عند نهاية المنحني الأيمن والبنفسجي (430 nm) عند نهاية المنحني الأيسر، وهذا بالطبع يخص الإنسان القياسي كمشاهد. أما بالنسبة للحيوانات، فقد تكون لعيونها حساسيات مختلفة، وبالنسبة للأجهزة الالكترونية فقد تكون لها منحنيات حساسية أعرض أو أضيق.

أما مصادر الضوء المرئي فتعتمد بصورة جوهرية على حركة الالكترونات. فالالكترونات في الذرات يمكن أن ترتفع من حالتها الطاقية الدنيا إلى حالات طاقية أعلى بأساليب مختلفة، كتسخين المادة أو بتمرير تيار كهربائي فيها. وأثناء هبوطها النهائي عائداً إلى مستوياتها الدنيا تبعث هذه الالكترونات إشعاعاً قد يكون في المنطقة المرئية من الطيف الكهرومغناطيسي، إن انبعث ضوء مرئي أمر محتمل حدوثه عندما تنتقل الالكترونات الخارجية في الذرات من حالات طاقية أعلى إلى حالات طاقية أدنى.

إن المصدر المألوف للضوء المرئي هو الشمس. فسطحها يبعث إشعاعاً خلال كامل الطيف الكهرومغناطيسي، ولكن جزءه الأكثر شدة يقع في المنطقة المرئية، وتتركز قمته المشعة حول الطول الموجي 550 nm، مقابل أعلى حساسية للعين السليمة (شكل 1).

جميع الأجسام، وبسبب درجة حرارتها، تبعث إشعاعاً يدعى الاشعاع الحراري. والأجسام التي تمتلك إشعاعاً حرارياً مرئياً كالشمس، تدعى أجسام ساطعة (أو متوهجة). وهناك أجسام متوهجة مألوفة أخرى كفتائل المصابيح الضوئية العادية والجمرات المتوهجة في نار الفحم. والتوهج يكون بالضرورة مرافقاً بأجسام ساخنة تتجاوز درجة حرارتها 1000°C .

يمكن للضوء أن ينبعث من أجسام باردة أيضاً، وهذه الظاهرة تدعى بالتألق، كتألق المصابيح المتفلورة الشائعة البرق، الساعة المتوهجة، الساعة الشمسية، والمستقبلات التليفزيونية. ففي حالة المصباح المتفلور يمر التيار الكهربائي خلال الغاز في الأنبوب مسبباً انتقال الالكترونات إلى حالات طاقية أعلى، وعند عودتها إلى حالاتها الأصلية تفقد فائض طاقتها بهيئة إشعاع فوق

بنفسجي، يجري امتصاصه من قبل ذرات السطح الزجاجي الداخلي للأنبوب، وهذه الذرات تشع في النهاية ضوءاً مرئياً. وفي حالة الساعات الشمسية، فإن ضوء الشمس الساقط عليها يسبب لها الإثارة. يمكن تصنيف الأجسام المتألقة إلى صنفين، وذلك اعتماداً على أمد الإشعاع الضوئي بعد زوال مصدر الإثارة: الأجسام التي ينقطع فيها إشعاع الضوء مباشرة بعد زوال الإثارة، وتدعى الأجسام المتفلورة (تحدث الفلورة وتنتهي ضمن زمن 10^{-8} S) ومثالها المصباح المتفلور. والأجسام التي تستمر بالتوهج بعد زوال مصدر الإثارة لأطول من 10^{-8} S وتدعى أجساماً متفسفرة، والمادة التي تسبب هذه الظاهرة تدعى بالمادة الفسفورية، ومثالها بلورة بورات الصوديوم التي تبعث ضوءاً مرئياً عندما تمتص إشعاعاً فوق بنفسجي. يمكن أن يكون للتألق أسباباً متنوعة. فعندما تكون الطاقة التي تثير الذرات ناشئة عن تفاعل كيميائي، يدعى التألق كيميائياً. وكثيراً ما يشاهد التألق في أشياء حية، كالديدان المتوهجة في الكهوف الموجودة في أيسلاند وكثير من الكائنات الحية البحرية: وهنا يدعى التألق بـ «التألق الحيوي». كذلك يمكن للضوء أن ينبعث عندما تعصر بعض البلورات كالسكر، وهذا يعرف بتألق الاحتكاك.

(2 - 2) سرعة الضوء

تمثل سرعة الضوء في الفراغ أحد ثوابت الطبيعة. وأول قياس تقريبي لها كان قد أنجز في 1676 بواسطة الفلكي الدانمركي أولف رومر Olaf Roemer من مشاهداته لحركة أحد توابع المشتري، وأول قياس ناجح لها كان بواسطة فرنسل fresnel ثم مايكلسون (1852 - 1931)، الذي كان قياسه الأقرب إلى الصحيح. إن الاختراق الحاسم في قياسات سرعة الضوء حصل في العام 1970 مع تطبيقات الليزر. فبقياس تردد وطول موجة حزمة الليزر مباشرة أمكن حساب سرعة الضوء من العلاقة $C = \lambda f$ بارتياح أصغر من 1m/s ، فكانت قيمتها $C = 299,792,458\text{m/s}$.

هذا في الفضاء الفارغ، أما في المادة وبسبب الطبيعة الكهرومغناطيسية للضوء، فإن المجال الكهربائي يتبدل في العازل بالعامل K_e ، المعروف بثابت

العزل الكهربائي للمادة، الذي ندخله في الحساب في حالة المادة العازلة، فنستبدل السماحية الكهربائية بـ $K_e \epsilon_0$.

كذلك يجب حساب تأثير الخواص المغناطيسية للوسط على المجال المغناطيسي للموجة الكهرومغناطيسية المنتشرة، فالمواد المغناطيسية تتصف بثابت نفاذية نسبي K_m ، الذي يمكن معاملته مثل ثابت العزل الكهربائي، فندخله في الحساب في حالة المواد غير عالية الانفاذية، فنستبدل ثابت الانفاذية المغناطيسية μ_0 بـ $K_m \mu_0$. وعلى هذا الأساس يمكن التعبير عن سرعة الضوء في المادة كدالة للخواص الكهربائية والمغناطيسية للوسط بالعلاقة:

$$v = \frac{1}{\sqrt{K_e K_m}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{K_e K_m}} \quad (2 - 1)$$

أما المواد المنفذة للضوء فهي مواد غير عالية الانفاذية المغناطيسية عادة وثابت إنفاذيتها النسبي K_m لا يختلف عن الوحدة الواحدة الا بمقدار لا يزيد كثيراً عن 10^{-4} ; ومن ثم فإن عزلها الكهربائي K_e هو الذي يحدد سرعة انتشار الضوء فيها وفقاً للعلاقة (2 - 1)، شريطة أن لا يتغير المجال المطبق عند تردد عال والجدول 1 يبين قيم سرعة الضوء في مواد مختلفة.

جدول 1 سرعة الضوء في مواد مختارة

المادة	سرعة الضوء (10 ⁸ m/s)
الفراغ	3.00
الهواء	3.00
الماء	2.26
محلول السكر (50%)	2.11
الزجاج التاجي	1.97
الماس	1.24

بأنسبة للضوء الأصفر ($\lambda = 589 \text{ nm}$).

مثال 1 سرعة الضوء الأصفر ($\lambda = 589 \text{ nm}$) في الماء تساوي $2.26 \times 10^8 \text{ m/s}$.

s. ما هو ثابت العزل الكهربائي الفعال للماء عند هذا التردد.

الحل: نستخدم المعادلة (2 - 1) ونفترض أن $K_m = 1$ للماء، نجد:

$$K_e = \left(\frac{C}{v} \right)^2 = \frac{(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})^2}{(2.26 \times 10^8 \text{ m/s})^2} = 1.76$$

انتشار الضوء في المادة

إن الآلية المعول عليها في انتشار الضوء في المادة هي الاستطارة. ولأمواج المستطارة المنتشرة بصورة مستعرضة على اتجاه انتشار الضوء الساقط تسبب تداخلاً هداماً كاملاً تقريباً في الاتجاه المستعرض. أما الأمواج المستطارة المنتشرة في الاتجاه الموازي لاتجاه انتشار الضوء الساقط. فهي ليست في الطور مع الضوء الساقط؛ ولذلك. فإن نتيجة تداخلها معه تكون ذات طور مختلف عن طوره؛ وهذا ما يمكن مشاهدته في حالة تغير سرعة الضوء.

إن المجال الكهربائي للضوء الساقط يجبر الإلكترونات في ذرات حادة الوسط على الاهتزاز بنفس تردد الضوء. ما يجعل طور الموجة المعاد إشعاعها يعتمد على الاهتزازات الذرية. ومن ثم على تردد الموجة الأصلية. عندما تتداخل الأمواج الساقطة والمستطارة. فإن طور اتحادهما يعتمد على فرقهما الطوري ومن ثم على التردد. ولذلك. فإن سرعة الضوء في المادة تعتمد على التردد أو الطول الموجي. وهذا ما يعرف بالتشتت. فالضوء الذي نراه أتياً من الشمس إلى عيوننا هو في الحقيقة ليس من الشمس مباشرة. بل من جزيئات الهواء على بضع مليمترات من عيوننا بعد أن يكون قد تشتت بواسطة هذه الجزيئات وأعيد إشعاعه من جديد بواسطة أيضاً.

(2 - 2) أثر دوبلر النسبي في الضوء

يظهر أثر دوبلر في الضوء. كما في الصوت. كتغير في التردد أثناء الحركة النسبية لكل من المصدر والمراقب أو لكليهما معاً. فالصوت يصبح أكثر جهورية (يزداد تردده) عندما يقترب المصدر من السامع الثابت وفقاً للعلاقة.

$$(2 - 2) \quad \lambda = \lambda_0 \frac{1}{1 - uv} \quad (\text{المصدر الصوتي يقترب من السامع الثابت})$$

حيث ν هو التردد المسموع، ν_0 التردد الأصلي للمصدر الثابت، v - سرعة المصدر، و v هي سرعة الصوت في الهواء.

أما إذا اقترب السامع من المصدر الثابت، فإن التردد المسموع.

$$(2-3) \quad \nu = \nu_0 (1 + u/v) \quad (\text{السامع يقترب من المصدر الثابت})$$

أما بالنسبة للضوء، وفي الوسط المنفذ، فلا يصح تطبيق أي من المعادلتين (2-2) أو (2-3). وهنا يصح فقط أثر دوبلر النسبي، شرط أن يكون اتجاه انتشار الضوء هو نفسه اتجاه الحركة النسبية للمصدر والمراقب:

$$\nu = \nu_0 \frac{1 + u/c}{1 - u^2/c^2}$$

$$(2-4) \quad (\text{المصدر الضوئي والمُشاهد يقتربان من بعضهما})$$

$$\nu = \nu_0 \sqrt{\frac{1 - u^2/c^2}{1 - u/c}}$$

تُطبق المعادلة (2-4) في حالة خاصة فقط، عندما يكون اتجاه انتشار الضوء هو نفسه اتجاه الحركة النسبية لكلا المشاهدين في الاطار S وفي الاطار S. يمكن مؤالفة المعادلات (2-2)، (2-3)، و(2-4) إذا كان المصدر والمُشاهد يتباعدان الواحد عن الآخر وذلك باستبدال u بـ $-u$.

المعادلات (2-2)، (2-3)، و(2-4) تعطينا نتائج متماثلة إذا كانت النسبة u/c صغيرة، وهذا يمكن رؤيته من خلال نشر المعادلات باستخدام نظرية ذي الحدين، معوضين v بـ c ، وهذا يعطينا.

$$\text{المعادلة (2-2): } \nu = \nu_0 [1 + \frac{u}{c} + (\frac{u}{c})^2 + \dots]$$

$$\text{المعادلة (2-3): } \nu = \nu_0 (1 + \frac{u}{c}), \quad \text{المعادلة (2-7): } \nu = \nu_0 (1 + \frac{u}{c}),$$

$$\text{المعادلة (2-4): } \nu = \nu_0 [1 + \frac{u}{c} + \frac{1}{2}(\frac{u}{c})^2 + \dots] \quad (2-8)$$

إن النسبة u/c لأغلب المصادر الضوئية، حتى لتلك المصادر ذات الأبعاد الذرية، تكون صغيرة، وبالتالي فإن الحد u^2/c^2 هو من الصغر البالغ حد الإهمال. وعليه، فإن الحد u/c يعطينا تقييماً معقولاً لرحضة دوبلر. إن الفروقات بين هذه المعادلات تحت جميع الظروف ليست ذات أهمية.

مثال 2 نجم بعيد يتحرك مبتعداً عن الأرض بسرعة 4. أراد مُستكشف فلكي أن يحدد خط طيفي معين في الضوء القادم من النجم فوجد أن خط طيف الهيدروجين المنبعث من النجم كان بطول موجي $\lambda = 460.9 \text{ nm}$ في حين أن نفس هذا الخط الطيفي المنبعث من الهيدروجين الذري كان قد شوهد بواسطة أنابيب التفريغ الهيدروجينية على الأرض بطول موجي $\lambda_0 = 121.6 \text{ nm}$. فما هي سرعة النجم بالنسبة للأرض على فرض أنه يتحرك قطرياً مبتعداً عنا؟

الحل: بتطبيق المعادلة (4 - 2) بالنسبة للطول الموجي مع تعويض $(-U)$ بدلاً من u لأن المصدر والمُشاهد يبتعدان عن بعضهما البعض. نجد:

$$\frac{c}{\lambda} = \frac{c}{\lambda_0} \sqrt{\frac{1-u/c}{1+u/c}}$$

$$\lambda = \lambda_0 \sqrt{\frac{1-u/c}{1+u/c}} \quad (2 - 9)$$

وبحل هذه المعادلة بالنسبة للسرعة، نحصل على:

$$\frac{u}{c} = \frac{(\lambda/\lambda_0)^2 - 1}{(\lambda/\lambda_0)^2 + 1} \quad (2 - 10)$$

ومنه نجد (بعد التعويض عن λ/λ_0 بـ $460.9 \text{ nm} : 121.6 \text{ nm} = 3.79$)

$$\frac{u}{c} = \frac{(3.79)^2 - 1}{(3.79)^2 + 1} = 0.87$$

بمعنى أن النجم يتحرك مبتعداً عن الأرض بسرعة 87% من سرعة الضوء بالاتجاه القطري.

في حالة عندما لا يتطابق اتجاه انتشار الضوء مع اتجاه الحركة النسبية للمصدر والمراقب، بل يصنعان بينهما زاوية θ ، فإن المعادلة (4 - 2) تعاد كتابتها بالصورة.

(2 - 11) (المصدر الضوئي والمُشاهد يقتربان من بعضهما البعض)

$$\nu = \nu_0 \frac{\sqrt{1-u^2/c^2}}{1-(u/c)\cos\theta}$$

هنا يقيس المُشاهد في الإطار S تردداً أعلى. نلاحظ أن هذه المعادلة تتحول إلى المعادلة (2 - 5) إذا وضعنا $\theta = 0$. وعندما يبتعد المصدر عن المُشاهد نضع $(-U)$.

مثال 3 تابع أرضي يدور من الغرب إلى الشرق على ارتفاع $h = 153 \text{ Km}$ في مدار معين فوق خط الاستواء (شكل 2-2). ثمة سفينة مراقبة راسية عند خط الاستواء فوق خط الزوال الرئيس عند الدرجة صفر 0° طولاً (عند الساحل الغربي لأفريقيا تماماً).

وكان التابع يبعث موجات راديوية بتردد 122.450 MHz . ما هو التردد الذي يتناغم معه مستقبل السفينة عندما يكون التابع.

(أ) فوق السفينة مباشرة،

(ب) غرب السفينة بـ 10° طولاً،

(ج) شرقها بـ 10° طولاً؟

الحل (أ) نجعل المعلم الإحداثي S' متحركاً مع التابع في اللحظة التي يكون فيها في السميت: والمعلم الإحداثي S لسفينة المراقبة في الأسفل. إن التردد ω_0 المشاهد في المعلم المتحرك S' (التردد الأصلي) هو 122.450 MHz ؛ أما السرعة النسبية U بين المعلمين فتحدد بواسطة السرعة المدارية للتابع عند الارتفاع h أو عند نصف القطر $R = R_E + h$. حيث R_E نصف قطر الأرض. عند هذا الارتفاع فإن تعجيل الجاذبية عند نصف القطر R_E هو MG/R^2 والذي يجب أن يخضع للتعجيل المركزي u^2 / R ، الضروري للمدار الدائري. وهكذا فإن:

$$\frac{MG}{R^2} = \frac{u^2}{R}$$

$$u = \sqrt{\frac{MG}{R}}$$

$$= \sqrt{\frac{MG}{R_E + h}}$$

$$= \sqrt{\frac{(5.98 \times 10^{24} \text{ kg})(6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2)}{6370 \text{ km} + 153 \text{ km}}}$$

$$= 7.82 \times 10^3 \text{ m/s} ; \Rightarrow \frac{u}{c} = 6.8 \times 10^{-10}$$



شكل 2 - 2

شكل 2 - 2 تابع في مدار أرضي على ارتفاع h فوق سطح الأرض، وسفينة مراقبة

ترصد اشاراته.

حيث M كتلة الأرض و G ثابت الجاذبية العام. وعندما يكون التابع فوق السفينة مباشرة، فإن زحزحة دوبلر (التردد المسموع) عندما تكون هناك زاوية بين اتجاه حركة المصدر واتجاه انتشار الضوء) تتحصل من العلاقة (2 - 7) حيث $\theta = 90^\circ$ في المسألة المدروسة: ومنه نجد:

$$\nu = \nu_0 \sqrt{1 - u^2/v^2} = 122.450 \text{ MHz} \sqrt{1 - (2.61 \times 10^{-5})^2} = 122.450 \text{ MHz} \sqrt{1 - 6.8 \times 10^{-10}} \approx 122.450 \text{ MHz}$$

(ب) عندما لا يكون التابع في السميت (ليس فوق رأس المراقب مباشرة) فمن الضروري في هذه الحالة حساب الزاوية θ بين سرعة التابع والاتجاه إلى سفينة الرصد (الشكل 2 - 2). ولحساب θ يجب حساب α أولاً وذلك بتطبيق قانون الجيوب على المثلث المتكون من التابع، السفينة، ومركز الأرض:

$$\frac{\sin \alpha}{R_E} = \frac{\sin (\pi - \alpha - \phi)}{R_E + h}$$

وعبر هذه المعادلة بالنسبة لـ $\sin \alpha$ ، نحصل على:

$$\tan \alpha = \frac{R_E \sin \phi}{h + R_E (1 - \cos \phi)} = \frac{(6370 \text{ Km}) (\sin 10^\circ)}{153 \text{ K} + (6370 \text{ Km}) (1 - \cos 10^\circ)} = 4.428$$

$$\alpha = \tan^{-1} 4.428 = 77.3^\circ \Rightarrow \theta = \frac{\pi}{2} - \alpha = 90 - 77.3^\circ = 12.7^\circ$$

وبتطبيق المعادلة (2 - 7)، مع ملاحظة أن التابع يقترب في حركته من السفينة، نجد أن:

$$\nu = \frac{\nu_0}{1 - (u/v) \cos \theta} = \frac{122.450 \text{ MHz}}{1 - (2.61 \times 10^{-5}) (\cos 12.7^\circ)} = 122.453 \text{ MHz}$$

أي أن زحزحة دوبلر في هذه الحالة تساوي 0.053 MHz وهي تقوية للتردد المشاهد.

(ج) بعد مرور التابع من على رأس سفينة الرصد وحركته نحو الشرق، فإنه يبتعد عنها، وفي هذه الحالة يجب تعويض سرعة التابع U بـ $-U$ في المعادلة (2 - 7)، ومنه نجد:

$$\nu = \frac{\nu_0}{1 + (u/v) \cos \theta} = \frac{122.450 \text{ MHz}}{1 + (2.61 \times 10^{-5}) (\cos 12.7^\circ)} = 122.447 \text{ MHz}$$

أي أن التردد المسجل على الأرض يتناقص في حالة ابتعاد التابع عن السفينة بمقدار 0.003 MHz . وهذا يعنى أنه يتغير من 122.453 MHz إلى

122.450MHz (التابع يقترب من المراقب) ومن ثم إلى 122.447MHz (التابع يبتعد عن الراصد (التابع فوق الرأس)).

(2 - 3) حوادث أثر دوبلر النسبي

هناك حادثتان هامتان لأثر دوبلر النسبي تمت مناقشتهما هما: زحزحة دوبلر الحمراء المشار إليها في المثال 2 والزحزحة الترددية المشار إليها في المثال 3. والآن سنعتبر حادثتان اضافيتان، هما أثر دوبلر المستعرض والتناقض التوأمي؛ سنناقش الأولى منهما:

أثر دوبلر المستعرض

الفرق المهم بين الصياغات التقليدية والصياغات النسبية لأثر دوبلر يظهر عندما نعتبر الحالة $\theta = 90^\circ$ ، التي تكون فيها الحركة النسبية للمصدر والمشاهد بزوايا قائمة بالنسبة لاتجاه انتشار الجبهات الموجية، ووفقاً للتحليل التقليدي، ليس ثمة زحزحة دوبلرية في هذه الحالة، في حين أن التعبير النسبي (11 - 2) يتوقع أن المشاهد يقيس تردداً قدره.

$$\nu = \nu_0 \sqrt{1 - u^2/c^2} \quad (2 - 12)$$

وهذا يُعرف بأثر دوبلر المستعرض وهو أثر نسبي نقي دونما تطابق تقليدي (أو كلاسيكي)، وهنا يلاحظ أن تردد المشاهد ν أقل دائماً من التردد ν_0 المنبعث بواسطة المصدر.

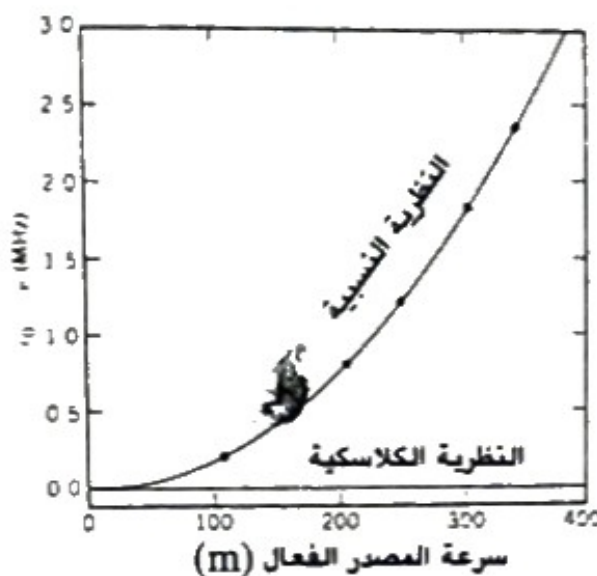
إذا نشرنا المعادلة (12 - 2) باستخدام نظرية ذات الحدين، نحصل على:

$$\nu = \nu_0 (1 - \frac{1}{2} \frac{u^2}{c^2} + \dots) \quad (2 - 13)$$

بمقارنة هذه المعادلة مع المعادلات (6 - 2) - (8 - 2)، نجد أن زحزحة دوبلر المستعرضة لا تتضمن عبارة التناسب الطردي مع الرتبة الأولى لـ u/c . بينما يضم كل من أثر دوبلر النسبي الطولي وأثر دوبلر التقليدي مثل هذه العبارة (u/c) . إن غياب العبارة u/c من المعادلة (13 - 2) يتساق مع عجز النظرية التقليدية (الكلاسيكية) عن التنبؤ بمثل هذا الأثر.

إن الاثبات الحاسم لأثر دوبلر المستعرض ينتج على وجه الخصوص من تجربة والتر كوندج W. Kundig، الذي وضع مصدر اشعاعات جاما عند

مركز دوار النابذة (rotor of centrifuge) وعلى حافتها وضع رقاقة معدنية خلفها كاشف لقياس الامتصاص عندما كانت سرعة الدوار قد تغيرت. عندما تدور النابذة تكون الرقاقة في حركة مستعرضة بالنسبة للمصدر الموجود في المركز، والاشعاع الواصل للرقاقة يتعرض لזחزحة دوبلر المستعرضة، ورغم أن السرعة المماسية للمادة الماصة (الكاشف) كانت بضع أمتار في الثانية، بحيث أن القيمة المطابقة U^2/c^2 بحدود 10^{-12} ، فإن هذه التجربة الحساسة كانت قادرة على الحصول على دليل واضح لזחزحة دوبلر المستعرضة، والشكل 3 يلخص نتائج كوندج، التي تتفق مع الصيغة النسبية وتتعارض مع الصيغة الكلاسيكية التي لا تتنبأ بأثر دوبلر المستعرض.



شكل 2 - 3

سرعة المصدر الفعال (m/s).

شكل 2 - 3 نتائج تجربة كوندج لانتقال أثر دوبلر بالتوافق مع نظرية النسبية وبالتعارض مع النظرية الكلاسيكية التي لا تتوقع الأثر.

كان يمكن أيضاً تفسير زحزحة دوبلر المستعرضة بوصفها ظاهرة أو أثر تمدد الزمن. فمصدر الأمواج في الاطار S كان يمكن اعتباره كساعة. تدق بمعدل يتحدد بالدور $\omega = 1/T$ ، كزمن ملائم في S. إن المشاهد في الاطار S يقيس دوراً أطول (متمدد) T وبالتالي، تردداً أصغر $\omega = 1/T$. وعليه، فإن اثبات أثر دوبلر المستعرض كان يمكن أخذه كإثبات آخر لتمدد الزمن النسبي.

(1 - 1) الضوء المرئي

1 - أ) عند أي الأطوال الموجية تكون لعين المشاهد القياسي نصف حساسيتها العظمى؟ ب) ما هو الطول الموجي، التردد، الدور للضوء الذي بالنسبة اليه تكون العين في أقصى حساسيتها؟

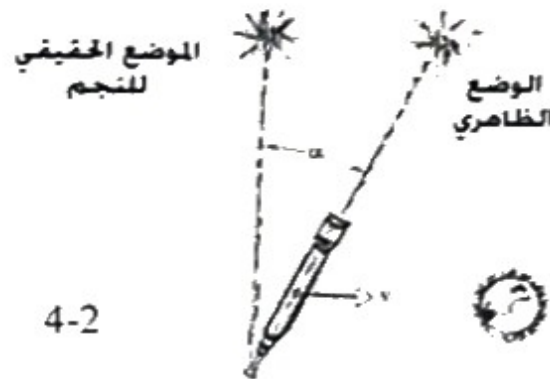
2 - كم عدد الذبذبات الكاملة التي يتضمنها قطار موجي طوله الموجي 520 nm ينبعث من ذرة ما خلال زمن 12ps؟

(1 - 2) سرعة الضوء

3 - هب أن بالإمكان إقامة اتصال راديوي مع قاطنين افتراضيين لكوكب افتراضي في فلك أقرب نجم إلينا، النجم، الذي يبعد عنا 4.34 سنة ضوئية، كم يلزم من الزمن لاستلام جواب على رسالة نبعثها لسكان هذا الكوكب؟

4 - إذا كانت اللادقة (الشك) في المسافة إلى القمر، كما قيست بواسطة انعكاس ضوء الليزر من عاكس موضوع على القمر، هي 2cm تقريباً، وهو شك يرافق الزمن المنقضي، فما هي اللادقة في هذا الزمن ضمناً؟

5 - إعتبر نجماً متموضعاً على خط خلال الشمس، مرسوم بصورة عمودية على مستوى المدار الأرضي حول الشمس، مسافة النجم أكبر بكثير من قطر المدار الأرضي، بين أن التليسكوب، الذي نرى بواسطته النجم يجب، وبسبب من محدودية سرعة الضوء، أن يكون مائلاً في اتجاهه بزاوية $20.5''$ ومتحركاً بسرعة V ، كما يبين ذلك الشكل 4. هذه الظاهرة تدعى الزيف.



شكل 4 مسألة 5

4-2

(2 - 2) اثر دوبلر في الضوء

6 - برهن أن زحزحة دوبلر عندما تكون $c \gg u$ يمكن أن تكتب بالصورة

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{u}{c}$$

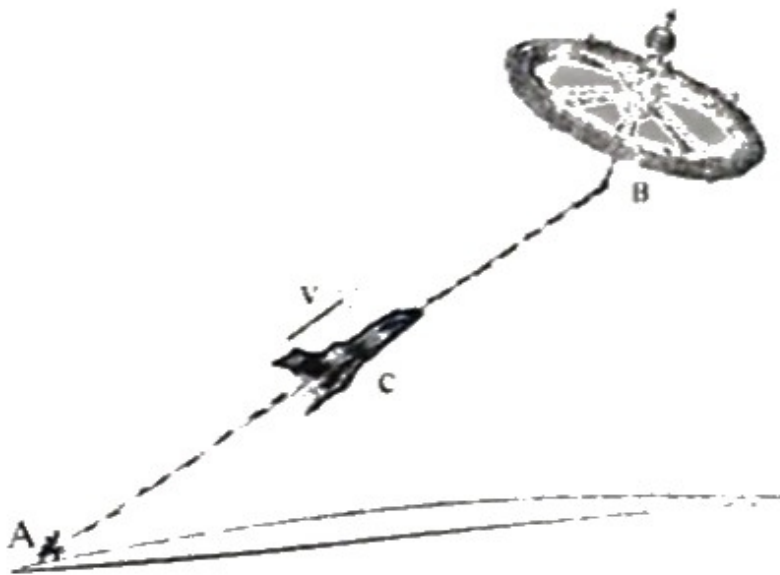
التقريبية:

حيث $\Delta \lambda$ هو التغير في الطول الموجي.

7 - مركبة صاروخية (مُسَيِّرة بالصواريخ وقادرة على الانطلاق خارج جو الأرض) تغادر الأرض بسرعة $0.20c$ (أي 20% من سرعة الضوء). ثمة ضوء بدا أزرقاً لركاب المركبة، فما هو اللون الذي يظهر لمراقب على الأرض؟

8 - احسب زحزحات دوبلر الطول موجية المتوقعة لضوء طوله الموجي 553 nm ينبعث من حافة قرص الشمس عند خط الاستواء أثناء دوران الشمس. (لاحظ المثال 2 - 2 وخذ المعطيات حول الأرض من الجداول).

9 - المصدر الضوئي A على الأرض يبعث ومضة ضوئية كل 6 دقائق. والمستقبل B على ظهر محطة فضائية مستقرة بالنسبة للأرض. والمستقبل C على متن صاروخ يسير من A إلى B بسرعة ثابتة تشكل 0.60 من سرعة الضوء ($0.60c$) بالنسبة لـ A. (لاحظ الشكل 5) أ) عند أي الفترات الزمنية يستلم B إشارات من A؟ ب) عند أي الفترات الزمنية يستلم C إشارات من A؟ ج) إذا أومض C في كل مرة يستلم فيها إشارة من A، فعند أي الفترات الزمنية يستلم B هذه الومضات؟



شكل 5 مسألة

(2 - 3) حوادث اثر دوبلر

10 - احسب زحزحة دوبلر الطول موجية $\lambda - \lambda_0$ لخط الصوديوم D2 (589.00nm) المنبعث من مصدر متحرك في دائرة بسرعة ثابتة قدرها 0.122 C بمقاسة بواسطة مراقب ثابت في مركز الدائرة.

11 - مصدر أمواج راديوية تردده السكوني 188MHz يتحرك بسرعة 0.717C بصورة مستعرضة بالنسبة لخط موقع مسجل الاشارات. عند أية زاوية إلى خط الموقع يجب أن يتحرك مصدر ثاني تردده السكوني 162MHz ويسير بنفس سرعة المصدر الثاني إذا كان ترددا المصدرين لحظة استلامهما عند مسجل الاشارات متساويين؟

الفصل الثالثة

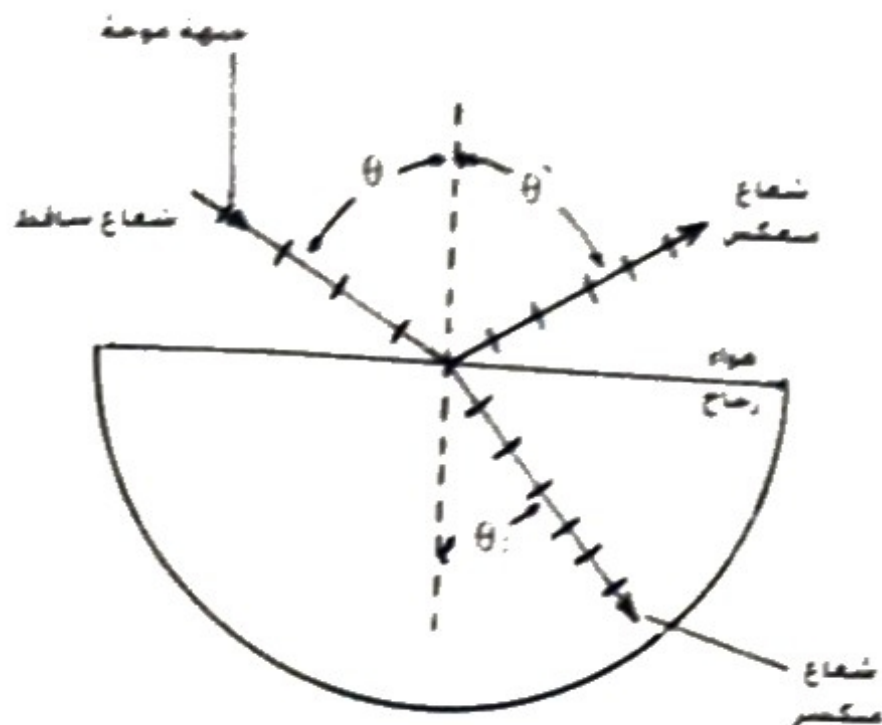
الانعكاس والانعكاس

تدخل دراسة انعكاس الضوء وانكساره تحت مفهوم البصريات الهندسية، القائم على وجهة النظر الشعاعية للضوء في إطار النظرية الجسيمية للضوء. إن التطبيقات التقليدية للبصريات تشمل العدسات المصححة للبصر وتكون الصورة (تشكلها) بواسطة التليسكوب والميكروسكوب. أما التطبيقات الحديثة للبصريات فهي تخزين المعلومات واسترجاعها، كما في الأقراص المدمجة (أو طبقات الـ CD)، وانتقال الاشارات خلال كابلات الألياف البصرية القادرة على حمل كم هائل من المعلومات. سنتعامل في هذا الفصل مع الضوء على أنه يسير بخطوط مستقيمة ويتقابل مع أجسام قياساتها أكبر بكثير من الطول الموجي للضوء: آخذين بالنموذج الشعاعي للضوء، وهذا هو عالم البصريات الهندسية.

(3 - 1) الانعكاس والانكسار عن السطوح المستوية

يمكن لظاهرتي الانعكاس والانكسار أن تظهراً حيثما ينتقل الضوء من وسط إلى آخر (من الهواء إلى الزجاج، مثلاً). وجزء من الضوء (الحزمة الضوئية) قد ينعكس إلى الخلف داخل الوسط الأول والجزء الثاني قد ينفذ داخل الوسط الثاني، مثلما هو موضح على الشكل 1 في هذا الشكل مُثلث حزم الضوء بواسطة الأشعة التي رُسمت كخطوط مستقيمة عمودية على الجبهات الموجية (المستوية)، مُشيرة إلى اتجاه حركة هذه الجبهات. حيث نلاحظ ثلاثة أشعة، الشعاع الأصلي أو الساقط، المنعكس، والمنكسر، الذي يغير اتجاه الشعاع الأصلي عندما يدخل الوسط الثاني.

عند نقطة ارتطام الضوء بالسطح نرسم خطاً عمودياً عليه، وهنا نحدد ثلاث زوايا مُقاسة بالنسبة لهذا العمود: زاوية السقوط θ_i ، زاوية الانعكاس θ_r ، وزاوية الانكسار أو النفوذ θ_t (الرموز i, r, t ، و a ترمز للمصطلح اللاتيني للظاهرة) ونسمي المستوي المتكون من الشعاع الساقط والعمود بمستوي السقوط، وهو مستوي الصفحة.



شكل 1

شكل 1 تمثيل باستخدام الأشعة، حيث أشير إلى زوايا السقوط θ_i ، الانعكاس θ_r ، والانكسار θ_t ، وهي مقاسة بين العمودي على السطح والشعاع المناسب.

قانون الانعكاس، وينص على أن زاوية السقوط تساوي زاوية الانعكاس:

$$\theta_i = \theta_r \quad (3 - 1)$$

قانون الانكسار، وينص على أن الشعاع المنكسر يقع في مستوى السقوط، وأن:

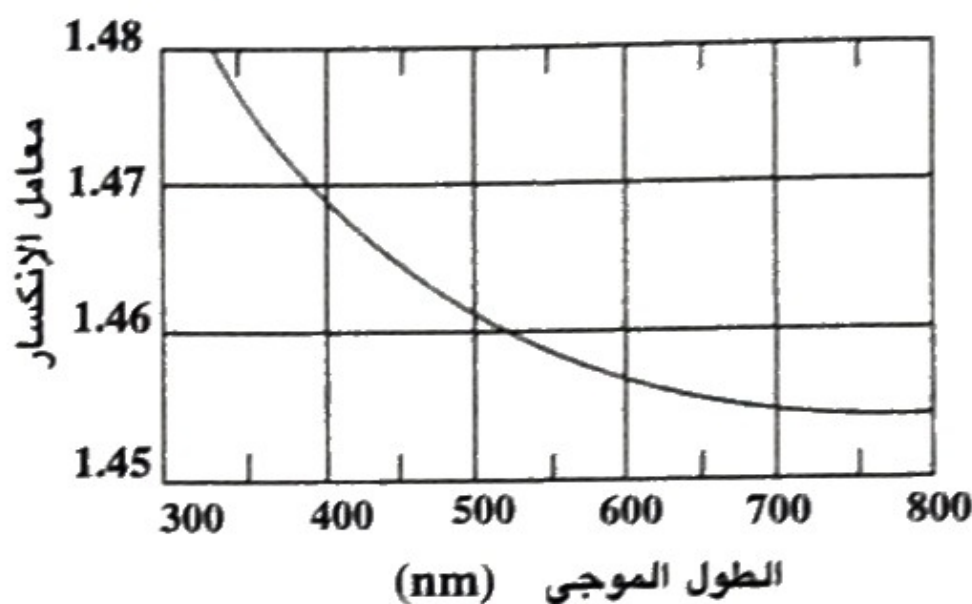
$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad (3 - 2)$$

حيث n_i هو معامل انكسار الوسط الذي ورد منه الضوء (الهواء في حالتنا المدروسة - الوسط الأول) و n_t - معامل انكسار الوسط الثاني (الذي نفذ فيه الضوء)، وهو كمية بدون وحدات (لاحظ المعادلة (24 - 1)). والمعادلة (3 - 2) تدعى بقانون سنل، وهنا من المفيد التذكير أن الانكسار يظهر بسبب سرعة الضوء عند انتقاله من وسط إلى آخر، وكلما كان هذا التغير كبيراً (نقصانها في حالة انتقال الضوء من الهواء - الأعلى شفافية والذي اعتبر معامل انكساره مساوياً للوحدة بما يكافئ الفراغ - إلى الزجاج أو الماء أو زيادتها عند انتقال الضوء من وسط أقل شفافية كالماء أو الزجاج إلى الهواء، والجدول التالي، يبين بعض الأمثلة لمعاملات الانكسار لمواد مختلفة.

جدول 1 بعض معاملات الانكسار

الوسط	معامل الانكسار	الوسط	معامل الانكسار
الفراغ (تام)	1.00000	الزجاج الناجي العادي	1.52
الهواء	1.00029	كلوريد الصوديوم	1.54
الماء (20 م°)	1.33	بولستيرين	1.55
الأسيتون	1.36	ثاني كبريتور الكربون	1.63
الكحول الأيثلي	1.36	زجاج فلنت الخفيف	1.65
محلول السكر (30%)	1.38	الماس	2.42
محلول السكر (80%)	1.49	زجاج فلنت الأخف	1.89

وعلى العموم، فإن معامل انكسار المادة يتغير مع الطول الموجي للضوء، كما يبدو ذلك على الشكل 2. فالانكسار يمكن أن يكون وسيلة لتحليل الحزمة الضوئية إلى مكوناتها من الأطوال الموجية كما يظهر في قوس قزح.



شكل 2

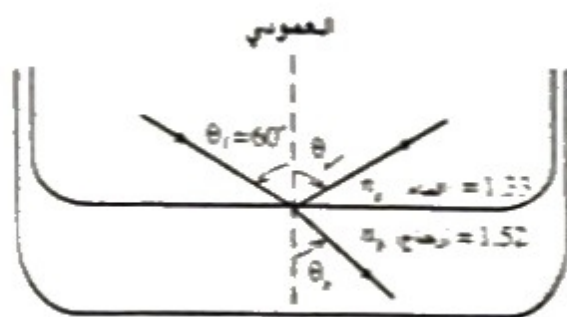
شكل 2 معامل انكسار مرو (كوارتز) ذاتب كدالة للطول الموجي.

انعكاس وانكسار الأمواج الكهرومغناطيسية

يصح قانونا الانعكاس والانكسار لجميع مناطق الطيف الكهرومغناطيسي، وليس للضوء فقط. ومثال ذلك انعكاس الأمواج الميكروية أو أمواج الراديو من

تغلاف الأيونى (الأيونوسفير) وانكسار الأشعة السينية بواسطة البلورات. يمكن اعتماداً على طبيعة السطح العاكس وعلى الطول الموجي للأشياء الساقط. تصنيف الخواص الانعكاسية. وبالتالي الانعكاس. إلى: انعكاس انتشاري. كالانعكاس بواسطة الورقة. وانعكاس مرآوي. كالانعكاس بواسطة السطح الناعم الصقيل. وفي كلتا الحالتين. فإن الحزمة المنعكسة تتشكل فقط إذا كانت الأبعاد التقليدية للشذوذات السطحية للعاكس أقل بصورة ملموسة من الطول الموجي للضوء الساقط. فعلى سبيل المثال. تعتبر قاعدة سبيكة مقلاة الحديد عاكساً جيداً للأمواج الميكروية ذات الطول الموجي 0.5 cm ولكنها ليست كذلك بالنسبة للضوء المرئي.

مثال 1 يوضح الشكل 3 شعاعاً ضوئياً يسقط على سطح بينى يفصل بين الماء والزجاج. فإذا كانت زاوية سقوط الشعاع مع العمود 60° . فتأوجد اتجاهي الشعاعين المنعكس والمنكسر. علماً أن n للماء = 1.33 وللزجاج 1.52.



شكل 3

شكل 3 انعكاس وانكسار الضوء المار في الماء إلى الزجاج.

الحل: يتحدد اتجاه الشعاع المنعكس أو المنكسر بالزاوية التي يعملها مع العمود عند نقطة السقوط على السطح البيني. ووفقاً للقانون الأول للانعكاس (1 - 3) فإن زاوية انعكاس الشعاع المنعكس تساوي زاوية السقوط. وتساوي 60° . أما زاوية انكسار الشعاع المنكسر فتتحدد من قانون سنل (2 - 3):

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$$

أو

$$\theta_t = \sin^{-1} \frac{n_i \sin \theta_i}{n_t} = \sin^{-1} \frac{(1.33)(\sin 60^\circ)}{1.52} = 49.3^\circ$$

وهي أقل من زاوية السقوط ($\theta_i = 60^\circ$) لأن الشعاع النافذ في المادة الثانية ينحرف نحو العمود إذا كان معامل انكسار المادة الثانية أكبر من معامل

انكسار المادة الأولى، ويبتعد عنه إذا كان أقل. كذلك تفعل الموجة حيث تتباطأ وتستدير نحو العمود في الحالة الأولى وتزداد سرعتها وتبتعد عن العمود.
مثال 2 معامل الانكسار في العين: عندكا يدخل الضوء الأحمر لليزر الهليوم - نيون ذو الطول الموجي 633 nm في الرطوبة المائية للعين ينقص طوله الموجي إلى 474 nm. احسب معامل انكسار العين (رطوبتها المائية) وسرعة الضوء فيها وتردده.

الحل: إن معامل انكسار الهواء n_0 للضوء (وبالأصح للضوء الأصفر) قريب جداً من الوحدة، لذلك يحسب الطول الموجي في الهواء وفي الفراغ هو نفسه λ_0 ، وهو عادة أكبر من الطول الموجي في المادة (نقصان سرعة الضوء في المادة يتطلب بالضرورة نقصان طوله الموجي لأن تردد الضوء الأصلي لا يتغير بتغير الوسط بل يبقى هو نفسه):

$$f = c / \lambda_0 = v / \lambda \quad (3 - 3)$$

وبتركيب هذه المعادلة مع المعادلة (24-1)، نحصل على:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad (3 - 4)$$

ومنه نجد:

$$n = \frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{633\text{nm}}{474\text{nm}} = 1.34$$

وهو نفسه معامل انكسار الماء تقريباً. أما سرعة الضوء في العين فهي:

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{m/s}}{1.34} = 2.24 \times 10^8 \text{m/s}$$

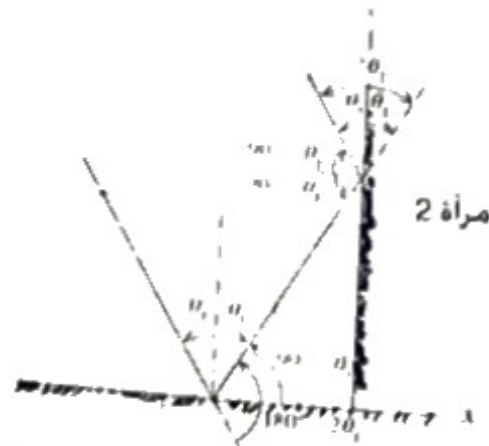
تردده:

مثال 3 مرأتان مستويتان متعامدتان، سقط على الأولى شعاع ضوئي كان يسير في مستوى عمودي على كلا المرأتين فانعكس عن الأولى، ومن ثم عن الثانية (شكل 4)، ما هو الاتجاه النهائي للشعاع بالنسبة إلى اتجاهه الأصلي؟
الحل: ينعكس الشعاع عن المرآة الأولى بنفس زاوية سقوطه θ_i (القانون الأول للانعكاس) ليسقط على المرآة الثانية بزاوية سقوط $\theta_i - 90^\circ$ (من العلاقات المثلثية للزوايا). إذن التغير في اتجاه الشعاع الأصلي حصل عند المرأتين: الأول بمقدار $(180 - 2\theta_i)$ والثاني بمقدار $2\theta_i - 2(90^\circ - \theta_i) = 180^\circ$ ؛ ومنه،

فإن:

$$\text{Total change in direction} = 180^\circ - 2\theta_i + 2\theta_t = 180^\circ$$

أي أن اتجاه الشعاع المنعكس النهائي عكس اتجاه الشعاع الأصلي



شكل 4

شكل 4 شعاع متحرك في المستوى xy ، يغير الانعكاس الأول إشارة المركبة y لسرعته، والانعكاس الثاني يغير إشارة المركبة x . بالنسبة للشعاع المختلف بمركبة z للسرعة، فإن المرآة الثالثة (العمودية على المرأتين المرئيتين) يمكن أن تستخدم لتغيير إشارة المركبة z .

مثال 4: حزمة ضوئية في الهواء تسقط على سطح مستوٍ للوحة من الكوارتز وتعمل زاوية 30° مع العمود، الحزمة تتضمن طولين موجيين، 400، و 500 nm، ومعامل انكسار الكوارتز عند هذين الطولين الموجيين هما 1.4702 و 1.4624 على التوالي. ما هي الزاوية بين الحزمتين المنكسرتين؟

الحل: نجد زاوية الانكسار لكل حزمة وذلك من قانون سنل:

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad \text{بالنسبة للطول الموجي 400 nm}$$

$$1 \sin 30 = (1.4702) \sin \theta_t$$

$$\theta_t = \sin^{-1} \frac{\sin 30}{1.4702} = 19.88^\circ$$

$$1 \sin 30 = (1.4624) \sin \theta_t \quad \text{وبالنسبة للطول الموجي 500 nm}$$

$$\theta_t = \sin^{-1} \frac{\sin 30}{1.4624} = 19.99^\circ$$

ومنه، فإن الزاوية بين الحزمتين المنكسرتين هي:

$$\Delta \theta = \theta_{(500\text{nm})} - \theta_{(400\text{nm})} = 19.99 - 19.88 = 0.11^\circ$$

المعنى الفيزيائي لهذه النتيجة هو أن الطول الموجي الأكبر أقل إنثناءً (إنكساراً) نحو العمود، أي أن زاوية انحرافه عن الاتجاه الأصلي أو اقترابه من العمود أقل منه للطول الموجي الأصغر، وهذا هو أصل تحليل الألوان بواسطة المناشير. والمثال التالي يوضح ذلك.

مثال 5: حزمة ضوئية في الهواء تسقط على منشور زجاجي، كما هو مبين على الشكل 5. وقد اختيرت زاوية السقوط θ_1 بحيث أن الشعاع المنبثق من وجه المنشور المقابل يعمل نفس الزاوية مع العمود. اشتق تعبيراً لمعامل إنكسار مادة المنشور، معتبرين n للهواء $n = 1$

الحل:

نلاحظ من الشكل أن $\angle ABC + \alpha = \pi/2$ ، وأن $\angle ABC + \phi_2 = \pi/2$ حيث هي زاوية المنشور. منه ينتج أن

$$\alpha = \frac{1}{2} \phi \quad (3-5)$$

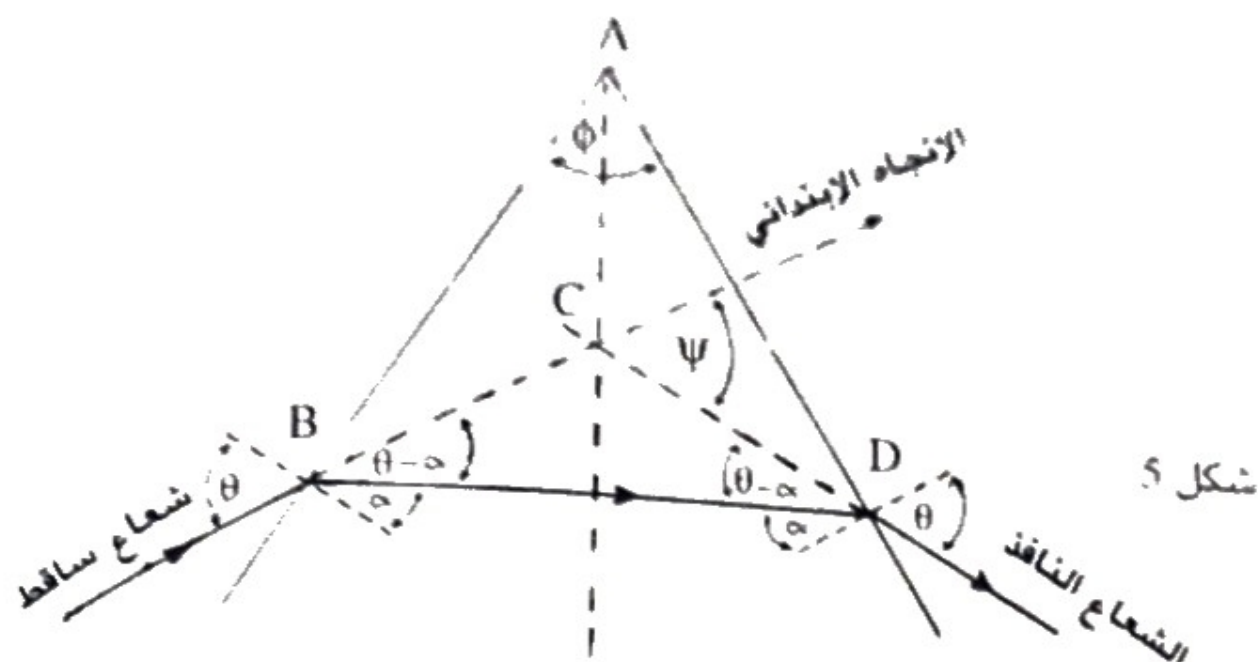
وأن زاوية الإنحراف تساوي مجموع الزاويتين الداخليتين المقابلتين لها في المثلث ACD، أي أن $\psi = 2(\theta - \alpha)$ وبالتعويض عن α بـ $\phi/2$ وتحل المعادلة أعلاه بالنسبة لـ θ ، نجد

$$\theta = \frac{1}{2} (\psi + \phi) \quad (3-6)$$

والآن نطبق قانون سنل عند النقطة B، حيث θ هي زاوية السقوط و α هي زاوية الإنكسار، نجد $\sin \theta = n \sin \alpha$ نعوض عن θ و α من المعادلتين (3-5) و (3-6)، ونعيد ترتيب المعادلة المحصلة من أجل n ، نجد.

$$n = \frac{\sin \frac{1}{2} (\psi + \phi)}{\sin \phi/2} \quad (3-7)$$

هذه المعادلة صحيحة فقط لـ θ مختارة بحيث أن الشعاع يمر مُتَناظراً خلال المنشور وفي هذه الحالة تدعى ψ بزاوية الإنحراف الصغرى.



شكل 5 انحراف الشعاع في المنشور.

(3 - 2) اشتقاق قانون الإنعكاس

يمكن اشتقاق قانون الانعكاس بعدة طرق، أهمها:

(۱) مبدأ هیو غنز

كريستيان هيوغنز، فيزيائي ألماني (1629 - 1695)، صاغ أول نموذج موجي للضوء في 1678، يعتمد على افتراض أن الضوء أمواج، لكنه لم يقل أي شيء عن طبيعة الموجة. وهو لم يكن يعلم فيما إذا كان الضوء أمواجاً مستعرضة أو طولية، ولم يكن يعلم أي شيء عن الأطوال الموجية للضوء المرئي. ولا عن طور الموجة أو قطار الأمواج، لكن يقيناً كان لديه تصور عن سلسلة غير نظامية من النبضات المنفردة المتحركة بسرعة علم شيئاً قليلاً عنها. ومع ذلك فقد كانت نظرية هيوغنز مرشداً مفيداً للتجربة لسنوات عديدة تالية وظلت مفيدة لحد الآن لأغراض تعليمية وعملية.

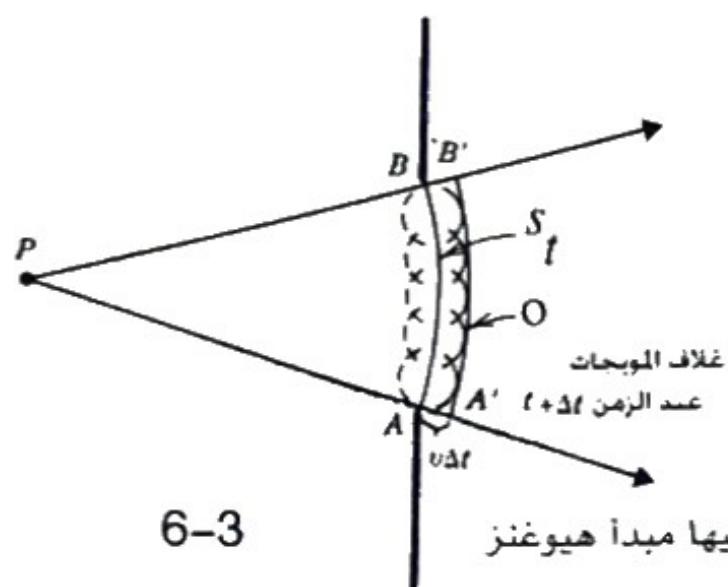
أقام هيوغنز نظريته على مفهوم البنية الهندسية - مُستصوباً بذلك رؤية ديكارت، القائلة إن علم الهندسة كان القاعدة الأساسية للفيزياء - التي تقول لنا أين تكون جبهة موجة معطاة عند أي زمن مستقبلي إذا علمنا موقعها الحالي. وينص مبدأ هيوغنز هذا على الآتي:

يمكن اعتبار جميع النقاط على جبهة الموجة كمصادر نقطية لإنتاج موجات ثانوية كروية، بعد زمن t سيكون الموقع الجديد لجبهة الموجة هو السطح المماس لهذه الموجات الثانوية.

نعتبر جبهة الموجة AB في الشكل 10 في موجة مستوية في الفضاء الحر، أين ستكون هذه الجبهة الموجية بعد مرور t من الزمن؟

إن النهج المقترح في مبدأ هيوغنز هو أن نتصور الموجة أو الاضطراب الموجي في لحظة معينة مركبة من عدة أمواج أو اضطرابات منفصلة، يؤثر كل منها كمصدر نقطي، ذلك الذي يبعث في كل لحظة تالية اضطرابات شبه موجية متناظرة كروياً يمكن معرفة موضعها في أي زمن مستقبلي إذا عرفنا موضعها الحالي.

نعتبر مصدراً ضوئياً P يرسل أمواجاً كروية تسقط على شاشة مثقوبة (شكل 6). نفرض أنه في اللحظة t من الزمن كان موضع الموجة يقع تماماً داخل الثقب ذو السطح δ .



شكل 6

6-3

شكل 6 البنية الهندسية المؤسس عليها مبدأ هيوغنز

وحسب مبدأ هيوغنز، فإن كل نقطة من نقاط هذا السطح تعتبر مركزاً لموجات كروية ثانوية، يصبح نصف قطرها بعد مرور Δt من الزمن $c \Delta t$ ، حيث c ، سرعة الضوء في الفراغ. نرسم هذه الموجات الكروية متمركزة عند كل نقطة على السطح S ، ومزدحمة إلى أقصى حد في المناطق بين الخطين PA و PB ، وتدعى بمنطقة الإنارة، وذلك وفقاً للرأي القائل إن الضوء ينتقل من المركز نحو الخارج بخطوط مستقيمة أو أشعة. بينما تكون المناطق خارج

مستطبة الخط الهندسي هي مصفاة. وهذا هو الجزء الأول من مبدأ هيوغر
 أما الجزء الثاني من مبدأ هيوغر فينقسم عن انقسام هذه الموجات الثانوية
 أو بواكبتها ويحدد الموجة الجديدة المحصلة كغلاف ϕ على الشكل لجميع
 الموجات الثانوية المنتشرة وكل نقطة على الغلاف هي معاً لموجة واحدة
 تنبع من موجات هيوغر. وينتهي الغطاء على نحو مماثل عند حافة الخط
 الهندسي.

ومثلما هناك موجات كروية تتحرك للأمام هناك أيضاً موجات أخرى
 تتحرك إلى الخلف ولكنها بشدة مضمضة جداً تصل إلى حدها الأدنى
 القصوي قياساً بالشدة القصوى التي تظهر بها الموجات في الاتجاه
 الأمامي ولذلك نعمل هذه الموجات الخلفية هي مبدأ هيوغر



الأمر سره أن قانون الانعكاس
 ينبع من مبدأ هيوغر. يوضح
 الشكل 7 (أ) ثلاث جهات موجية
 هي موجة مستوية تسقط على
 مرآة مستوية MM . بحيث يتم
 اعتبار هذه الجهات متعادلة من
 بعضها بعض بغير طول موجي
 واحد. وبزاوية سقوط θ . نفس
 تلك التي يجعلها الشعاع المسقط
 مع العمود على المرآة.

بعتبر النقطة S هي جهة الموجة
 هي الشكل 7 (ب) كمصدر لموجة
 هي جهة نتمدد لنضم النقطة P
 على سطح المرآة. أما النقطة P
 هي شكل 7 إثبات قانون الانعكاس
 باستخدام مبدأ هيوغر

هي نفس الجبهة الموجية. فالضوء المنبعث منها لا يمكن أن يتحرك خلف المرآة ولكنه يجب أن يتمدد إلى الأعلى كموجة هيوجنية كروية. وبوضع محيط نصف راثدي لنصف القطر r والقوس الدوار حول P تتجهز نصف دائرة تكون جبهة الموجة المنعكسة مماساً لها. وبما أن b تقع على جبهة موجية جديدة، إذن يجب أن يمر هذا المماس خلال b . ونلاحظ هنا أن الزاوية θ_r بين جبهة الموجة المنعكسة والمرآة هي نفس الزاوية بين الشعاع المنعكس والعمود على المرآة (تتم إحداها الأخرى). وكذلك الحال بالنسبة لزاوية السقوط θ_i بين الشعاع الساقط والعمود على المرآة التي هي نفسها بين المماس لجبهة الموجة الساقطة والمرآة (بالتمام أيضاً).

الآن نبرهن أن $\theta_i = \theta_r$: نأخذ المثلثين القائمين abp و $a'bp$ ، وفيهما الضلع bp مشترك والضلع $(= r)$ ab يساوي الضلع $a'p$ ، إذن فهما متطابقان. ومنه ينتج أن:

$$\theta_i = \theta_r$$

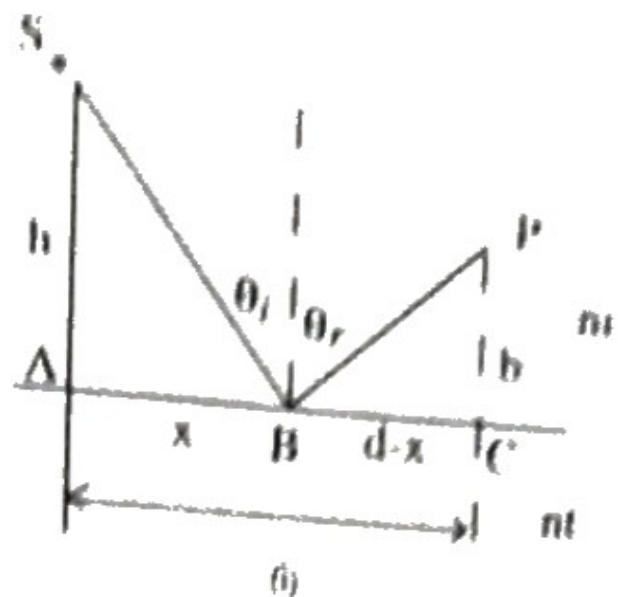
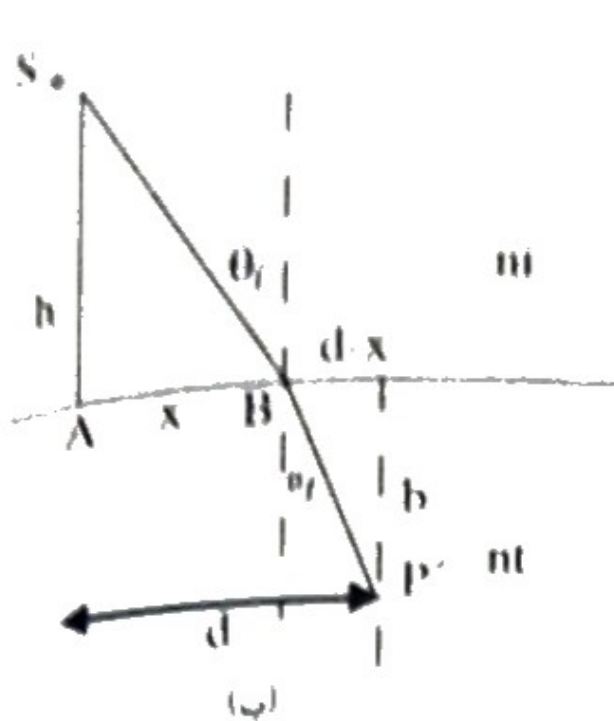
وهذا هو إثبات لقانون الانعكاس بواسطة مبدأ هيوجنز.

(2) بواسطة مبدأ فيرمات Fermat's Principle

مبدأ فيرمات أو مبدأ الزمن الأقل، ففي 1664 كتب فيرمات، أن الطبيعة تؤثر دائماً بواسطة أقصر المسارات. «فلو أن شعاعاً ضوئياً انتقل من نقطة ثابتة إلى أخرى ثابتة أيضاً، فإنه يتبع أقصر المسارات، والزمن اللازم إما أن يكون أقل ما يمكن أو أكبر ما يمكن، أو يبقى دون تغيير، هذا هو محتوى مبدأ فيرمات.

ولاشتقاق قانون الانعكاس من مبدأ فيرمات هذا، نعتبر شعاعاً متبعاً من المصدر الثابت S ليسقط على السطح البيني بين الوسيطين n_1 و n_2 شكل 8 عند النقطة غير المحددة B لينعكس منها إلى النقطة الثابتة P (شكل 8 أ) أو ينكسر عندها نافذاً في الوسط n_2 إلى النقطة p (شكل 8 ب)

شكل 8 شعاع ساقط منعكس جزئياً أ ومنكسر جزئياً ب.



شكل 8

إن الطول الكلي للشعاع المنعكس SBP هو

$$L = n_1 \sqrt{h^2 + x^2} + n_2 \sqrt{b^2 + (d-x)^2}$$

حيث $n_1 = 1$ للهواء

حيث x - موضع النقطة B، حيث يلامس الشعاع الساقط السطح البيني. وطبقاً لمبدأ فيرمات، فإن B يجب أن يكون لها ذلك الموضع بحيث يكون زمن مسير الضوء $t = L/c$ أقل ما يمكن (أو أكبر ما يمكن أو يبقى دون تغيير). وهذا يتحقق عندما $dt/dx = 0$ ، ومنه نحصل على:

$$\frac{dt}{dx} = \frac{1}{c} \frac{dL}{dx} = \frac{1}{2c} (h^2 + x^2)^{-1/2} \cdot 2x + \frac{1}{2c} (b^2 + (d-x)^2)^{-1/2} \cdot 2(d-x)(-1)$$

وبوضع المشتقة الأولى للزمن مساوية للصفر وإعادة كتابة المعادلة، نجد:

$$\frac{x}{\sqrt{h^2 + x^2}} = \frac{(d-x)}{\sqrt{b^2 + (d-x)^2}}$$

وبالمقارنة مع الشكل 8، نستطيع إعادة كتابة المعادلة أعلاه كالتالي:

$$\sin \theta_i = \sin \theta_r$$

ومن أجل زاويتي سقوط وانعكاس صغيرتين، فإن $\theta_i = \theta_r$ وهذا هو قانون الانعكاس.

(3 - 3) اشتقاق قانون الانكسار

1 - بواسطة مبدأ فيرمات

في حالة الانكسار، نفرض أن الوسيطين كانا متجانسين، أي أن معاملتي انكساريهما n_i و n_t ثابتين، وبالتالي، فإن طول المسار Sp' (الذي هو طول الشعاع المنكسر SBP) هو:

$$L = n_i \sqrt{h^2 + x^2} + n_t \sqrt{b^2 + (d-x)^2}$$

ووفقاً لشرط المسار الأقصر الذي يتحقق عندما $\frac{dt}{dx} = \frac{d}{dx} \left(\frac{L}{C} \right) = 0$

تجد:

$$\frac{dt}{dx} = \frac{n_i}{2C} (h^2 + x^2)^{-\frac{1}{2}} \cdot 2x + \frac{n_t}{2C} (b^2 + (d-x)^2)^{-\frac{1}{2}} \cdot 2(d-x)(-1)$$

وبوضع $dt/dx = 0$ وإعادة كتابة المعادلة، نحصل على:

$$n_i \frac{x}{\sqrt{h^2 + x^2}} = n_t \frac{d-x}{\sqrt{b^2 + (d-x)^2}}$$

التي تعني أن:

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$$

وهذا هو قانون الانكسار:

2 - بواسطة مبدأ هيوغنز

يبين الشكل 9 أربع مراحل في الانكسار لثلاث جبهات موجية متتالية في موجة مستوية تسقط على سطح بيني بين الهواء (وسط سقوط بمعامل انكسار، $n_i = 1$) والزجاج (وسط انكسار n_t) نفرض، لغرض الملاءمة، أن الموجات الساقطة منفصلة عن بعضها بعض بطول موجي واحد λ_i ، كما هو مُقاس في الوسط n_i ، وسرعتها v_i ، وهي أكبر من سرعتها في الزجاج 2 (سرعة الضوء في الهواء أكبر منها في الزجاج).

$$v_i > v_t \quad (3 - 8)$$

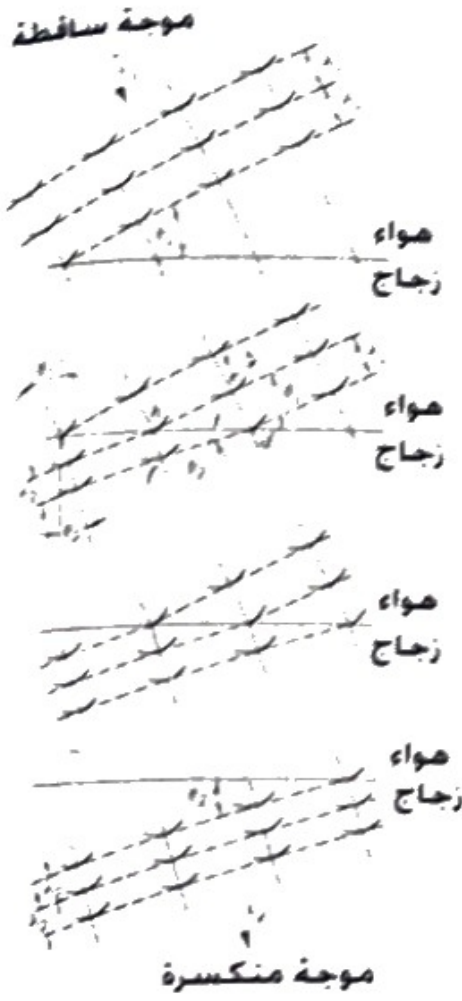
وكما في الشكل 9، فإن θ_i هي زاوية السقوط، وفي الجزء ب من الشكل 9 نعتبر الزمن $(\frac{\lambda_i}{v_i})$ الذي تتحرك خلاله موجة هيوغنز من e إلى d.

خلال نفس هذا الزمن، يقطع الضوء المنبعث من n مسافة أقصر خلال الزجاج ومقدارها:

$$\lambda_t = \lambda_i \frac{v_t}{v_i} \quad (3-9)$$

وهذا نابع من العلاقو بين السرعة والتردد والطول الموجي، وحقيقة أن التردد ثابت في الوسطين.

إن جبهة الموجة المنكسرة يجب أن تكون مماساً للقوس ذي نصف القطر λ_t المتمركز عند h. وبما أن d تقع على جبهة الموجة الجديدة، فإن المماس يجب أن يمر بها، كما هو ظاهر على الشكل، أما الزاوية λ_i بين جبهة الموجة المنكسرة والسطح البيني هواء - زجاج فهي نفسها تلك التي بين الشعاع المنكسر والعمود على السطح البيني؛ أي هي زاوية الإنكسار.



شكل 9

شكل 9 إنكسار موجة مستوية عند سطح بيني مستو كما هو موصوف بواسطة بنية هيوغنز ولم تظهر الموجة المنعكسة وذلك لسهولة المشاهدة. ويلاحظ التغير في الطول الموجي للموجة المنكسرة.

يمكن أيضاً الوصول إلى هذه النتيجة بالإستعانة بالمثلثين القائمين hde و hdf، وفيهما على التوالي:

$$\sin \theta_i = \frac{\lambda_i}{hd}, \quad \sin \theta_t = \frac{\lambda_t}{hf}$$

بالقسمة واستخدام العلاقة (3-9)، نحصل على:

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{\lambda_i}{\lambda_t} = \frac{v_i}{v_t}$$

وبإدخال سرعة الضوء في الفراغ c كعامل مشترك وإعادة كتابة العلاقة أعلاه، نحصل على:

$$\frac{c}{v_i} \sin \theta_i = \frac{c}{v_t} \sin \theta_t$$

لكن $\frac{c}{v_i}$ هي n_i و $\frac{c}{v_t}$ هي n_t (لاحظ المعادلة (24 - 1))، إذن:

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$$

وهذا هو قانون الانكسار.

مثال 6 ضوء أحمر طوله الموجي 632 nm في الفضاء الحر يسقط بزاوية $\theta_i = 39^\circ$ بالنسبة للعمود على شريحة ميكروسكوب سمكها $d = 0.78 \text{ mm}$ ومعامل إنكسارها $n = 1.52$ (شكل 10) أوجد أ) طول موجة الضوء في الزجاج و ب) طول المسار الضوئي خلال الزجاج.

الحل أ) نجد الطول الموجي للضوء في الزجاج باستخدام المعادلة (9 - 3):

$$\lambda_t = \lambda_i \frac{v_t}{v_i} = \lambda_i \frac{1}{n} = (632 \text{ nm}) \left(\frac{1}{1.52} \right) \approx 416 \text{ nm}$$

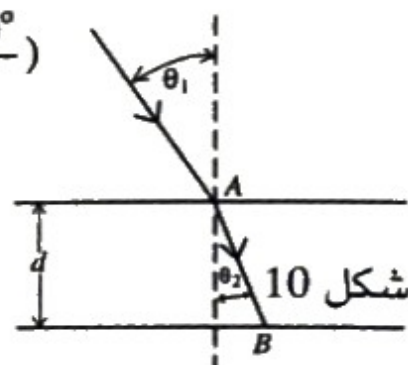
ب) أما طول المسار الضوئي في الزجاج، فهو كما يبين ذلك الشكل

$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$ من نجدها، ونجد θ_t زاوية الانكسار، حيث $n_t AB = n_t d / \cos \theta_t$

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \Rightarrow \theta_t \Rightarrow \sin^{-1} \frac{\sin \theta_i}{n_t} = \sin^{-1} \left(\frac{\sin 39^\circ}{1.52} \right)$$

$$\theta_t = \sin^{-1} (0.414) = 24.5^\circ$$

$$L = 1.52 \frac{0.78 \text{ mm}}{\cos 24.5^\circ} = 1.30 \text{ mm}$$



شكل 10 مثال 6

(3 - 4) تكون الصورة بواسطة المرآة المستوية

إن مفهوم الصورة هو أكثر أفكار البصريات الهندسية أهمية، وأكثر التجارب البصرية شيوعاً هي النظر إلى المرآة، فالشكل 11 أ يبين مصدراً نقطياً للضوء O، نسميه جسماً، موضوع على مسافة O أمام مرآة مستوية من جهة

اليسار (سنأخذ جهة اليسار هي الجهة التي يرد منها الضوء دائماً).

يُمثل الضوء الساقط على المرآة بأشعة بازغة من O، ومن النقطة التي عندها يصدم كل شعاع المرآة نرسم شعاعاً منعكساً، نمد هذه الأشعة المنعكسة إلى ما وراء المرآة فتلتقي عند النقطة I التي نسميها صورة الجسم O. وهي تقع خلف المرآة على نفس مسافة الجسم أمام المرآة (شكل 11 أ).

قد تكون الصورة حقيقية أو تخيلية، في الصورة الحقيقية يمر الضوء فعلاً خلال النقطة الصورة، بينما في الصورة التخيلية يسلك الضوء كما لو أنه يتفرق من النقطة الصورة، رغم أن الحقيقة ليست كذلك (لاحظ الشكل 12 أ). إن صور الضوء المتفرق في المرايا المستوية هي دائماً تخيلية.

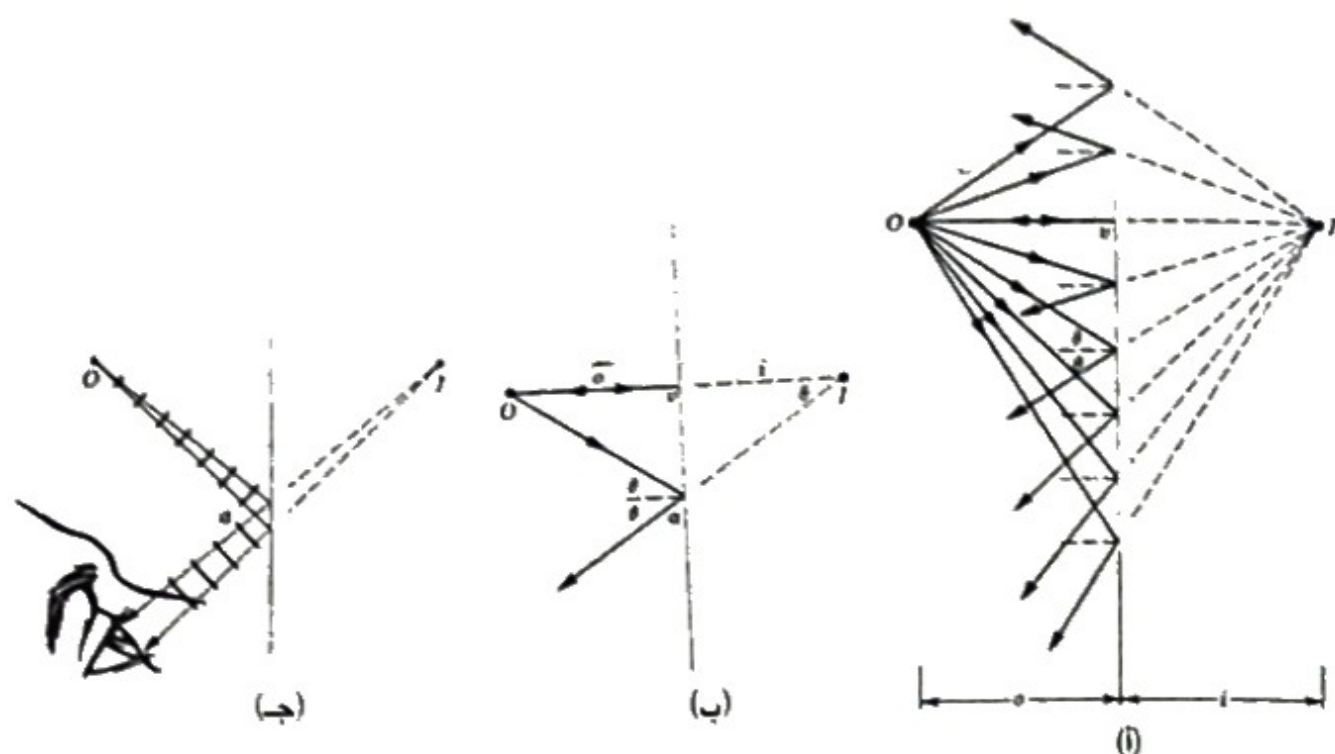
يبين الشكل 11 ب شعاعين من الشكل 11 أ، الأول يصدم المرآة عند بامتداد الخط العمودي، والثاني عند نقطة عشوائية a، عاملاً زاوية سقوط i مع العمود عند ذات النقطة، ومن الهندسة الأولية للشكل، فإن الزاويتين aov و aiv يساويان θ_i أيضاً، لذلك فإن المثلثين aov و aiv متطابقان، ومنه فإن:

$$O = -i \quad (3 - 10)$$

حيث الإشارة السالبة (-) تشير إلى أن الصورة I تقع في الجانب المعاكس لموقع الجسم O بالنسبة للمرآة. ضف إلى ذلك أن المعادلة (3 - 10) تخلو من الإشارة إلى زاوية السقوط θ_i ، ما يعني أن جميع الأشعة الواردة من الجسم O والصادمة للمرآة تمر خلال I عندما تُمدد إلى الخلف، كما هو الحال في الشكل 11 أ. غير ذلك، وبدلاً من افتراض الاستوائية الدقيقة للمرآة والتمسك بشروط البصريات الهندسية، يمكن اشتقاق المعادلة (3 - 10) انطلاقاً من حقيقة أن الجسم النقضي يُنتج في المرآة المسنوية صورة نقطية بـ $O = -i$ ، دونما اهتمام، كم تكون θ_i كبيرة في الشكل 11 ب.

وبسبب محدودية قطر بؤبؤ العين، فإن الأشعة التي تمتد متقاربة لبعضها تماماً هي فقط التي يمكن أن تدخل العين بعد انعكاسها عند المرآة، فبالنسبة لموضع العين المبين على الشكل 11 (ج) هناك قطعة صغيرة جداً من المرآة بالقرب من a هي فقط المؤثرة في تكون الصورة، أما بقية المرآة فيمكن أن تغطى أو تُزال، وإذا حركنا عيننا إلى موضع آخر، فإن قطعة

صغيرة مختلفة من المرآة ستكون مؤثرة: وفي جميع الحالات يظل موقع الصورة دون تغيير طالما بقي موقع الجسم ثابتاً.



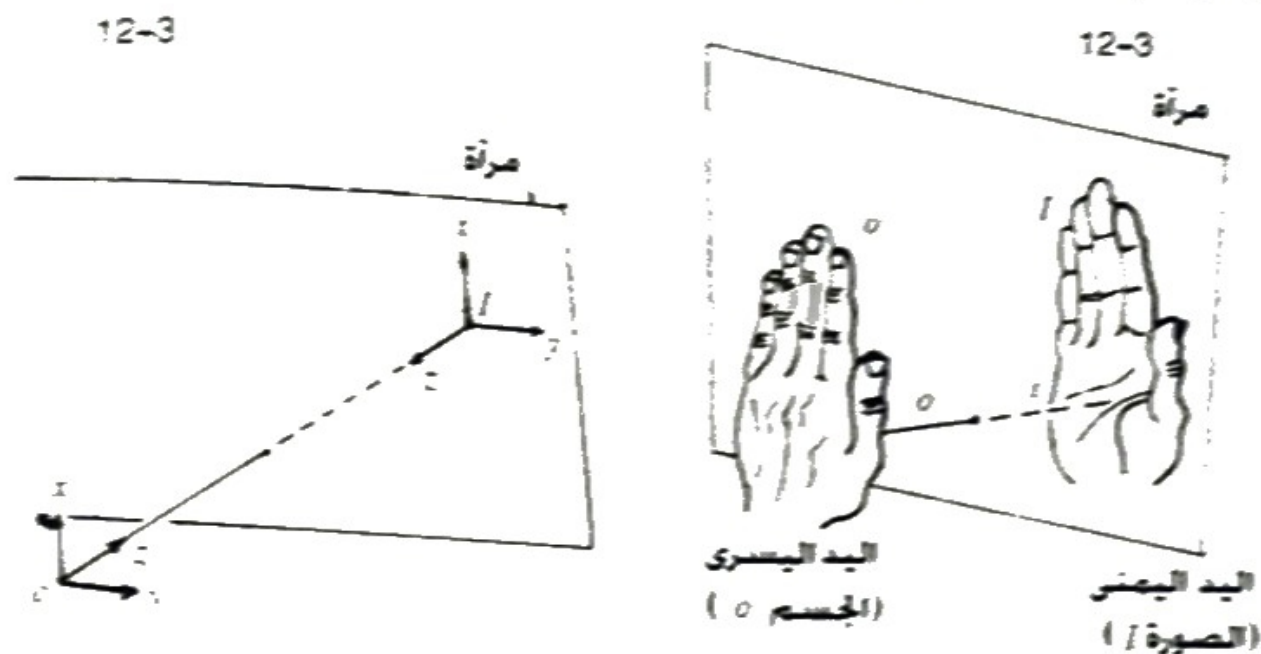
شكل 11 - (أ) جسم نقطي O يكون صورة تخيلية I في مرآة مستوية، حيث تظهر الأشعة متفرقة من I، في حين أن لا وجود للضوء الفعلي في هذه النقطة. (ب) شعاعات من O، الأول (O) يصدم المرآة عمودياً، والثاني (Oa) يصطدمها بزاوية θ_i عشوائية مع العمود على سطح المرآة. (ج) حزمة من الأشعة من الجسم O تدخل العين بعد انعكاسها من المرآة، وجزء صغير من المرآة، القريب من a، هو فقط المؤثر. أما الأقواس الصغيرة العمودية على الحزمة، فتمثل أجزاء الجبهات الموجية الكروية الضوئية الساقطة، ويظهر الضوء كما لو أنه وارد من I.

إذا كان الجسم مصدراً ممتداً، رأس إنسان مثلاً، فإن صورة تخيلية تتكون أيضاً. مثل هذا المصدر يمكن أن يكون منظومة من المصادر النقطية، كل منها يُنتج أمواجاً كروية. ووفقاً للمعادلة (10 - 3) تمتلك كل نقطة جسم من المصدر نقطة صورة مطابقة تقع على نفس المسافة مباشرة خلف مستوى المرآة، وهكذا فإن الصورة تعيد إنتاج الجسم نقطة بنقطة.

عكس الصورة
يبيّن الشكل 12 (i) صورة يد يسرى تظهر وكأنها يد يمنى. وهذا يفسّر بلغة
بصريّات الهندسية عكس أو قلب اليسار يميناً واليمين يساراً. بمعنى أنك
لو رفعت يدك اليسرى أمام مرآة مستوية، فإن صورتك في المرآة ترفع يدها
اليمنى.

وهنا يطرح سؤال. لماذا ت قلب المرآة اليسار واليمين ولا ت قلب الأعلى والأسفل؟
والجواب موضح على الشكل 12 ب. فالجسم الثلاثي الأبعاد الموجود أمام
المرآة المستوية ممثّل كطاقم من ثلاثة أسهم متعامدة. إثنان منها (السهم x
والسهم y). الموازيان لتسوي المرآة يتطابقان مع صورتيهما المرآتيتين. وفقط
السهم الثالث z اتجاهه متغير بالانعكاس. ومن ثم. فمن باب الدقة القول إن
المرآة تعكس الأمام خلفاً بدلاً من القول إنها تعكس اليسار يميناً. فتحويل
اليد اليسرى إلى يمنى أو اليمنى إلى يسرى يتم إدراكاً عن طريق استبدال
أمام اليد وخلفها.

يمكن أيضاً اعتبار أن الجسم يمثل نظام أحداثيات اليد اليمنى التقليدي (x)
مقاطعة. و y متجهة باتجاه z). بينما تمثل الصورة نظام أحداثيات اليد
اليسرى (x مقاطعة. و y متجهة في الاتجاه المائل $-z$).



شكل 12 (i)

شكل 12 (i) الجسم 0 هو يد يسرى. صورته I هي يد يمنى.

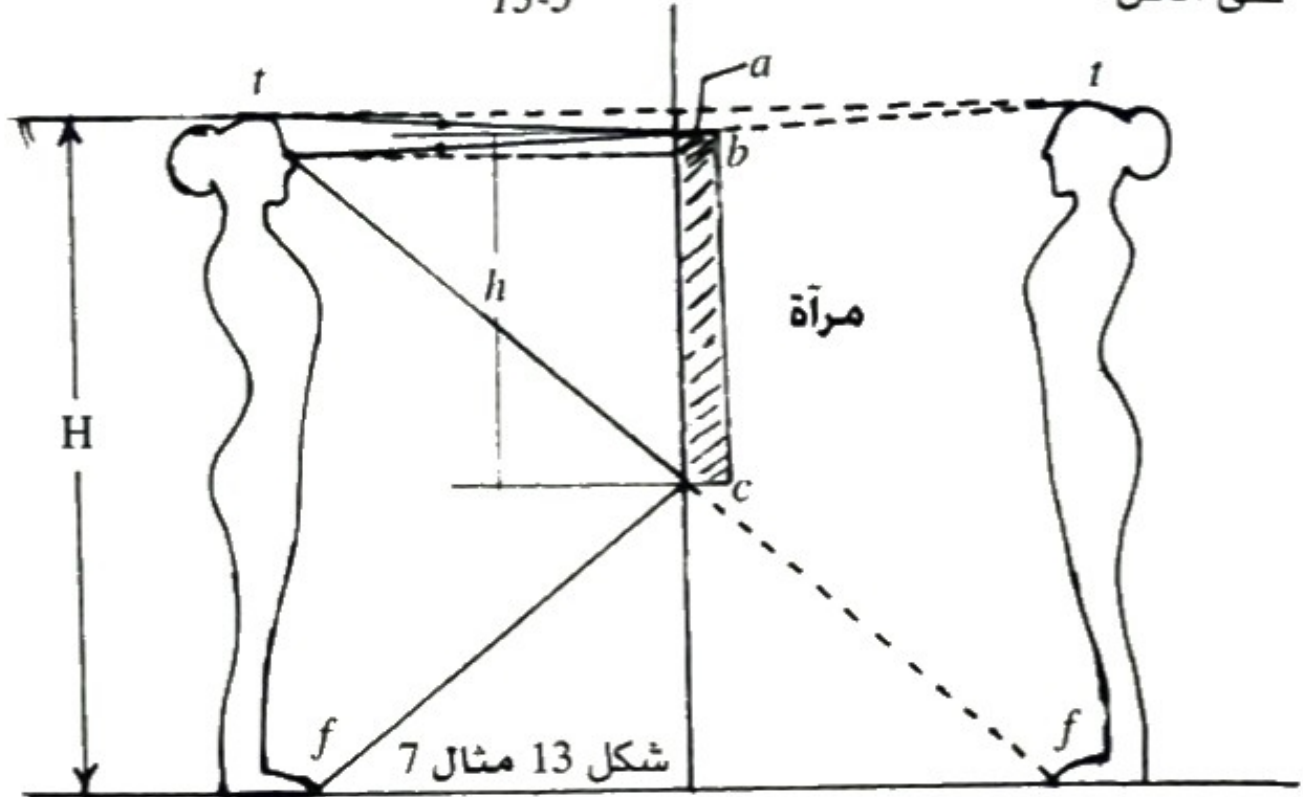
ب) دراسة انعكاس ثلاثة أسهم تبين أن المرآة تواضع (تضع أحد شيئين مكان الآخر) الأمام والخلف، بدلاً من اليسار واليمين.

مثال 7

أوجد أقل طول h لمرآة مستوية تكفي لأن ترى فيها فتاة طولها H كامل صورة قوامها.

الحل: يبين الشكل 13 قدم الفتاة f ، عيناها e ، وقمة رأسها t . لكي ترى الفتاة كامل طولها، (ارتفاعها)، يجب أن يغادر الشعاع (tae) قمة رأسها، ينعكس من المرآة عند a ، ويدخل عيناها، بينما الشعاع الآخر (fce) يجب أن يغادر قدمها، ينعكس من المرآة عند c ، ويدخل عيناها. الفتاة يجب أن ترى إنعكاس ارتفاعها كاملاً (بضمه الصورتان التخيليتان للنقطتين t و f) إذا كان طول المرآة هو ac على الأقل.

13-3



من هندسة الشكل 13، نجد:

$$ab = \frac{1}{2} te \quad bc = \frac{1}{2} ef$$

.حيث النقطة P تقع عند نفس إرتفاع العينين. لذلك:

$$ac = ab + bc = \frac{1}{2} te + \frac{1}{2} ef = \frac{1}{2} tf$$

مع $h = ac$ و $H = tf$ ، نحصل

$$h = \frac{1}{2} H$$

إذن نستطيع الفتاة أن ترى كامل صورتها إذا كانت المرآة بقدر نصف طولها. أجزاء المرآة تحت ϵ تظهر انعكاسات الأرض أمام قدم الفتاة، بينما التي فوق ϵ تظهر ما يمكن أن نضعه الفتاة على رأسها.

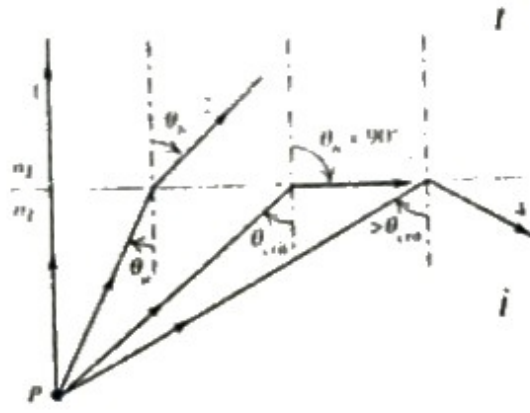
(1 - 9) الانعكاس الداخلي الكلي
يظهر الانعكاس الكلي الداخلي، وهو يعني عودة الشعاع كاملاً إلى الوسط الذي ورد منه، فقط عندما يسقط الشعاع على سطح بيني يكون معامل انكسار مادته الثانية أصغر من معامل انكسار مادته الأولى التي ورد منها الشعاع وبزاوية سقوط معينة تعتمد على النسبة بين معاملي انكسار المادتين. فالشكل 14 يبين عدة أشعة متفرقة من مصدر ضوئي نقطي P (مصباح، مثلاً) مثبت في قاع بحيرة سطحها مكشوف إلى الهواء. بتطبيق قانون سنل

$$\sin \theta_i = \frac{n_i}{n_t} \sin \theta_t \quad (2 - 3) \quad \text{نجد أن:}$$

ومنه نستنتج أن $\sin \theta_i$ أكبر من $\sin \theta_t$ لأن معامل انكسار الماء (n_i) أكبر من معامل انكسار الهواء n_t . وهذا يتطلب أن ينحني الشعاع الساقط بعيداً عن العمود، ولأن النسبة n_i / n_t هي كمية ثابتة، إذن $\sin \theta_i$ هو دالة لـ $\sin \theta_t$. معنى ذلك أن هناك قيمة معينة لـ θ_i ، وهي بالتأكيد أقل من 90° تلك التي يعطينا فيها قانون سنل $\sin \theta_t = 1$ و $\theta_t = 90^\circ$ وهذا ما نشاهده بواسطة الشعاع 3 على الشكل، الذي ينبثق ماشاً تماماً سطح الماء، بزاوية انكسار $\theta_i = 90^\circ$. إن زاوية السقوط التي بالنسبة لها ينبثق الشعاع المنكسر مماساً للسطح الكاسر تدعى بالزاوية الحرجة، ويرمز لها بـ θ_{crit} ، وقيمتها تتحدد من قانون سنل أعلاه، وذلك بوضع $\sin \theta_t = 1$ وإعادة ترتيب المعادلة:

$$\sin \theta_{crit} = \frac{n_t}{n_i} \quad (3 - 11)$$

وإذا تجاوزت زاوية السقوط الزاوية الحرجة، فإن زاوية الانكسار يصبح أكبر من 90° ، وهذا مستحيل، إذن الشعاع الساقط لا يمكن أن يمر إلى الوسط الثاني (الهواء)، بل ينحبس داخل الوسط الأسفل (الماء)، منعكساً انعكاساً كلياً داخلياً عند السطح الحدودي.



شكل 14

شكل 14 يحدث الإنعكاس الكلي الداخلي للضوء الوارد من مصدر نقطي s لجميع زوايا السقوط الأكبر من الزاوية الحرجة θ_c . عند الزاوية الحرجة، يتجه الشعاع المنكسر بامتداد السطح البيني هواء - زجاج (أو هواء - ماء).

تلك الحقيقة أن الزاوية الحرجة أقل قليلاً من 45° ساعدت على استخدام المنشور الثلاثي ذو الزوايا 45° ، 90° (شكل 15). كسطح عاكس كلياً. هذا النوع من المناشير لها أفضلية على السطوح المعدنية كالمرايا الزجاجية المغطاة، فالضوء ينعكس كلياً بواسطة المنشور، في حين لا يوجد سطح معدني يعكس الضوء الساقط عليه بنسبة 100% ، ضف إلى ذلك أن الخواص العاكسة دائمية ولا تتأثر باللمعان.

شكل 15 (i)



شكل 15 (i) الإنعكاس الكلي الداخلي في منشور بورو.
(ب) اتحاد منشوري بورو في المناظير.

المنشور $90^\circ - 45^\circ - 45^\circ$ الموضح على الشكل 14 أ يدعى منشور بورو، يدخله الضوء ويخرج بزوايا قائمة على الوتر منعكساً كلياً عند كل وجه قصير،

فيكون التغير الكلي في اتجاه الشعاع الساقط 180° . هذا النوع من المنشهر
 تتحد منها إثنان لتكونا ما يعرف بالمنظار الثنائي العيني (الشكل 14 ب).
 مثال 8: بين الشكل 16 منشوراً مثلثاً من الزجاج. ثمة شعاع يسقط عمودياً
 على أحد أوجهه فينعكس كلياً. فإذا كانت $\theta_i = 45^\circ$ ، ماذا نقول بشأن معامل
 الانكسار n ؟

الحل: يتضح من الشكل أن الشعاع منعكس كلياً، هذا معناه أن زاوية السقوط
 قد تكون مساوية لـ 45° أو أكبر؛ وهذا يتطابق مع الشكل. إذن من العلاقة (3)
 (5) نجد:

$$\sin \theta_{\text{crit}} = \frac{n_t}{n_i} = \frac{n_{\text{air}}}{n_{\text{glass}}} = \frac{1}{n_{\text{glass}}}$$

$$n_{\text{glass}} = \frac{1}{\sin \theta_{\text{crit}}}$$

وبما أن الانعكاس الداخلي الكلي متحقق، إذن θ_{crit} في المعادلة أعلاه يجب
 أن تكون أقل من 45° ، هذا معناه أن:

$$n > \frac{1}{\sin 45^\circ} = 1.41$$

وهكذا، فإن معامل انكسار الزجاج يجب أن يتجاوز القيمة 1.41. أما إذا قل
 عنها، فلا يحصل انعكاس داخلي كلي، بل أن جزءاً من الشعاع الساقط سوف
 ينكسر (ينفذ) في الوسط الثاني (الهواء).

(ب) في حالة غمر المنشور في الماء، فإننا نستبدل معامل انكسار الهواء
 بمعامل انكسار الماء في قانون سنل، ونحصل على زاوية حرجة جديدة.

$$n_{\text{glass}} \sin \theta_{\text{crit}} = n_{\text{water}} \sin 90^\circ$$

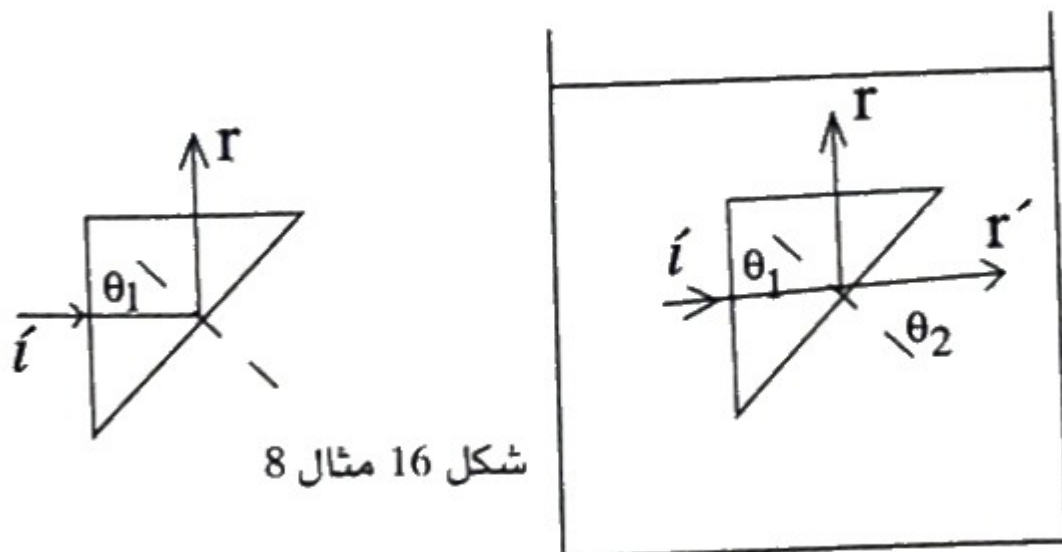
أو

$$\theta_{\text{crit}} = \sin^{-1} \frac{n_{\text{water}}}{n_{\text{glass}}} = \sin^{-1} \frac{1.33}{1.5} = 62.5^\circ$$

في حين أن زاوية السقوط الفعلية هي 45° ، إذن لا يتحقق انعكاس داخلي
 كلي، بل سيظهر شعاع منعكس بزاوية 45° وشعاع منكسر بزاوية انكسار
 تتحدد بقانون سنل، الذي نجد منه أن:

$$\theta_t = \sin^{-1} \frac{n_i \sin \theta_i}{n_t} = \sin^{-1} \frac{(1.5)(\sin 45^\circ)}{1.33} = 53^\circ$$

والشكل 16 يوضح ذلك



شكل 16 مثال 8

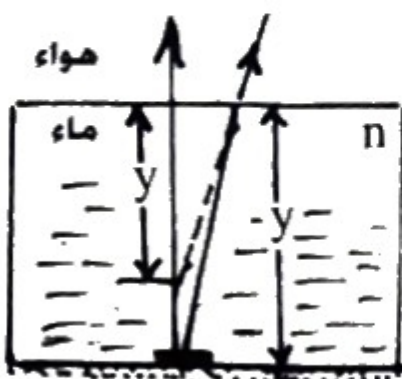
مثال 9 البعد الظاهري والبعد الحقيقي:

قطعة معدنية تقع عند قاعدة حوض سباحة عمقه y ومعامل إنكسار مائه n (شكل 17). برهن أن الأشعة الضوئية القريبة من العمود تظهر كما لو كانت آتية من النقطة $y' = y / n$ تحت السطح، والتي تدعى بالعمق الظاهري للبركة (y')

الحل: نطبق قانون سنل: (2 - 3)

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$$

شكل 17 مثال 9



حيث n_i هذه المرة هو معامل إنكسار وسط السقوط (الماء)، ونرمز له بـ n ، و n_t - وسط الإنكسار (الهواء $n_t = 1$) ومنه نجد أن:

$$\frac{\sin \theta_i}{\cos \theta_t} = \frac{1}{n} \quad (3 - 12)$$

ومن الشكل نلاحظ أن المسافة بين أقرب شعاع يبزغ من سطح الماء والعمود هي:

$$AB = y \tan \theta_i = y' \tan \theta_t$$

$$d \frac{\sin \theta_i}{\cos \theta_i} = y' \frac{\sin \theta_t}{\cos \theta_t} \quad \text{ومنه، فإن}$$

$$\frac{\sin \theta_i}{\cos \theta_t} = \frac{y'}{y} \cdot \frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_t} = \frac{1}{n} \quad \text{أو}$$

ومن أجل شعاع قريب جداً من العمود تكون $\mu_1 = \mu_2 = \cos \theta_1 = 1$ ومنه، فإن البعد الظاهري d_{app} يساوي:

$$d_{app} = \frac{d}{n} \quad (3-13)$$

(3 - 4) الألياف البصرية

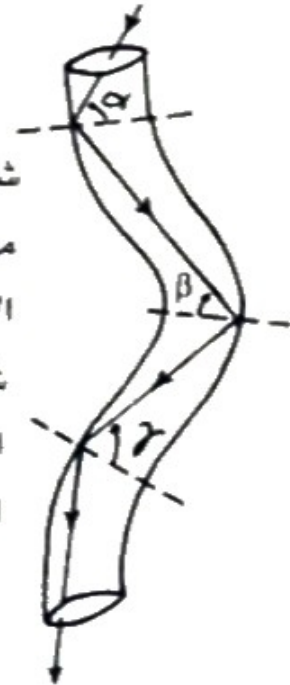
تعتمد آلية عمل الألياف البصرية على الانعكاس الداخلي الكلي. فمقسم تدخل الحزمة الضوئية من إحدى نهايتي قضيب شفاف (شكل 18). فإن الضوء ينعكس انعكاساً كلياً داخلياً و"ينحبس" داخل القضيب حتى لو كان القضيب منحنياً شرط أن لا يكون الانحناء كبيراً جداً. مثل هذا القضيب يدعى أحياناً بالأنبوب الضوئي.

إن حزمة الألياف الزجاجية أو البلاستيكية تسلك بنفس الطريقة وتتمتع بميزة المرونة، يمكن أن تتألف من آلاف الألياف المنفردة، التي يصل قطر الواحدة منها من 0.002 إلى 0.01 mm. فإذا جمعت هذه الألياف في حزمة واحدة بحيث تحتفظ كل ليفة بنفس موضعي نهايتها النسبيين عند كلا النهايتين فإن الحزمة تستطيع أن تنقل الصورة، كما هو موضح على الشكل 19.

شكل 19 صورة النقل بواسطة الألياف البصرية لنقل حزمة ليزرية معدلة.



شكل 18 شعاع ضوئي محبوس بواسطة الانعكاسات الداخلية، شريطة أن تكون الزوايا المبنية أكبر من الزاوية الحرجة.



شكل 18

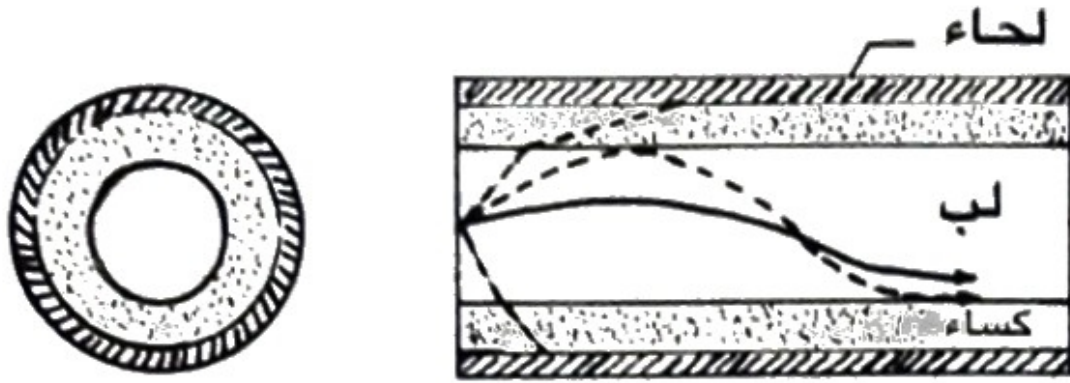


شكل 19

16-3

(ـ)

من الناحية التقنية، تتزلف الليفة البصرية من قلب مركزي مدرج بصورة ناعمة إلى طبقة كاسية خارجية من مادة ذات معامل إنكسار منخفض (شكل 20). ما يضمن شرط حدوث الانعكاس الداخلي الكلي، فبامتداد الليفة تستطيع أن تنتشر فقط تلك الأشعة المنعكسة إنعكاساً داخلياً كلياً.



شكل 20

شكل 20 (أ) ليفة بصرية تظهر في مقطع عرضي بقطر يقترب من قطر شعرة الإنسان.

(ب) منظر مستعرض يبين الإنتشار بواسطة الإنعكاس الكلي الداخلي، ويظهر اللب واللحاء.

ولإنقاص تلاشي الإشارة عندما تمر بامتداد الليفة يجب استخدام مواد عالية النقاء بصورة استثنائية، فلو كان الماء شفافاً كالزجاج الذي تصنع منه الألياف البصرية لكان من الممكن رؤية قاعدة البحر بواسطة إنعكاس ضوء الشمس عند عمق عدة أميال.

للألياف البصرية تطبيقات طبية واسعة في أجهزة تدعى الجواف (وهو أداة أنبوبية لفحص الأجزاء الداخلية من عضو أجوف في جسم الإنسان)، يمكن أن تغرز مباشرة إلى داخل الأنابيب الشعبية، المثانة، القولون، وهلم جرأً من الفحوص العيانية المباشرة، يمكن أيضاً أن تغلف حزمة الألياف أو تحصر داخل إبرة تحت جلدية لدراسة الأنسجة والأوعية الدموية البعيدة تحت الجلد.

وجدت الألياف البصرية أيضاً تطبيقاتها في أنظمة الاتصالات لنقل حزم الليزر المعدلة، وفي مجال المعلوماتية التي أحدثت تحولات مذهلة فيها. إن

كم المعلومات الهائل التي يمكن أن تنقل بواسطة موجة (صوتية، راديوية، وغير ذلك) في زمن مُعطى يتناسب طردياً مع التردد. ولتوضيح ذلك، نعتبر أن تعديل الموجة يتم بواسطة التغير الفجائي لبعض الذرى الموجية، التي ينظر لكل منها بوصفها ممثلاً لرقم تحت عشري ثنائي، مع ذروة متحولة ممثلة بصفر وذروة غير متحولة، ومن ثم، فإن عدد الأرقام تحت عشرية الثنائية التي يمكن أن تنقل بوحدة الزمن يتناسب طردياً مع تردد الموجة. فالأشعة تحت الحمراء والأمواج الضوئية المرئية تمتلك ترددات أعلى بكثير من أمواج الراديو، ولذلك فإن حزمة الليزر المعدلة يمكن أن تنقل مقداراً هائلاً من المعلومات خلال حبل (كبل) الألياف البصرية - المنفردة، فعلى سبيل المثال، أنظمة الكومبيوترات العملاقة، التي تحتوي على عدة آلاف من كومبيوترات شبكات الأعمال الخدمية موصولة جزئياً بواسطة كابلات ألياف بصرية من النوع المبين في الشكل 19 ب. الكثير من أنظمة التليفونات موصولة بواسطة.

● ميزة أخرى لكابلات الألياف البصرية هي كونها عوازل كهربائية، وبالتالي، فهي منيعة على التداخل الكهربائي من المصادر الصوتية وغيرها، فهي لا تسمح للتيارات غير المطلوبة بين المصادر والمستقبلات، وهي مأمونة ونادرة العطل.

الخلاصة

• إذا سقط الضوء على سطح بيني لوسطين مختلفين في معاملي إنكساريهما، فإن جزءاً منه ينعكس مرتدداً لنفس الوسط الذي ورد منه محققاً بذلك قانون الانعكاس، الذي ينص أن زاوية السقوط θ_i تساوي زاوية الانعكاس θ_r ($\theta_i = -\theta_r$). والإشارة السالبة هنا تشير إلى أن الزاويتين على جهتين مختلفتين من العمودي على السطح، وينكسر الجزء الآخر نافذاً في الوسط الثاني، مغيراً اتجاهه وسرعته، محققاً بذلك قانون سنل في الانكسار $n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$. وقانون تباطؤ أو تقامي سرعته في الوسط تبعاً لمعامل الانكسار.

• عندما تنتقل الأشعة من مادة ذات معامل إنكسار أكبر n_i إلى أخرى ذات معامل إنكسار أقل n_t ، فإنها تنعكس إنعكاساً كلياً داخلياً عندما تسقط بزاوية أكبر من القيمة الحرجة المحددة بالعلاقة:

$$n > \frac{1}{\sin \theta_{crit}} = 1.41 \quad (n_t < n_i)$$

• يمكن بواسطة مبدأ هيوغنز اشتقاق قانوني الانعكاس والانكسار، وكذلك بواسطة مبدأ فيرمات.

نكتسب معرفة تكون الصورة بواسطة المرآة المستوية أهميتها من خلال تتبع مسارات الأشعة الساقطة وانعكاساتها وامتداداتها ونقاط التقائها.

• تقوم آلية عمل الألياف البصرية على الانعكاس الداخلي الكلي.

مسائل

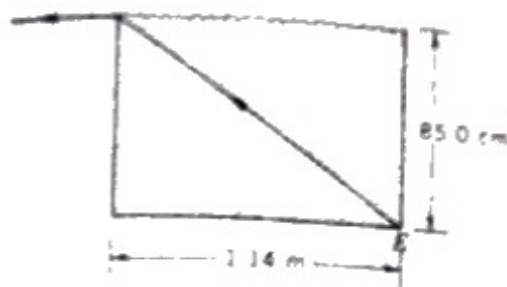
(3 - 1) الإنعكاس والإنكسار عن السطوح المستوية

1 - يسقط شعاع ضوئي على سطح بيني بين وسطين، الأول معامل إنكساره $n_1 = 1.58$ والثاني $n_2 = 1.22$ بزاوية 38° . أوجد زاويتي الإنعكاس والإنكسار.

2 - قيست سرعة ضوء الصوديوم الأصفر في سائل معين فوجدت أنها تساوي $1.92 \times 10^8 \text{ m/s}$. أوجد معامل إنكسار هذا السائل بالنسبة لضوء الصوديوم.

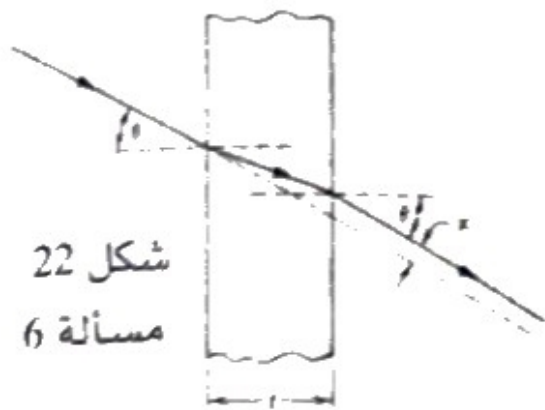
3 - عندما يتحرك الإلكترون خلال وسط ما بسرعة تفوق سرعة الضوء في

دات الوسط، فإنه يشع أمواجاً كهرومغناطيسية، ما هي أقل سرعة يجب أن يمتلكها الإلكترون في سائل معامل انكساره 1.54 لكي يشع أمواجاً؟



شكل 21 مسألة 4

4 - بين الشكل 21 خزاناً معدنياً مستطيلاً مملوء تماماً بسائل غير معروف. ثمة مشاهد يضع عينيه بمستوى الحافة اليسرى للخزان ويرى الحرف E في الزاوية السفلى اليمنى، المبينة على الشكل. أوجد معامل انكسار السائل.



شكل 22
مسألة 6

5 - شعاع ضوئي يتقدم خلال منشور متساوي الأضلاع في وضع الانحراف الأدنى، ومقداره 37° . احسب معامل انكسار مادة المنشور.

6 - برهن أن الشعاع الضوئي الساقط

على سطح شريحة زجاجية سمكها d يبرز عن الوجه المقابل موازياً لاتجاهه الابتدائي ولكنه مزاحاً عنه جانباً، كما هو مبين على الشكل (17. أ) بين أن مقدار هذه الإزاحة من أجل زوايا سقوط صغيرة θ_i هو:

$$x = d \frac{n-1}{n} \theta_i$$

7 - طبقة من الماء ($n = 1.33$) سمكها 20 mm تطفو على طبقة من كلوريد الكربون الرباعي ($n = 1.46$) سمكها 41 mm. كم تبدو قاعدة الخزان بعيدة عن سطح الماء؟

(2 - 3) اشتقاق قانون الانعكاس

8 - برهن، باستخدام مبدأ فيرمات، أن الشعاع المنعكس، المنكسر، والعمود يقعان في مستوى واحد.

(3 - 3) تكون الصورة بواسطة المرآة المستوية.

8 - هب أنك تقف أمام مرآة مستوية كبيرة، تتأمل صورتك، وتحركت نحوها

بسرعة v ، بأي سرعة تتحرك صورتك نحوك؟

(أ) في اطارك (معلمك) المرجعي، (ب) في اطار الغرفة.

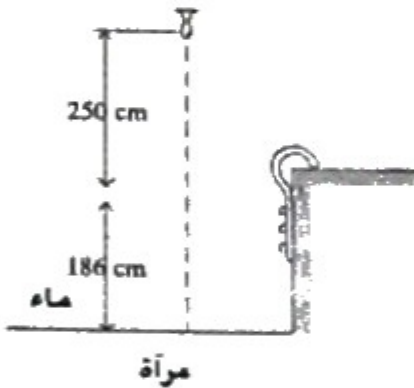
9 - (أ) برهن أنه إذا دارت مرآة مستوية خلال زاوية قدرها α ، فإن الشعاع المنكسر يدور بزاوية 2α . بين كذلك أن ذلك ممكناً لـ $\alpha = 45^\circ$. (ب) إذا تحركت المرآة باتجاه عمودي على سطحها مسافة x إلى الأمام، فما مقدار المسافة التي تتحركها الصورة؟ وبأي اتجاه؟

10 - يبين الشكل 23 مصباح ضوئي صغير معلق على مسافة 250 cm فوق سطح الماء في حوض سباحة عمق الماء فيه 186cm وكانت قاعدة الحوض عبارة عن مرآة كبيرة. أين تقع صورة المصباح عندما تشاهد بالقرب من السقوط العمودي.

(3 - 4) اشتقاق قانون الانكسار

11 - ضوء طوله الموجي 612 nm في الفراغ يقطع $1.57 \mu\text{m}$ في وسط معامل إنكساره 1.51. أوجد (أ) الطول الموجي في الوسط.

(ب) طول المسار الضوئي في الوسط.



شكل 23 مسألة 10

الانعكاس الداخلي الكلي

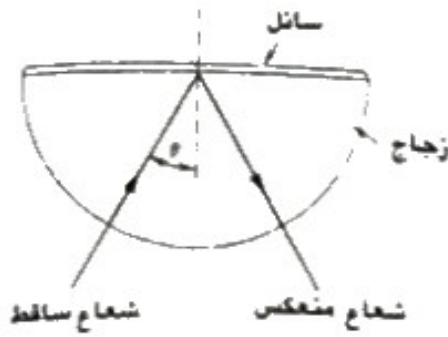
12 - مادتان A و B، معاملتا إنكسارهما 1.667 و 1.586 على التوالي. (أ) أوجد الزاوية الحرجة للانعكاس الداخلي الكلي عند السطح البيني بين المادتين. (ب) بأي اتجاه يجب أن يكون الشعاع الساقط منتشراً إذا أريد له أن ينعكس كلياً.

13 - قطرة سائل موضوعة على شريحة زجاجية نصف دائرية، كما هو مبين على الشكل 24 وضح العلاقة بين معاملي إنكسار السائل والزجاج بمشاهدتك للانعكاس الكلي الداخلي.

14 - مصدر ضوئي نقطي على مسافة 82 cm تحت سطح الماء، أوجد أكبر دائرة يبرز خلال سطحها الضوء.

24-3

15 - شعاع ضوئي يسقط على سطح مستوي يفصل بين شريحتي زجاج معاملتي انكسارهما 1.8 و 1.52 بزاوية سقوط 35° على الشريحة ذات معامل الانكسار الأكبر. احسب زاوية الانكسار. (ملاحظة للحل: نطبق قانون سنل على كل سطح بيني - هواء - زجاج، زجاج - زجاج، وأخيراً زجاج - هواء)

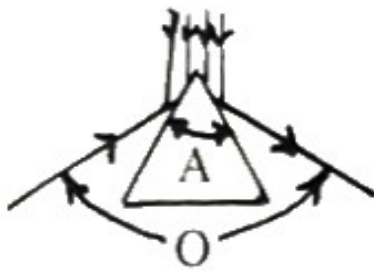


شكل 24 مسألة 13

16 - حزمة ضوء متوازية في الهواء تعمل زاوية 30° مع سطح لوح زجاجي معامل انكساره 1.52 (أ) ما هي الزاوية بين جزء الضوء المنعكس والسطح الزجاجي؟ (ب) جزء الضوء المنكسر والسطح الزجاجي؟

17 - ضوء طوله الموجي 656 nm وسرعته في زجاج الفلنت تساوي $1.90 \times 10^8 \text{ m/s}$ (أ) ما معامل انكساره بهذا الطول الموجي؟ (ب) إذا انتقل هذا الضوء في الهواء، فكم يصبح طوله الموجي؟

18 - حزمة ضوئية طولها الموجي في الفراغ 500 nm (أ) ما سرعتها في قطعة من الزجاج معامل انكساره لهذا الطول الموجي 1.70 وما طولها الموجي؟



19 - حزمة ضوء متوازية تسقط على منشور، كما هو مبين على الشكل 25. جزء من الضوء ينعكس على أحد أوجه المنشور وجزء ينعكس على الوجه الآخر. برهن أن الزاوية θ بين الحزمتين المنعكستين تساوي ضعف الزاوية بين الوجهين العاكسين.

شكل 25 مسألة 19

الفصل الرابع

المرايا والعدسات الكروية

الانعكاس والانعكاس عند السطوح المستوية التي تمت مناقشتها في الفصل السابق محدودا الفائدة في الآلات البصرية لسبب واحد هو أنهما غير قادرين على تحويل الضوء المتفرق إلى ضوء متجمع. فالضوء المتفرق، كضوء المصدر النقطي، يظل متفرقاً بعد انعكاسه من المرآة المستوية أو إنكساره عبر الحد المستوي (فصل 3 شكل 11). أما إذا كانت المرآة (أو السطح الكاسر) منحنية، فإن جبهات الأمواج المستوية يمكن أن تتحول إلى جبهات أمواج منحنية. ومن ثم يمكن أن تتجمع بعد ذلك عند نقطة أو تظهر كما لو أنها متفرقة من نقطة. فالضوء المتفرق يمكن أن ينحني إلى ضوء متجمع ويُبَيَّن ليكوّن الصورة، كما هو الحال في الكاميرا، التليسكوب، أو عين الإنسان. وباستخدام تركيبات من المرايا والعدسات، يمكن جعل الأجسام البالغة الصغر تظهر كبيرة أو الأجسام البعيدة تظهر قريبة.

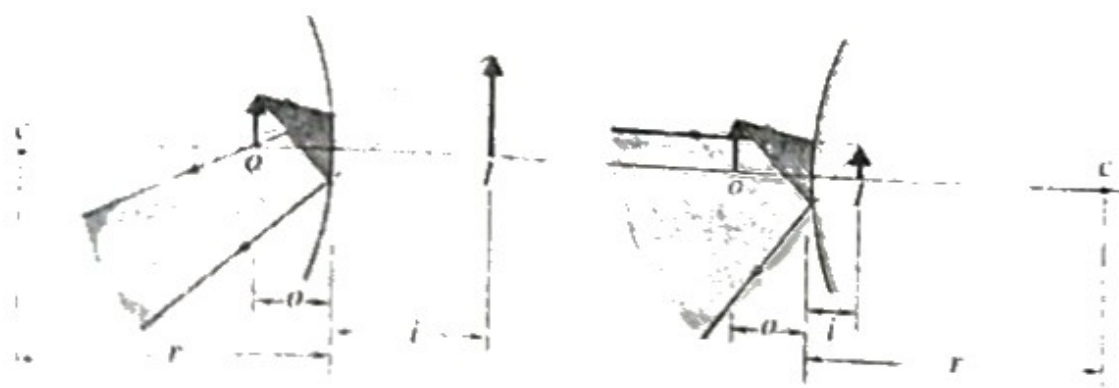
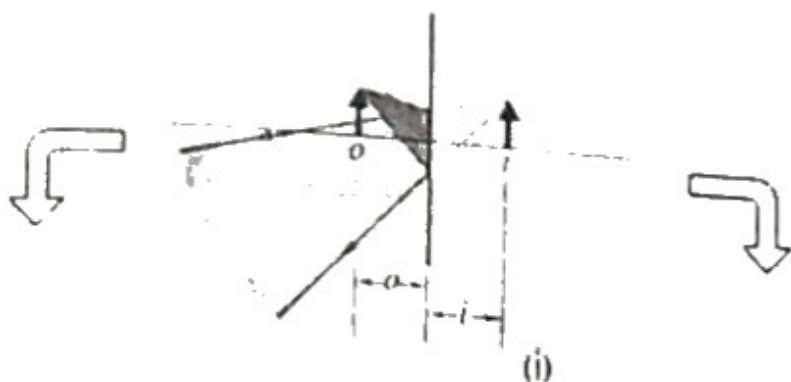
في هذا الفصل نعالج كيفية تكوّن الصور بواسطة المرايا والعدسات الكروية: وباستخدام الطرق الجبرية أو البيانية سنجد الصورة ونحدد قياسها بالنسبة للجسم الأصلي، والأمثلة العملية على ذلك سيكون الميكروسكوب والتليسكوب، ومن خلال ذلك سيتبين لنا كيف يمكن استخدام هذه المبادئ لتصميم المنظومات البصرية لتوسيع مدى رؤية الإنسان على مسافات صغيرة جداً أو كبيرة جداً.

(4 - 1) الانعكاس عند السطوح الكروية (المرآة الكروية)

الآن لو صنعت المرآة المستوية (شكل 1 (أ)) والمدرسة في الفقرة (3 - 4) بنصف قطر صغير للغاية، لحصلنا على مرأتين على شكل كروي، الأولى (شكل 1 (ب)) مقعرة بالنسبة إلى موضع الجسم والثانية (شكل 1 (ج)) محدبة. في الحالة الأولى، نحصل على صورة مكبرة قياساً بالمرآة المستوية، وواقعة على مسافة أكبر خلف المرآة (وهذا يحصل عندما يقع الجسم على مسافة صغيرة من المرآة - أصغر من بعدها البؤري) قياساً بالمرآة المستوية، مثل هذه المرايا شائعة الاستعمال في الحلاقة والمكياج، عندما يكون التكبير مرغوباً، رغم أن مجال الرؤيا لهذا النوع من المرايا صغيراً.

في الحالة الثانية (شكل 1 (ج)) يقل قياس الصورة وتصبح أكثر قرباً من

المرآة (تقع بين المرآة وبؤرتها بصرف النظر عن بعد أو قرب الجسم من المرآة). هذا النوع من المرايا يستخدم للرؤيا في جانبي السيارة وكمرآة في الأسواق الكبيرة. حيث مجال الرؤيا فيها يكون عريضاً قياساً بالمرآة المقعرة أو المستوية.



(ب)

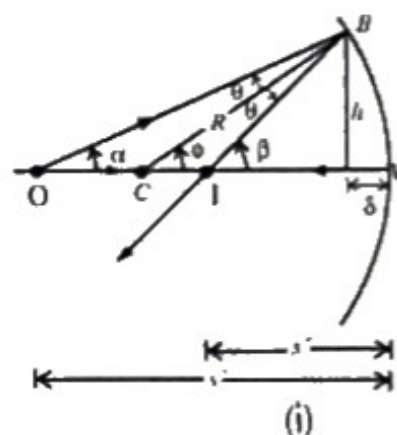
شكل 1 (i) (ج)

شكل 1 (أ) الجسم O يكون صورة تخيلية I في مستوى المرآة. (ب) إذا حُنت المرآة بحيث تصبح مقعرة، فإن الصورة تتحرك بعيداً عنها وتصبح أكبر. (ج) إذا حُنت المرآة المستوية بحيث تصبح محدبة، فإن الصورة تتحرك قريباً منها وتصبح أصغر. تدعى النقطة C مركز انحناء المرآة، وهي مركز السطح الكروي الذي تكون المرآة جزءاً منه.

(4 - 2) اشتقاق معادلة المرآة الكروية

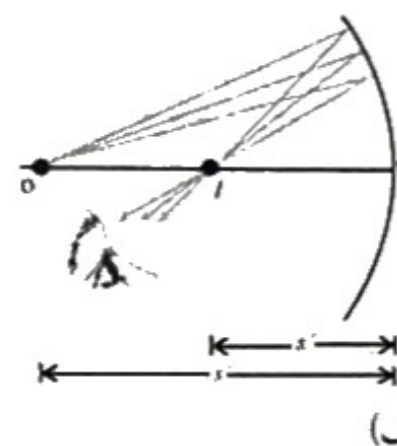
يبين الشكل 2 (أ) مرآة كروية بنصف قطر انحناء R، وجانبها المقعر مواجهاً للضوء الساقط. (تقليدياً تعتبر الجهة يسار النظام البصري جهة ورود الضوء). ومركز انحناء السطح (مركز الكرة التي يعتبر السطح جزءاً منها) عند C. النقطة O هي الجسم النقطي. وفي الحالة المدروسة نفرض أن

المسافة من O إلى V أكبر من R. والشعاع OV، المار خلال C، يصدم المرآة عمودياً وينعكس إلى الخلف على نفسه، النقطة V، عند مركز المرآة، تدعى قمة المرآة، والخط OCV يدعى المحور البصري.



شكل 2 (i)

شكل 2 (i) بنية لإيجاد موقع الصورة I للجسم النقطي O، المتكونة بواسطة مرآة كروية مقعرة. (ب) إذا كانت الزاوية α صغيرة، فإن جميع الأشعة من O تتقاطع عند I. ترى العين بعض الأشعة المغادرة المرآة (بعد إنعكاسها من المرآة) وتذكرها كما لو كانت آتية من I.



(ب)

الشعاع OB، عند الزاوية α مع المحور، يصدم المرآة عند B، حيث زاويتا السقوط والانعكاس هما θ ، والشعاع المنعكس يقطع المحور عند I (جميع الأشعة من O تقطع المحور عند I بعد إنعكاسها من المرآة شريطة أن تكون الزاوية

صغيرة - سنبرهن ذلك لاحقاً). ومنه، فإن النقطة I هي صورة الجسم O، ومسافة الجسم، مقاسة من القمة V، هي O، ومسافة الصورة i، وكلا الصورة والجسم يقعان بنفس جهة سقوط الضوء، وبالتالي، فإن إشارتي مسافتيهما موجبتان (0 و i). وخلافاً للمرآة المستوية (شكل 11 (أ) فصل 3)، فإن الأشعة المنعكسة في الشكل 2 (ب) تتقاطع فعلاً عند I، ومن ثم تتفرق من I كما لو أنها بزغت من هذه النقطة، لذلك فإن الصورة I هي صورة حقيقية.

وفقاً لما تنص به الهندسة المستوية، فإن الزاوية الخارجية للمثلث تساوي مجموع الزاويتين الداخليتين المقابلتين لها. باستخدام هذه البديهية بالنسبة للمثلثين OBC و IBC في الشكل 2 (i) نجد أن:

$$\phi = \alpha + \theta, \quad \beta = \phi + \theta$$

وباستثناء θ من هاتين العلاقتين. نحصل على:

$$\alpha + \beta = 2\phi \quad (4-1)$$

الآن نحاول تثبيت قاعدة إشارات لأنصاف اقطار السطوح الكروية:
عندما يكون مركز الانحناء C على نفس جهة مغادرة الضوء (بعد انعكاسه).
فإن نصف قطر الانحناء يكون موجباً ($+R$): وهذا يحصل عندما تكون المرآة
مقعرة. أما في السطح المحدب فيكون مركز الانحناء على الجهة المتقابلة
للضوء المنعكس. ولهذا فإن نصف قطر الانحناء سالب ($-R$).

ولحساب مسافة الصورة i نمثل ارتفاع النقطة B في الشكل 2 (أ)
بالحرف h . والمسافة من قمة المرآة V إلى قاعدة هذا الخط العمودي بـ x .

$$\text{ومنه فإن: } \tan \alpha = \frac{h}{o-\delta}, \tan \beta = \frac{h}{C}, \phi = \frac{h}{R-\delta}$$

هذه المعادلات المثلثية تُحل بسهولة عندما تكون الزاوية α . وتبعاً لذلك
الزاويتين β و ϕ . صغيرة. فظل الزاوية الصغيرة يساويها تقريباً (محسوبة
بالزوايا القطرية). لذلك يمكن إهمال المسافة قياساً بمسافتي الجسم
والصورة O و i ونصف القطر R . والمادة كتابة العلاقات أعلاه بصورة
تقريبية.

$$\alpha = \frac{h}{o}, \beta = \frac{h}{C}, \phi = \frac{h}{R}$$

وبتعويض هذه العلاقات بالمعادلة (4-1). نحصل على العلاقة العامة التي
تربط R, i, O

$$\frac{1}{o} + \frac{1}{C} = \frac{2}{R} \quad (4-2)$$

وهي لا تتضمن الزاوية α : وهذا معناه أن جميع الأشعة الواردة من الجسم
 O . والتي تصنع زوايا صغيرة بصورة ملموسة مع المحور الضوئي. تتقاطع
عند I بعد انعكاسها. مثل هذه الأشعة. الموازية تقريباً للمحور الضوئي
وقريبة منه. تدعى أشعة حدودية (أو محورية).

المعادلة أعلاه (4-2) صحيحة فقط بصورة تقريبية. فهي نتج من حسابات
تقوم على التقريب وتصح فقط للأشعة الحدودية. فعندما تزداد الزاوية α
تتحرك النقطة I شيئاً ما مقترية من القمة. ولهذا فإن المرآة الكروية. خلافاً

للمرآة المستوية، لا تكون صورة نقطية دقيقة للجسم النقطي. هذه الخاصية للمرآة الكروية تدعى الزيغ الكروي.
إذا أصبح $R = \infty$ ، تصبح المرآة مستوية وتتحول المعادلة (2 - 4) إلى المعادلة (10 - 3).

النقطة البؤرية

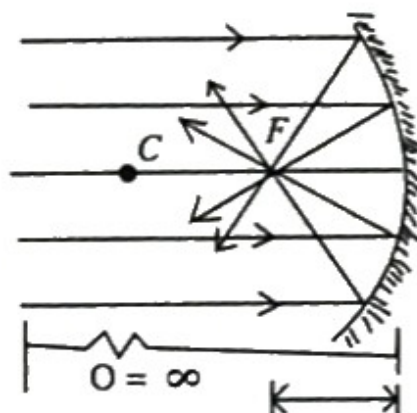
عندما يكون الجسم O بعيداً جداً عن المرآة ($O = \infty$)، تكون الأشعة الواردة متوازية، وتصبح مسافة الصورة i تساوي (لاحظ المعادلة 2 - 4):

$$\frac{1}{\infty} + \frac{1}{c} = \frac{2}{R} \quad i = \frac{R}{2}$$

هذه الوضعية موضحة على الشكل 3 (i)، فحزمة الأشعة المتوازية الساقطة تتجمع، بعد الانعكاس، عند النقطة F على مسافة $R/2$ من قمة المرآة. وتدعى f بـ النقطة البؤرية، ويرمز لبعدها عن القمة بالحرف f الذي يدعى بـ الطول البؤري، ويرتبط بنصف قطر الانحناء R بالعلاقة:

$$f = R/2$$

شكل 3 (i)

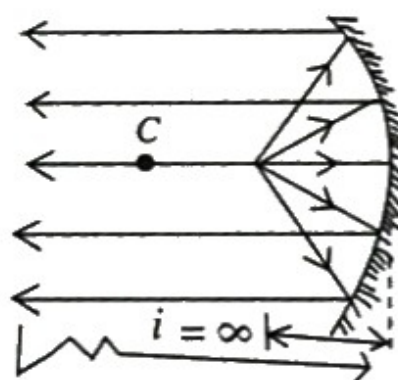


$$i = f = R/2$$

(i)

شكل 3 (i) الأشعة الساقطة موازية للمحور الضوئي تتجمع عند النقطة البؤرية F للمرآة المقعرة. (ب) الأشعة المتفرقة من النقطة البؤرية للمرآة المقعرة توازي المحور الضوئي بعد الانعكاس. رسمت الزوايا مبالغ فيها وذلك لغرض التوضيح.

الوضعية المعاكسة الموضحة على الشكل 3 (ب) تحصل عندما تكون مسافة الصورة i كبيرة جداً، وعندها تكون الأشعة الراحلة



$$o = \frac{R}{2} = f$$

(ب)

موازية للمحور الضوئي، ومن ثم فإن مسافة الجسم O تعطى بالعلاقة:

$$\frac{1}{o} + \frac{1}{\infty} = \frac{2}{R}, \quad o = \frac{R}{2}$$

ففي الشكل 3 (ب)، تنعكس الأشعة الواردة من البؤرة موازية للمحور الضوئي. ومرة أخرى نجد أن $f = R/2$.

وهكذا يكون لبؤرة المرآة الكروية المقعرة الصفات التالية:

(1) أي شعاع وارد موازياً للمحور الضوئي ينعكس خلال البؤرة.

(2) أي شعاع وارد ماراً بالبؤرة ينعكس موازياً للمحور الضوئي.

هذه النصوص الخاصة بالمرآيا الكروية صحيحة فقط في حالة الأشعة الحدودية (المحورية). أما بالنسبة للمرآيا القطع مكافئية، فإن النصوص أعلاه صحيحة تماماً.

وعلى العموم، يُعبر عادة عن العلاقة بين مسافتي الجسم والصورة بالنسبة للمرآة بدلالة الطول البؤري f بما يعرف بـ «المعادلة العامة للمرآيا».

$$\frac{1}{o} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f} \quad (4 - 4)$$

التكبير الجانبي

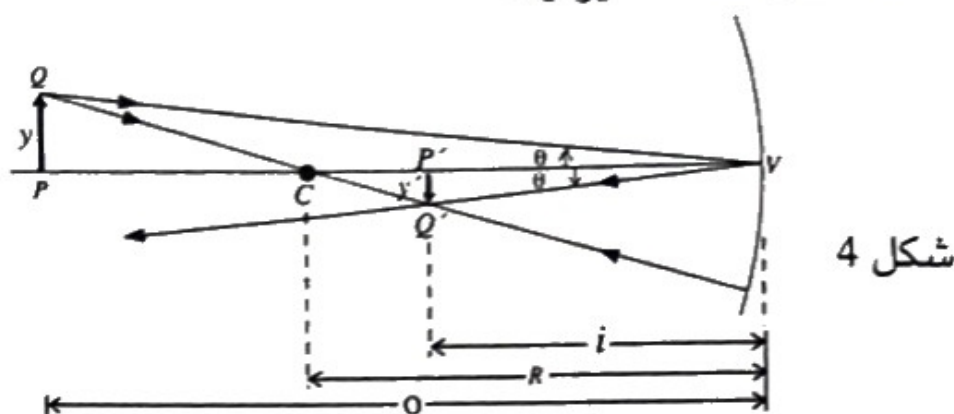
الآن نفترض أن لدينا جسماً محدود القياس، معبراً عنه بالسهم PQ في الشكل 4، عمودي على المحور PV ، إن صورة P المتكونة بواسطة الأشعة الحدودية تقع عند النقطة P . إن مسافة الجسم بالنسبة للنقطة Q تساوي تقريباً مسافة الجسم بالنسبة للنقطة P ، لذلك فإن الصورة $P'Q'$ هي تقريباً خط مستقيم وعمودي على المحور. ويلاحظ هنا أن الجسم والصورة لهما قياسان مختلفان y و y' على التوالي، وتوجهان متعاكسان. والنسبة بين القياسين y و y' تدعى التكبير الجانبي:

$$m = \frac{y'}{y}$$

ولأن المثلثين PVQ و $P'V'Q'$ في الشكل 4 متشابهان، ولدينا العلاقة $y'/o = y/i$ ، والإشارة السالبة لأن الجسم والصورة يقعان على جهتين متعاكستين، فإذا كانت y موجبة، تكون y' سالبة. ومنه، فإن التكبير الجانبي:

$$m = \frac{y'}{y} = - \frac{i}{o} \quad (4 - 5)$$

والقيمة السالبة لـ m تشير إلى أن الصورة مقلوبة بالنسبة للجسم، كما يوضح ذلك الشكل 4، وفي الحالات التي تكون فيها m موجبة تكون الصورة معتدلة. فبالنسبة للمرآة المستوية تكون $o = -i$ ، لذلك، فإن $y' = y$ والصورة تكون معتدلة، كما نلاحظ ذلك يومياً.



شكل 4 بنية لتحديد موضع، توجه، وارتفاع الصورة المتكونة بواسطة مرآة كروية مقعرة.

مثال 1 مرآة مقعرة تكون صورة على جدار مسافة 3.0m منها، لفتيلة مصباح مسافة 10cm أمامها. (أ) ما هو نصف قطر انحناء المرآة؟ (ب) ما ارتفاع الصورة إذا كان ارتفاع الجسم 5.0mm؟ (الحل أ) لأن الصورة تكونت على جدار، إذن هي حقيقية وتقع أمام المرآة بنفس جهة الجسم. وعليه، فإن كل من مسافتي الصورة i والجسم o موجبتان. وبتطبيق المعادلة العامة للمرآة (4 - 4) نجد:

$$\frac{1}{o} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f}, \quad \frac{1}{10\text{cm}} + \frac{1}{300\text{cm}} = \frac{1}{f}, \quad f = 9.7\text{cm}, \quad R = 2f = 19.4\text{cm}$$

(ب) نطبق المعادلة (4 - 5):

$$m = \frac{y'}{y} = \frac{-i}{o} = \frac{-300\text{cm}}{10\text{cm}} = -30$$

وهذا معناه أن الصورة مقلوبة (الإشارة السالبة)، أي حقيقية ومبكرة بمقدار 30 مرة. وبالتالي، فإن ارتفاعها y' يساوي:

$$y' = 30 \times 5.0 \text{ mm} = 150 \text{ mm}$$

المرآة المحدبة

في الشكل 5 (أ) الجانب المحدب لمرآة كروية يواجه الضوء الساقط؛ أما مركز الانحناء فيقع في الجهة المعاكسة من الأشعة المغادرة (المنعكسة)، لذلك، فإن نصف قطر انحناء هذه المرآة، وطبقاً لقاعدة الإشارات التي

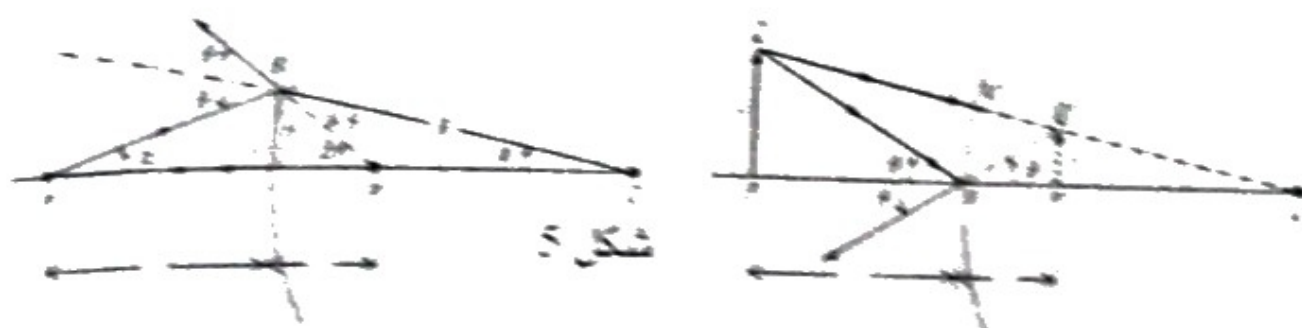
بالنسبة لها سائلاً. سائب. يعكس الشعاع PB مرآوية انعكاس مساوية لزاوية سقوطه θ . واعتماد الشعاع المنعكس إلى الخلف بقطع المحور الضوئي عند P . وكما هي المرآة المقعرة، تتفرق جميع الأشعة الواردة من P وانعكسة بواسطة المرآة من نفس النقطة P . شرط أن تكون المرآة α صغيرة، وعليه فإن P هي صورة P إلى مسافة الجسم O موجبة، مسافة الصورة α سالبة ونصف قطر الانحناء R سائب.

يظهر الشكل 5 (ب) شعاعات متفرقة من رأس السهم PQ وصورة تخيلية لها السهم $P'O$. ونفس النهج الذي اتبعناه في المرآة المقعرة، يمكن إثبات

$$\frac{1}{O} - \frac{1}{I} = \frac{1}{f}$$

ون

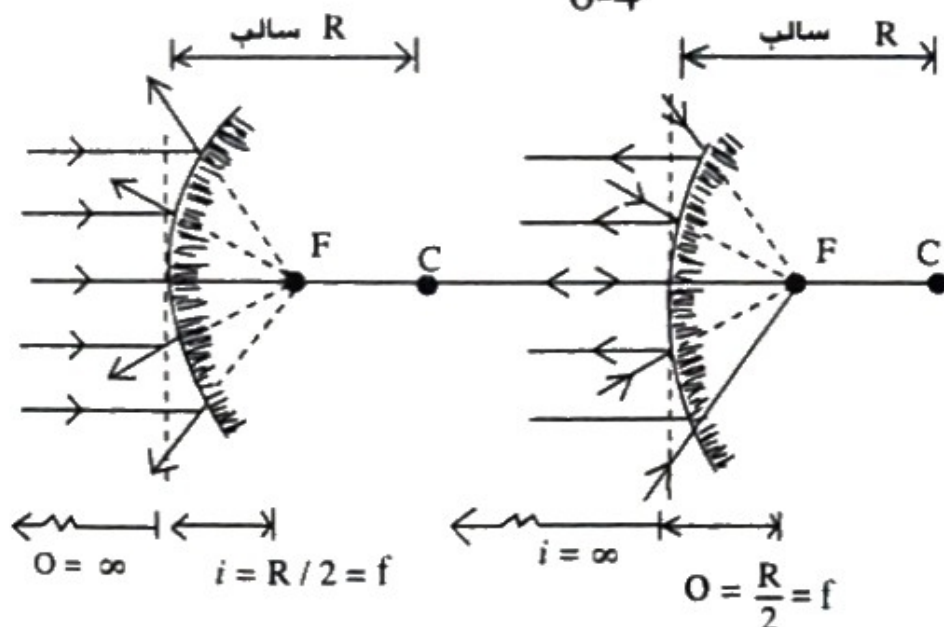
$$m = \frac{y'}{y} = \frac{I}{O}$$



شكل 5 بنية لإيجاد (أ) موقع الصورة، و (ب) تكبيرها بالنسبة لمرآة محدبة.

عندما يكون R سائلاً (مرآة محدبة)، فإن الأشعة الواردة الموازية للمحور الضوئي لا تنعكس خلال البؤرة F ، بل تتفرق كما لو أنها كانت واردة من النقطة F عند مسافة f خلف المرآة. كما يوضح ذلك الشكل 6 (أ)، في هذه الحالة يكون f هو الطول البؤري و F تدعى نقطة بؤرية تخيلية.

إن مسافة الصورة المطابقة α سالبة، وبالتالي، فإن كل من f و R سائبين. والمعادلة (3 - 4) صحيحة للمرآة المحدبة كما هي للمرآة المقعرة، في الشكل 6 (ب) تتجمع الأشعة الواردة كما لو أنها ستقابل عند النقطة البؤرية التخيلية F ، وهي تنعكس موازية للمحور الضوئي.



شكل 6 (أ) تتفرق الأشعة الساقطة الموازية للمحور الضوئي كما لو أنها كانت واردة من النقطة البؤرية التخيلية F للمرآة المحدبة. (ب) الأشعة المسددة نحو النقطة البؤرية التخيلية F للمرآة المحدبة تنعكس موازية للمحور الضوئي.

(4 - 3) الطريقة البيانية لتعيين موضع الصورة بواسطة المرآة

للتأكد من صحة النتائج الجبرية المؤسسة على المعادلة العامة للمرايا يستفاد من الرسم الشعاعي لتعيين موضع الصورة. لهذا الغرض تُرسم بعض الأشعة الأساسية، التي يستفاد من تقاطعها لتعيين موضع الصورة، وهي:

1- الشعاع الموازي للمحور، الذي ينعكس ليمر خلال النقطة البؤرية (في حالة المرآة المقعرة، شكل 7 (أ)) أو ليظهر كما لو كان قادماً من النقطة البؤرية (في حالة المرآة المحدبة، شكل 7 (ج)).

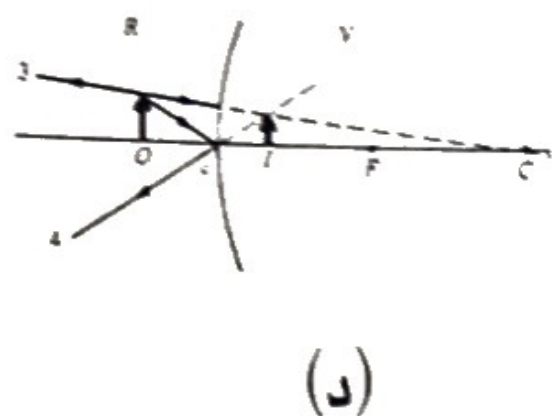
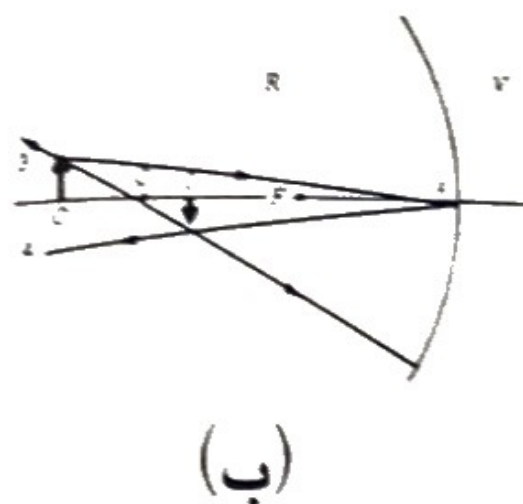
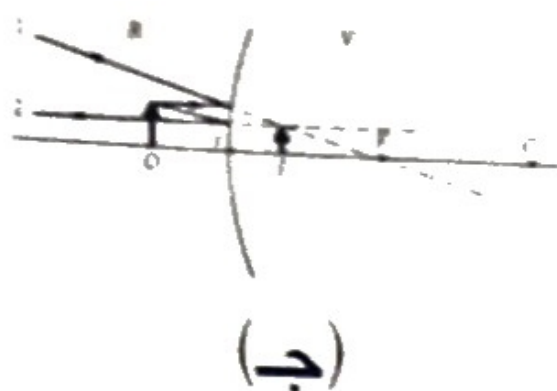
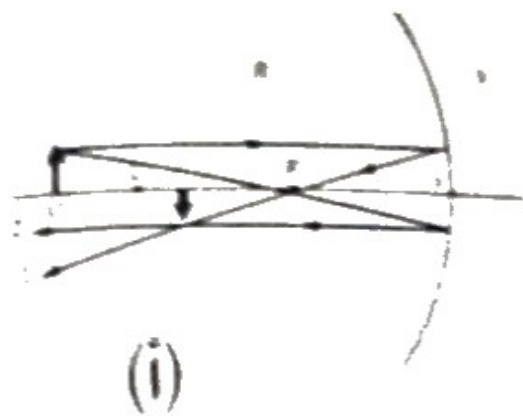
2 - الشعاع المار خلال النقطة البؤرية (المرآة المقعرة، شكل 7 (ب)) أو الظاهر كما لو كان كذلك (مرآة محدبة، شكل 7 (ج))، ينعكس بموازاة المحور.

3 - الشعاع المار خلال مركز الانحناء C ينعكس إلى الخلف بامتداد مساره الأصلي (الشكل 7 (ب) و 7 (د)).

4 - الشعاع المرتطم بقمة المرآة (النقطة حيث يقطع المحور المرآة) ينعكس بزاوية مساوية على الجانب المقابل للمحور (الشكل 7 (ب) و 7 (د)).

أي شعاعين من هذه الأشعة الأربعة يمكن أن يستخدمهما لتعيين موضع

الصورة. كما هو مبين على الشكل 7.



شكل 7 (أ، ب) أربع أشعة يمكن استخدامها في البنية البيانية لتحديد موضع صورة الجسم في المرآة المقعرة. ويلاحظ فيهما أن الصورة حقيقية مقلوبة. (ج، د) أربع أشعة مشابهة رسمت في حالة المرآة المحدبة. فكانت الصورة تخيلية ومعتدلة.

مثال 2 في الحالة المبينة في الشكلين 7 (أ) و 7 (ب). نفرض أن $f = 12 \text{ cm}$ و $O = 30 \text{ cm}$. أوجد موضع الصورة وتكبيرها الجانبي.

الحل: بحل المعادلة العامة للمرايا (4 - 4) بالنسبة لـ $1/i$. نجد:

$$\frac{1}{0} - \frac{1}{c} = \frac{1}{f}, \quad \frac{1}{c} = \frac{1}{f} - \frac{1}{o} = \frac{1}{12 \text{ cm}} - \frac{1}{30 \text{ cm}}, \quad i = 20 \text{ cm}$$

وهذا ينسجم مع الشكلين 7 (أ) و 7 (ب).

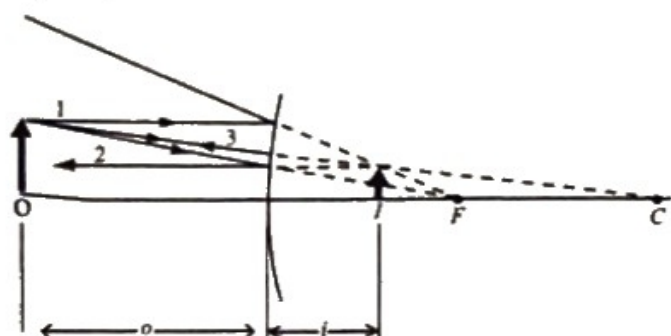
وبمساعدة المعادلة (4 - 5). نحصل على:

$$m = -\frac{i}{o} = -\frac{20 \text{ cm}}{30 \text{ cm}} = -0.67$$

أي أن الصورة مصغرة بنسبة $2/3$ من قياس الجسم ومقلوبة. وهذا ما تشير

إليه الإشارة السالبة لقيمة m ، مثلما يشير إليه الشكل 7 (أ، ب).
 مثال 3: مرآة محدبة نصف قطر انحنائها 22 cm، وضع جسم أمامها على مسافة 14 cm. عين موضع الصورة ومواصفاتها بالطريقة البيانية أولاً والجبرية ثانياً.

الحل (أ) الشكل 8 يبين الجسم والصورة فالأشعة 1، 2، و3 رسمت لتعيين موضع الصورة، وهي تخيلية، معتدلة وتقع في الجهة المعاكسة لسقوط الضوء بالنسبة للمرآة، ومسافتها نصف مسافة الجسم تقريباً.



شكل 8

(ب) طبقاً لقاعدة الإشارات، فإن نصف القطر يكون سالباً عندما يقع مركز الانحناء C في الجهة السالبة للمرآة، باستخدام المعادلة (2 - 4)، نجد:

$$\frac{1}{o} + \frac{1}{i} = \frac{2}{R}, \quad \frac{1}{i} = \frac{2}{-22 \text{ cm}} - \frac{1}{14 \text{ cm}}, \quad i = -6.2 \text{ cm}$$

أما التكبير الجانبي، فنجدّه بتطبيق المعادلة: (5 - 4)

$$m = -\frac{i}{o} = \left(\frac{-6.2 \text{ cm}}{14 \text{ cm}} \right) = +0.44$$

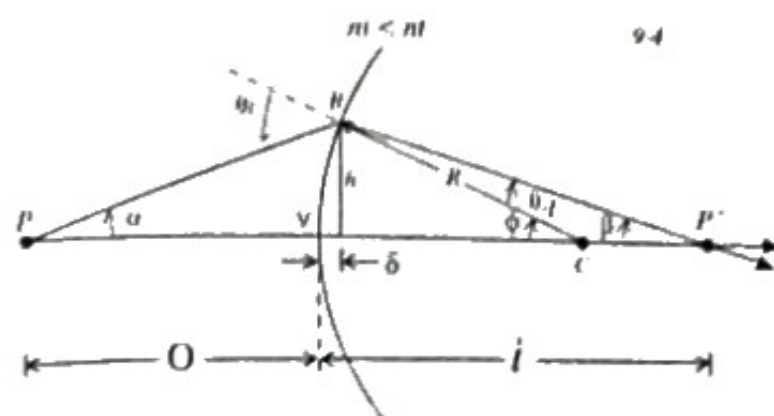
أي أن الصورة مصغرة، ومعتدلة لأن $m > 0$

(4 - 4) الإنكسار عند السطوح الكروية

الإنكسار عند السطح الكروي معناه إنكسار عند سطح كروي بين مادتين بمعاملتي إنكسار مختلفين، وهذا ينطبق مباشرة على عين الإنسان، بوصفها نظاماً ضوئياً حقيقياً، وكذلك الحال بالنسبة للعدسات التي تتكون عادة من سطحين كرويين كاسرين.

يبين الشكل 9 سطحاً كروياً كاسراً بنصف قطر R وهو يشكل سطحاً بينياً بين مادتين بمعاملتي إنكسار n_i و n_o . هذا السطح يكون الصورة P' للجسم P ، والمطلوب أن نجد العلاقة بين مسافتي الجسم والصورة O و i على التوالي

لهذه الغرض نستخدم نفس القواعد المتبعة في المرايا الكروية. فمركز التحديب C في جهة مفادرة الضوء، لذلك، فإن R موجب، والشعاع PV يصدم القمة V وهو عمودي على السطح (بمعنى أدق، عمودي على السطح المماس للسطح الكروي عند نقطة السقوط V). وهو يمر إلى المادة الثانية دونما انحراف. أما الشعاع PB ، الذي يعمل الزاوية α مع المحور، فهو يسقط بزاوية θ_i مع العمود وينكسر بزاوية θ_t . هذان الشعاعان يلتقيان عند i عندنا على يمين القمة.



شكل 9

شكل 9 بنية لإيجاد موضع الصورة i للجسم O المتكون بواسطة الإنكسار عند سطح كروي.

الشكل أعلاه رسم للحالة حيث $n_i < n_t$ ، وكلا المسافتان i و O موجبتان. الآن نبرهن أنه إذا كانت الزاوية α صغيرة، فإن جميع الأشعة من P' تتقاطع عند نفس النقطة P' ، لذا، فإن P هي صورة حقيقية للجسم P . من المثلثين PBC و $P'BC$ لدينا:

$$\theta_i = \alpha + \phi, \quad \phi = \theta_t + \beta$$

ومن قانون الإنكسار (2 - 3) لدينا:

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$$

واستخدام ظلال الزوايا α ، β ، و ϕ التي هي:

$$\tan \alpha = \frac{h}{o + \delta}, \quad \tan \beta = \frac{h}{i - \delta}, \quad \tan \phi = \frac{h}{R - \delta},$$

والأخذ في الاعتبار أنه في الأشعة المحورية يقترب كل من جيب وظل الزاوية من الزاوية نفسها، فضلاً عن إهمال المسافة الصغيرة δ ، نحصل على:

$$n_i \theta_i = n_t \theta_t$$

وبالتعويض عن هذه العلاقة في المعادلة الأولى من المعادلتين (4 - 6)، نجد:

$$\theta_i = \frac{n_i}{n_1} (\alpha + \phi)$$

نعوض عن α في المعادلة الثانية من المعادلتين (4 - 6)، نحصل على:

$$\phi - \beta = \frac{n_i}{n_1} (\alpha + \phi)$$

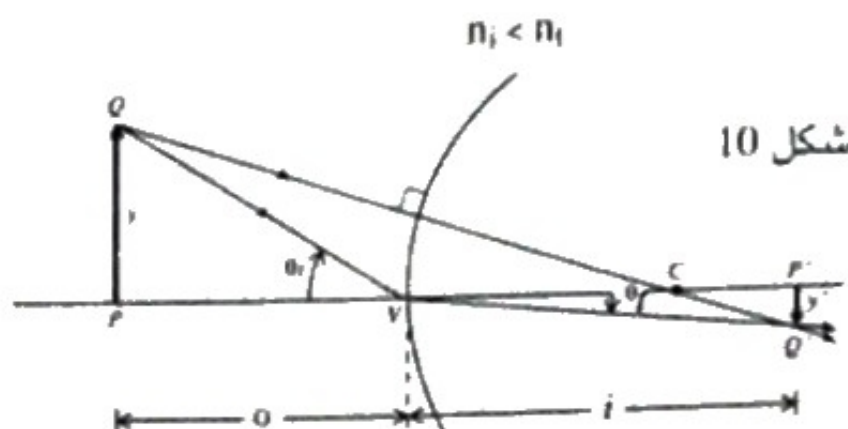
نعيد ترتيب هذه المعادلة ونعوض عن كل زاوية بظلها مع إهمال المسافة الصغيرة h وحذف h من جميع الحدود، نحصل على المعادلة:

$$\frac{n_i}{o} + \frac{n_i}{i} = \frac{n_i - n_1}{R} \quad (4 - 7)$$

وهي لا تتضمن الزاوية. لذلك، فإن مسافة الصورة i هي نفسها لجميع الأشعة المحورية من الجسم P .

تكبير السطح الكروي الكاسر

لإيجاد تكبير السطح الكروي الكاسر نأخذ البنية الموضحة على الشكل 10.



شكل 10 بنية لتحديد ارتفاع جسم بواسطة الإنكسار عند السطح الكروي.

نرسم شعاعين من النقطة Q ، أحدهما يمر خلال مركز الانحناء C ، والآخر يسقط عند القمة V ، فنحصل على مثلثين POV و $IQ'V$ ، وفيهما:

$$\tan \theta_i = \frac{y}{o}, \quad \tan \theta_1 = \frac{-y'}{i}$$

ولدينا من قانون الإنكسار، أن:

$$n_i \sin \theta_i = n_1 \sin \theta_1$$

وملاحظة $\sin \theta_i = \tan \theta_i$ و $\sin \theta_1 = \tan \theta_1$ عندما تكون θ_i و θ_1 صغيرتان، عليه

$$n_i \frac{y}{o} = -n_t \frac{y}{i} \quad \text{نجد أن:}$$

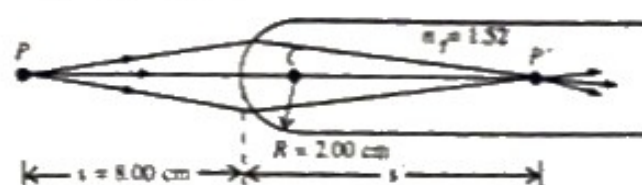
$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{n_t}{n_i} \frac{i}{o} \quad \text{ومنه. فإن التكبير } m \text{ يساوي:}$$

مثال 4 قضيب زجاجي أسطواناني مغمور في الهواء (شكل 11) معامل إنكسار 1.52. قطعت إحدى نهايتيه بهيئة سطح نصف كروي نصف قطره $R = 2.00 \text{ cm}$ (أ) أوجد مسافة صورة جسم صغير على محور القضيب وعلى مسافة 8.00 cm يسار القمة.
(ب) أوجد التكبير الجانبي.
الحل (أ) نطبق المعادلة (7 - 4)، نحصل على:

$$\frac{1}{2.00 \text{ cm}} + \frac{1.52}{i} = \frac{1.52 - 1.00}{2.00 \text{ cm}}, \quad i = 11.3 \text{ cm}$$

وتقع يمين القمة لأن i موجبة وعلى مسافة 11.3 cm منها.

$n_t = 1.00$ (هواء)



شكل 11

شكل 11 يشكل القضيب في الهواء صورة حقيقية.
(ب) لإيجاد التكبير نستخدم المعادلة (8 - 4):

$$m = -\frac{1}{1.52} \cdot \frac{11.3 \text{ cm}}{2.00 \text{ cm}} = -0.93$$

أي أن الصورة مصغرة وحقيقية (لأن m سالبة) ومقلوبة.

مثال 5 إذا غمر القضيب الزجاجي في المثال 4 في الماء (معامل إنكساره 1.33) كما هو مبين على الشكل 12، فما هي مسافة الصورة؟ وما هو التكبير الجانبي؟

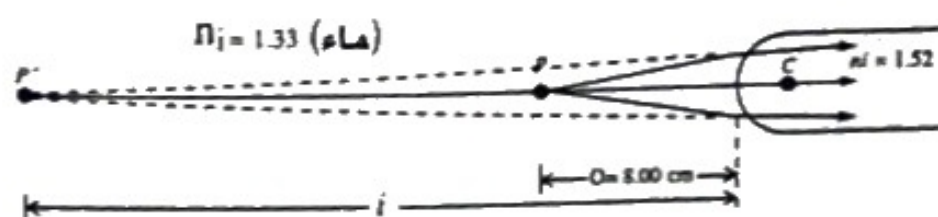
الحل: نطبق أولاً نفس المعادلة (7 - 4) ولكن من أجل الماء بدلاً من الهواء:

$$\frac{1.33}{8.00 \text{ cm}} + \frac{1.52}{i} = \frac{1.52 - 1.33}{+2.00 \text{ cm}}, \quad i = -21.3 \text{ cm}$$

أي أن الصورة تخيلية (لأن i سالبة): وهذا يعني أن الأشعة بعد إنكسارها بواسطة السطح لا تتجمع، بل تظهر وكأنها تنفرق من نقطة على مسافة 21.3 cm يسار القمة. أما التكبير، فنجدته بتطبيق المعادلة (4 - 8):

$$m = \frac{-(1.52)}{(1.33)} \frac{(-21.3\text{cm})}{(2.00\text{cm})} = +2.33$$

أي أن الصورة مكبرة (أكبر بـ 2.33 مرة من الجسم) ومعتدلة لأن m موجبة. وتخيلية.



شكل 12

شكل 12 عندما يغمر القضيب في الماء، فإنه يكون صورة تخيلية للجسم. الحالة المهمة الخاصة للسطح الكروي الكاسر هي السطح المستوي بين مادتين ضوئيتين، ما يتطابق مع جعل $R = \infty$ في المعادلة (4 - 7). ومنه نحصل على:

$$\frac{n_i}{o} + \frac{n_t}{i} = 0 \quad (4 - 9)$$

وبتوحيد هذه المعادلة مع المعادلة (4 - 8)، نجد أن التكبير في هذه الحالة يساوي:

$$m = - \frac{n_i}{n_t} \cdot \frac{i}{o} = - \frac{o}{i} \cdot \frac{-o}{i} = 1$$

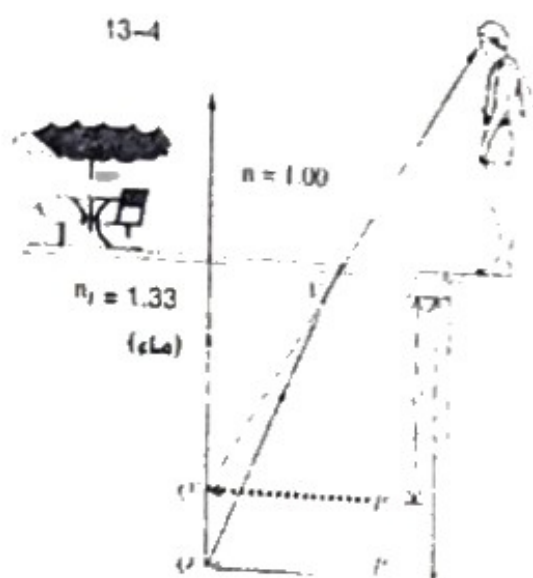
أي أن الصورة المتكونة بواسطة السطح الكاسر تكون دائماً بنفس قياس الجسم، وهي معتدلة دائماً.

مثال 6 حوض سباحة يبدو عند النظر إليه أنه أقل عمقاً مما هو عليه حقيقة، ولذا يجب تعيين الأجزاء العميقة فيه بحيث يتجنب من لا يجيد السباحة القفز فيه. فإذا نظر مثل هذا الشخص إلى الماء بصورة مستقيمة إلى الأسفل، فكيف يبدو عمق الحوض إذا كان عمقه الحقيقي هو 2.00m؟

الحل: الحالة المدروسة موضحة على الشكل 13. نفرض وجود سهم PQ مصبوغ على أرضية الحوض عند عمق $O = 2.00\text{m}$. إن الصورة التي يكونها السطح الكاسر للسهم هي $P'Q'$ عند عمق i . ولإيجاد i نطبق المعادلة (4 - 9)،

$$\frac{1.33}{2.00 \text{ m}} + \frac{1}{i} = 0 \quad , \quad i = -1.50 \text{ m} \quad \text{ومنها نجد:}$$

وهذا هو العمق الظاهري للحوض.



شكل 13

شكل 13 السهم P'Q' هو الصورة التخيلية للسهم PQ الموجود تحت الماء. حيث رسمت زوايا الأشعة مع العمود للتوضيح فقط.

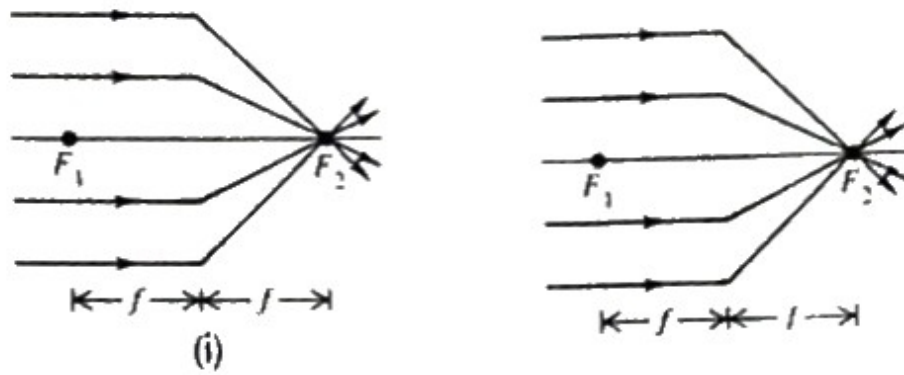
(4 - 5) العدسات الرقيقة

أكثر الأدوات البصرية إنتشاراً وأوسعها استخداماً (بعد المرآة المستوية) هي العدسة. والعدسة بوصفها نظاماً بصرياً كاسراً تتكون في أبسطها من سطحين كرويين قريبين من بعضهما بدرجة كافية بحيث يمكن إهمال المسافة بينهما (وتعرف بسمك العدسة): هذه العدسة تدعى بالرقيقة. أما في الأنظمة الضوئية الأكثر تعقيداً، كالميكروسكوب، التليسكوب، الكاميرات وغيرها، فهناك عدسات بأكثر من سطحين كاسرين. سنركز بداية على العدسة الرقيقة كحالة خاصة، حيث يكون السمك فيها صغيراً قياساً ببُعدي الجسم والصورة أو أي من نصفي قطر انحناء سطحها، شارحين خواصها وكيفية تكون الصورة فيها.

النقاط البؤرية للعدسة

تمتلك العدسة من النوع المبين في الشكل 14 خاصية تجميع حزمة الأشعة

المتوازية عندما تمر خلالها، تجميعها عند النقطة F_2 (الشكل 14 (أ)). وبصورة مماثلة، فإن الأشعة المارة خلال النقطة F_1 تنبثق من العدسة كحزمة من الأشعة المتوازية (شكل 14 (ب)). وتدعى هاتان النقطتان F_1 و F_2 بالنقطتين البؤريتين الأولى والثانية، وتدعى المسافة F (مقاسة من مركز العدسة) بالطول البؤري، والطولان البؤريان في الشكل 14، رُمز لـ f لكليهما بـ f . متساويان دائماً للعدسة الرقيقة، حتى عندما يكون لسطحي العدسة نصفاً قطري انحناء (R_1 و R_2) مختلفان - سنبرهن ذلك في نهاية هذه الفقرة، وذلك من خلال العلاقة بين f وبين معامل انكسار العدسة n ونصفاً قطري انحناء سطحيها. وكما في المرآة الكروية، يدعى الخط المركزي الأفقي بـ المحور الضوئي، الذي يقع عليه مركزا انحناء السطحين الكرويين ويتحدد هما.

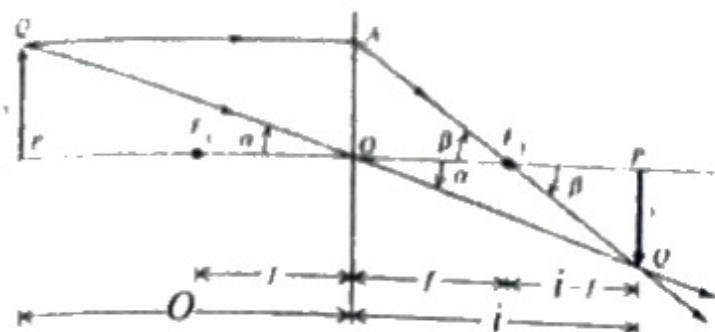


شكل 14

شكل 14 النقطتان البؤريتان الأولى والثانية لعدسة رقيقة مجمعة. والقيمة العددية لـ f موجبة.

تحديد موضع الصورة المتكونة بواسطة العدسة الرقيقة.

يبين الشكل 15 كيف يمكننا تحديد موضع الصورة المتكونة بواسطة العدسة الرقيقة. فباستخدام نفس مجموعة الرموز وقواعد الاشارات، نجعل o و i مسافتي الجسم والصورة على التوالي، و y ، y' ارتفاعيهما. الشعاع QA ، الموازي للمحور الضوئي قبل الانكسار، يمر خلال النقطة البؤرية F_2 بعد الانكسار، والشعاع QoQ' يمر مستقيماً دون انحراف خلال مركز العدسة لأنه عند المركز يكون سطحاً العدسة متوازيين وقريبين جداً من بعضهما.



شكل 15 بنية لايجاد موضع الصورة المتكونة بواسطة

العدسة الرقيقة ويظهر فيها الشعاع QAO' منحنياً عند منتصف مستوي العدسة بدلاً من سطحيها والشعاع QOO' كخط مستقيم ليؤكد على صغر سمك العدسة. إن الزاويتين α في الشكل 15 متساويتان؛ ومن ثم فإن المثلثين القائمين OQV و $O'Q'V$ متشابهان. وعليه، فإن نسب الأضلاع المتطابقة متساوية. وهكذا، فإن:

$$\frac{y}{o} = -\frac{y'}{i} \text{ , أو } \frac{y'}{y} = -\frac{i}{o} \quad (4 - 10)$$

(وسبب الإشارة السالبة هو أن الصورة تقع تحت المحور الضوئي و y سالبة). كذلك، فإن الزاويتين B متساويتان، والمثلثين القائمين QOF_2 و VAF_2 متشابهان، وبالتالي، فإن:

$$\frac{y}{f} = -\frac{y'}{i \cdot f}$$

أو

$$\frac{y'}{y} = -\frac{i \cdot f}{f}$$

وبمساواة المعادلتين (4 - 10) و (4 - 11) والقسمة على i ؛ نجد بعد إعادة كتابة حاصل القسمة على i ، أن:

$$\frac{1}{o} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f} \quad (4 - 12)$$

وهذه تدعى بالمعادلة العامة للعدسات أو معادلة غاوس (انظر المعادلة (4 - 4)). هذا التحليل يعطينا أيضاً التكبير الجانبي للنظام. فمن المعادلة (4 - 10) نحصل على:

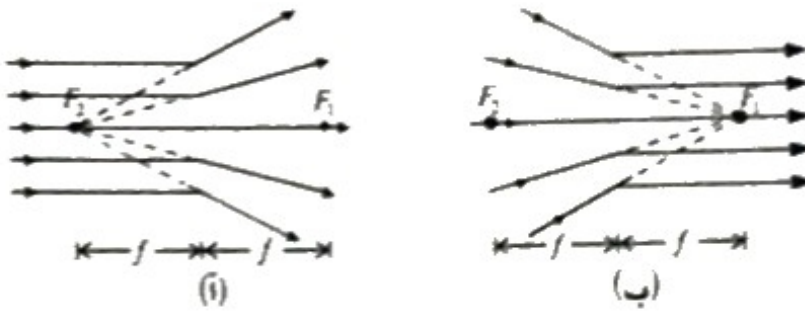
$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{i}{o} \quad (4 - 13)$$

والإشارة السالبة تخبرنا أنه عندما تكون كل من i و o موجبتان، فإن الصورة مقلوبة، و y و y' لهما إشارتان متعاكستان.

العدسة المفرقة

تتفرق حزمة الأشعة المتوازية الساقطة على العدسة المبينة في الشكل 16 بعد إنكسارها. ومثل هذه العدسة تدعى بالمفرقة. إن الطول البؤري للعدسة المفرقة سالب، ولهذا تدعى أيضاً بالعدسة السالبة.

ونقطتيها البؤريتين F_1 و F_2 معاكستان لنظيرتيهما في العدسة المجمعة. فالنقطة البؤرية F_2 للعدسة المفرقة هي النقطة التي تبدو الأشعة التي كانت في الأصل موازية للمحور وكأنها تتفرق منها بعد الإنكسار (شكل 16 (أ)). والأشعة الساقطة المتجمعة باتجاه النقطة البؤرية الأولى F_1 (شكل 16 (ب)) تنبثق من العدسة موازية لمحورها.

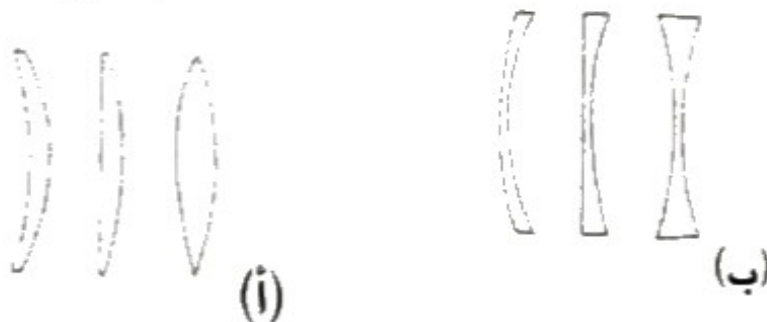


شكل 16

شكل 16 النقطتان البؤريتان للعدسة الرقيقة المفرقة F_1 و F_2 . إن القيمة العددية للطول البؤري f سالبة.

تتطبق المعادلتان (4 - 12) و (4 - 13) على كلا العدستين المجمعة والمفرقة وعلى نماذجهما الأخرى المختلفة (شكل 17). إن أي عدسة تكون أسمك عند مركزها مما عند حافتيها هي عدسة مجمعة بطول بؤري f موجب؛ وأي عدسة أسمك عند حافتيها مما عند مركزها هي عدسة مفرقة بطول بؤري f سالب (تحت شرط أن يكون معامل إنكسار العدسة أكبر من معامل إنكسار المادة المحيطة). وهذا يمكن إثباته باستخدام المعادلة اللاحقة (4 - 15).

17 - 4



شكل 17 (i)

شكل 17 (أ) عدسات مجمعة هلالية، مستوية - محدبة، مضاعفة النحور.
 (ب) عدسات مفرقة هلالية، مستوية - مقعرة، مضاعفة التقعر، العدسة
 المجمعة تكون أسمك دائماً عند مركزها مما عند حافتيها، وعكس ذلك
 بالنسبة للعدسة المفرقة. إذا كان معامل انكسار المادة المحيطة أكبر من
 معامل انكسار العدسة، فإن العدسات في (أ) تصبح مفرقة، وتلك التي في
 (ب) تصبح مجمعة.

معادلة صانع العدسات

نتابع الآن اشتقاق المعادلة العامة للعدسات (12 - 4)، وتدعى أيضاً بمعادلة
 غاوس، بتفصيل أكثر، معتمدين مبدأ، أن الصورة المتكونة بواسطة أحد
 الوجهين الكاسرين أو العاكسين يمكن استخدامها كجسم بالنسبة للسطح
 الكاسر أو العاكس الثاني.

نبدأ بالمسألة الأكثر عمومية للسطحين البينيين الفاصلين لثلاثة مواد
 بمعاملات إنكسار n_1 ، n_2 و n_3 ، كما هو موضح على الشكل 18، بالنسبة
 للسطح الأول، فإن مسافتي الجسم والصورة هما O_1 و i_1 ، أما المسافة
 بين السطحين، فهي من الصغر بحيث يمكن إهمالها قياساً بهذه
 المسافات، في هذه الحالة ستكون i_1 و O_2 متساويتين من حيث المقدار
 ولكن بإشارتين متعاكستين، فعلى سبيل المثال، لو كانت الصورة الأولى على
 جهة مغادرة الضوء بالنسبة للسطح الأول، فإن i_1 تكون موجبة، ولكن
 عندما ينظر لهذه الصورة كجسم بالنسبة للسطح الثاني، فإن i_1 ليست
 على جهة ورود الضوء بالنسبة للسطح الثاني، وهكذا يلزمنا استخدام
 معادلة السطح المفرد، المعادلة (7 - 4) مرتين، مرة لكل سطح، ومنه،
 نحصل على:

$$\frac{n_1}{O_1} + \frac{n_2}{i_1} = \frac{n_2 - n_1}{R_1}, \quad \frac{n_2}{O_2} + \frac{n_3}{i_2} = \frac{n_3 - n_2}{R_2},$$

فإذا كانت العدسة مغمورة في الهواء، فإن $n_1 = n_3 = 1$ و $n_2 = n$ ومنه نجد،
 بعد التعويض عن i_2 بـ $-i_1$

$$\frac{1}{O_1} + \frac{n}{i_1} = \frac{n-1}{R_1} \quad \frac{n}{-i_1} + \frac{1}{i_2} = \frac{1-n}{R_2}$$

وبجمع هاتين المعادلتين، نحصل على:

$$\frac{1}{o_1} + \frac{1}{i_2} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

وبالنظر للعدسة كوحدة واحدة وتسمية مسافة الجسم O بدلاً من O_1 ومسافة الصورة النهائية i بدلاً من i_2 ، نحصل على:

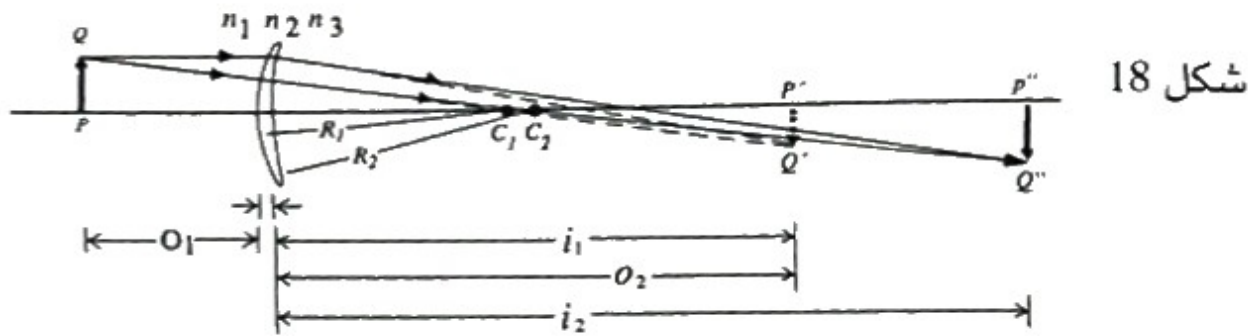
$$\frac{1}{o} + \frac{1}{i} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (4-15)$$

وبمقارنة هذه المعادلة مع المعادلة العامة للعدسات (4-12)، نلاحظ أن مسافتي الجسم والصورة O و i تظهران في نفس المكانين في كلا المعادلتين، ما يمكن التعويض عنهما بدلالة الطول البؤري F للعدسة المدروسة.

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (4-16)$$

هذه العلاقة تدعى بمعادلة صانع العدسات؛ وهي لعدسة مغمورة في الهواء ($n_0 = 1$)، حيث n هنا هي معامل إنكسار مادة العدسة. عندما تغمر العدسة في سائل (n_1) تتحول المعادلة (4-16) إلى الصورة:

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n}{n_1} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (4-17)$$



شكل 18

شكل 18 تستخدم الصورة المتكونة بواسطة السطح الأول للعدسة كجسم بالنسبة للسطح الثاني

وهنا يجب أخذ قواعد الإشارات بالنسبة لـ o ، i ، R_1 ، و R_2 ، حيث R_2 هي الكمية الوحيدة السالبة في جميع الحالات التي سبق لنا دراستها لأنها تقع في جهة ورود الضوء بالنسبة للعدسة، كما يوضح ذلك الشكل 19.

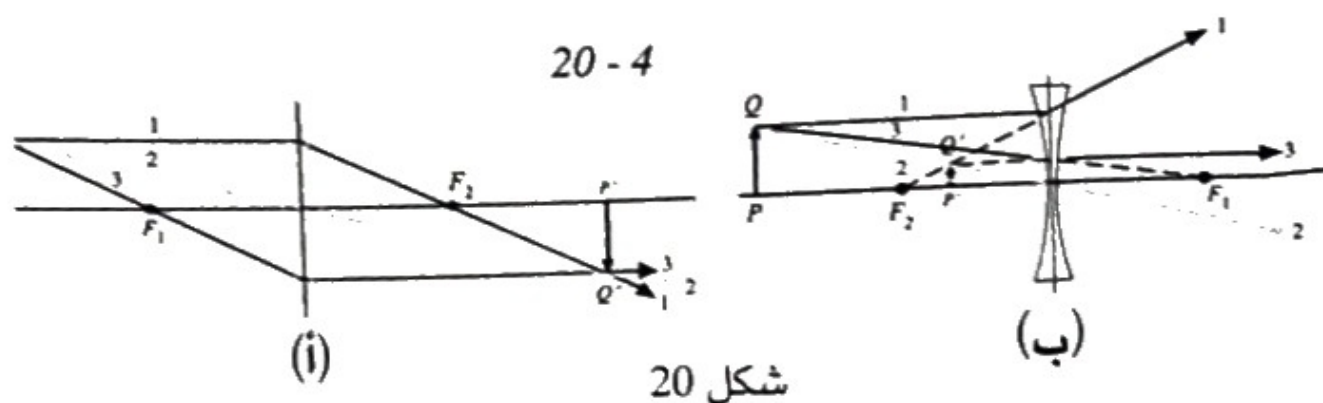
عندما يحدث عند منتصف مستوي العدسة، كما يوضح ذلك الشكل 20: وهذا ينسجم مع افتراض أن المسافة بين سطحي العدسة مهملة. هناك ثلاثة أشعة رئيسية يمكن تتبع مساراتها بسهولة، وهي:

1 - الشعاع الموازي للمحور يمر بعد إنكساره بواسطة السطح الثاني للعدسة بالبؤرة الثانية F_2 للعدسة المجمعة أو يظهر كما لو أنه ورد من النقطة البؤرية الثانية للعدسة المفرقة.

2 - الشعاع المار خلال مركز العدسة لا يعاني انحرافاً لأنه عند مركز العدسة يكون سطحها متوازيين وقريبين من بعضهما.

3 - الشعاع المار خلال البؤرة الأولى F_1 للعدسة المجمعة يبرز من العدسة موازياً للمحور.

عندما تكون الصورة حقيقية، فإن موقع النقطة الصورة يتحدد بتقاطع شعاعين إثنين من الأشعة الثلاثة (شكل 20 (أ))، وعندما تكون الصورة تخيلية نمد الأشعة الراحلة إلى الخلف إلى نقطة تقاطعها (شكل 20 (ب)). وحالما يصبح موقع الصورة معلوماً، يمكن رسم أي شعاع آخر من نفس النقطة، ولكن ذلك لا يضيف شيئاً.



شكل 20 التخطيط الشعاعي الرئيسي يوضح الطريقة البيانية لتحديد موضع الصورة.

(أ) عدسة مجمعة؛ (ب) عدسة مفرقة.

ثمة أوضاع متعددة للجسم أمام العدسة المجمعة تقابلها أوضاع مناظرة متعددة للصورة جميعها جديرة بالاهتمام والدراسة، وبشكل 21 يوضح ذلك، نختار منها، مثلاً، الوضع عندما يكون الجسم في بؤرة العدسة (شكل 21 (د))؛ فهنا لا يمكن رسم الشعاع 3 لعدم امكانية مروره خلال العدسة، وفي

هذه الحالة. عندما يكون الجسم واقعاً بين العدسة وبؤرتها (شكل 21 هـ). فإن الأشعة المارة خلال العدسة تتفرق مبتعدة عن بعضها والصورة المتكونة خيالية من امتدادات الأشعة المارة بالعدسة. وفي هذه الحالة يكون بعد الصورة s سالباً. أما التخطيط الأخير (شكل 21 يـ)، فهو يمثل الحالة التي يكون فيها الجسم افتراضياً (أو تخيلياً)، وهي الحالة عندما تكون الأشعة الواردة ليست متفرقة من جسم نقطي حقيقي P . بل أنها متجمعة كما لو أنها ستتقابل عند جسم نقطي تخيلي P . على الجهة اليمنى. وفي هذه الحالة تكون مسافة الجسم O سالبة. في حين تكون الصورة حقيقية. ومسافتها s موجبة وأقل من F .



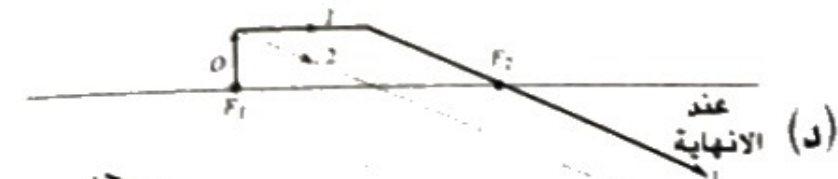
(i)



(ب)



(ج)



(د)



(هـ)



(ي)

شكل 21

شكل 21 تكون الصور بواسطة عدسة رقيقة مجمعة لمسافات (أوضاع) مختلفة للجسم: وقد رُفِعت الأشعة الرئيسية.

الخلاصة

• عندما تتفرق الأشعة من جسم نقطي P وتنعكس أو تنكسر، فإن اتجاهات الأشعة المغادرة (منعكسة أو منكسرة) هي نفسها كما لو أنها كانت قد تفرقت من النقطة P' التي تدعى النقطة الصورة.

فإذا كانت الأشعة قد تجمعت فعلاً عند P' وتفرقت منها مرة أخرى، فإن P' هي صورة حقيقية لـ P ؛ أما إذا بدت وكأنها تفرقت من P' ، فإن P' هي صورة تخيلية لـ P . والصور إما أن تكون معتدلة أو مقلوبة، سواءً في المرايا أو العدسات، وتتفرد المرايا، المستوية والكروية، في أن صورها تكون دائماً معكوسة، أي اليمين يساراً واليسار يميناً فصورة اليد اليسرى هي يد يمنى.

• يعرف التكبير الجانبي m في أية حالة إنعكاس أو إنكسار بأنه النسبة بين ارتفاع الصورة y وارتفاع الجسم y :

$$m = \frac{y'}{y}$$

فعندما تكون m موجبة، فإن الصورة معتدلة، وعندما تكون سالبة، فإن الصورة مقلوبة.

• علاقات الجسم - الصورة المعتمدة في هذه الدراسة تصح فقط بالنسبة للأشعة القريبة والموازية تقريباً للمحور الضوئي وتدعى بالأشعة المحورية. أما الأشعة غير المحورية فهي لا تتجمع تماماً عند نقطة الصورة؛ وهذا الأثر يعرف بالزيغ الكروي.

• النقطة البؤرية للمرآة هي النقطة التي تتجمع عندها الأشعة المتوازية إنعكاسها من المرآة المقعرة، أو هي النقطة التي تبدو الأشعة متفرقة منها بعد الإنعكاس من المرآة المحدبة. الأشعة المتفرقة من النقطة البؤرية للمرآة المقعرة تكون متوازية بعد انعكاسها. والأشعة المتجمعة جهة النقطة البؤرية للمرآة المحدبة تكون متوازية بعد انعكاسها، المسافة من النقطة البؤرية إلى قمة المرآة تدعى البعد أو الطول البؤري، ويرمز له بـ f . وبصورة مماثلة تعرف النقطتان البؤريتان للعدسة.

• تجمع صيغ مسافتي الجسم والصورة، o و i ، للمرايا المستوية والكروية والسطوح الكاسرة المنفردة، تجمع في جدول كالتالي. وفيما يخص معادلة

السطح المستوي فيمكن الحصول عليها من المعادلة المطابقة للسطح الكروي على أن نضع $R = \infty$.

السطح الكروي الكاسر	السطح المستوي الكاسر	المرآة الكروية	المرآة المستوية
$\frac{n_i}{o} + \frac{n_l}{i} = \frac{n_l - n_i}{R}$	$\frac{n_i}{o} + \frac{n_l}{i} = 0$	$\frac{1}{o} + \frac{1}{i} = \frac{2}{R} = \frac{1}{f}$	$\frac{1}{o} + \frac{1}{i} = 0$
مسافتا الجسم والصورة			

• علاقة الجسم - الصورة بالنسبة للعدسة الرقيقة هي نفسها كما للمرآة

$$\frac{1}{o} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f}$$

ومعادلة صانعي العدسات:

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

• تستخدم قواعد الاشارات التالية لجميع السطوح العاكسة والكاسرة:

O موجبة عندما يقع الجسم في جهة ورد الضوء، وسالبة في الجهة المعاكسة.

i موجبة عندما تقع في جهة المغادرة (الجهة التي تغادر اليها الأشعة بعد انعكاسها أو إنكسارها) وسالبة في الجهة المعاكسة.

R موجبة عندما يكون مركز التكور في جهة المغادرة بالنسبة للسطح العاكس أو الكاسر، وسالبة في الجهة المخالفة.

m موجبة عندما تكون الصورة معتدلة، وسالبة عندما تكون مقلوبة.

مسائل

الإنعكاس عن السطح الكروي

المرآة الكروية

1. مرآة حلقة مقعرة نصف قطر إنحنائها 35 cm تكونت فيها صورة لوجه رجل بقياس 2.7 أكبر من وجهه الحقيقي. كم بُعد المرآة من وجه الرجل؟
2. جسم خطي قصير طوله L يقع على محور مرآة كروية على مسافة o منها.

(أ) برهن أن طول الصورة L يساوي:

$$L' = L \left(\frac{f}{o-f} \right)^2$$

(ب) بين أن التكبير الطولي $m' = (L / L')$ يساوي التكبير الجانبي m^2 .
(ملاحظة: خذ القانون العام للعدسات واشتقه).

الطريقة البينانية

3 - الصورة التليسكوبية للقمر، قطر القمر هو 3480km ويعدّه عن الأرض هو 386000 km. أوجد قطر صورة القمر المتكونة بواسطة المرآة المقعرة الكروية للتليسكوب ذات الطول البؤري 3.20 m.

4 - جسم طوله 0.4 cm وضع على بعد 15.0 cm يسار قمة مرآة مقعرة كروية نصف قطر إنحنائها 20.0cm (أ) ارسم التخطيط الشعاعي الرئيسي الموضح لتكون الصورة . (ب) حدد موقع، قياس، توجه، وطبيعة (حقيقية أو تخيلية) الصورة.

5 - برهن أن الصورة المتكونة لجسم حقيقي بواسطة مرآة محدبة هي صورة تخيلية دائماً، بصرف النظر عن موقع الجسم.

6 - أعد المسألة 4 باستخدام مرآة محدبة.

7- جسم طوله 1.5 cm وضع على مسافة 8.0 cm يسار قمة مرآة محدبة كروية نصف قطرها 24.0 cm (أ) ارسم التخطيط الشعاعي الرئيسي لتكون الصورة. (ب) حدد موقع، قياس، توجه، وطبيعة الصورة.

8 - المعادلتان (4 - 4) و (4 - 5) كان قد تم اشتقاقهما لمرآة مقعرة. أعد نفس الاشتقاق لمرآة محدبة، وبين أن نفس المعادلة تحصل إذا استخدمنا قاعدة الإشارات التي ثبتناها في الفصل.

(4 - 4) الإنكسار عند السطوح الكروية.

9 - المعادلتان (4 - 7) و (4 - 8) كان قد تم اشتقاقهما للحالة التي يكون فيها R موجباً و $n_i < n_t$ (أ) اشتق هاتين المعادلتين للحالة $o < R$ و $n_i < n_t$ (ب) اشتق المعادلتين للحالة $o > R$ و $n_i > n_t$.

10 - عُمِلت النهاية اليسرى لقضيب زجاجي بهيئة سطح نصف كروي نصف

- قطرة 10.0cm . أوجد موضع صورة جسم نقطي وضع على محور القضيبي
 مسافة 80.0cm يسار القضيبي الذي كان مغموراً في الهواء .
- 11 - لو غمر القضيبي في المسألة 10 في الماء ($n = 1.33$) بدلاً من الهواء،
 فما هو موضع الصورة؟
- 12 - قضيبي زجاجي طويل قطره 6.0cm ونهايته اليسرى بهيئة سطح نصف
 كروي محدب نصف قطره 3.0cm، ومعامل إنكسار مادته 1.5 . حدد موضع
 الصورة إذا وضع جسم في الهواء على محور القضيبي عند المسافات التالية
 على يسار قمة النهاية المحدبة: (أ) في اللانهاية، (ب) 16.0cm، (ج) 4.0 cm .
- 13 - غمر القضيبي في المسألة 12 في سائل ووضع جسم على محوره مسافة
 60.0cm من قمة النهاية اليسرى للقضيبي لتكون له صورة عند نقطة على
 مسافة 90.0cm داخل القضيبي، ما هو معامل إنكسار السائل؟

(4 - 5) العدسات الرقيقة

- 14 - جسم على مسافة 20cm يسار عدسة رقيقة مفرقة طولها البؤري -
 30cm . أين تتكون الصورة؟ احسب موضع الصورة رياضياً وبالتخطيط
 الشعاعي.
- 15 - عدسة محدبة الوجهين معامل إنكسار مادتها 1.5 . نصف قطر أحد
 وجهيها ضعف الآخر وطولها البؤري 6 cm . أوجد نصفي قطريها .
 (ملاحظة للحل: طبق المعادلة 13 - 4).
- 15 - هب أنك جمعت صورة الشمس على شاشة باستخدام عدسة رقيقة
 طولها البؤري 27 cm . أوجد قطر الصورة. علماً بأن المسافة من الأرض إلى
 الشمس هي 15×10^6 km ونصف قطر الشمس هو 6.96×10^8 km .
- 16 - عدسة أحد جانبيها مسطح والآخر محدب بنصف قطر إنحناء 20 cm
 مصنوعة من زجاج معامل إنكساره 1.5 (أ) أوجد طولها البؤري . (ب) إذا وضع
 جسم مسافة 40 cm يسار العدسة، فأين تتموضع صورته؟
 (ملاحظة للحل: أ) طبق معادلة صانع العدسات، (ب) طبق المعادلة العامة
 للعدسات).
- 17 - بين أن الطول البؤري f لعدسة رقيقة معامل إنكسارها n مغمورة في

سائل معامل إنكساره n يُعطى بالعلاقة:

$$\frac{1}{f} = \frac{n - n'}{n'} \left(\frac{1}{V_1} - \frac{1}{V_2} \right)$$

- 18- أوجد البعد البؤري للعدسات التالية: (أ) عدسة محدبة الوجهين (عدسة لامة) نصف قطر إنحناء سطحها $|R_1| = 15 \text{ cm}$, $|R_2| = 25 \text{ cm}$ ، (ب) عدسة مستوية - محدبة) نصف قطر سطحها المحدب 15 cm ، (ج) مقعرة - محدبة نصف قطر إنحناء سطحها $|R_1| = 15 \text{ cm}$, $|R_2| = 25 \text{ cm}$ ، (د) مقعرة الوجهين، نصف قطر إنحناء سطحها $|R_1| = 15 \text{ cm}$, $|R_2| = 25 \text{ cm}$ ، (هـ) محدبة - مقعرة، $|R_1| = 25 \text{ cm}$, $|R_2| = 15 \text{ cm}$.

(ملاحظة للحل: الإجابة على هذا السؤال تستلزم تحديد السطح الذي يصدمه الضوء أولاً. وهذا يختلف من كاتب لآخر. فقد يكون السطح الذي يلتقط (أو يكتب) في تسمية العدسة هو المواجه للضوء الوارد من جهة اليسار عادة أو قد يكون العكس، ونحن نتبع وجهة النظر الأولى).

- 19 - برهن أنه بالنسبة للعدسة اللامة بنصفي قطر إنحناء متساويين ومعامل إنكسار $n = 1.5$ تتطابق البؤرة الأساسية مع مركزي إنحناء سطحها.

- 20 - عدسة مستوية - محدبة نصف قطر إنحناء سطحها المحدب 10 cm . وضع أمامها من جهة اليسار مصدر نقطي على مسافة 35 cm من قمته. أوجد موضع الصورة. (أ) عندما يكون السطح المستوي بمواجهة المصدر، و (ب) عندما يكون السطح المنحني بمواجهة المصدر، إذا كان معامل إنكسار مادة العدسة 1.5 وهي مغمورة في الهواء.

- 21 - احسب الطول البؤري لعدسة رقيقة مفرقة مصنوعة من زجاج الفلنت ($n = 1.66$) ومغمورة في الماء.

- 22 - سائل شفاف معامل إنكساره $n_1 = 1.36$ غمرت فيه عدسة لامة معامل إنكسار مادتها n_L فوجد أن طولها البؤري يساوي خمسة أضعافه عندما تكون مغمورة في الهواء. أوجد معامل إنكسار العدسة وطولها البؤريين في السائل وفي الهواء إذا كان نصف قطر إنحناء سطحها $|R_1| = |R_2| = 10 \text{ cm}$.
- 23 - نصف قطر إنحناء عدسة رقيقة لامة ($n = 1.5$) بنسبة $1:2$ ، أكتب تعبيراً لأصفرهما بدلالة الطول البؤري للعدسة.

24 - عدسة لامة طولها البؤري 16cm تكون صورة ساطعة لحسم عندما يكون في موضعين. المسافة بينهما 60cm . أوجد المسافة بين الحسم والشاشة التي تتكون عليها الصورة في الحالتين.

25 - عدسة لامة نصف قطر انحناء سطحها منكافئان $R_1 = R_2 = 12\text{ cm}$ وصفت على مسافة ما من حسم بحيث تكون له صورة مكبرة بمقدار m أوجد المسافة d من الحسم إلى الشاشة إذا كانت.

(أ) $m = 1$ (ب) $m = 20$ (ج) $m = 0.2$. علماً بأن معامل إنكسار العدسة هو 1.5.

26 - عدسة لامة، مستوية - محدبة، معامل إنكسارها 1.5، أوجد العلاقة بين طولها البؤري ونصف قطر انحنائها.

27 - عدسة رقيقة قوتها الضوئية 5 ديوبتر. عندما تغمر في سائل معامل إنكساره n_L أكبر من معامل إنكسارها تؤثر كعدسة مفرقة بطول بؤري $f = -100\text{ cm}$. أوجد معامل إنكسار السائل إذا كان معامل إنكسار العدسة 1.5.

28 - المسافة بين مصدرين ضوئيين نقطيين هي 24 cm . أين يجب أن توضع بينهما عدسة لامة طولها البؤري $f = 9\text{ cm}$ لكي نحصل على صورتين للمصدرين تقعان عند نفس النقطة.

ملاحظة تساعد للحل: لا بد أن تكون إحدى الصورتين تخيلية والأخرى حقيقية، وبالتالي يجب تطبيق المعادلة العامة للعدسات لكلا الصورتين).

الفصل الخامس

الآلات البصرية المركبة

إن الهدف النهائي لعلم البصريات الهندسية يتحدد في تصميم وصنع أجهزة بصرية عالية الكفاءة، الغاية العملية والعلمية منها تتجسد في الحصول على أدق الصور للأجسام المرئية بالعين المجردة وتلك التي لا يمكن رؤيتها إلا بالتكبير. إن هذه الأجهزة تخضع بمجملها للمبادئ الأساسية لتشكل الصورة بواسطة العدسة المنفردة أو مجموعة العدسات، التي يمكن أن نطلق عليها اسم «منظومات تكوين الصورة».

بعض هذه المنظومات يستخدم عدة عدسات أو مجموعات من عدسات ومرايا.

إن مفهوم الصورة يلعب دوراً هاماً في تحليل الآلات البصرية. ومع استخدام النموذج الشعاعي للضوء سنستمر في تحليلنا لمحتويات هذا الفصل.

(5 - 1) العدسة الرقيقة المركبة

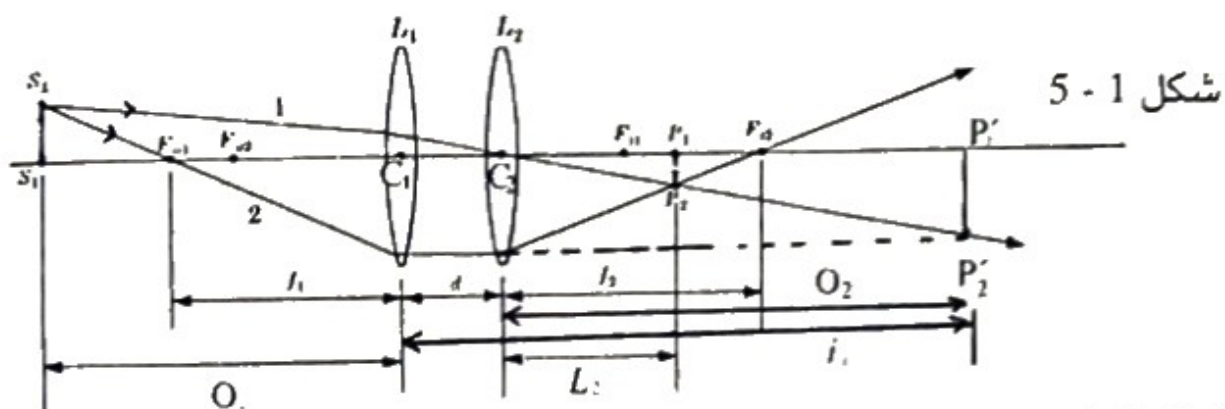
هي مجموعة من عدستين رقيقتين بسيطتين من نوع واحد (عادة تكونا لامتين Convex) تنطبق عليها نفس القواعد والأسس المتبعة في تشكل الصورة بواسطة العدسة الرقيقة البسيطة التي تعرضنا لها في فقرات سابقة لتشكيل الصورة بواسطة العدسة المركبة هناك طريقتان:

الأولى بيانية (بواسطة التخطيط الشعاعي) هي الموضحة على الشكل 1 وفي هذه الحالة تبني المجموعة أو ترتب بحيث تكون المسافة (d) بين العدستين الرقيقتين أصغر من كل من بعديهما البؤريين f_1 و f_2 . نختار شعاعين، شعاع 1 وشعاع 2: الأول نسقطه بزاوية حرة على العدسة الأولى، بحيث يمر بعد انكساره بواسطة العدسة الثانية فيخترقها دون أن يعاني أي إنكسار فيها. أما الشعاع الثاني فيمر في البؤرة الأمامية للعدسة الأولى (F_{01}) ليخرج منها موازياً لمحورها الضوئي والذي هو محوراً ضوئياً للمجموعة ولهذا سوف ينكسر بواسطة العدسة الثانية ماراً في بؤرتها الخلفية (F_{i2}). هذان الشعاعان سوف يلتقيان عند النقطة P_2 ليشكلوا الصورة النهائية، وهي حقيقية مقلوبة مصغرة. لكي نحصل على هذه الصورة ($P_1 P_2$) نجد أولاً صورة الجسم $S_1 S_2$ بواسطة العدسة L_1 ، كما لو أن العدسة الثانية غير موجودة، ومن ثم نجد صورة هذه الصورة بواسطة

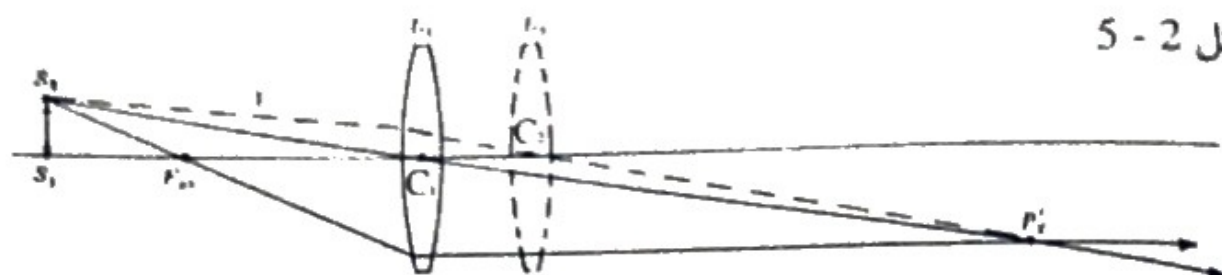
العدسة الثانية: بالنسبة للشعاع 2 فمساره واضح، أما الشعاع 1، فقد اختير براوية مجهولة لسقوطه على العدسة الأولى، مشروطة بأن يمر بعد إنكساره بواسطتها في مركز العدسة الثانية (C_2)، وهنا تكمن بعض الصعوبة، فلو رفعت العدسة الرقيقة الثانية من المجموعة فإن مسار هذا الشعاع (الأول) لن يتأثر. وبالتالي، يمكن تصور العدسة الثانية غير موجودة وتبقى المهمة هي أن نجد موضع الصورة المتكونة بواسطة العدسة L_1 . ومثلما يبين الشكل 2، فإن جميع الأشعة الساقطة على العدسة L_1 من النقطة S_2 تتقاطع بعد الإنكسار في النقطة P_2 . ويكفي فقط أن نحدد موضع النقطة P_2 بواسطة أي شعاعين متجمعين (ملتقيان في نقطة واحدة) ومن ثم نرسم الشعاع 1 راجعاً للخلف من P_2 عبر C_2 إلى S_2 . وحيث أن الشعاع 2 بين العدستين مواز للمحور فإنه سوف يمر بعد إنكساره بواسطة العدسة L_2 بنقطتها البؤرية F_2 ويتقاطع مع الشعاع 1 الراجع إلى الخلف عند النقطة P_2 ، محدداً موضع الصورة P_2 . ولفحص صحة هذه الطريقة البيانية لتشكيل الصورة في العدسة المركبة نأخذ المعطيات التالية، كمثال أول: البعد البؤري للعدسة الأولى $f_1 = +3 \text{ cm}$ وللثانية $f_2 = +4 \text{ cm}$ ، والمسافة بينهما $d = 2 \text{ cm}$ وكان الجسم يقع على بعد 4 cm أمام العدسة الأولى (جهة اليسار عادة). والمطلوب إيجاد موضع الصورة النهائية.

الحل: نجد أولاً موضع الصورة المتكونة بواسطة العدسة الأولى. نطبق معادلة العدسة الرقيقة (12 - 4)، نحصل على:

$$i_1 = \frac{o_1 f_1}{o_1 - f_1} = \frac{(4 \text{ cm})(3 \text{ cm})}{4 \text{ cm} - 3 \text{ cm}} = 12 \text{ cm}$$



شكل 1 تكون الصورة بواسطة العدسة الرقيقة المركبة



شكل 2 تتصرف كلا العدستين L_1 و L_2 بصورة مستقلة الواحدة عن الأخرى.

وهذه هي الصورة التي تكونها العدسة الأولى وحدها. وهي صورة حقيقية وتقع على بعد $12 \text{ cm} +$ يمين العدسة الأولى L_1 . وهذه الصورة تصبح جسماً تخيلياً بالنسبة للعدسة الثانية لأن الأشعة متجمعة تجاه الصورة التي تكونها العدسة الأولى، لذلك فإن بُعد يكون سالباً، ومقداره $o_2 = P_2 C_2 = -(P_2 C_1 - d) = -10 \text{ cm}$ الآن نطبق معادلة العدسة الرقيقة (4 - 12) على العدسة الثانية L_2 ، نجد:

$$i_2 = \frac{o_2 f_2}{o_2 - f_2} = \frac{(-10 \text{ cm})(4 \text{ cm})}{(-10 \text{ cm}) - (4 \text{ cm})} = +2.86 \text{ cm}$$

وعلى العموم، فإنه في حالة أي عدستين رقيقتين فإن موضع الصورة النهائية i_2 يمكن أن يعبر عنه بالمعادلة التالية.

$$i_2 = \frac{f_2 d - [f_1 f_2 o_1 / (o_1 - f_1)]}{d - f_2 - [f_1 o_1 / (o_1 - f_1)]} \quad (5 - 1)$$

التكبير الجانبي للعدسة المركبة هو نتاج تكبير العدستين الرقيقتين ويساوي عددياً حاصل ضرب تكبيريهما m_1 و m_2 :

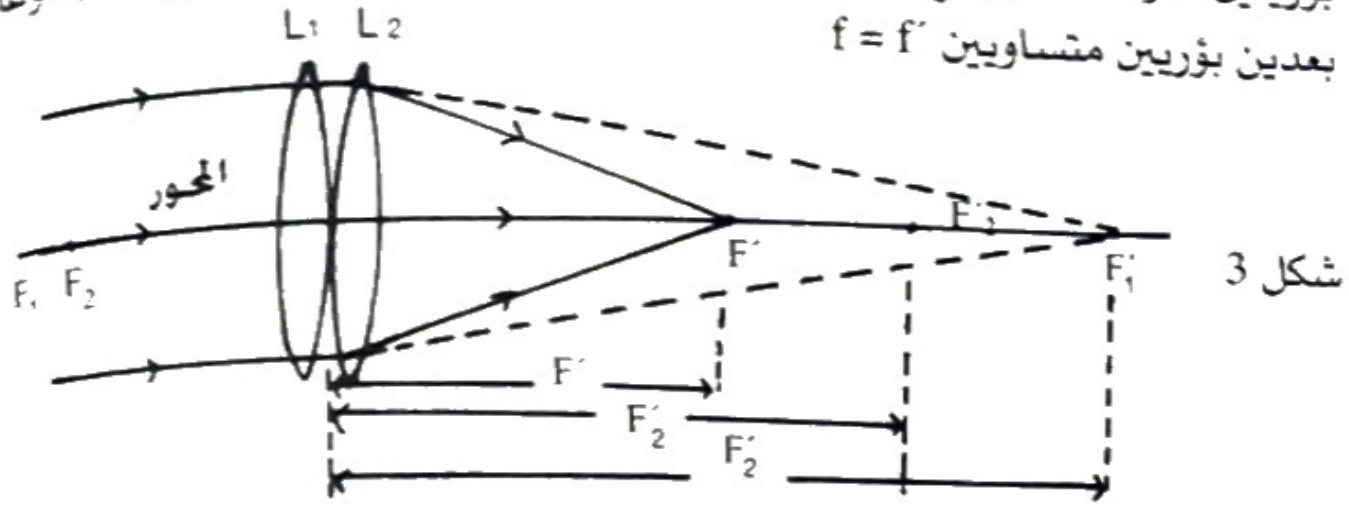
$$m_T = m_1 \times m_2 = \left(\frac{-i_1}{o_1}\right) \left(\frac{-i_2}{o_2}\right) \quad (5 - 2)$$

وعندما لا يكون موضع الصورة الأولى L_2 ، وبالتالي موضع الجسم الثاني o_2 ، فإننا نستعيز عن L_1 من المعادلة (4 - 12) وعن o_2 بـ $i_1 - d$ ، فيكون التكبير الجانبي للمنظومة بالصورة:

$$m_T = \frac{f_1 i_2}{d(o_1 - f_1) - o_1 f_1} \quad (5 - 3)$$

العدسات الرقيقة المتلامسة

الآن لو جعلت العدستين الرقيقتين L_1 و L_2 في العدسة المركبة متلامستين (d = 0) كما في الشكل 3، فإن المجموعة تعمل كعدسة واحدة ذات نقطتين بؤريتين F و F' تقعان في وضعين متماثلين على جانبيها، أي يصبح للمجموعة بعدين بؤريين متساويين $f = f'$



شكل 3 العدسات الرقيقة المتلامسة.

يوضح الشكل 3، أن الأشعة المتوازية الساقطة على المجموعة تنكسر بواسطة العدسة الأولى L_1 تجاه نقطتها البؤرية الثانوية F_1 . ونتيجة للانكسار الإضافي بواسطة العدسة الثانية L_2 تتجمع هذه الأشعة في البؤرة المشتركة للمجموعة F' . ونتيجة لتساوي البعدين البؤريين، الأمامي والخلفي للمجموعة، يصبح لها بعد بؤري، مقلوبة يساوي:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \quad (5 - 4)$$

حيث f_1 ، f_2 البعدين البؤريين للعدستين الرقيقتين المتلامستين.

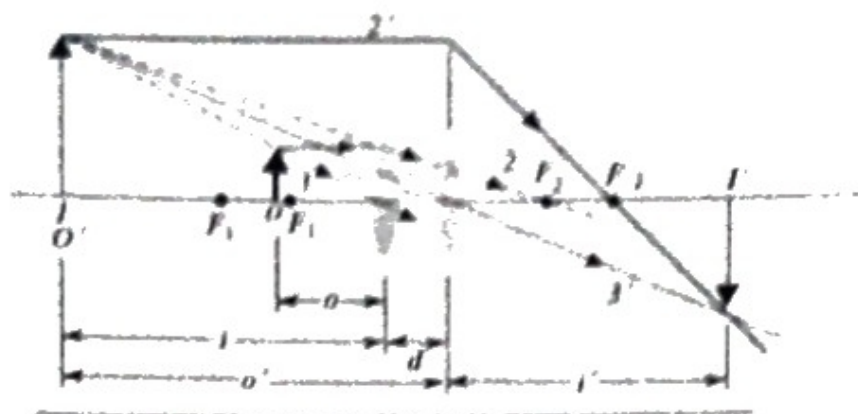
مثال 2 عدستان لامتان متطابقتا الطول البؤري $f = f' = +15 \text{ cm}$ مفصولتان بمسافة 6 cm ، كما هو موضح على الشكل 4. وضع مصدر ضوئي على مسافة $o = 10 \text{ cm}$ أمام العدسة الأولى. عيّن موضع الصورة النهائية.

الحل: يمكن حل المثال بطريقتين: الأولى، نعوض مباشرة في المعادلة (1 - 5):

$$i_2 = \frac{(15\text{cm})(6\text{cm}) - [(15\text{cm})(15\text{cm})(10\text{cm}) / (10\text{cm} - 15\text{cm})]}{(6\text{cm}) - (15\text{cm}) - [(15\text{cm})(10\text{cm}) / (10\text{cm} - 15\text{cm})]} = \frac{540 \text{ cm}^2}{21 \text{ cm}} = 25.7 \text{ cm} \approx 26 \text{ cm}$$

الطريقة الثانية، هي الطريقة البيانية: نبدأ بتحديد موضع الصورة المتكونة بواسطة العدسة الأولى. فكما يتبين من الشكل 4، نسقط الشعاعين 2 و 3 من الجسم الموجود داخل مدى الطول البؤري للعدسة الأولى فتتكون له صورة

تخيلية 1 من امتداد الشعاعين المنكسرين. هذه الصورة (التخيلية) تؤثر بعد ذلك كجسم (تخيلي) O' بالنسبة للعدسة الثانية. ويعطي الشعاعات 2 و 3 موضع الصورة النهائية 1'، التي تكون مقلوبة وحقيقية.



شكل 4

شكل 4 مثال 2

بتطبيق معادلة غاوس (12 - 4)، نجد موضع الصورة الأولى

$$\frac{1}{+10 \text{ cm}} + \frac{1}{i_1} = \frac{1}{+15 \text{ cm}}$$

$$i_1 = -30 \text{ cm}$$

أي أن الصورة تخيلية ومتكونة على مسافة 30 cm من العدسة الأولى في الجانب السالب. هذه الصورة تعامل كجسم O' بالنسبة للعدسة الثانية ومسافته $|i_1| + d = 30 \text{ cm} + 6 \text{ cm} = 36 \text{ cm}$

ومن الجدير بالملاحظة أنه رغم أن الصورة هنا تخيلية بالنسبة للعدسة الأولى، فإن الجسم O' هو جسم حقيقي بالنسبة للعدسة الثانية، لأن الضوء المتفرق من العدسة الأولى يفاد الجسم ويصدم العدسة الثانية.

نطبق المعادلة (13 - 4) مرة أخرى، نجد:

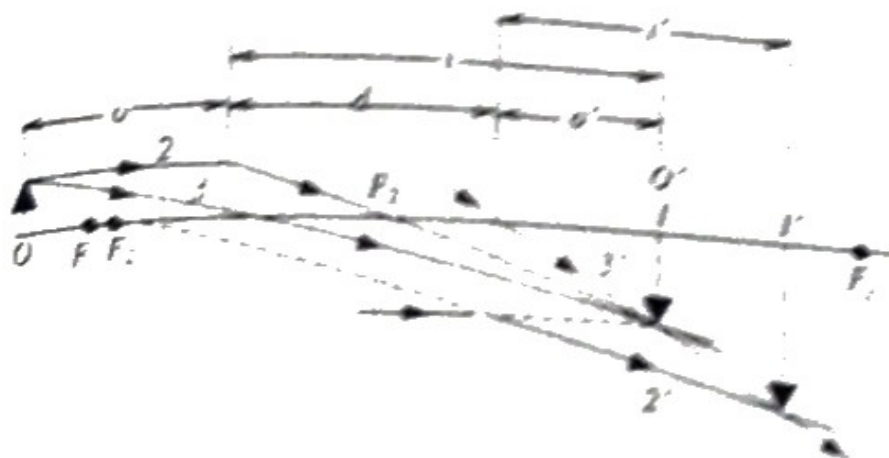
$$\frac{1}{+36 \text{ cm}} + \frac{1}{i_2} = \frac{1}{+15 \text{ cm}}$$

$$i_2 = +26 \text{ cm}$$

وهي صورة حقيقية، مقلوبة وتتموضع على مسافة 26 cm يمين المنظومة العدسية.

مثال 3

منظومة بصرية (شكل 5) تتكون من عدستين، طوليهما البؤريين $f = +12 \text{ cm}$ و $f' = -32 \text{ cm}$ ، مفصولان بمسافة 22 cm. وضع أمام العدسة الأولى جسم مضيء على مسافة 18 cm، عيّن موضع الصورة النهائية المتكونة بواسطة هذا النظام.



شكل 5

شكل 5 مثال 3

الحل: بالنسبة للعدسة الأولى نجد من المعادلة (12 - 4)

$$\frac{1}{18 \text{ cm}} + \frac{1}{i_1} = \frac{1}{+12 \text{ cm}} \Rightarrow i_1 = +36 \text{ cm}$$

الآن وبخلاف المثال 1، فإن الصورة الأولى تقع يمين العدسة الثانية وهي صورة حقيقية. مثل هذه الصورة ستؤثر كجسم تخيلي بالنسبة للعدسة الثانية. يقع يمينها على مسافة o_2 تساوي $i_1 - d$ أو $36 \text{ cm} - 18 \text{ cm} = 14 \text{ cm}$. لأن o جسماً تخيلياً، فإن o_2 تكون سالبة. ومنه نجد من المعادلة (12 - 4):

$$\frac{1}{-14 \text{ cm}} + \frac{1}{i_2} = \frac{1}{-32 \text{ cm}} \Rightarrow i_2 = +25 \text{ cm}$$

أي أن الصورة حقيقية، مقلوبة وتقع في الجانب الموجب للعدسة الثانية. نلاحظ هنا أن الصورة المتكونة بواسطة العدسة المركبة هي صورة حقيقية دائماً. سواء أكان الجسم المؤثر على العدسة الثانية o' جسماً حقيقياً (عندما تكون الصورة الأولى الممثلة له تخيلية، تقع في الجانب السالب للمنظومة - يسارها) أو افتراضياً (عندما تكون الصورة الأولى حقيقية، تقع في الجانب الموجب للمنظومة - يمينها).

مثال 2

إذا كان ارتفاع الجسم في الشكل 5 هو 2.4 cm ، فما هو ارتفاع صورته؟
الحل: نطبق المعادلة (2 - 5)، نجد:

$$m_T = \left(-\frac{+36 \text{ cm}}{+18 \text{ cm}}\right) \left(-\frac{+25 \text{ cm}}{-14 \text{ cm}}\right) = -3.57 = \frac{y'}{y}$$

ومنه، فإن:

$$y' = (-3.57)(2.4 \text{ cm}) = -8.6 \text{ cm}$$

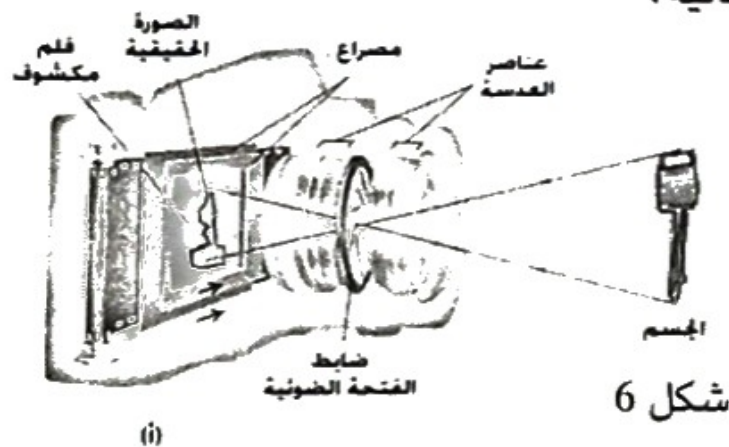
والإشارة السالبة تعني أن الصورة النهائية مقلوبة بالنسبة للجسم الأصلي وحقيقية.

(5 - 2) الكامرة

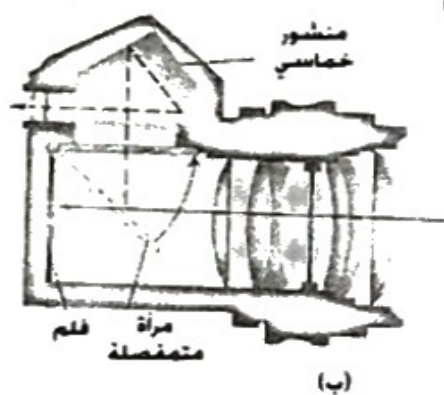
العناصر الرئيسية في الكامرة هي مكافئ عدسي يُغلق بمصراع، سياج ضوئي محكم، وفلم حساس للضوء يسجل الصورة (شكل 6 أ). تكون العدسة صورة مقلوبة، حقيقية للجسم على الفلم تصبح فيما بعد الصورة الفوتوغرافية التقليدية. لضمان مسافات صورة ملائمة لمسافات جسم مختلفة، تُحرك العدسة قريباً أو بعيداً عن الفلم، وهذا يتحقق غالباً بواسطة تحكم خيطي. تمتلك أغلب العدسات عدة عناصر تتيح جزئياً إمكانية تصحيح مختلف العيوب، بما فيها اعتماد معامل الانكسار على الطول الموجي والتشوهات الناتجة عن التقريب الحدودي أو المحوري. والجزء ب من الشكل 6 يوضح التصميم الكلاسيكي للكامرة، المعروف باسم «تصميم تيزار، رغم أن الصانع الحقيقي للكامرة ومصممها هو عالم البصريات العربي الحسن بن الهيثم. حتى اسمها جاء من الأصل الذي سماها به الحسن بن الهيثم وهو «القمر المظلمة».

لكي يسجل الفلم الصورة بدقة فإن الطاقة الضوئية الكلية بوحدة المساحة الواصلة إلى الفلم يجب أن تسقط على حدود معينة. وهذا يتم التحكم به بواسطة مصراع الكامرة وثقب العدسة. فمصراع الكامرة يضبط الزمن الذي يدخل أثناءه الضوء للعدسة. وهذا يتم عادة بخطوات تطابق عاملين تقريباً، هما غالباً من 1 إلى $\frac{1}{1000}$ من الثانية.

6-5



شكل 6



(ب)

شكل 5: كاميرا بمنظف فتحة الضوء. (أ) تكون العدسة صورة حقيقية في مستوى آخر
 (ب) عدسة تيرز رير: عدسة مركبة عويحية. مشور حمسي لتطير حلال. عدسة

تناسب شدة الضوء، أو صل إلى تفتله مع المساحة لتفتلة العدسة. تفر في
 تفتير بمساعدة "ثقب النظم" أو "تحتجب" كحجر. وهو ثقب دائري تفرير
 بقطر متغير D، وعادة يوصف بقياس "ثقب".

كجزء من الطول البؤري للعدسة. فالعدسة ذات طول بؤري 50 (f = 50)
 وثقب قطره D = 25 mm تمتلك ثقباً مقداره 2 : f، وكثير من خصائص
 يدعون هذا بـ الطول البؤري عدد 2، أو العدد - f ومقداره 2. وعموماً

$$f\text{-number} = \frac{\text{الطول البؤري}}{\text{قطر "ثقب"}} = \frac{f}{D} \quad (5-5)$$

لأن الشدة الضوئية عند الفلم تتناسب مع مساحة ثقب العدسة وبالتالي مع
 مربع قطره. فإن تغير القطر بالعامل 2 يغير التعرض للإضاءة بالعامل 2. إن
 ثقب الضبط (وغالباً تدعى بـ f-stops) غالباً لها مقاييس معينة بأرقام
 متعاقبة مرتبطة بالعوامل 2، مثل:

$$f/2, f/2.8, f/5.6, f/8, f/11, f/16,$$

وهلم جرّاً. إن أكبر الأرقام يمثل أصغر الثقب وأصغر التعرضات لضوء.
 وكل خطوة تطابق العامل 2 في التعرض (شكل 7). وهكذا فإن:

$$\frac{1}{125} \text{ s}, f/8, \frac{1}{250} \text{ s}, f/5.6, \frac{1}{500} \text{ s}, f/4$$

7-5

جميعها تطابق نفس التعرض للإضاءة.



شكل 7

شكل 7: الأعداد الأكبر تعني أصغر أقطار
 الفتحات الضوئية في الكاميرا.

إن اختيار الطول البؤري لعدسة الكاميرا يعتمد على قياس الفلم وزاوية النظر المرغوبة، أو المجال. إن قياس صورة الكاميرا الشائعة 35 - mm على الفلم هو 24 x 36 mm. والعدسة الطبيعية لمثل هذه الكاميرا لها طول بؤري حوالي 50 mm، وهذا يتيح زاوية نظر بحدود 45°. أما العدسة ذات الطول البؤري الأكبر، وغالباً يكون بحدود 135 mm أو 200 mm، فهي توفر زاوية رؤيا زصفر وصورة أكبر لجزء الجسم، قياساً بالعدسة الطبيعية، هذا يعطينا انطباعاً أن الكاميرا أقرب لأن تكون واقعية، ومثل هذه العدسة تدعى عدسة تليفوتوغرافية أو عدسة مقربة - وهي صفة لعدسة تصوير معدة لإعطاء صورة كبيرة لشيء بعيد. بينما العدسة ذات الطول البؤري الأقصر، بحدود 35 mm أو 28 mm، فهي تتيح زاوية رؤيا أعرض وتدعى عدسة الزاوية العريضة. وهناك عدسة الزاوية المفرطة العرض، أو عين السمكة، التي قد يكون لها طولاً بؤرياً أصغر ما يمكن 6mm. يبين الشكل 8 منظراً مصوراً عن نفس النقطة بعدسات مختلفة الأطوال البؤرية.



شكل 8 عندما تزداد f من 28 mm إلى 300 mm (بنسبة 10:1) يزداد قياس الصورة طردياً.

مثال 4

العروض الفوتوغرافية. عدسة التصوير الشائعة للكاميرا 35 - mm لها طول بؤري مقداره 200 mm ومدى f - stops من $f/5.6$ إلى $f/45$ (أ) ما هو المدى المطابق لأقطار الثقوب؟

(ب) ما هو المدى المطابق لشدة صورة الفلم؟

(الحل: أ) من المعادلة (5 - 5)، نجد أن مدى الأقطار هو من:

$$D = \frac{f}{f - \text{number}} = \frac{200 \text{ mm}}{5.6} = 36 \text{ mm}$$

إلى:

$$D = \frac{200 \text{ mm}}{45} = 4.4 \text{ mm}$$

(ب) لأن الشدة تتناسب مع مربع قطر الثقب. فإن نسبة القيمة 5.6 إلى القيمة عند $f / 45$ هي تقريباً:

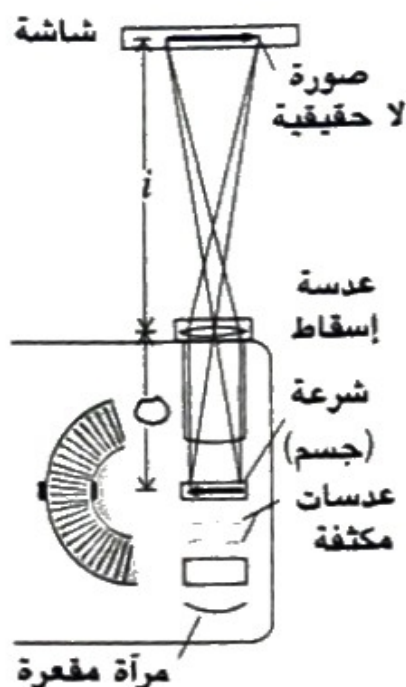
$$\left(\frac{36 \text{ mm}}{4.4 \text{ mm}}\right)^2 = \left(\frac{4.5}{5.6}\right)^2 \approx 65$$

إذا كان زمن العرض القائم هو عند $f / 5.6$ هو $\frac{1}{1000} \text{ S}$ ، فهو عند $f / 45$ يساوي $\frac{1}{15} \text{ S}$ (65) $\left(\frac{1}{1000} \text{ S}\right) = \frac{1}{15} \text{ S}$

إن الأداة البصرية لكamera التليفزيون هي نفسها من حيث المبدأ كذلك التي للكامرة العادية. فالفلم في الكامرة العادية يستبدل بنظام الكتروني يسمح الصورة بسلسلة من الخطوط المتوازية قدرها 525 خطأً. ويتحول سطوح الصورة عند نقاط بامتداد هذه الخطوط إلى نبضات كهربائية يمكن أن تذاق باستخدام أمواج كهرومغناطيسية بترددات من الرتبة من 100 - 400 MHz. وتمسح الصورة الكلية 30 مرة كل ثانية. لذلك فإن خطأ $30 \times 525 = 15750$ تمسح كل ثانية.

(5 - 3) المسلاط (البروجكتر)

هو أداة تسليط الصور المتحركة أو الشراع واسقاطها على الشاشة. وهو يعمل بطريقة تعاكس تماماً عمل الكامرة، وعناصره الأساسية مبينة على الشكل 9. فالضوء من المصدر (مصباح متوهج أو مصباح قوس كربوني في مساليط الصور الكبيرة المتحركة) يشرق خلال الفلم فتكوّن عدسة الإسقاط صورة حقيقية. مقلوبة. غير مكبرة للفلم على شاشة الإسقاط. وهناك عدسات إضافية تدعى بعدسات التكثيف موضوعة بين المصباح والفلم، وظيفتها توجيه الضوء من المصدر بحيث يدخل معظمه عدسة الإسقاط بعد مروره خلال الفلم. ثمة أيضاً مرآة مقعرة خلف المصباح تساعد على توجيه الضوء.



شكل 9 مسلاط (بروجكتر) شرائحي.
المرآة المقعرة والعدسات المكثفة يجمعون
الضوء ويوجهونه من المصباح بحيث
يدخل العدسة المسقط بعد مروره خلال
الشريحة.

يجب أن تكون العدسات المكثفة كبيرة بما يكفي لتغطية المساحة الكلية للفلم.
إن الصورة على الشاشة هي دائماً حقيقية ومقلوبة؛ وهذا يبين لماذا يجب أن
توضع الشرائح (السلايدات) مقلوبة داخل المسلاط.
يتحدد موضع وقياس الصورة المسقط على الشاشة بواسطة موضع عدسة
الإسقاط وطولها البؤري.

مثال 5

مسلاط الشرائح. شريحة ملونة عادية mm - 35 لها مساحة صورة 24x36
mm. ما هو الطول البؤري الذي يجب أن يكون لعدسة الإسقاط لكي تُسقط
صورة قياسها 1.2m x 1.8m على شاشة تبعد 5m من العدسة؟
الحل: يلزمنا تكبير جانبياً مقداره $50 = (1.2m) / (24 mm)$ ومن المعادلة
(4 - 13)، فإن i / o يجب أن تكون 50 أيضاً.

لدينا من معطيات المثال أن $i = 5m$ ، لذلك فإن بعد الجسم o يساوي (من
نفس المعادلة 4 - 13) $o = \frac{5m}{50} = 0.10m$ الآن نطبق المعادلة (4 - 12) لنجد أن:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{0.10m} + \frac{1}{5.0m}, \Rightarrow f = 0.098m = 98mm$$

الطول البؤري الشائع لمسلاط الشرائح البيتيه هو 100mm؛ ومثل هذه
العدسات متاحة بيسر ومن المناسب اختيارها في مثل هذه الحالات.

يمثل السلوك البصري للعين ذلك الذي للكامرة فالأجزاء الجوهرية للعين الإنسان، بوصفها نظاماً بصرياً، هي الموضحة على الشكل 10، فهي تقريباً كروية هي شكلها ينظر يصل إلى 2.5 cm تقريباً، وحزنها الأمامي أكثر تحدباً ومغطى بغشاء شفاف متين يدعى القرنية، وتتضمن المنطقة خلف القرنية سائلاً يدعى الرطوبة المائية، تأتي بعده العدسة البلورية المثبتة في مكانها بأربطة توصلها بالعضلة الهدبية التي تطوقها، وتملأ العين خلف العدسة بهلام مائي رقيق يدعى الرطوبة الزجاجية، ويساوي معامل انكسار كل من الرطوبة المائية والرطوبة الزجاجية معامل انكسار الماء تقريباً، وهما حوالي 1.336، ورغم لا تجانس العدسة البلورية، فإن لها متوسط معامل انكسار يساوي 1.437، وهو لا يختلف كثيراً عن معاملي انكسار الرطوبتين المائية والزجاجية، أغلب انكسارات الضوء الداخل للعين تحدث عند السطح الخارجي للقرنية.



شكل 10 العين، تنقبض العضلة الهدبية لتغير الطول البؤري للعدسة البلورية لتصبح صورة الأجسام القريبة حادة.

ينتج الانكسار عند القرنية وسطحي العدسة البلورية صورة حقيقية للجسم المرئي؛ تتكون على الشبكية الحساسة للضوء، والتي تشكل خلفية السطح الداخلي للعين، تلعب الشبكية دور النظم في الكامرة، وتؤثر القشبان

والمخاريط في الشبكية مثل صفوف من الخلايا الضوئية: فهي تحس بالصورة وتنقلها بواسطة العصب البصري إلى الدماغ. وتكون الرؤية أكثر حدة في منطقة مركزية صغيرة تدعى النقرة المركزية، وقطرها حوالي 0.25 mm.

أمام العدسة هناك القرنية، وفيها ثقب بقطر متغير يدعى البؤبؤ الذي يُفتح ويغلق ليكيف أو يُهايئ الشدة الضوئية المتغيرة. وللمستقبلات الشبكية أيضاً آليات تكيف الشدة.

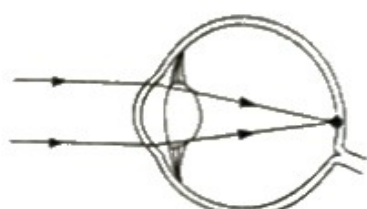
لكي يكون الجسم مرئياً بحدة، يجب أن تتكون الصورة على الشبكية تماماً. إن المسافة من العدسة إلى الشبكية، المطابقة لبعد الصورة i ، لا تتغير، ولكن العين هي التي تتكيف لمسافات الجسم المختلفة o عن طريق تغيير الطول البؤري لعدستها. فعندما تتقلص العضلة الهدبية المحيطة بالعدسة، تنتفخ العدسة ويقل نصف قطر إنحناء سطحها: وهذا يقلل من طولها البؤري. بالنسبة للعين الطبيعية يُرصد الجسم عند اللانهاية بحدة عندما تكون العضلة الهدبية مرتخية. ومع زيادة الشد يقل الطول البؤري ليسمح بتكوين صور حادة للأجسام القريبة على الشبكية. هذه العملية تدعى بالتكيف.

النقطة البعيدة والنقطة القريبة للعين، هما النهايتان القصوى والدنيا للمدى الذي تكون فيه الرؤية المميزة ممكنة. فالنقطة البعيدة للعين الطبيعية تكون في اللانهاية، ويعتمد موقع النقطة القريبة على المقدار الذي تستطيع فيه العضلة الهدبية أن تزيد إنحناء العدسة البلورية. ومع تقدم العمر ينقص مدى التكيف تدريجياً عندما تفقد العدسة البلورية لدانتها (مرونتها). لهذا السبب، فإن النقطة القريبة تتراجع تدريجياً مع تقدم الإنسان في العمر؛ وهذا يدعى بـ بصر الشيخوخة. والجدول 1 يبين الموقع التقريبي للنقطة القريبة لشخص متوسط عند مختلف الأعمار، فمثلاً، بالنسبة لشخص متوسط في الـ 50 من عمره لا يستطيع أن يعدل العين (يركزها) على جسم أقرب من 40 cm تقريباً.

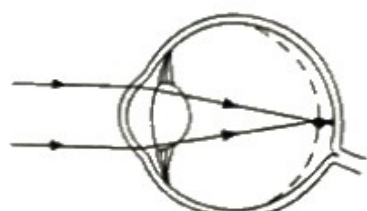
عيوب الرؤية

هناك عيوب رؤية شائعة كثيرة تنتج عن العلاقات المسافية غير الصحيحة في العين. فالعين الطبيعية تكون صورة على الشبكية لجسم عند اللانهاية عندما تكون العين مستريحة (أو مسترخية) شكل 11 (أ). في العين المصابة بقصر البصر تكون كرة العين طويلة جداً من الأرقام إلى الخلف قياساً بنصف قطر تحدب القرنية (أو أن القرنية محدبة بصورة حادة). والأشعة الواردة من الجسم الموجود عند اللانهاية تتجمع أمام الشبكية (شكل 11 ب). وعليه، فإن أغلب الأجسام التي يمكن أن تتكون لها صورة أمام الشبكية يجب أن تكون أقرب من اللانهاية. في العين المصابة ببصر كرة العين قصيرة جداً أو أن القرنية لم تتحدب بما يكفي، وصورة الجسم البعيد في اللانهاية تتكون خلف الشبكية (شكل 11 ج).

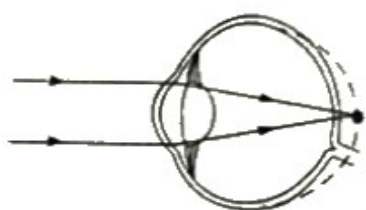
العيب الثالث للرؤية هو اللانطباق أو الاستجماتيزم. وينتج عن لا كروية سطح القرنية وانحنائها بحدّة أكثر في أحد المستويات قياساً بالآخر. وكنتيجة لذلك، فإن الخطوط الأفقية قد تتصور في مستوى مختلف عن الخطوط الرأسية (شكل 11).



(أ) عين طبيعية



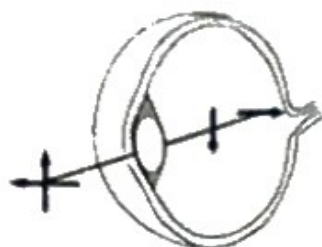
(ب) عين مصابة بقصر البصر



(ج) عين مصابة بطول البصر

شكل 11

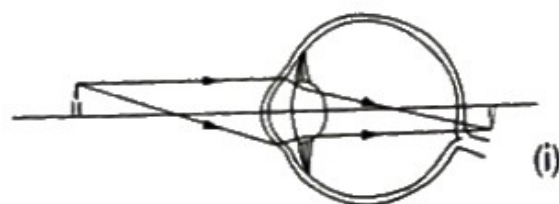
شكل 11 أخطاء الإنكسار لعين مصابة بقصر البصر وأخرى بطول البصر عند مشاهدة جسم بعيد جداً، والمنحني المتقطع يشير إلى الموقع الصحيح للشبكية.



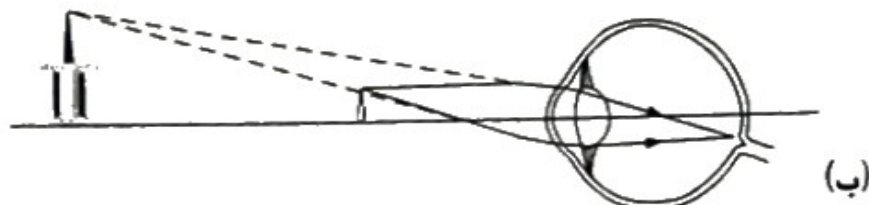
شكل 12 خطوط راسية مصورة بواسطة عين مصابة بالاستجماتيزم.

جميع هذه العيوب يمكن أن تصحح باستخدام عدسات مصححة (عدسة المجهر أو نظارات أو عدسات لاصقة). فالنقطة القريبة الناجمة عن بصر الشيخوخة أو العين المصابة ببعد البصر هي أبعد من تلك التي للعين الطبيعية. فلرؤية الجسم الموجود عند مسافة القراءة الطبيعية (غالباً ما يفترض أنها تساوي 25cm) رؤية واضحة يلزمنا لعلاج مثل هذه العين (المصابة ببعد البصر) عدسة تكون صورة تخيلية للجسم الموجود عند

أو خلف النقطة القريبة. وهذا يمكن أن ينجز بواسطة عدسة مجمعة (لامعة). كما هو مبين على الشكل 13. فالعدسة تحرك الجسم أبعد عن العين إلى النقطة حيث يمكن تكوين صورة حادة على الشبكية. وبصورة مماثلة، يقتضي تصحيح العين المصابة بقصر البصر استخدام عدسة مفرقة (سالبة) لتحريك الصورة أقرب إلى العين مما هو عليه الجسم الفعلي، مثلما هو موضح على الشكل 14.

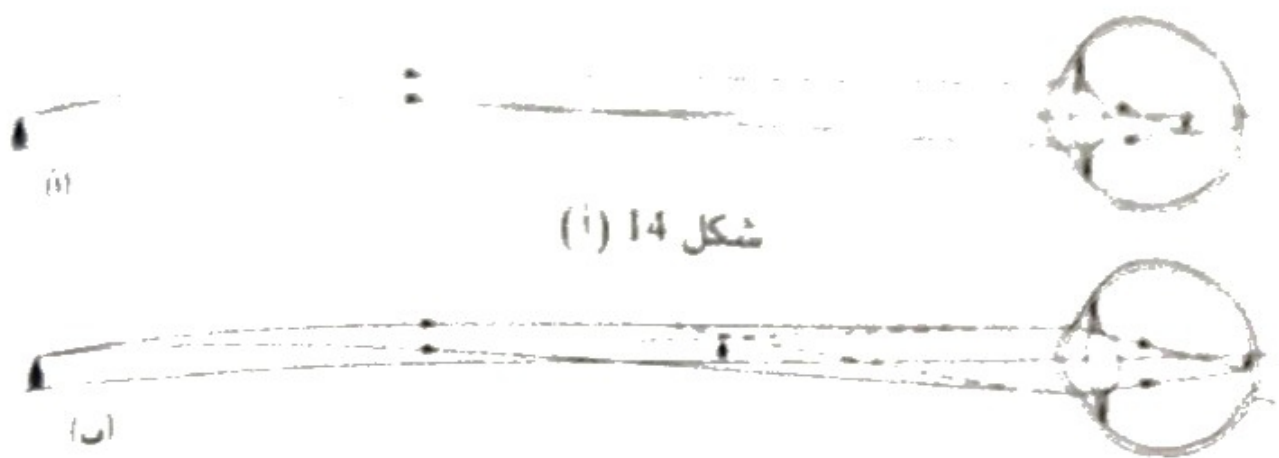


شكل 13 (i)



شكل 13 (i) عين مصابة بطول البصر غير معالجة (غير مسلحة).

(ب) عدسة موجبة (مجمعة) تعطي تبثيراً (تجميعاً) استثنائياً ضرورياً للعين المصابة بطول البصر لكي تبوثر (تركز) الصورة على الشبكية. والصورة التخيلية المتكونة بواسطتها تؤثر كجسم عند النقطة القريبة أو أبعد منها.

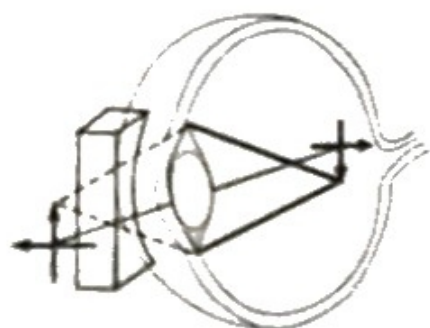


شكل 14 (أ)

شكل 14 (أ) عين قصيرة البصر غير مسلحة. (ب) العدسة السالبة (المفرقة) تمد الأشعة إلى مسافة أبعد لتعوض التبشير المفرط للعين القصيرة البصر. والصورة التخيلية المكونة بواسطة العدسة المفرقة تؤثر كجسم عند النقطة البعيدة أو داخلها (أقرب منها).

أما اللانطباق (الاستجماتزم) فيصحح بواسطة عدسة ذات سطح اسطواني. فمثلاً، لو فرضنا أن إنحناء القرنية في المستوي الأفقي قد تم تصحيحه ليجمع الأشعة من اللانهاية على الشبكية. ولكن الإنحناء في المستوي الرأسي ليس كبيراً بما يكفي لتكوين صورة شبكية حادة. فعندما توضع العدسة الاسطوانية أمام العين بحيث يكون محورها أفقياً، فإن الأشعة في المستوي الأفقي لن تتأثر، ولكن التفرق الإضافي للأشعة في المستوي الرأسي يجعل هذه الأشعة تتصور بحدة على الشبكية. كما هو موضح على الشكل 15

شكل 15



شكل 15 العدسة الاسطوانية المفرقة ذات المحور الأفقي تنثر الأشعة بعيداً بصورة رأسية بحيث يتصور الخط الرأسي على الشبكية أيضاً لهذه العين المصابة باللانطباق.

توصف عدسات تصحيح الرؤية عادة بدلالة القدرة. المحددة كمقلوب الطول البؤري معبراً عنه بالمتر، ووحدتها الديوبتير. وهكذا، فإن العدسة التي طولها

البؤري $f = 50 \text{ cm}$ تكون قدرتها

$$\text{Power } P = \frac{1}{f_m} = \frac{1}{5.0 \text{ cm} \left(\frac{10^{-2} \text{ cm}}{1 \text{ cm}} \right)} = 2.0 \text{ D}$$

حيث D ترمز لوحدة القدرة (ديوبتير)، والعدسة التي طولها البؤري $f = -25 \text{ cm}$ تكون قدرتها

$$P = \frac{1}{(-25 \text{ cm}) \left(\frac{10^{-2} \text{ cm}}{1 \text{ cm}} \right)} = -4.0 \text{ D}$$

وهلم جراً، وعادة يقصد بالرقم الموجود على النظارات القدرة بالديوبتير. وعندما يشمل التصحيح كل من الاستجماتزم وقصر البصر أو طول البصر، فإن هناك ثلاثة أرقام، واحد للقدرة الكروية، واحد للقدرة الاسطوانية، بالإضافة إلى الزاوية التي تصف توجه المحور الاسطواني.

مثال 6

تصحيح طول البصر: النقطة القريبة لعين مصابة بطول البصر هي 100 cm أمام العين، ما هي العدسة اللازم استخدامها لرؤية جسم على مسافة 25 cm أمام العدسة رؤية واضحة؟

الحل: في هذه الحالة يجب أن تكون العدسة صورة تخيلية للجسم في الموضع المطابق لنقطة العين القريبة وهي 100 cm منها. بمعنى أنه عندما يكون الجسم على مسافة 25 cm نريد أن تكون صورته على مسافة $i = -100 \text{ cm}$. ومن المعادلة العامة للعدسات (12 - 4)، نجد:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{o} + \frac{1}{i} = \frac{1}{+25 \text{ cm}} + \frac{1}{-100 \text{ cm}}, f = +33 \text{ cm}$$

إذن يلزمنا عدسة مجمعة بطول بؤري $f = 33 \text{ cm}$ ، قدرتها

$$P = \frac{1}{f_m} = \frac{1}{0.33 \text{ m}} = +3 \text{ diopter.}$$

مثال 7

تصحيح قصر البصر: النقطة القريبة لعين معينة مصابة بقصر البصر هي 50 cm أمام العين. ما هي العدسة اللازم استخدامها لرؤية جسم موجود في اللانهاية رؤية واضحة؟

الحل: النقطة البعيدة للعين المصابة بقصر البصر تكون أقرب من اللانهاية.

ولرؤية جسم موجود خلف النقطة البعيدة يلزم لمثل هذه العين عدسة تكون صورة تخيلية لهذا الجسم ليست أبعد عن العين من نقطتها البعيدة. وبفرض أن الصورة التخيلية تكونت عند النقطة البعيدة، فحينذاك سيكون بعد الجسم $O = \infty$ وبعد الصورة $i = -50 \text{ cm}$. ومن المعادلة (12 - 4)، نجد:

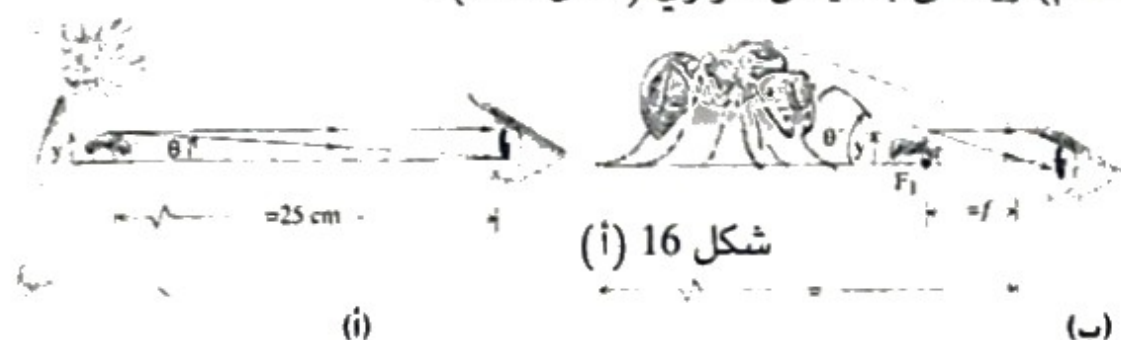
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{\infty} + \frac{1}{-50 \text{ cm}}, \quad f = -50 \text{ cm}$$

إذن نحن بحاجة إلى عدسة مفرقة طولها البؤري $f = -50$ وقوتها

$$P = \frac{1}{f, \text{m}} = \frac{1}{-50 \times 10^{-2} \text{ m}} = -2.0 \text{ diopter.}$$

(5-5) المجهر البسيط

يتحدد القياس (أو الحجم) الظاهر لجسم ما بقياس صورته على الشبكية. فإذا كانت العين غير مسلحة (أي أنها بدون مساعدة خارجية)، فإن هذا القياس يعتمد على الزاوية θ المحددة بفضاء الجسم عند العين (التي يقابلها الجسم) ويدعى بالقياس الزاوي (شكل 16 أ).



شكل 16 (أ) الزاوية المقابلة θ (القياس الزاوي) هي الأكبر عندما يكون الجسم عند النقطة القريبة. (ب) المكبر البسيط يعطي صورة تخيلية عند اللانهاية. هذه الصورة تؤثر كجسم حقيقي محدد بأكبر زاوية θ' بالنسبة للعين.

لكي نحدد عن قرب في جسم صغير، حشرة، مثلاً، أو جسم بللوري فإننا نجلبه بالقرب من عيننا، جاعلين الزاوية المحددة والصورة الشبكية أكبر ما يمكن. ولكن عيوننا لا تستطيع أن تتعدل (تركز) بحدة على الأجسام الأقرب من النقطة القريبة، وبالتالي، فإن القياس الزاوي للجسم هو أكبر ما يمكن

(يقابل أكبر زاوية رؤية ممكنة) عندما يوضع الجسم عند النقطة القريبة (25 cm أمام العين). ولحل هذا الإشكال تستخدم عدسة لامة. فهي قادرة على تكوين صورة تخيلية للجسم أكبر وأبعد عن العين من الجسم نفسه (شكل 15 ب). ومن ثم فإن الجسم يمكن أن يتحرك أقرب إلى العين وقد يكون القياس الزاوي للصورة أكبر من القياس الزاوي للجسم الموجود عند 25 cm بدون العدسة. إن العدسة المستخدمة بهذه الطريقة تدعى زجاجة مكبرة، أو مكبراً. إن الصورة التخيلية تكون غالباً مريحة للرؤية عندما توضع في اللانهاية.

في الشكل 16 أ الجسم عند النقطة القريبة، حيث أنه يقابل الزاوية عند العين. وفي الجزء ب من هذا الشكل يكون المكبر الذي وُضع أمام العين صورة عند اللانهاية، والزاوية المقابلة في المكبر هي θ' . يعرف التكبير الزاوي M بأنه النسبة بين زاوية فضاء الصورة θ وزاوية فضاء الجسم θ :

$$M = \frac{\theta'}{\theta} \quad (5 - 6)$$

ولكي نجد قيمة M ، نفترض أولاً أن الزاويتين θ و θ' صغيرتان محسوبتان بالدرجات القطرية) بما يكفي بحيث أن كلاهما تساوي جيبها وظلها. ومن الشكل 15، فإن:

$$\theta = \frac{y}{25\text{cm}} \quad \theta' = \frac{y'}{f}$$

ومنه، فإن:

$$M = \frac{y/f}{y/25\text{cm}} = \frac{25\text{cm}}{f} \quad (5 - 7)$$

ومن الجدير بالإشارة هنا أنه ليس بالإمكان زيادة التكبير بقدر ما يمكن إنقاص f ، لأن عيوب العدسة المجمعّة تحول دون ذلك. فقدرتها لا تزيد عن X3 إلى X4 (هكذا يرمز لقوة العدسة أو لقدرتها على التكبير: عدد مرات التكبير ثم العلامة X).

أما إذا أتينا بعدسة لامة مصححة، فإن التكبير الزاوي قد يبلغ X20. وعندما تكون الحاجة إلى تكبير أكثر، فإنه يستعاض عن المجهر البسيط هذا بالمجهر المركب.

مثال 7

عدستان مصنوعتان من البلاستيك، أحدهما مجمعة والأخرى مفرقة، الطول البؤري لكل منهما 10.0cm (أ) أي عدسة يمكنك استخدامها كمجهر بسيط؟ (ب) ما مقدار التكبير الزاوي.

(الحل: أ) يستلزم تكوين الصورة التخيلية المبينة في الشكل 15 عدسة مجمعة، فهي وحدها القادرة على تكوين صورة تخيلية مكبرة. (ب) من المعادلة (5 - 7)، فإن التكبير الزاوي هو:

$$M = \frac{25\text{cm}}{10\text{cm}} = 2.5$$

(5 - 6) الميكروسكوب المركب

هو نظام بصري قوته (تكبيره) تفوق كثيراً قوة المجهر البسيط، الغاية منه التمكين من رؤية الأجسام التي لا يمكن رؤيتها بالعين المجردة، وتدعى بالأجسام المجهرية. اخترعه غاليليو في 1610، وهو يتكون من حيث المبدأ من عدستين، إحداهما ذات طول بؤري صغير جداً تدعى بالشيئية (نظراً لوضعها قرب الشيء المراد رؤيته)، والأخرى ذات طول بؤري أكبر إلى حد ما تسمى العينية (بسبب وضعها قرب العين). ورغم أن هاتين العدستين تحتوي كل منهما عدة عناصر لتقليل عيوبهما، إلا أنهما تعاملان كعدستين منفردتين رقيقتين، كما يوضح ذلك الشكل 17.



شكل 17 (أ) (ب)

شكل 17 (أ) عناصر الميكروسكوب. (ب) تكون العدسة الشيئية صورة حقيقية، مقلوبة داخل النقطة البؤرية الأولى f_1 للعدسة العينية. تستخدم العدسة العينية هذه الصورة كجسم وتكون صورة مكبرة تخيلية تبقى مقلوبة. (ج) تستطيع الميكروسكوبات الضوئية عادة، تمييز تفاصيل من رتبة 200 nm، قياساً بالطول الموجي للضوء.

لكي يكون الجسم O مرئياً يوضع أبعد قليلاً من البؤرة الأولى للعدسة الشيئية فتكون له صورة حقيقية I مكبرة. تقع تماماً، في التصميم المقترحة في الشكل 17، داخل البؤرة الأولى للعدسة العينية f_1 . هذه الصورة تؤثر كجسم بالنسبة للعدسة العينية فتكون له صورة تخيلية مكبرة I هي الصورة النهائية للمنظومة البصرية. موقع الصورة النهائية قد يكون في أي مكان بين النقطتين القريبة والبعيدة للعدسة العينية.

تكون الشيئية صورة حقيقية، مقلوبة، مكبرة مرئية خلال العينية. ومن ثم، فإن التكبير الزاوي الإجمالي للميكروسكوب المركب هو حاصل ضرب التكبير الجانبي m_1 للشيئية (13 - 4) والتكبير الزاوي M_2 للعينية (7 - 5):

$$m = m_1 \times M_2 = \frac{-25\text{cm}}{i_1 f_{\text{ob}} f_{\text{eye}}} \quad (5 - 8)$$

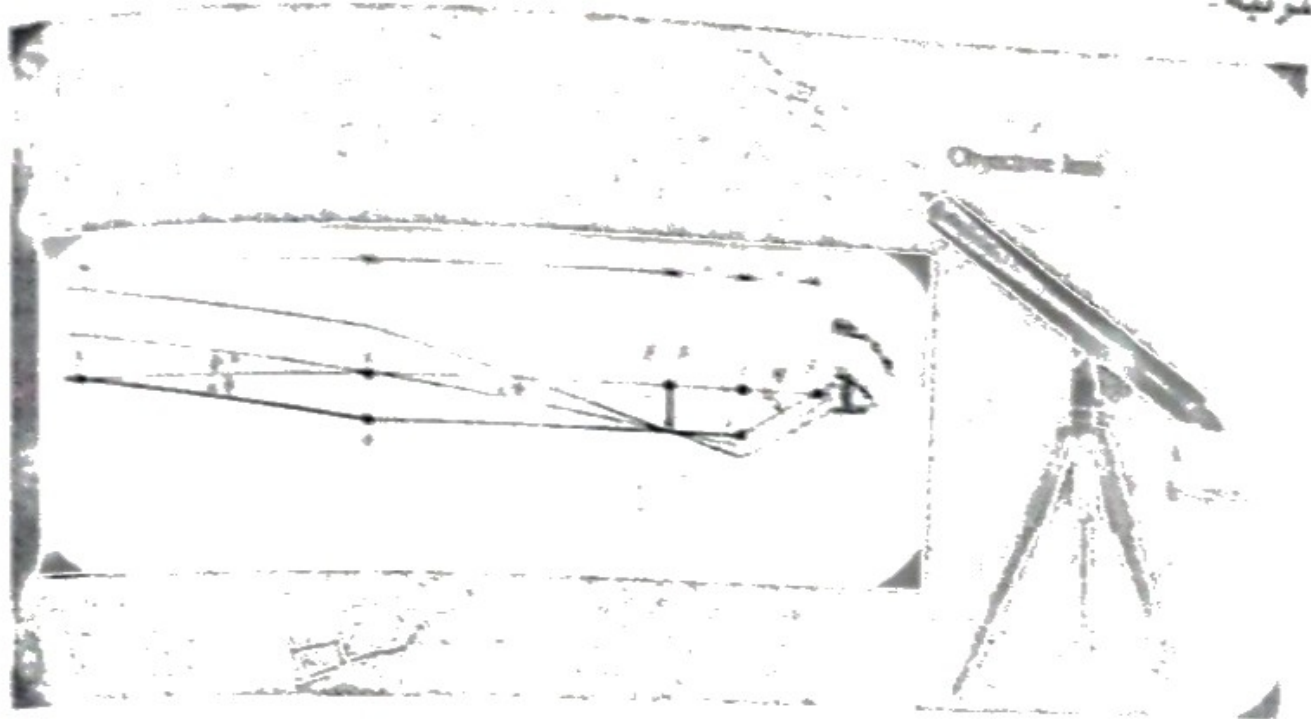
حيث f_{ob} و f_{eye} هما الطولان البؤريان للشيئية والعينية على التوالي، والإشارة السالبة هنا أيضاً تشير إلى أن الصورة النهائية I مقلوبة بالنسبة للجسم O. توصف مصانع الميكروسكوبات عادة قيم التكبيرين m و M_2 نسبة إلى مركبات الميكروسكوب بدلاً من الطولين البؤريين للشيئية والعينية.

(5 - 7) التليسكوب

يمثل النظام البصري للتليسكوب الكاسر (شكل 18) ذلك الذي للميكروسكوب.

ففي كلا الأدوات تشاهد الصورة المتكونة بواسطة الشيئية خلال العينية، باستثناء الوظيفة التي يؤديها كل منهما. فالتليسكوب معد لرؤية الأجسام الكبيرة جداً والبعيدة جداً، كالمجرات والنجوم والكواكب، بينما أعد

الميكروسكوب لأعراض معاكسة تماماً من حيث المسافات وحجوم الأجزاء
المرئية.



شكل 18

شكل 18 المنظومة البصرية لتليسكوب فلكي. تكون العدسة الشيئية صورة حقيقية مقلوبة للجسم البعيد عند نقطتها البؤرية الثانية. التي هي أيضاً نقطة بؤرية أولى للعدسة العينية. تستخدم العدسة العينية ذات الصورة كجسم لتكون صورة مكبرة تخيلية عند اللانهاية وتظل مقلوبة.

يبين شكل 18 تليسكوباً فلكياً. وهو يتكون من شيئية. تكون صورة حقيقية مصغرة I للجسم. وعينية. تكون صورة تخيلية. مكبرة I' للجسم I . وكما في الميكروسكوب. فإن الصورة I' قد تتكون في أي مكان بين النقطتين القريبة والبعيدة للعين. عادة تكون الأجسام المشاهدة بواسطة التليسكوب بعيدة جداً بحيث أن الصورة الأولى I تتكون عند النقطة البؤرية الثانية للشيئية. هذه الصورة هي الجسم بالنسبة للعينية. فإذا كانت الصورة النهائية I' المتكونة بواسطة العينية عند اللانهاية (بالنسبة للعين الطبيعية تكون رؤية الصورة مريحة إذا كانت عند اللانهاية). فإن الصورة الأولى I يجب أن تكون عند النقطة البؤرية الأولى للعينية. ومن ثم. فإن المسافة بين الشيئية والعينية. والتي هي طول التليسكوب. هي مجموع الطولين البؤريين للشيئية والعينية $f_1 + f_2$.

يتحدد التكبير الزاوي للتليسكوب كنسبة زاوية فضاء الصورة θ' (المقابلة عند العين بواسطة الصورة النهائية) إلى زاوية فضاء الجسم θ المقابلة عند العين (غير المسلحة) بواسطة الجسم:

$$M = \frac{\theta'}{\theta} \quad (5 - 9)$$

ومن الشكل 18 نلاحظ أن الشعاع المار خلال البؤرة الأولى للشيئية F_1 وخلال البؤرة الثانية للعينية F_2 هو شعاع مؤكدة والزاوية θ المقابلة للجسم عند الشيئية تقابل نفس الزاوية عند العين غير المسلحة (الجهة اليمنى الشيئية). أيضاً، بما أن عين المشاهد وضعت يمين النقطة البؤرية F_2 ، فإن الزاوية المقابلة عند العين بواسطة الصورة النهائية تساوي تقريباً جداً زاوية فضاء الصورة النهائية θ' . ولأن bd يوازي المحور الضوئي للتليسكوب، فإن المسافتين ab و cd متساويتان ويساويان أيضاً لارتفاع الصورة y . لأن θ و θ' صغيرتان، فقد يقربان إلى ظلّيهما، ومن علاقات المثلثين القائمين f_{1ab} و f_{2cd} نجد:

$$\theta = \frac{y}{f_{ob}}, \quad \theta' = \frac{y'}{f_{eye}}$$

لأن y في المتساوية الأولى هي صورة مقلوبة بالنسبة للشيئية، وفي الثانية جسم بالنسبة للعينية)، إذن تكبير التليسكوب هو:

$$M = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{y' / f_{eye}}{-y / f_{ob}} = -\frac{f_{ob}}{f_{eye}}$$

أي أن التكبير الزاوي للتليسكوب يساوي نسبة الطول البؤري للشيئية إلى الطول البؤري للعينية، والإشارة السالبة تبين أن الصورة النهائية مقلوبة.

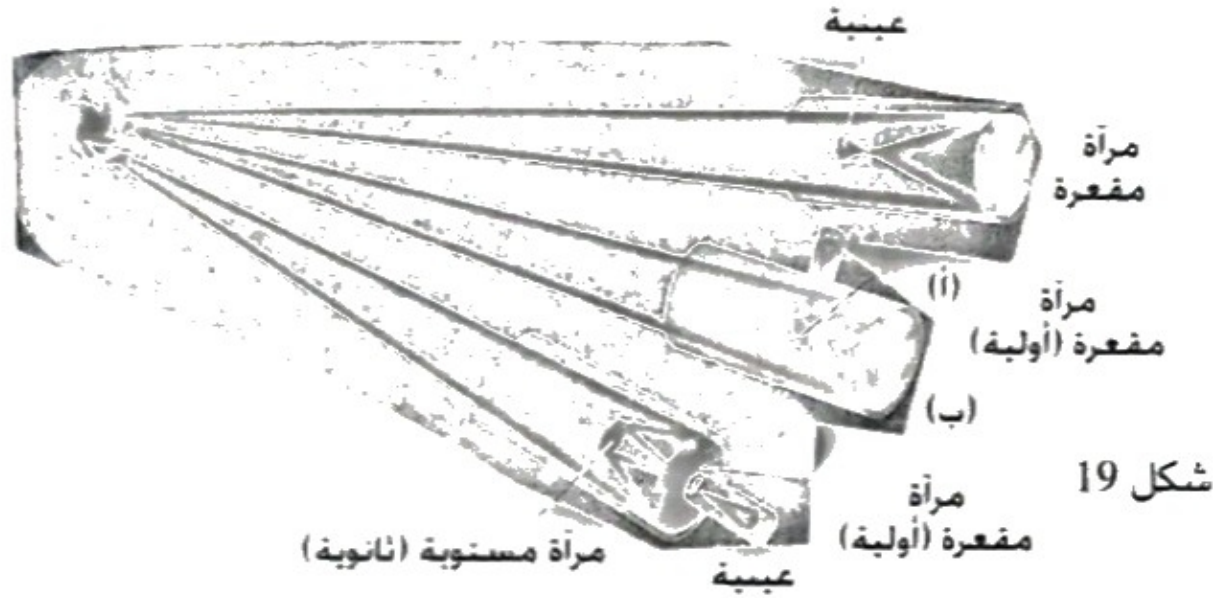
التليسكوب العاكس

إضافة إلى التليسكوب الكاسر، موضوع المناقشة أعلاه، هناك أيضاً تليسكوبات عاكسة (شكل 19)، وفيها تستبدل العدسة الشيئية بمرآة مقعرة، ولهذا التخطيط في التليسكوبات الكبيرة عدة أفضليات، نظرية وعملية. فالمرآة حرة تماماً من الزيوغ اللونية (اعتماد الطول البؤري على الطول الموجي) والزيوغ الكروية (المترافقة مع التقريب المحوري) ومن اليسير تصحيحها قياساً بالعدسات. يكون السطح العاكس أحياناً بيضوياً بدلاً من

الكروي. ليس من الضرورة أن تكون مادة المرآة شفافة، والمرآة يمكن أن تصنع بصلابة أكثر من العدسة، التي يمكن أن تستند عند حافتيها فقط.

إن أكبر مرآة لتلسكوب عاكس في العالم هي في مرصد الكرم في الإتحاد السوفيتي سابقاً، ويبلغ قطرها 6m، وفي السنوات الخمس الأخيرة تم بناء تلسكوب كيسك ويبلغ قطر مرآته 10m.

ولأن الصورة في التلسكوب العاكس تتكون في منطقة محجوزة بواسطة الأشعة الواردة، فإن هذه الصورة يمكن مشاهدتها مباشرة بالعينية باعتراض جزء الحزمة الواردة (شكل 19 أ): وهذا عملياً فقط بالنسبة لتلسكوب كبير جداً. هناك تخطيطات أخرى تستخدم مرآة لعكس الصورة خارج جهة المرآة أو خلال ثقب فيها كما هو موضح على الشكلين 19 ب و 19 ج. وهذا يستخدم أيضاً في بعض عدسات التصوير المقربة في الكاميرات.

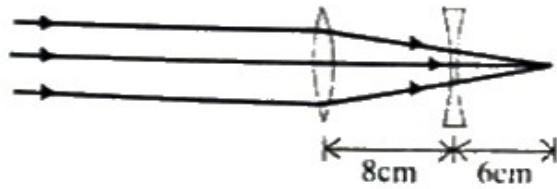
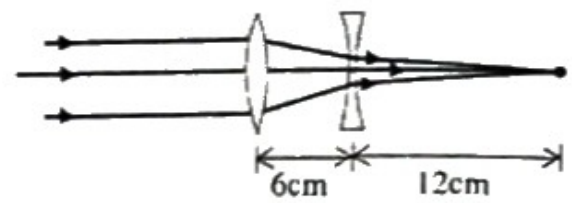
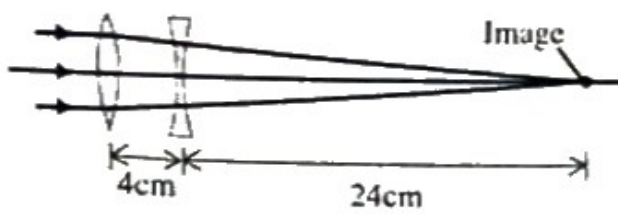


شكل 19 أنظمة بصرية لتليسكوبات عاكسة. (أ) المحراق الأصلي. (ب) المحراق النيوتوني؛ (ج) محراق كاسي.

(5 - 8) عدسات أخرى

سنذكر هنا باختصار ثلاثة أنواع خاصة من العدسات: الأولى عدسة الزوم، التي هي ليست عدسة واحدة مفردة، بل تجمع معقد من عدة عناصر

عدسية تعطي طولاً بؤرياً متغيراً بصورة مستمرة على مدى أكبر ما يمكن من 10 إلى 1. والشكل 20 يبين نظاماً بسيطاً بطول بؤري متغير وعدسة زوم نموذجية لكamera 35 - mm. تستخدم عدسة الزوم مع الكاميرات، المساليط (البروجكترات)، الميكروسكوبات، والتلسكوبات لتعطي مدى من قياسات الصورة للجسم المعطى. إن المشكلة المعقدة في التصميم البصري لعدسة الزوم هي في إبقاء الصورة في البؤرة والمحافظة على الثابت البؤري العددي بينما يتغير الطول البؤري. تقليدياً، هناك مجموعتان من العناصر تتحرك داخل العدسة، وغشاء يفتح ويغلق كطول بؤري مُعدّل.



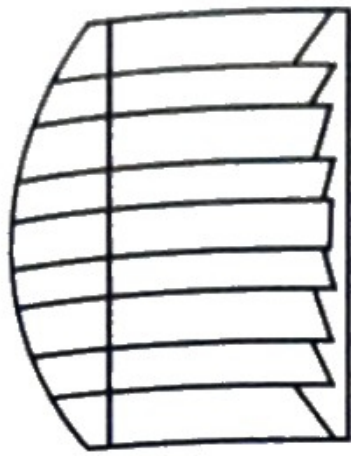
شكل 20 (i)

(i)

(ب)

شكل 20 (i) مبدأ عمل عدسة الزوم (أو العدسة المقربة). باستخدام عنصرين بفاصل فضائي متغير. يمكن أن يتغير الطول البؤري الفعال من 4 إلى 8 cm. (ب) عدسة زوم نموذجية لكamera 35 mm، متضمنة لـ 12 عنصراً مرتبة في أربع مجموعات.

ثانياً، عدسة فرنل: جميع العدسات التي ناقشناها لحد الآن تعمل إلى حد ما بسبب انحناء الأشعة الضوئية عند سطوحها. فلا إنكسار يحدث في داخل العدسة. ولو أمكن التخلص من المادة بين سطحي العدسة. نكون حينذاك قد قللنا من وزن العدسة الكبيرة. هذا ما تم عمله في عدسة فرنل (شكل 21). كل درجة دائرية فيها تشكل بنية تطابق قرصاً لعدسة عادية.



(i)

(ب)

شكل 21

شكل 21 مقطع عرضي لـ (أ) عدسة مجمعة تقليدية: (ب) عدسة فرنل المجمعة.

وعادة لا تكون عدسة فرنل من نوعية بصرية عالية، ولكنها خفيفة جداً وليست غالية الثمن. وهي تستخدم في إشارات السير الضوئية، المسالط العلوية، مجمعات الخلايا الضوئية - الشمسية، مكبرات الجيب المسطحة، وأماكن أخرى عديدة.

وأخيراً، العدسة المدرجة الدليل، وهي قرص شفاف بوجهين مسطحين ومعامل انكسار غير منتظم يكبر عند المركز ويقل جهة الحافات (بالنسبة للعدسة المجمعة). مثل هذه العدسة لها فعل تجميعي لأن موجات هاجينز لا تنتشر بسرعة عند المركز كما هي عند الحافات.

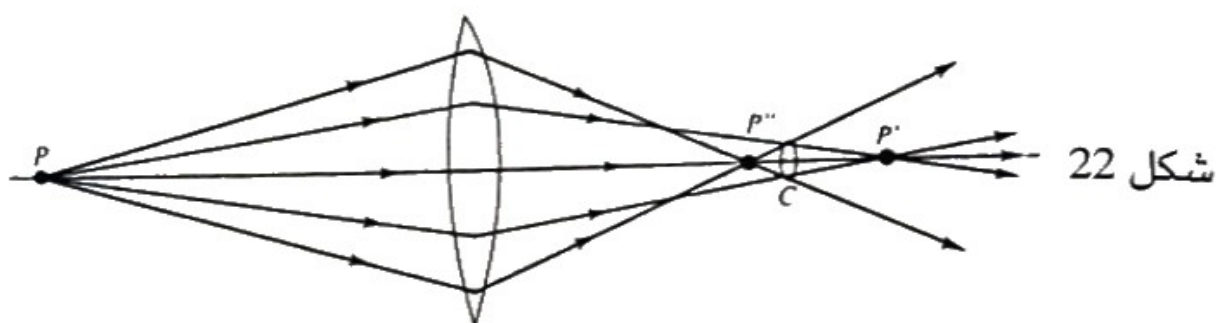
(5 - 9) الزوجان العدسي

الزوجان هو أي إخفاق أو عجز للمرآة أو العدسة لأن تسلك بدقة طبقاً لصيغ وقوانين الانكسار والانعكاس التي تم اشتقاقها في فقرات سابقة. والزوجانات يمكن تصنيفها إلى زوجانات لونية، تشتمل على سلوك يوصف بالتبعية للطول الموجي، أو زوجانات أحادية اللون، تظهر حتى مع الضوء الأحادي اللون (ذو الطول الموجي الواحد). والزوجانات العدسية ليست ناجمة عن عيوب في بنية العدسة، كاللا إنتظام أو اللاقياسية في سطحها، بل هي نتائج حتمية لقوانين الانكسار عند السطوح الكروية.

ترتبط الزوجانات الأحادية اللون جميعها بالتقرير المحوري. فكل اشتقاقاً السابقة لمعادلات مسافتي الجسم والصورة، الطول البؤري، والتكبير عملناها على أساس هذا التقريب، مفترضين دائماً أن حزمة الضوء الساقطة على

الأداة البصرية (عدسة أو مرآة) ليست عريضة وأن جميع الأشعة المأخوذة من أية نقطة على الجسم قريبة من المحور البصري للنظام وتعمل زوايا صغيرة معه. هذا الشرط لا يخضع بأية حال للمقاييس الدقيقة.

بالنسبة لأية عدسة بثقب محدود القياس، يمتلك مخروط الأشعة التي تكون صورة أية نقطة قياساً محدوداً، وعلى العموم، ليس ثمة أشعة محورية تتبع من نقطة جسم معينة تتقاطع جميعها عند نفس النقطة تماماً بعد إنكسارها بواسطة العدسة. لهذا السبب، فإن الصورة المتكونة بواسطة هذه الأشعة ليست صورة حادة تماماً. إن الزوجان الكروي هو عجز الأشعة المنبثقة من جسم نقطي على المحور البصري عن أن تتجمع إلى صورة نقطية. وبدلاً من ذلك، فإنها تتجمع داخل دائرة نصف القطر الأدنى، المسماة بدائرة أقل فوضى، ومن ثم تتفرق ثانية، كما هو موضح على الشكل 22.



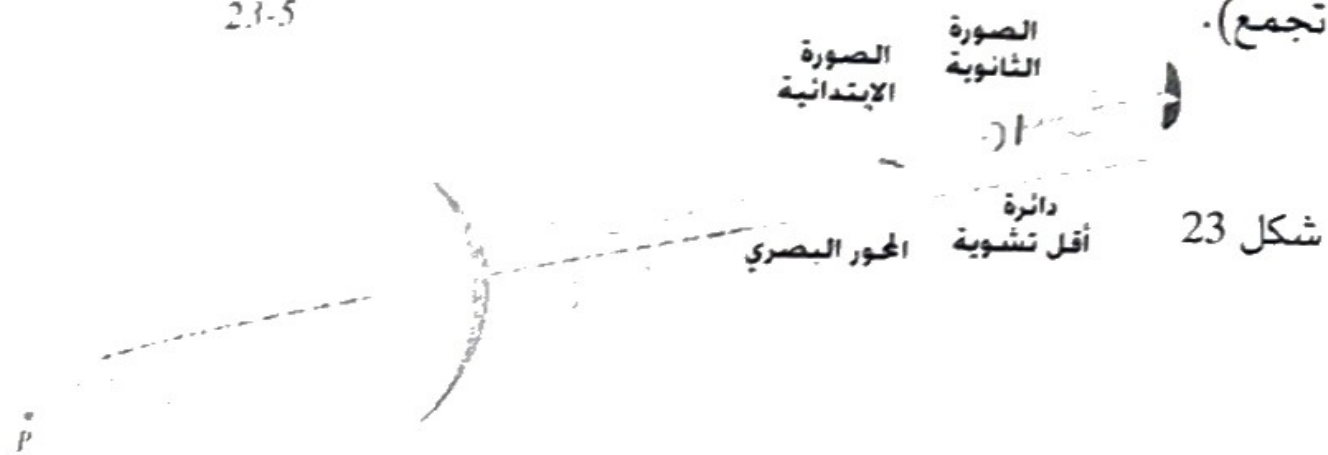
شكل 22 الزيغات الكروي، دائرة أقل تشويه مبينة بواسطة الحرف C.

إن الأثر المتطابق للنقاط خارج المحور البصري يُنتج صوراً بهيئات مذنبية الشكل بدلاً من الدوائر، هذا الأثر يدعى دؤابة المذنب. يلاحظ هنا أن نقصان قياس الثقب يقطع أشعة الزاوية - الأكبر، وبالتالي نقصان الزوجان الكروي.

الزوجان الكروي موجود أيضاً في المرايا الكروية. وفي الأدوات البصرية الدقيقة التي تستخدم المرايا عنصراً أساسياً في عملها، كالتلسكوبات الفلكية، ثم التخلص من هذا العيب، وذلك بأن صُنعت المرايا بهيئة أجسام مكافئة دوائر بدلاً من الكروية؛ وهذه الهيئة تزيل تماماً الزيغ الكروي بالنسبة للنقاط على المحور.

إن هياكل الأجسام المكافئة هي أكثر صعوبة في تحصيلها الدقيق قياساً بالهياكل الكروية.
 الاستغماز أو اللانطباق أيضاً زوجان، فهو تصوير نقطة خارج المحور كخطين متعامدين في مستويين مختلفين، في هذا الزوجان تتجمع الأشعة المنبعثة من جسم نقطي، عند مسافة معينة من العدسة، إلى خط يدعى الصورة الأولية، عمودي على المستوي المحدد بواسطة المحور البصري والنقطة الجسمية، عند مسافة مختلفة إلى حد ما من العدسة تتجمع الأشعة أيضاً إلى خط ثانٍ يدعى الصورة الثانوية، توازي ذلك المستوي، وهذا مبين على الشكل 23 وبين هذين الموضعين تظهر دائرة أقل فوضى (أكبر تجمع).

23-5



شكل 23 زوجان العدسة بالنسبة لنقطة تحت المحور البصري. تكون العدسة صورتين للنقطة في مستويين عموديين الواحد على الآخر.

يعتمد تموضع دائرة أقل فوضى على المسافة المستعرضة للنقطة الجسمية من المحور بنفس القدر الذي يعتمد فيه على المسافة الطولية من العدسة، وكنتيجة لذلك، فإن النقاط الجسمية الواقعة في المستوي هي على العموم مصورة ليس في المستوي ولكن في بعض سطح منحني؛ وهذه الظاهرة تدعى إنحناء المجال.

في النهاية، فإن صورة الخط المستقيم الذي لا يمر خلال المحور البصري قد تكون منحنية، وكنتيجة لذلك، فإن صورة المربع بمحور خلال مركزه قد تشبه برميلًا (الجوانب محنية نحو الخارج) أو وسادة دبابيس (الجوانب محنية نحو الداخل). هذه الظاهرة تدعى تشويهها، وهي لا ترتبط بعوز أو نقص حدة

الصورة ولكنها تنتج عن التغير في التكبير الجانبي مع المسافة من المحور. الزوجانات اللونية هي نتاج التفرق، وتغير معامل الإنكسار بسبب التفرق (أو التشتت) اختلافاً للطول البؤري للعدسة بالنسبة للأطوال الموجية المختلفة. فعندما يعرض جسم ما لضوء يحتوي خليطاً من الأطوال الموجية، فإن الأطوال الموجية المختلفة تتصور عند نقاط مختلفة. تكبير العدسة يتغير أيضاً مع الطول الموجي، وهذا الأثر مسؤول عن صور أهداب قوس - قزح التي تشاهد بواسطة المناظير أو التلسكوبات. العواكس وحدها الحرة من الزوجانات اللونية، وهذا أحد الأسباب لاستخداماتها المفيدة في التلسكوبات الفلكية الكبيرة.

بالنسبة للعدسة المفردة، فإنه من المستحيل التخلص من جميع هذه الزوجانات، ولكن في العدسة المركبة مع عديد من العناصر البصرية، فإن زوجانات عنصر واحد قد تلغي جزئياً تلك التي لعنصر آخر. إن تصميم مثل هذه العدسات هو مسألة غاية في التعقيد، ساهم الكومبيوتر كثيراً في تذليل الكثير من جوانبها في السنوات الحديثة. وما زال مستحيلاً التخلص من جميع الزوجانات، ولكن من الممكن تحديد أي منها أكثر ازعاجاً بالنسبة لتطبيق معين ومن ثم تصميم الأداة على هذا الأساس.

مثال 8

الزيغ اللوني

عدسة زجاجية مستوية - محدبة جانبها المسطح نحو الجسم، والجانب الآخر له نصف قطر إنحناء مقداره 30.0cm. ومعامل إنكسار زجاج العدسة للضوء البنفسجي (الذي طوله الموجي 400 nm) هو 1.535، وللضوء الأحمر (الذي طوله الموجي 700 nm) 1.517. أما اللون الأرجواني، فهو خليط من الأحمر والبنفسجي، وضع جسم أرجواني مسافة 80.0cm من هذه العدسة. أين تتكون الصورتان الحمراء والبنفسجية؟

الحل: نطبق معادلة العدسة الرقيقة بصيغتها (15 - 4)

$$\frac{1}{o} + \frac{1}{i} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

في الحالة المدروسة، مستخدمين قاعدة الإشارة العادية) لدينا $R_1 = \infty$

و $R_2 = -30.0 \text{ cm}$. بالنسبة للضوء البنفسجي ($n = 1.537$) .

$$\frac{1}{80.0 \text{ cm}} + \frac{1}{i} = (1.537) \left(\frac{1}{\infty} - \frac{1}{-30.0 \text{ cm}} \right) \quad i = 18.5 \text{ cm}$$

وبنفس الطريقة إن i بالنسبة للضوء الأحمر ($n = 1.517$) تساوي $i = 211 \text{ cm}$. هذا يعني أن الضوء البنفسجي ينكسر أكثر من الأحمر، وصورته تتكون أقرب إلى العدسة، ومنه نلاحظ أن تغيراً صغيراً إلى حد ما في معامل الانكسار يسبب إزاحة ملموسة للصورة.

الخلاصة

- تتكون العدسة المركبة من عدستين على الأقل، تتصرف كل منها بصورة مستقلة.
- تتكون الكامرة صورة حقيقية، مقلوبة، مصغرة عادة (على الفلم) للجسم تصبح صورة فوتوغرافية. يُضبط مقدار الضوء الصادم للفلم بواسطة مصراع السرعة والثقب.
- يعمل المسلاط بطريقة تعاكس عمل الكامرة، فعدسته تكون صوراً حقيقية، مقلوبة، غير مكبرة على الشاشة للشريحة أو فلم الصور - المتحركة.
- في العين تتكون صورة حقيقية على الشبكية وتنتقل إلى العصب البصري. يتم ضبط مسافات الجسم بواسطة العضلة الهدبية، التي تعصر العدسة البلورية، جاعلة إياها منتفخة ومنقصة لطولها البؤري، العين المصابة بقصر البصر طويلة جداً بالنسبة لعدستها، بينما العين الطويلة البصر قصيرة جداً، قدرة العدسة المصححة بوحدات الريوبتير هي مقلوب الطول البؤري بالمتر.
- يخلق المكبر البسيط صورة تخيلية قياسها الزاوي أكبر من القياس الزاوي للجسم نفسه عند 25 cm ، مسافة أفضل رؤية مريحة، إن التكبير الزاوي للمكبر البسيط هو النسبة بين القياس الزاوي للصورة التخيلية إلى ذلك الذي للجسم عند هذه المسافة.
- في المكروسكوب المركب تكون الشيئية صورة أولى حقيقية في الجزء الاسطواناني للاداة، وتكون العينية صورة نهائية تخيلية، تقع غالباً في اللانهاية، للصورة الأولى.

- يعمل التلسكوب على نفس المبدأ، ولكن الجسم يكون بعيداً جداً، في التلسكوب العاكس استبدلت الشيئية بمرآة مقعرة، تزيل الزيغ اللوني.
- زوجانات العدسة تحدث لعجز العدسة عن تكوين صورة حادة تماماً للجسم، وتحدث الزوجانات الأحادية اللون بسبب تقييدات التقريب المحوراني، أما الزوجانات اللونية فتنتج عن اعتماد معامل الانكسار على الطول الموجي.

مسائل

(5 - 1) العدسة الرقيقة المركبة

- 1 - عدسة مجمعة طولها البؤري 20.0cm + متموضعة يسار عدسة مفرقة طولها البؤري 15.0cm - . فإذا تموضع جسم حقيقي مسافة 40.0cm يسار العدسة الأولى، حدد وصف الصورة المتكونة.
- 2 - (i) برهن أن العدسة الرقيقة المجمعة ذات الطول البؤري f المتبوعة بعدسة رقيقة مفرقة طولها البؤري $-f$ ستجلبان الضوء المتوازي إلى بؤرة تقع خلف العدسة الثانية تحت شرط أن المسافة الفاصلة للعدستين تفي بالشرط $0 < L < f$.

(ب) هل تتغير هذه الخاصية إذا تبادلت العدستان الموضع؟

(ج) ماذا يحدث عندما $L = 0$ ؟

- 3 - وضع جسم على مسافة 1.12m أما عدسة مجمعة طولها البؤري 58.0cm ، وهي تقع على مسافة 1.97m أمام مرآة مستوية. (أ) أين تقع الصورة النهائية، مقاسة من العدسة، تلك التي يجب أن تشاهد بواسطة العين الناضرة نحو المرآة خلال العدسة؟ وما صفاتها وتكبيرها؟
- 4 - عدستان رقيقتان طوليهما البؤريان f_1 و f_2 وضعتا متماستان. برهن أنهما تكافئان عدسة رقيقة مفردة طولها البؤري يُعطى بالعلاقة:

$$f = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2}$$

(5 - 2) الكامرة

- 5 - عدسة كامرة طولها البؤري 135 mm . كم يجب أن يبعد الجسم المراد تصويره عن العدسة إذا كان الفلم يبعد عنها بمقدار 15.2 ؟

6 - اختيار عدسة الكامرة: قياس صورة على فلم كامرة عادية mm - 35 هو 24 x 36 mm. الأطوال البؤرية للعدسات المنتفع بها لكامرة mm - 35 تقليدياً تشمل على 28، 35، 50 (عدسة قياسية)، 85، 100، 135، 200، و 300 mm. وهناك أخرى. أي من هذه العدسات يجب أن يستخدم لتصوير الأجسام التالية، بافتراض أن الصورة تملأ معظم مساحة اللوحة؟ (أ) جدارية عرضها 100 m وطولها 150m وتبعد بمسافة 150m. (ب) عُناب المسافة بين أقصى جناحيه 2.0m وهو يبعد 12.0m.

7 - الطول البؤري لعدسة كامرة f/2.8 هو 90.0mm. ما هو قطر ثقب العدسة؟

(5 - 3) المسلاط (البروجكتر)

8 - يلزم وضع شريحة على مسافة 10.0cm أمام عدسة مسلاط طولها البؤري 98.0mm لتركيز الصورة على شاشة تبعد 5.00m عن العدسة. الآن نفرض أن العدسة أعلاه استبدلت بأخرى طولها البؤري 100.0mm (أ) إذا بقيت الشاشة على نفس المسافة 5.00m عن العدسة، فعلى أية مسافة يجب وضع الشريحة أمام العدسة الجديدة؟ (ب) هل يمكن إبقاء المسافة بين الشريحة والعدسة بمقدار 10.0cm وتحريك الشاشة حتى تبلغ أحسن صورة؟ وإذا كان ذلك ممكناً، فكيف تكون الشاشة قد تحركت وبأي اتجاه؟

9 - شريحة ملونة mm - 35 أبعاد الصورة عليها 24 x 36mm أُسقطت صورة الشريحة على شاشة تبعد 6.00m عن عدسة المسلاط. فإذا كان الطول البؤري للعدسة هو 120 mm (أ) كم تبعد الشريحة عن العدسة؟ ما هي أبعاد الصورة على الشاشة؟

(5 - 4) العين

10 - (أ) أين تقع النقطة القريبة لعين قدرة العدسة المعالجة لها هي +3.00 ديوبتير؟ (ب) أين تقع النقطة البعيدة لعين قدرة العدسة المعالجة لها هي - 6.00 ديوبتير؟

11 - إنحناء القرنية: في النموذج المبسط لعين الإنسان، تمتلك كل من

الرطوبتين المائية والزجاجية وكذلك العدسة البلورية معامل إنكسار قدره 1.40 وكل الإنكسار يحصل عند القرنية، التي تبعد قممتها عن الشبكية بمقدار 2.60cm. كم يجب أن يكون نصف قطر إنحناء القرنية لكي تركز صورة جسم في المآل النهائية على الشبكية؟

12 - بالنسبة للنموذج الموصوف في المسألة (11)، ماذا يجب أن يكون نصف قطر إنحناء القرنية لكي تركز على الشبكية صورة جسم يبعد 25.0cm قمة القرنية؟

13 - عَيِّن قدرة العدسات المعالجة اللازمة للحالات أ) عَيِّن مصابة بيبعد البصر نقطتها القريبة عند 80.0cm، ب) عين مصابة بقصر البصر نقطتها البعيدة عند 90.0cm.

14 - العين المصابة بقصر البصر: شخص مصاب بقصر بصر حاد لا يستطيع التركيز على أي شيء أبعد من 30.0cm عن العين. اعتبر النموذج المبسط الموصوف في المسألة (11). فإذا كان نصف قطر إنحناء القرنية هو 0.75cm عندما تكون العين مُعدّلة (مُركزة) على جسم يبعد 30.0cm عن قمة القرنية ومعاملات الإنكسار كما وصفت في المسألة (11)، فما هي المسافة من قمة القرنية إلى الشبكية؟ ماذا يخبرك ذلك عن شكل هذه العين؟

(5 - 5) المجهر البسيط

15 - أريد فحص حشرة بعدسة مُكبّرة طولها البؤري 30.0cm. فإذا كان قياس صورة الحشرة 11 مرة بقدر قياس الحشرة، فما هو بُعد الحشرة عن العدسة؟ أين تكون صورتها بالنسبة للعدسة؟

16 - الطول البؤري لمكبر بسيط هو 12.0cm. بفرض أن المكبر هو عدسة رقيقة موضوعة قريبة جداً من العين. أ) فأين يجب وضع جسم أمام العدسة إذا كانت صورته قد تكونت عند النقطة القريبة للرؤية أمام العين؟ ب) إذا كان ارتفاع الجسم 1.00mm، فما هو ارتفاع صورته المتكونة بواسطة المكبر؟

17 - عدسة رقيقة بطول بؤري 8.0cm أُستخدمت كمكبر بسيط.

أ) ما هو أكبر تكبير زاوي يمكن الحصول عليه بهذه العدسة؟

ب) عندما يُفحص جسم خلال العدسة، فكم يجب تقريبه منها، بفرض أن

الصورة تكونت في النقطة القريبة 25.0cm من العين؟

(5 - 6) المكرو سكوب المركب

18 - الطول البؤري لعينية مكرو سكوب معين هو 2.50cm ولشيثيته 16.0mm، والمسافة بينهما هي 21.4cm. والصورة النهائية المتكونة بواسطة العينية تقع في اللانهاية. عامل جميع العدسات على أنها عدسات رقيقة. (أ) ما هي المسافة بين الشيثية والجسم الذي يمكن أن يكون مرئياً؟ (ب) ما مقدار التكبير الخطي الناتج بواسطة الشيثية؟ (ج) ما هو التكبير الكلي للمكرو سكوب؟

19 - مكرو سكوب معين مجهز بشيثيات أطوالها البؤرية 16mm، 4mm و 1.9mm وبعينيات تكبيراتها 5x و 10x.

كل شيثية تكون صورة خلف نقطتها البؤرية الثانية بمقدار 140mm. عَيِّن (أ) أكبر تكبير كلي يمكن الحصول عليه. (ب) أقل تكبير كلي يمكن الوصول إليه. 20 - الطول البؤري لشيثية مكرو سكوب 8.0mm ولعينيته 4.0cm. وضع جسم أمام بؤرة الشيثية بمسافة 0.5mm. أوجد التكبير الكلي للمكرو سكوب.

(5 - 7) التلسكوب

21 - تليسكوب مصنوع من عدستين، الأولى طولها البؤري 90.0cm والثانية 20.0cm، حيث تستخدم الأولى كعدسة شيثية. الجسم الذي أصبح مرئياً والصورة النهائية كلاهما يقعان في اللانهاية.

(أ) أوجد التكبير الزاوي للتلسكوب، (ب) أوجد ارتفاع الصورة المتكونة بواسطة الشيثية لمبنى شاهق بمقدار 80.0m ويبعد 2.00km، (ج) ما هو القياس الزاوي للصورة النهائية كما شوهدت بواسطة عين قريبة جداً من عينية التلسكوب.

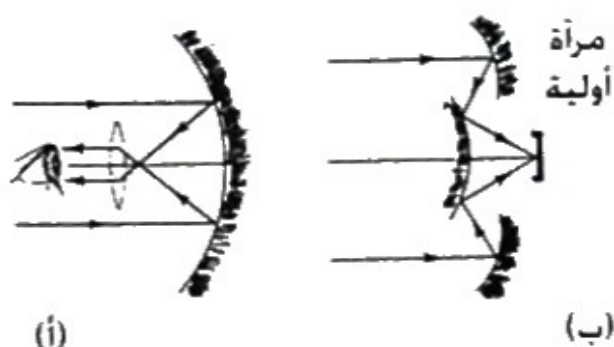
22 - تليسكوب كاسر الطول البؤري لعدسته العينية هو 8.0cm والمسافة بين عدسته الشيثية والعينية هي 2.20m، والصورة النهائية عند اللانهاية. ما هو التكبير الزاوي للتليسكوب؟

23 - يقابل القمر المشاهد من الأرض زاوية قدرها 1/2 درجة تقريباً. ما هو

قطر صورة القمر الناتجة بواسطة شبيئية تليسكوب فلكي، الطول البؤري لعاكسه 18.0m

24 - تليسكوب عاكس (شكل 24 (أ)) مصنوع باستخدام مرآة كروية نصف قطر انحنائها 0.80m وعدسة عينية طولها البؤري 1.00cm. تكونت الصورة النهائية في اللانهاية. (أ) ما هو التكبير الزاوي للتليسكوب؟ (ب) ما هي المسافة بين العدسة العينية وقمة المرآة إذا كان الجسم المأخوذ عند اللانهاية؟

24-5



شكل 24

شكل 24 مسألة 25

25 - تليسكوب هابل الفضائي يستخدم نظاماً ضوئياً كالمبين في الشكل 23 (ب). ركزت صورة جسم بعيد على كاشف خلال ثقب في المرآة الكبيرة (الابتدائية)، التي طولها البؤري 2.4m، والمسافة بين قمتي المرأتين هي 1.5m، ومن المرآة الابتدائية إلى الكاشف 0.25m. ماذا يجب أن تكون المرآة الأصغر (الثانوية) مقعرة أو محدبة؟ وما نصف قطر انحنائها؟

(5 - 8) الزوجانات العدسية

26 - عدسة مفرقة مقعرة الوجهين (شكل 17 (ب)) شحذت من الزجاج الموصوف في المثال 8. نصف قطر العدسة هما 15.0cm مقدار كل منهما. وضع الجسم الأرجواني المذكور في المثال 8 على مسافة 40.0cm يسار العدسة. أين تتكون صورتان الحمراء والبنفسجية؟ وما المسافة بينهما؟

الفصل السادس

البصريات الهندسية التطبيقية

المضوائية (الفوتومتري) والمشعاعية (الراديومتري)

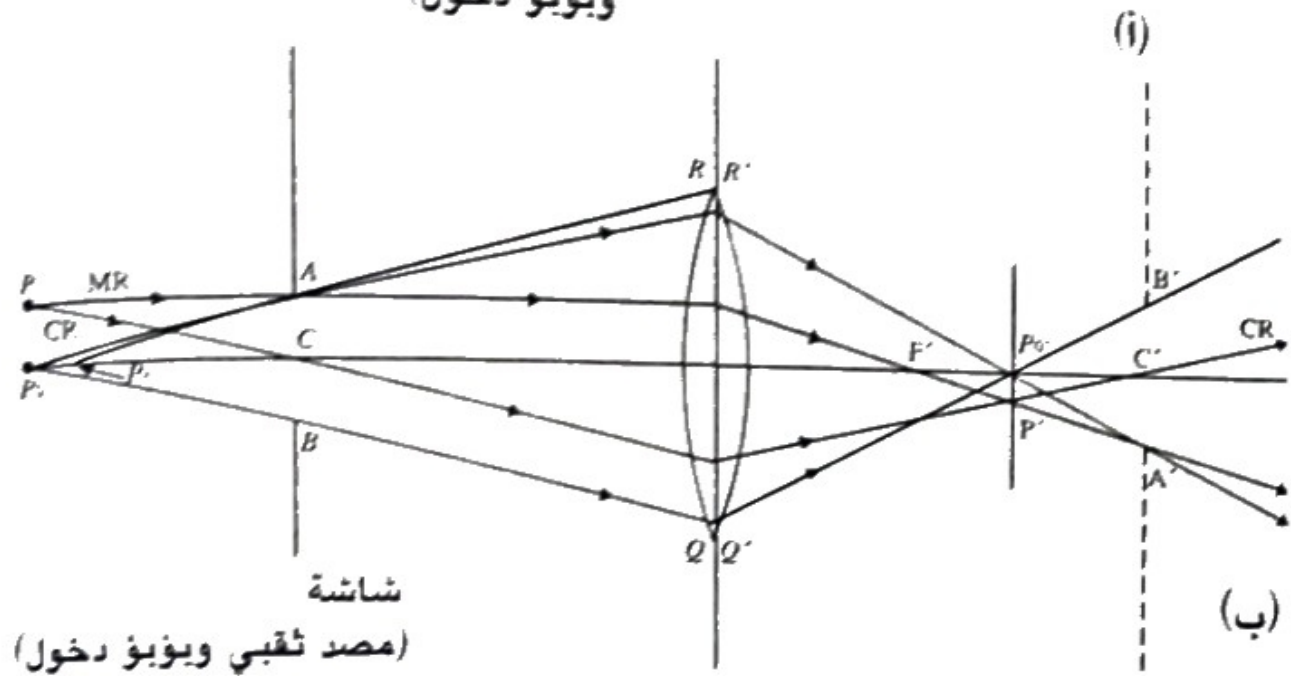
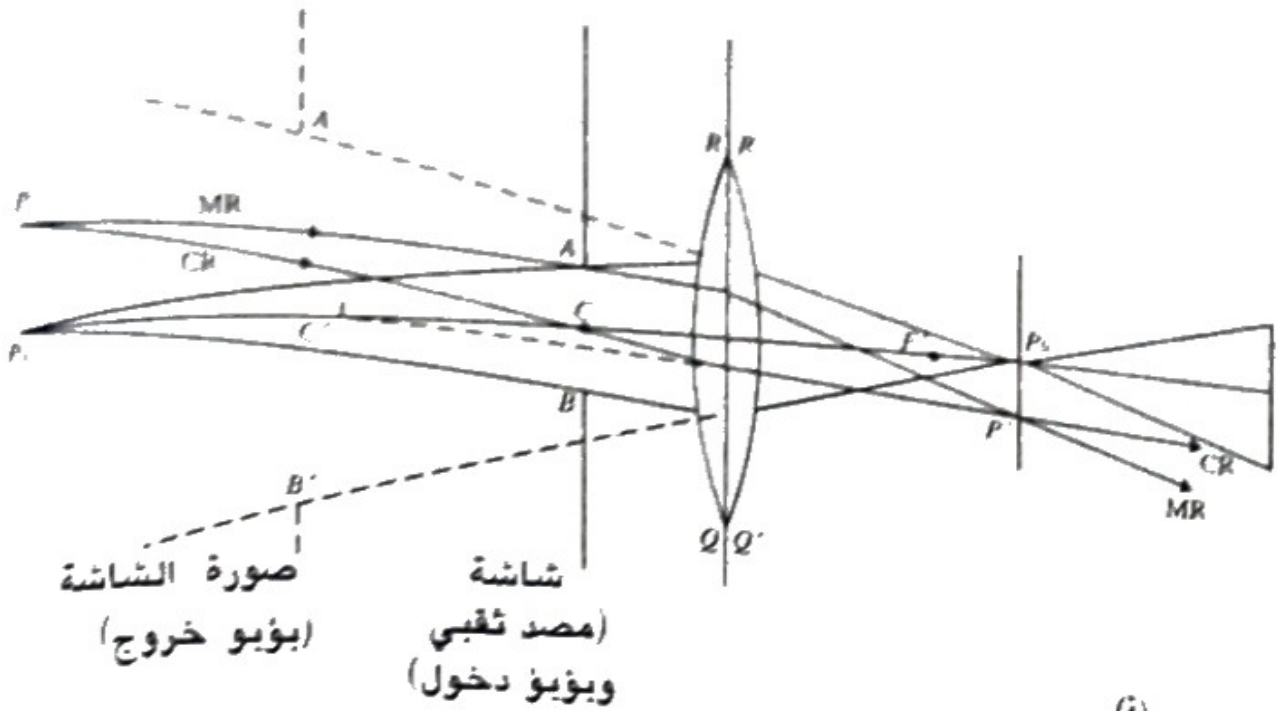
ليس كافياً أن يكون بمقدورنا التنبؤ بموقع الصورة وقياسها بالنسبة لنظام ضوئي معين، فهناك خواص مهمة أخرى للصورة تأتي في مقدمتها سطوع الصورة وقياس مجال الرؤية. هذه الموضوعات تتطلب دراسة عجز أو قصور الإمتداد الفضائي والزوايا للحزمة الضوئية بواسطة الحواجز والثقوب. ولإنجاز مثل هذه الدراسة سنعرض بعض التحديدات (التعريفات) والمفاهيم الجديدة. حتى لو أن النظام البصري تحت الاعتبار قد صُمم بحيث يستثني الأشعة الضوئية غير المحورانية (لاحظ الفقرة (5 - 9))

(6 - 1) حاجز ذو ثقب (مصد ثقبى) وبؤبؤين

نعتبر جسماً متموضعاً على محور نظام ضوئي، ونتخيله باعثاً لمخروط من الضوء لزاوية قمة (رأسية) متغيرة. وإذا كانت هذه الزاوية صغيرة، فإن جميع الأشعة الضوئية ستمر خلال النظام. ولكن عندما تزداد الزاوية، فإن بعض الأشعة ستوقف بواسطة حافة العدسة أو ثقب ميكانيكي في مكان ما في النظام. ومن هنا يمكن تحديد الحاجز ذو الثقب، بأنه حاجز أو حافة عدسية، تحدد فيزيائياً الزاوية المجسمة للأشعة المارة خلال النظام من نقطة على جسم ما على المحور.

(1) العدسة الرقيقة المفردة

أ - تمثل العدسة الرقيقة المفردة حاجزاً ذا ثقب على جهة السقوط، والشكل 1 (أ) يبين مثلاً بسيطاً لذلك (مثال 1). فهنا تُحدد الفتحة في الشاشة الزاوية المجسمة للأشعة من الجسم عند النقطة P_o التي (الأشعة) تمر خلال النظام. إذن هي حاجز ذو ثقب.



شكل 1

شكل 1 تخطيط شعاعي لحالة المصد الثقبي على الجانب السقوطي للعدسة (جهة سقوط الضوء - وهي تقليدياً الجهة اليسرى): (i) بؤبؤ خرج تخيلي: (ب) بؤبؤ خرج حقيقي.

تقطع الأشعة عند A و B، اللتان تظهر صورتيهما A' و B' بالنسبة لمشاهد ينظر خلال المرآة من الخلف، من موقع بالقرب من P'. كما لو أنهما A' و B' هما اللتان تقطعان الأشعة.

إذا حركنا الشاشة إلى يسار F ، ستكون لدينا الحالة المبينة على الشكل 1 (ب)، وتظل الشاشة حاجزاً ذا ثقب، ولكن صورتَي A و B (الصورتان A' و B') يصبحان يمين الصورة P_o . أما بالنسبة لمشاهد تحرك بعيداً إلى يمين، فإن A' و B' تظلان كما لو أنهما هما اللتان تقطعان الأشعة.

إن صورة الحاجز ذو الثقب، المتكونة بواسطة الضوء بعد مروره خلال العدسة، تدعى بـ «بؤبؤ الخروج»، وهي تخيلية عندما تقع الشاشة داخل بؤرة العدسة F (شكل 1 (أ))، وحقيقية عندما تقع خارجها (شكل 1 (ب)). بالنسبة للمشاهد الفاحص للضوء بعد تصادمه مع العدسة، فإن بؤبؤ الخروج يكون مفتوحاً وهذا يحدد الزاوية المجسمة بالنسبة للأشعة التي تتجمع إلى نقطة صورة على المحور.

وبالمناظرة يمكننا تحديد بؤبؤ الدخول، بأنه الفتحة التي يستطيع المشاهد أن يعرفها كتحديد للزاوية المجسمة بالنسبة للأشعة المتفرقة من نقطة الجسم على المحور في الشكل 1 (أ) يؤثر الحاجز ذو الثقب كبؤبؤ دخول، وهو فيزيائياً يتموضع بين الجسم والعدسة. وفي موقعه هذا يحدد الحاجز ذو الثقب الزاوية المجسمة للأشعة الواردة من الجسم.

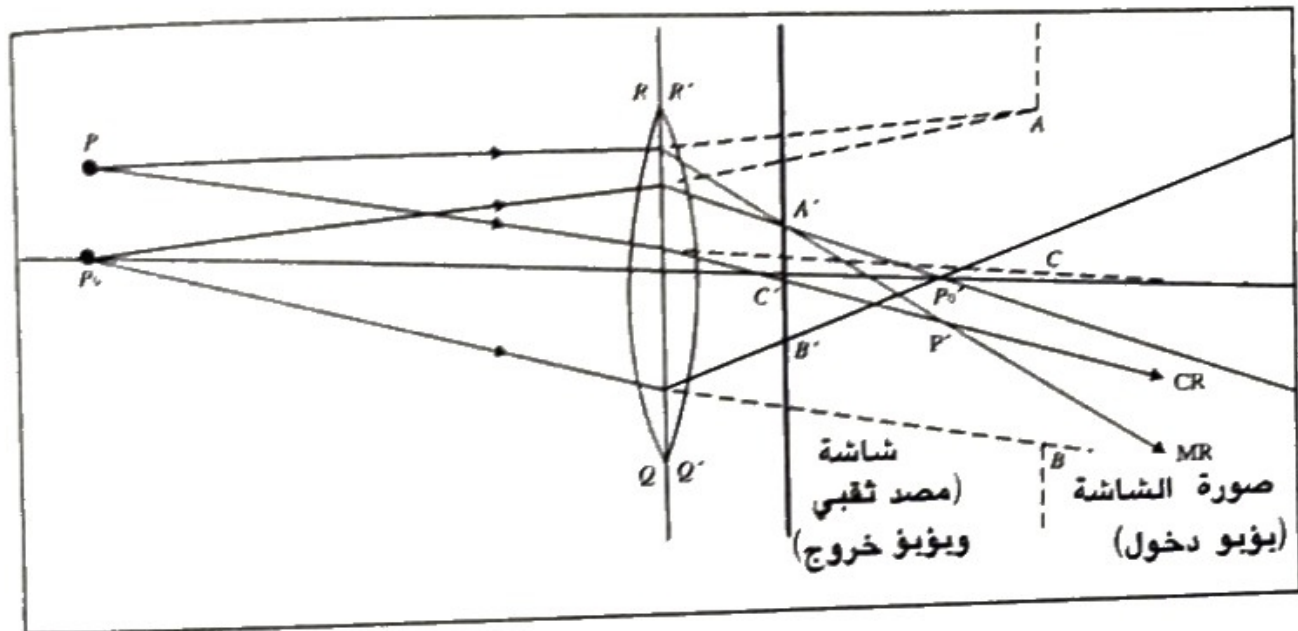
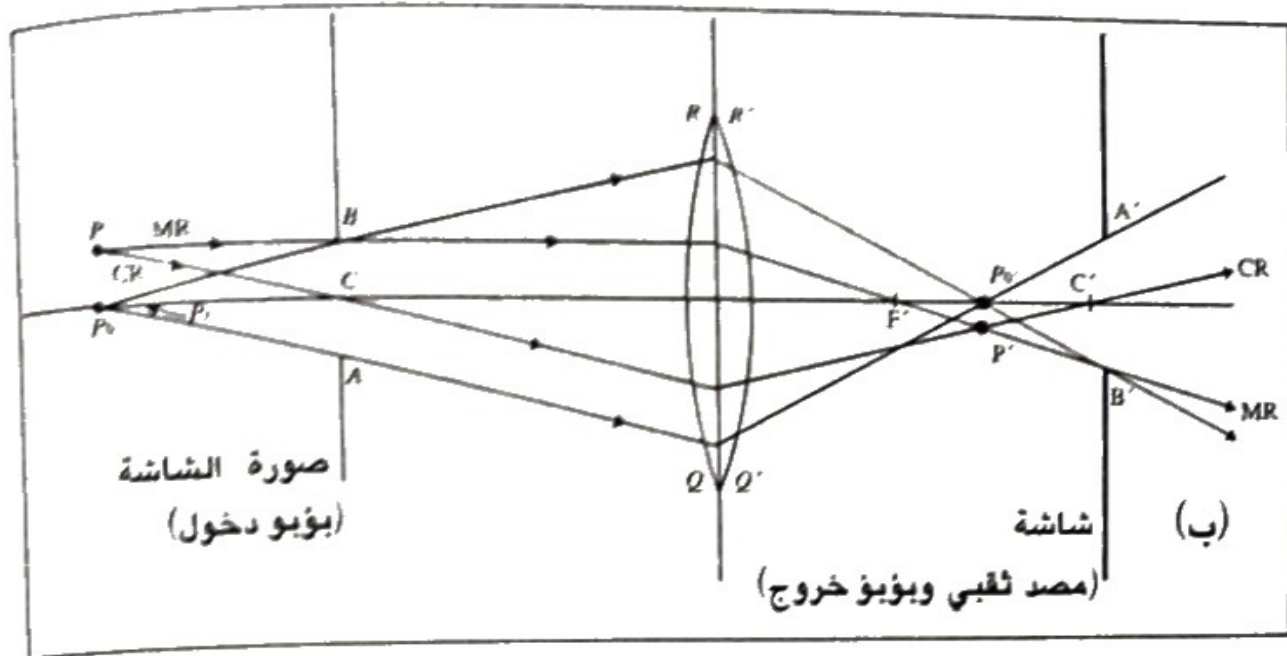
إن عبارة «بؤبؤ» تتساق مع تصميم النظام البصري المُعدُّ لكي يستخدم في المراقبة البصرية. ومن المرغوب فيه إلى أقصى حد أن يتوافق مع بؤبؤ عين المشاهد. وهذا يمكن أن يحصل في الشكل 1 (ب) وليس في الشكل 1 (أ).

الشعاع الوارد من الجسم P خارج المحور خلال مركز الحاجز ذي الثقب C يدعى بالشعاع الرئيسي، وهو يمر جزئياً في البداية خلال مركز بؤبؤ الدخول. ويبدو الشعاع المرافق $P'C'$ وكأنه يمر خلال مركز بؤبؤ الخروج. الشعاع مثل PA من نقطة الجسم خلال حافة الحاجز ذي الثقب يدعى بـ «الشعاع الهامشي»، ويبدو الشعاع المرافق $P'A'$ كما لو أنه يمر خلال حافة بؤبؤ الخروج. تحدد الأشعة الهامشية المرسومة من جسم ما على المحور الزاوية المجسمة العظمى التي يمكن أن تبني بواسطة النظام البصري.

إذا كان مستوي الجسم في الشكل 1 (ب) أقرب إلى حد ما إلى الشاشة، فإن

الاشعة من المصدر النقطي P_0 سوف تتقطع لتكون محددة بواسطة AB بدلاً من أن تكون محددة بواسطة الاستحكام العدسي QR . لذلك يصبح AB لاحقاً الحاجز ذو الثقب.

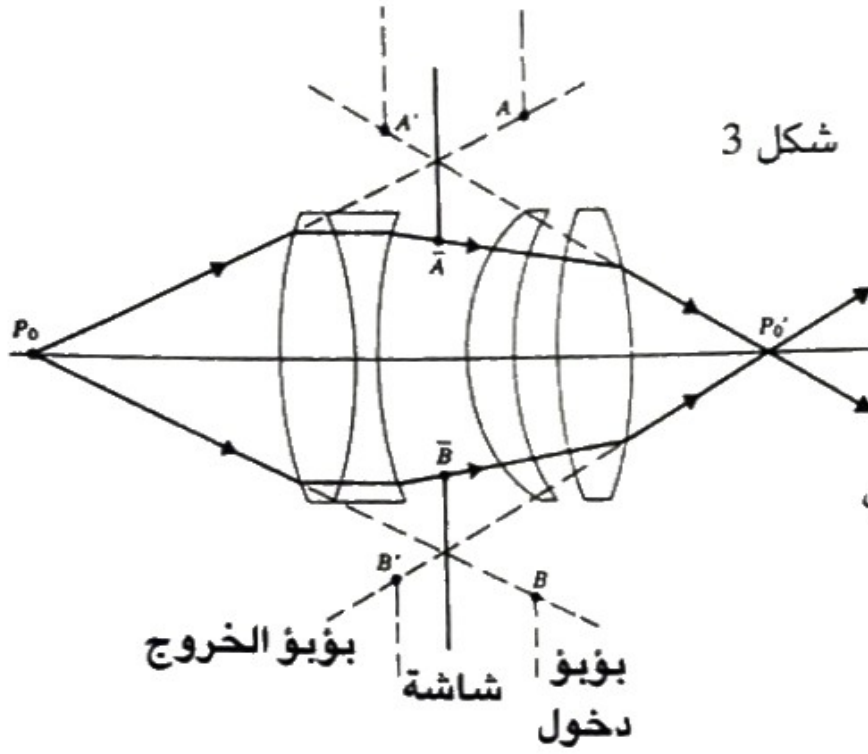
ب- الحاجز ذو الثقب على جهة النفوذ. حالتان بسيطتان، حيث يصدم الحاجز ذو الثقب الضوء بعد العدسة، موضحتان على الشكلين 2 (i) و (ب). إن بؤبؤ الدخول هو الصورة الحقيقية للحاجز ذي الثقب في الشكل 2 (i) والتخيلية في الشكل 2 (ب). في أي من الحالتين، يمثل ذلك انفتاح يستطيع المشاهد أن يطابقه كتحديد للأشعة المتفرقة من النقطة الجسمية P_0 .



شكل 2

2 - النظام المتعدد العدسات

في النظام المتعدد العدسات يمكن دائماً تعريف الحاجز ذي الثقب باستخدام نفس التعريفات المارة الذكر في الفقرة (6-1) (i). وهو فتحة فيزيائية تحدد مقدار الضوء الذي يمكن أن يمر خلال النظام. وسيكون بؤبؤ الدخول الفتحة أو الصورة الملائمة للفتحة التي نحوها تبدو الأشعة الهامشية وكأنها تتفرق من نقطة على محور الجسم، أما بؤبؤ الخروج، فسيكون الفتحة أو صورة الفتحة التي تبدو منها نفس هذه الأشعة الهامشية لتتجمع نحو الصورة. في الشكل 3، AB هو الحاجز ذو الثقب، بينما AB هو بؤبؤ الدخول و AB هو بؤبؤ الخروج.



شكل 3 الأشعة الهامشية في النظام المتعدد العدسات .

إن الطريقة النظامية لإيجاد بؤبؤ الدخول هي تصوير جميع الحواجز والحافات العدسية إلى اليسار (في الاتجاه المعاكس للاتجاه المتبوع بواسطة الأشعة من الجسم) خلال جميع عناصر النظام الكاسرة المعتزضة. ومن ثم إيجاد الزاوية المجسمة المقابلة (المحددة) بواسطة كل صورة عند P_0 ، واحدة من أصغر هذه الزوايا المجسمة هي بؤبؤ الخروج، والجسم الفيزيائي المطابق هو الحاجز ذو الثقب. هاتان الطريقتان يجب أن تحددتا نفس الجسم كحاجز ذي ثقب.

(6 - 2) الحاجز (المصد) الحقلي والشبابيك

يجب أن يكون واضحاً أن الحاجز ذا الثقب يحدد إضاءة الصورة النقطية على المحور، لأن الزاوية المجسمة الأكبر (التي يحددها الحاجز) تعطينا مخروطاً ضوئياً مُرسلاً أكبر، وبالتالي، فيضاً ضوئياً مُرسلاً أكبر. إن كثافة الفيض الضوئي في أجزاء الصورة خارج المحور تعتمد جزئياً على قياس وموقع حاجز آخر، هو الحاجز الميداني.

كل من الأشعة الرئيسية والهامشية سوف تغادر الجسم الواقع خارج المحور، ولكنها قد لا تمر جميعها خلال الصورة. إن الحاجز الميداني هو ذلك الحاجز أو الاطار العدسي الذي يحدد الزاوية المجسمة المتكونة بواسطة الأشعة الرئيسية. إن صورة الحاجز الميداني المتكونة بواسطة العناصر البصرية على جهة السقوط للحاجز الميداني تدعى بـ «شباك الدخول»، وصورته المتكونة بواسطة جميع العناصر البصرية على جهة مغادرة الضوء، بعد الحاجز الميداني تدعى بـ «شباك الخروج». فإذا لم توجد عناصر كاسرة إضافية بين الحاجز الميداني والجسم أو الصورة، فحينذاك يؤثر الحاجز الميداني نفسه كشباك دخول أو خروج على التوالي.

إذا كان شباك الدخول قريباً من مستوي الجسم، فإنه يسعى إلى الحد من مجال الرؤية، أي أن التمدد الجانبي للجسم سيتصور بواسطة النظام. بالنسبة للمشاهد الفاحص للصورة، يظهر شباك الخروج ليحدد مساحة الصورة، تماماً كما يحدد الشباك المساحة التي يمكن أن يراها المشاهد عندما ينظر خارج الباب. من جانب آخر، يسعى بؤبؤ الخروج لتحديد الزاوية المجسمة للأشعة المتجمعة إلى كل نقطة من الصورة.

مثال 2: يبين الشكل 4 نظاماً بصرياً مكوناً من عدستين رقيقتين لهما نفس الطول الموجي f ، حيث:

$$\overline{P_0 L_1} = 2f, \quad \overline{L_1 L_2} = 4f, \quad \overline{L_2 P_0} = 2f$$

وهناك حاجز ذو ثقب خلف العدسة L_1 جهة اليمين. وضع جسم P_0 على المحور أمام العدسة L_1 وفي مركز إنحنائها ($\overline{P_0 L_1} = 2f$) فتكونت له صورة أولاً عند P_0' ومن ثم عند P_0'' . ثمة حاجز ذو ثقب وبؤبؤ دخول عند L_1 . أوجد النسبة بين بؤبؤ الخروج (Ex. w.) (وهو في الحالة المدروسة عند

موضع الصورة النهائية (P_0) والحاجز ذو الثقب (AS) عندما يكون الجسم على مسافة $4f$.

الحل: نطبق المعادلة العامة للعدسات:

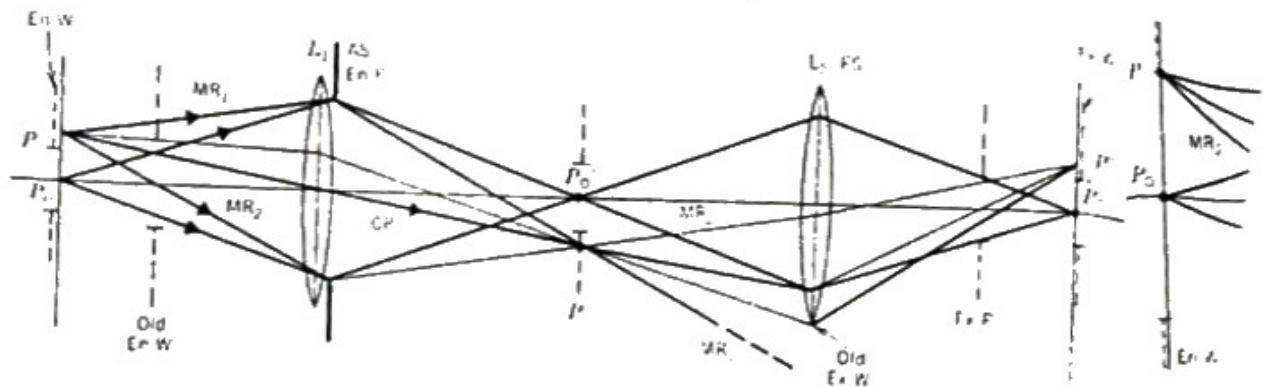
$$\frac{1}{O_1} + \frac{1}{i_1} = \frac{1}{f}$$

ومع $S = 4f$ ، نجد:

$$\frac{i_2}{O} = \frac{4}{3} \frac{f}{4f} = \frac{1}{3}$$

وهكذا نجد أن النسبة بين بؤبؤ الخروج والحاجز ذو الثقب هي $3/1$. في هذا المثال، وكما نلاحظ من الشكل 4، تمثل العدسة L_2 حاجزاً ميدانياً وكذلك شبك خروج. وبسبب تماثل وضع العدستين، فإن شبك الدخول هو ثلث قياس L_2 ويتموضع على مسافة $(4/3)f$ يسار L_1 .

عندما تتحرك P_0 خارج المحور، فإن الأشعة مثل MR_1 تختفي. وإذا أضيئت الشاشة الموضوعة في مستوي الجسم عند P بانتظام، فإن صورتها لن تكون مضاءة بانتظام، بل ستكون نصف ساطعة تقريباً سواءً عند P'' أو عند P'_0 . يمكن وضع حاجز إضافي عند نقطة الصورة البينية P_0 كما هو مبين بواسطة الخطوط المتقطعة. وإذا قابل هذا الحاجز الإضافي زاوية أصغر، كما يرى من مركز الحاجز ذي الثقب L_1 ، مما عمله L_2 ، فإن L_2 تصبح حاجزاً ميدانياً. أما شبك الدخول الجديد (New. En. W)، فسيكون الآن في مستوي الجسم، وسيكون (في هذا المثال في نفس القياس كما الحاجز الميداني) كلاهما يرى منقطاً في الشكل 4).



شكل 4

شكل 4 نظام العدستين المتماثل. يتجنب الشعاع MR_1 فتحة العدسة L_2 ، التي هي الحافز الحقلي. هذا يسبب إختفاء سطوع الأجزاء المحورية الخارجية للصورة.

عندما تتحرك P_0 خارج المحور نحو P ، فإن الأشعة الرئيسية الآن تُقطع بواسطة هذا الحاجز الميداني الجديد، ولكن بعض الأشعة الهامشية تبقى قاصرة عن L_2 ، وسيظل ثمة ضياع بسطوع الصورة. إن مجال الرؤية في مستوي الجسم يتحدد الآن بحدّة بواسطة شبّاك الدخول الجديد.

(6 - 3) المشعاعية (الراديومتري)

هي علم قياس كثافة الطاقة الإشعاعية، ففي النظام البصري الحقيقي يجب أن لا يُنتج فقط صورة بقياس مرغوب وفي المكان المناسب، بل يجب أن تكون الصورة ساطعة بدرجة تكفي لأن تكون مفيدة. إن سطوع الصورة يعتمد على سطوع الجسم وعلى قياس وموضع الحواجز داخل النظام البصري. يوجد في البصريّات نموذجان للوحدات الرابطة للكميات الطاقية. هما النموذج الفيزيائي والنموذج النفسي بدني. سنرمز لوحدات الطاقة الفيزيائية بالرمز التقليدي E ، ولوحدات الطاقة النفس بدنية بالرمز V ، نسبة إلى كلمة مرئي الانجليزية.

1 - تعريفات

للطاقة الفيزيائية تستخدم النظام العالمي للوحدات SI (mks) - متر كغم ثانية) أو النظام الهجيني الذي تقاس فيه المساحة بالـ cm^2 . في هذا النظام تقاس الطاقة الإشعاعية (نرمز لها بالرمز Q_e) بالجول، وهو المقدار الكلي للطاقة المنبعثة، المنتقلة أو المتجمعة، في العملية الإشعاعية. وتقاس كثافة الطاقة (ونرمز لها بالرمز U_e) بوحدّة الجول / مترمكعب (J / m^3)، وهي الطاقة المُشعة المحتواة في وحدة حجم الفضاء، وهاتان الكميتان، الطاقة المُشعة وكثافة الطاقة المُشعة، ترتبطان بالعلاقة.

$$U_e = \frac{dQ_e}{d\gamma} \quad (6 - 1)$$

حيث $d\gamma$ - تفاضل عنصري حجمي عشوائي.

وكما لاحظنا في الفصل الأول فقرة 5 (الفقرة (1 - 5)) فإن كثافة الطاقة هي قيمة الطاقة المنقولة بواسطة الموجة والتي أسميناها بشدة الموجة، وهي

نفس متجه بوينتينغ عندما نأخذ معدله الزمني S (معادلة 20 - 1):

$$\langle U_e \rangle = I = S' = \frac{1}{\mu_0 C} \bar{E}^2 = \frac{1}{2\mu_0 C} E_m^2 \quad (6 - 2)$$

لأنه من الصعب كشف التغيرات السريعة للمجال الكهرومغناطيسي. ولهذا نأخذ المتوسط الزمني للطاقة فوق عدد اهتزازات المجالين. أما القدرة المُشعَّة أو الفيض المُشع ϕ_e ، محسوباً بالواط، فهو المعدل الزمني لتغير الطاقة، أو معدل إنتقالها أو إشعاعها ويعبر عنه بالصورة:

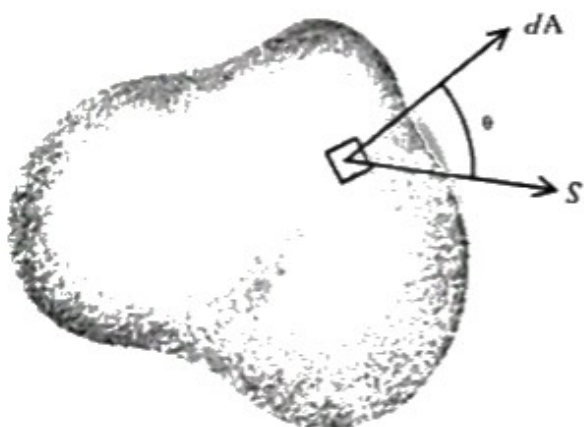
$$\phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad (6 - 3)$$

فإذا عرفنا السطح المغلق على أنه حجماً كالمبين في الشكل 5، حينذاك فإن الفيض الإشعاعي إلى خارج السطح المغلق هو:

$$\phi_e = \oint \vec{S} \cdot d\vec{A} \quad (6 - 4)$$

حيث $d\vec{A}$ هو متجه تفاضل السطح العنصري مأخوذاً إلى الخارج بإشارة موجبة، و $\vec{S}$ هي كثافة الفيض الطاقى الإشعاعي كما هو معرف في المعادلة (17 - 1) أو (20 - 1).

في الحالة العامة، فإن صافي المتجه $\vec{S}$ من جميع المساهمات يجب أن يكون محدداً عند كل بقعة على السطح بحيث أن التكامل في المعادلة (6 - 4) يمكن أن يكون كاملاً.



شكل 5

شكل 5 سطح مغلق يُستخدم لحساب الفيض الإشعاعي الكلي

إن جمع (أو اتحاد) كثافة الفيض من مصادر مختلفة غير متشاكهة (ليست في حالة طورية واحدة أو لا تختلف أطوارها بمقدار ثابت) يمكن أن يعبر عنه بـ:

$$\phi_e = \oint [\vec{S}_1 + \vec{S}_2 + \vec{S}_3 + \dots] \cdot d\vec{A}$$

أو بصورة (6-5)

$$\vec{a}_e = \vec{0} [\vec{S}_1 \cos \theta_1 + \vec{S}_2 \cos \theta_2 + \dots] dA$$

وعلم بوجود مدى مستمر للاتجاهات $\vec{S}$ فإن هذا التكامل يصبح حساباً كترملاتمة.

$$\vec{a}_e = \vec{0} \left[\int \frac{ds}{d\Omega} \cos \theta d\Omega \right] dA \quad (6-6)$$

وهذا موضح على الشكل 6. والعامل داخل القوس هو تكامل الزاوية المجسمة فوق جميع الاتجاهات. أما الإضافة $d\Omega$ فهي معرفة في الشكل 7 بوصفها

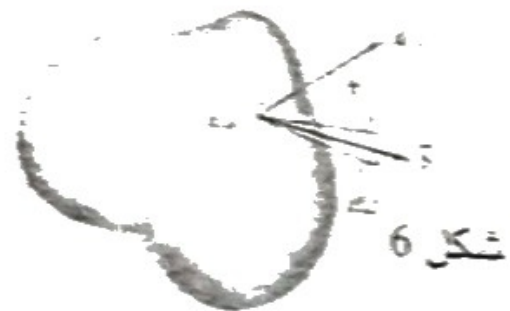
$$d\Omega = \frac{dA}{R^2} \quad (6-7)$$

وهذا يوصف بواسطة مخروط متمركز حول الاتجاه الموصوف بواسطة متجه الوحدة $\vec{S}$ الذي يحصر جزء الدائرة. ولدائرة كاملة فإن الزاوية المجسمة Ω مقاسة بالستيراديان (sr) تساوي:

$$\Omega = 4\pi \text{ sr}$$



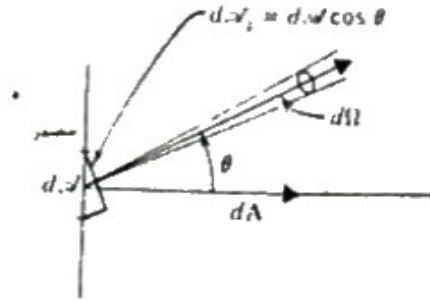
شكل 7 - تحديد العلاقات العامة لتغير التفاضلي للزاوية المجسمة.



شكل 6 هندسة تكامل الفيض الإشعاعي في الحالة حيث يحتفظ نظير بمعدل اتجاهات.

إن تغير الفيض الإشعاعي بالنسبة للزاوية المجسمة ($ds/d\Omega$) ويعرف بالاعتماد التفاضلي الزاوي لكثافة الفيض الإشعاعي (أي المعدل الزمني لتغير الطاقة المشعة) (أو مقدار متجه بوينتينغ) يسمى بالإشعاعية (I_e) (القدرة المنقولة بواسطة الموجة) بوحدات $W.m^{-2}.sr^{-1}$ ويعبر عنها بالعلاقة:

$$L_c = \frac{ds}{d\Omega} = \frac{d^2\phi_c}{\cos\theta d\Omega dA}$$



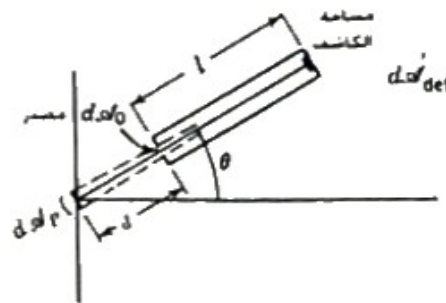
شكل 8

شكل 8 الإشعاعية مصدر مساحته dA في الاتجاه θ فيما يتعلق بالتعامد السطحي للمصدر ومن أجل الزاوية المجسمة $d\Omega$.

في النظام البصري ينصب الاهتمام عادة على خواص الجسم (المصادر) والصورة. ومن الأفضل أن يوصف هذا الاهتمام بواسطة الإشعاعية، ذلك لأن خواص المصدر أو الصورة تعتمد عادة على الزاوية $\hat{S}$ وعلى الموضع؛ والشكل 8 يبين كيف توصف إشعاعية المصدر. فالفيض الإشعاعي المنبعث بواسطة dA من المصدر داخل عنصر زاوية مجسمة $d\Omega$ حول الاتجاه $\hat{S}$ هو:

$$d^2\phi_c = L_c d\Omega dA_{\perp} = L_c d\Omega dA \cos\theta = L_c d\Omega (\hat{S} \cdot d\vec{A}) \quad (6 - 9)$$

وقد تقاس الإشعاعية مبدئياً بمساعدة الأداة الموضحة على الشكل 9.



شكل 9

شكل 9 الأداة التي يمكن أن تقاس بها الإشعاعية من المصدر.

فالفتحة الصغيرة أو الثقب تمتلك مساحة dA_0 ، تُسقط على المصدر باستخدام خطوط مستقيمة من نقطة على الكاشف. ومن ثم، فإن المساحة المُسقطه عند المصدر هي $dA_p = dA_0(L+d)^2 / L^2$ أما الزاوية المجسمة

المحددة بواسطة الكاشف كما تبدو من المصدر فهي $d\Omega = dA_{det} (L + d)^{-2}$ وهكذا، فإن $dA_p d\Omega = dA_o d^2\phi_e$. لذلك، فإنه إذا دُرِج الكاشف ليُقرأ بالواط فإننا نأخذ خرج $d^2\phi_e$ ونحصل على الإشعاعية من المعادلة

$$L_e = \frac{d^2\phi_e}{dA_p d\Omega} = \frac{d^2\phi_e L^2}{dA_o dA_{det}} \quad (6 - 10)$$

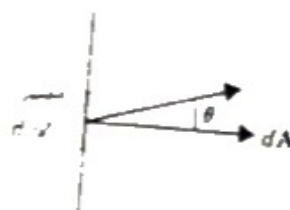
فيض الطاقة الإشعاعية

إحدى أهم أغلب الكميات الفيزيائية في القياسات الإشعاعية هي فيض الطاقة الإشعاعية الجارية عبر وحدة المساحة لسطح حقيقي أو تصوري. وهي العرف المقبول الذي يجعل من الممكن التمييز بين سطوح المصدر والسطوح الأخرى. أما الإخراجية الإشعاعية M_e (في الواط / متر²) فهي كثافة الفيض الكلي المنبعث (شكل 10)، وبصورة مماثلة، فإن التآلق E_e (في W/m^2) هو كثافة الفيض الإشعاعي الساقطة على سطح حقيقي أو تصوري. وهكذا سيكون لدينا بالنسبة للفيض إلى أو من المساحة dA :

$$d\phi_e = M_e dA \quad (\text{خارج من } dA)$$

$$d\phi_e = E_e dA \quad (\text{على } dA)$$

(6 - 11)



شكل 10

شكل 10 الخرج المتوهج هو المدره بوحده المساحة المغادرة dA والذاهبة إلى اليمين، وهي تتضمن جميع اتجاهات الانتشار θ من 0 إلى 90.

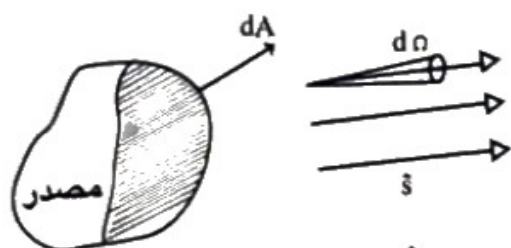
هذه الكميات ترتبط بالإشعاعية خلال التكامل الزاوي. وأنياً قد نحصل على الإخراجية الإشعاعية للمصدر بواسطة التكامل الزاوي للمعادلة (6 - 9) من أجل dA ثابتة (عند بقعة معينة على المصدر)

$$d\phi_e = \int_{(1/2)} d^2\phi_e = dA \int_{(1/2)} L_e \cos\theta d\Omega$$

لذلك فإن

$$M_e = \int_{(1/2)} L_e \cos\theta d\Omega \quad (6 - 12)$$

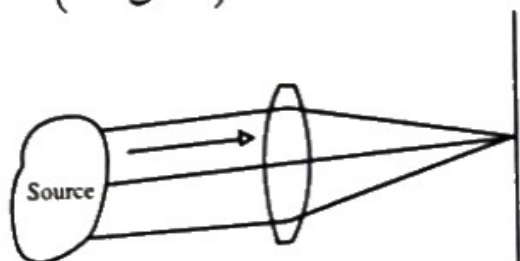
والتكامل $\int_{(1/2)} (...) d\Omega$ هنا يعود إلى التكامل الزاوي فوق نصف كامل الزاوية المجسمة، بمعنى فوق جميع الاتجاهات الخارجة من السطح. الشدة الإشعاعية I_e (القوة الضوئية للمصدر) بوحدات $\frac{W}{sr}$ ، وهي كمية هامة أخرى، وتمثل الفيض بوحدة الزاوية المجسمة، المُشع (الفيض) بواسطة كامل السطح باتجاه معين (يُمثل بـ $\hat{S}$)، كما يوضح ذلك الشكل 11.



شكل 11

شكل 11 تمثل الشدة الإشعاعية $I(\hat{S})$ القدرة الكلية بوحدة الزاوية المجسمة في الاتجاه $\hat{S}$ من مصدر محدود.

تكتسب الشدة أهميتها عندما يكون المصدر بعيداً وعندما يكون الكاشف صغيراً بحيث أن جميع الأشعة من أي جزء من المصدر إلى أي جزء من الكاشف تكون متوازية بصورة ملموسة. وهي مهمة أيضاً، إذا دُرِس الضوء في المستوي البؤري لعدسة، ومن ثم لأشعة آتية جميعها من المصدر باتجاه معين S يتم تجميعها عند نفس النقطة (شكل 12).



شكل 12

شكل 12 جميع الأشعة في الاتجاه $\hat{S}$ تبوءر (تُجمع) عند نفس النقطة بواسطة العدسة.

فإذا اعتبرنا مخروطاً من الأشعة يصنع زاوية مجسمة $d\Omega$ حول $\hat{S}$ (شكل 11)، حينئذ يُعطى الفيض بالعلاقة.

$$d\phi_e = I_e d\Omega \quad (6 - 13)$$

وتعتمد الشدة I_e ، بصورة عامة، على الاتجاه $\hat{S}$. قد نحصل على الشدة

بتكامل المعادلة (9 - 6) فوق المساحة S و $d\Omega$ ثابتين.

$$d\Phi_e = \int d\Phi_e = d\Omega \int L_e \cos\theta dA = \hat{s} d\Omega \int L_e d\vec{A}$$

ومن ثم فإن

$$I_e = \int L_e \cos\theta dA = \hat{s} \cdot \int L_e d\vec{A} \quad (6 - 14)$$

وهنا يمتد التكامل فوق جزء السطح الذي قد يشع في الاتجاه S فوق المساحة المظللة في الشكل 11، مثلاً.

2 - حالات خاصة

أ- المصدر المتماثل الناحي

بالتنسبة للمصدر الكروي المنتظم الذي نصف قطره R_0 ، والباعث لفيض كروي $\Phi_{e, tot}$ ، نحصل، بواسطة التكامل فوق كامل السطح

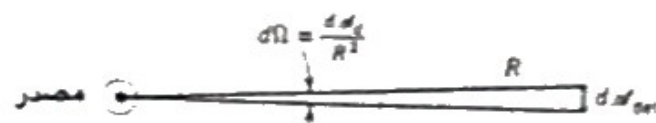
$$\Phi_{e, tot} = \int M_e dA = 4\pi R_0^2 M_e \quad (6 - 15 \text{ i})$$

ومن ثم، فإن كاشفاً صغيراً مساحته dA_{det} موضوع كما في الشكل 13، سوف يستلم الفيض.

$$d\Phi_e = \Phi_{e, tot} \frac{dA_{det}}{4\pi R^2} = \frac{\Phi_{e, tot}}{4\pi} \frac{dA_{det}}{R^2} = \frac{\Phi_{e, tot}}{4\pi} d\Omega \quad (6 - 15)$$

وبالمقارنة مع المعادلة (6 - 13)، نحصل على:

$$I_e = \frac{\Phi_{e, tot}}{4\pi} \quad (6 - 16)$$



شكل 13

شكل 13 كاشف الفيض.

بالتنسبة لمصدر متماثل، كرة مثلاً، نحصل أيضاً، باستخدام المعادلة (6 - 15 i) على:

$$I_e = R_0^2 M_e \quad (6 - 17)$$

مثال 3

منبع ضوئي شدته الإشعاعية $I_e = 90 \text{ W/s}$. احسب فيضه الكلي $\phi_{e,\text{tot}}$ خلال زمن قدره 1s ، 5s.

الحل: بتطبيق المعادلة (16 - 6)، نجد:

$$\phi_{e,\text{tot}}(1\text{s}) = 4\pi I_e(1\text{s}) = 4(3.14)(90 \text{ W/s})(1\text{s}) = 1130.4 \text{ Watts.}$$

ولخمس ثوانٍ نجد أن:

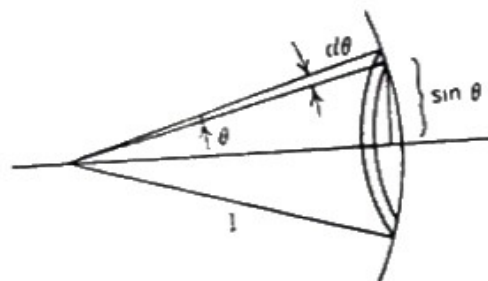
$$\phi_{e,\text{tot}}(5\text{s}) = 4(3.13)(90 \text{ W/s})(5\text{s}) = 5652 \text{ W}$$

ب. مصدر لامبرت

هو أحد المصادر التي تمتلك نفس الخواص التوجيهية، كذلك التي لفتحة صغيرة في تجويف. فداخل التجويف يمتزج الضوء بصورة عشوائية تماماً. فهو ينتشر في كل مكان في جميع الاتجاهات بإشعاعية متساوية. وهو أيضاً منتظم عبر مساحة الفتحة. وهكذا، فإن الإشعاعية I_e ليست تابعاً لـ $\hat{S}$ أو للموضع على المصدر. وبالنسبة لمصدر لامبرت، فإن الأداة في الشكل 9 ستنتج خرجاً للكاشف لا يعتمد على الموضع والزاوية θ ، بمقدار ما أن مجال رؤية الكاشف يتحدد بالفتحة التي مساحتها dA_n وليس بحافة المصدر.

بالنسبة لمصدر لامبرت قد تؤخذ الإشعاعية I_e خارج التكامل في المعادلة (12 - 6)، ومن ثم تكون مفيدة لإعادة تعريف الزاوية المجسمة العنصرية $d\Omega$ بحيث يكون $\cos\theta$ ثابتاً على نطاق العنصر. والحلقة المبينة على الشكل 14 تفي بهذا المطلب. ومن ثم، فإن $d\Omega = 2\pi \sin\theta d\theta$. وحينئذ فإن الإخراجية الإشعاعية لمصدر لامبرت ستكون:

$$M_{e,L} = I_e \int_0^{\pi/2} \cos\theta (2\pi \sin\theta) d\theta = \pi I_e \int_0^{\pi/2} d(\sin^2\theta) = \pi I_e$$



شكل 14

شكل 14 عنصر تفاضلي لزاوية مجسمة حلقيّة.

3. الكميات الطيفية

جميع التعديلات التي توصلنا إليها في فترات سابقة تُعزى إلى الإشعاع جميع التعديلات التي توصلنا إليها في فترات سابقة تُعزى إلى الإشعاع. في حين يمكن أن نتحدد كل كمية تبعاً لكي عند جميع الأطوال الموجية. في حين يمكن أن نتحدد كل كمية تبعاً طيفياً، فالفيض الطيفي الإشعاعي، مثلاً، ويرمز له بالرمز $\Phi_e(\lambda, d\lambda)$ ، فهو يمثل الفيض في مدى طيفي بين λ و $\lambda + d\lambda$ ، وقد جرت العادة أن توصف الأطوال الموجية بدلالة وحدات النانومتر، وهكذا سيكون الفيض $\Phi_e(\lambda)$ بوحدة الواط / نانومتر (W nm). ومن ثم نحصل بواسطة التكامل على

$$\Phi_e = \int_0^\infty \Phi_e(\lambda) d\lambda \quad (6-19)$$

والكميات الطيفية الأخرى هي $Q_e(\lambda)$ ، $U_e(\lambda)$ ، $M_e(\lambda)$ ، $E_e(\lambda)$ ، $I_e(\lambda)$ ، و $L_e(\lambda)$.

ويمتلك أيضاً تفاعل الإشعاع مع المادة أهمية في هذا المجال ليصبح بالإمكان توصيف الفيض الفوتوني في الحزمة الضوئية. إن الكميات الطيفية المنطبقة بصورة استثنائية في طول الموجي هي تلك التي تترافق، وفقاً لنظرية الكمومية، بفوتونات معينة طاقة، وطاقة الفوتون، كما هو معروف تسوي حاصل ضرب تردده (في ثابت يعرف بثابت بلانك h ومقداره $h = 6.62 \times 10^{-34}$ J.S في النظام العالمي للوحدات SI، أو $h = 4.136 \times 10^{-15}$ e V.S في نظام C.G.S. (أي سم، غرام، ثانية)، إذن تصبح طاقة الفوتون $E = h\nu$ بدلالة الطول الموجي $E = h \frac{c}{\lambda}$ ، وهكذا، فإن جميع الكميات الطيفية تشمل على طاقة يمكن تحويلها إلى كميات تشمل على فوتونات وذلك بقسمة "تعبير الإشعاعية على طاقة الفوتون $h\nu$ ، ومن ثم، فإن الفيض الفوتوني (عدد الفوتونات في الثانية) في مدى الأطوال الموجية من λ إلى $\lambda + d\lambda$ هو:

$$N(\lambda) d\lambda = \frac{\text{spectral quantity}}{\text{energy of photon}} = \lambda \frac{\Phi_e(\lambda)}{hc} d\lambda \quad (6-20)$$

4. أمثلة على الكميات المشعاعية

أحد أشد المصادر غير المتشاكهة هو مصباح الترقيق العالي الضغط، الذي إشعاعيته في المنطقة المرئية من الطيف، ومقدارها حوالي $250 \text{ W (cm}^2 \cdot \text{sr)}$

(لاحظ المعادلة (8 - 6)). الليزرزات الغازية المستمرة لها قدرة خرج كلية منخفضة نسبياً ولكن اتجاهيتها عالية بشكل مفرط. والمثال التقليدي في هذا المجال هو ليزر الهليوم - نيون، ذو القدرة 4 m W الباعث لضوء مرئي عند 632.8nm. ويمكن تركيز خرجة داخل بقعة نصف قطرها $r = 0.1 \text{ mm}$ بحزمة تصنع مخروطاً بنصف زاوية $\theta = 2 \times 10^{-3} \text{ rad}$ ومساحة بقعة حوالي $3.1 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ وزاوية مجسمتها المخروط $d\Omega$ تساوي:

$$d\Omega = (\theta R)^2 \pi / R^2 = \theta^2 \pi = 1.3 \times 10^{-5} \text{ sr}.$$

وحاصل الضرب $dAd\Omega$ يساوي: $4 \times 10^{-9} \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}$. أما إشعاعيته I_e والتي هي قدرته مقسومة على $dAd\Omega$ فهي حوالي $10^6 \text{ W} / (\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ ، وهي أسطع من مصباح الزئبق بـ 400 مرة.

(6 - 4) المضوائية (الفوتومتري)

وهي علم يبحث في قياس الشدة الضوئية للمصادر. والكميات المضوائية هي تلك التي يسجلها الإنسان المشاهد في النقطة المرئية من الطيف. ففي علم المضوائية يجري المشاهد مقارنات بين المصادر المختلفة. هذه المقارنة مرتبطة إلى أقصى حد بمصدر قياس واحد أو أكثر. ويرتبط نظام الوحدات في المضوائية بمثيله في المشعاعية التي سبقت مناقشتها في الفقرة السابقة؛ وهذا موضح في الجدول 1. إن التكافؤ الفعلي بين الوحدات المشعاعية (الفيزيائية) والوحدات المضوائية (النفوس بدنية) يعتمد على عدة متغيرات: شروط المشاهدة، عمر وخبرة المشاهد، حيث يسقط الضوء على شبكية عين المشاهد، وعلى الأطوال الموجية الموجودة في الضوء.

1 - تعريفات. وحدة التدفق الضيائي ϕ_v وهي اللومن ووحدة الشدة الضيائية I_v هي الشمعة أو لومن / ستيراديان، شمعة واحدة (1cd) تطابق فيض قدرة واحد لومن (1 Lm) خلال زاوية مجسمة مقدارها ستيراديان واحد (1sr). لذلك، فإن مصدراً متماثل المناحي شدته (1cd) (I_e) سيشتع تدفقاً ضيائياً كلياً قدره $4\pi \text{ Lm}$.

$$\phi_{e,\text{tot}} = I_e \Omega = (1 \text{ cd})(4\pi) = (1 \frac{\text{Lm}}{\text{sr}})(4\pi) = 4\pi \text{ Lm}$$

الإضاءة الإشعاعية والكثافة الميضي المصباحي lm / m^2 أو lm / ft^2 هما كميتان
 نعتلان كثافة الميضي المصباحي. فاللوكنس يدعى أيضاً بمترو - شمعة وهناك
 وحدات أخرى هي القدم - شمعة $(\text{lm} / \text{ft}^2)$ والقدم $(\text{lm} / \text{cm}^2)$
 $1 \text{ ft} \cdot \text{cd} = 10.764 \text{ m} \cdot \text{cd} (\text{lm}) = 1.0764 \times 10^3 \text{ phot}$
 $1 \text{ phot} = 10^4 \text{ Lux}$

ومثل نظيراتها الميضية، الإشعاعية lm ، فإن المورانية lm / m^2 (بوحدة
 $\text{lm} / \text{m}^2 \cdot \text{sr}$) هي الميضي بوحدة المورانية المحسنة بوحدة المساحة المسطحة
 للمصدر. وبما أن $1 \text{ cd} = 1 \text{ lm} / \text{sr}$ ، فإن وحدات المورانية بنظام lm
 هي cd / m^2 cd / m^2 .

هناك وحدات أخرى هي $(\text{lm} / (\text{cm}^2 \cdot \text{sr}))$ أو $10^4 \text{ cd} / \text{m}^2 = 10^4 \text{ cd} / \text{cm}^2$ اللامبرت
 $\text{Mili Lambert} = (1/\pi) \text{ cd} / \text{cm}^2 = (10^4/\pi) \text{ cd} / \text{m}^2$ الميلي لامبرت
 $(10^4/\pi) \text{ cd} / \text{cm}^2 = (1/1000\pi) \text{ cd} / \text{cm}^2$ والقدم - لامبرت.
 $\text{foot - Lambert} = 0.003426 \text{ cd} / \text{cm}^2 = 3.426 \text{ cd} / \text{m}^2$

جدول 1 تطابق المشعاعية والمصوالية

المصوالية	الرمز الميضي	الوحدات نظام SI	المصوالية
الطاقة الإشعاعية	Qe	جول	J
كثافة الإشعاعية	Ue	جول / m^2	J / m^2
الميضي الإشعاعي	Ie	واط	W
الإضاءة الإشعاعية	Me	واط / m^2	W / m^2
الإضاءة	Ee	واط / m^2	W / m^2
الشدة الإشعاعية	Ie	واط / ستراديان	W / sr
الإضاءة	Le	واط / m^2 - ستراديان	$\text{W} / \text{m}^2 \cdot \text{sr}$

المضوئية	الرمز المضيائي	الوحدات بنظام SI
الطاقة الضيائية	Q_v	talbot
الكثافة الضيائية	U_v	talbot/m ³
الفيض الضيائية	v	Lumen
الإخراجية الضيائية	M_v	L_m/m^2
المضيائية	E_v	L_m/m^2 (Lux)
الشدة الضيائية	I_v	L_m/sr (cd)
النورانية	L_v	$L_m / sr - m^2$

المعيار الأولي للنظام المضوئي للوحدات هو الإخراجية الضيائية لسطح الجسم الأسود المشع عند درجة انجماد البلاتينيوم (2043.5 K)، والمعروفة لتكون:

$$60 L_m / (cm^2 \cdot sr) = 60 cd / cm^2$$

2. التحويل بين وحدات الضيائية والطاقة الإشعاعية

أهم متغير في هذا التحويل هو الطول الموجي الموجود في الضوء. فالمصادر المتساوية الإشعاعية الطيفية تبدو للمشاهد أنها تمتلك نورانية نفس بدنية طيفية مختلفة عندما يتغير الطول الموجي. وقد تراكت نتائج تجارب عديد من المشاهدين لتعطي منحنى إنارة معياري هو الموضح على الشكل 15. وهذا المنحنى هو دالة للطول الموجي λ ، وسنرمز له بـ y_λ ؛ وهو يمتلك قمة عند 555 nm . وهذا يعني أن الضوء الذي طوله الموجي λ يعطينا عاملاً قدره y_λ هو بقدر الإحساس النفس بدني الذي يصل أقصاه عند الطول الموجي 555 nm . إن التحويل عند 555 nm يُعبر ليكن:

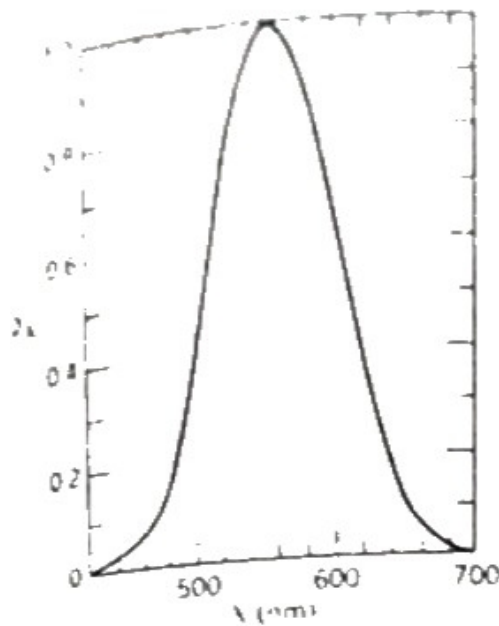
$$k_m = 680 L_m / W \quad (6 - 20)$$

هذا يعني أن فيضاً قدره 1 W عند 555 nm يعطي نفس الإحساس الفيزيائي الذي يعطيه $680 L_m$.

وللأطوال الموجية الأخرى فإن عامل التحويل:

$$k = k_m y_\lambda = 680 y_\lambda L / W \quad (6 - 21)$$

هذا يعني أنه من أجل $\lambda = 555 \text{ nm}$ ، فإن 1 W ينتج أقل من 680 Lm .



شكل 15

شكل 15 المنحني المعياري للإنارة

شكل 15 بصريات 2/2

قد تستخدم المعادلة (6-21) لتحويل أي كمية طيفية في الجدول 1 إلى الكمية النفس بدنية المطابقة. فمثلاً، لو كان لدينا الفيض الطيفي $\phi_e(\lambda)$ ، حينئذ، فإن الفيض الضيائي ϕ_v يعطى بالعلاقة:

$$\phi_v = 680 \int_0^{\infty} \bar{y}_\lambda \phi_e(\lambda) d\lambda [\text{Lm}] \quad (6-22)$$

يعرف متوسط عامل التحويل k بالعلاقة:

$$\phi_v = \bar{K} \phi_e \quad (6-23)$$

$$\phi_e = \int \phi_e(\lambda) d\lambda \quad \text{حيث:}$$

ويعطى $\bar{K}$ بالعلاقة:

$$\bar{K} = \frac{680 \int_0^{\infty} \bar{y}_\lambda \phi_e(\lambda) d\lambda}{\int \phi_e(\lambda) d\lambda} \quad (6-24)$$

إذا كانت الشدة المطلوبة من نفس المصدر، فإن التحويل

$$I_v = 680 \int_0^{\infty} \bar{y}_\lambda I_e(\lambda) d\lambda [\text{cd}] = \bar{K} I_e \quad \text{حيث:}$$

و

$$I_e = \int_0^{\infty} I_e(\lambda) d\lambda$$

$$K = \frac{680 \int_0^\infty y_\lambda I_e(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty I_e(\lambda) d\lambda} \left[\frac{\text{cd}}{\text{W/sr}} \right] \quad (6-26)$$

المعادلتان (6 - 24) و (6 - 26) متكافئتان، لأنه لمصدر معين وهندسة معينة تكون $I_e(\lambda)$ متناسبة طردياً مع $\phi_e(\lambda)$.

إن السقوط الضوئي من الشمس عند الظهيرة وعند خط الإستواء يبلغ حوالي 10^5 لوكس، وهو حوالي 500.000 مرة أكبر من ضوء القمر الكامل تحت نفس الظروف.

وإن كثافة الفيض الضيائي من مصباح ضوئي 60-W هي حوالي 50 لوكس = 50 لومن / متر² عند مسافة 1m. ومن ثم، فإن الفيض الكلي سيكون $600 \text{ Lm} = 4 \pi \text{ m}^2 \times 50 \text{ Lm} / \text{m}^2$ أو حوالي 1W فيض إشعاعي مرئي.

إن العين المتكيفة تماماً قادرة أن ترى 10^{-9} Lux فإن افترضنا أن نصف قطر بؤبؤ العين هو 2mm، فإن مساحة العين التي تستقبل هذا الضوء هي $13 \times 10^6 \text{ m}^2 \approx \pi (2 \times 10^{-3} \text{ m})^2$. وهذا يعني أن 10^{-4} Lm يمكن أن تكشف عنها عين الإنسان. وهذا حوالي $1.5 \times 10^{17} \text{ w}$ من القدرة المرئية أو حوالي 30 phot/sec من الطاقة التي مقدارها $3 \text{ ev} = 4.8 \times 10^{-19} \text{ J}$.

أمثلة على المشعاعية

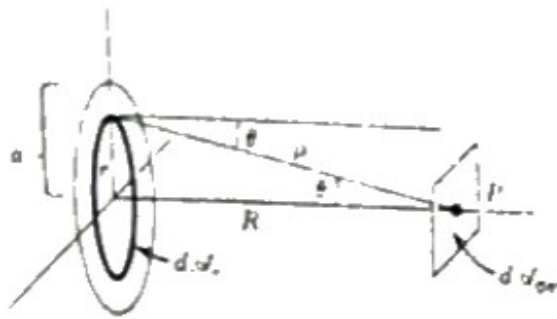
نُسقط الآن الرمز e و v بحيث أن المناقشة قد تنطبق بصورة متساوية على الكميات المشعاعية والمضوئية.

نستخدم عبارات المشع فيما يلي، ولكن العلاقات صحيحة للعبارات المضوئية والضيائية.

1 - المصادر البسيطة

تتضمن الحسابات في معظم الحالات تكاملات زاوية وسطحية معقدة. فبعض الأحيان تكون الهندسة بسيطة عملياً. علاوة على ذلك، فإن هذه التبسيطات قائمة على افتراضات أن المصادر تسلك مثل مصادر لامبرت. فلو أردنا حساب التألق E عند النقطة P على مسافة R من مركز المصدر نتبع ما يلي:

أ - القرص، هندسة القرص مبيّنة على الشكل 16. تعبير شكل القرص
عنصر لمصدر مساحته dA_s تساوي:
 $dA_s = 2\pi r \cdot dr = \pi d(r^2) = \pi d(\rho^2)$



شكل 16

شكل 16 الهندسة المصاحبة للشكل القرصي للمصدر.

حيث $\rho^2 = R^2 + r^2$ تؤخذ لكي يغطى اعتماد المتغير في التكامل كامل القرص.
ومن ثم، فإن الفيض الواصل للمساحة dA_{det} على الكاشف عند P الآتي
من القرص سيكون، وفقاً للمعادلة (9 - 6):

$$d^2\phi = Ld\Omega dA_s \cos\theta$$

هنا $d\Omega$ هي الزاوية المجسمة المحددة بمساحة الكاشف dA_{det} عند نقطة
على سطح القرص، وفقاً للمعادلة (7 - 6) مع وضع $dA' = dA_{det} \cos\theta$ ، وهي
مسقط مساحة الكاشف. ومنه نجد أن $d\Omega = dA_{det} \cos\theta / \rho^2$ ، ومن ثم، فإن

$$\text{الفيض: } d^2\phi = \pi L dA_{det} \frac{\cos^2\theta}{\rho^2} d\rho^2$$

$$\text{ولكن: } \cos^2\theta = \frac{R^2}{\rho^2}$$

وهكذا فإن الفيض الكلي الواصل للمساحة dA_{det} هو:

$$d\phi = \pi L dA_{det} R^2 \int_{R^2}^{R^2+a^2} \frac{d\rho^2}{\rho^4} = \pi L dA_{det} R^2 \left(\frac{1}{R^2} - \frac{1}{R^2+a^2} \right)$$

أما الإنارة E على الكاشف، فهي:

$$E = \frac{d\phi}{dA_{det}} = \pi L \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{a^2}{R^2}} \right) = \pi L \sin^2\theta_{\max}$$

حيث:

$$\sin\theta_{\max} = \frac{a}{\sqrt{a^2 + R^2}}$$

ويلاحظ هنا أنه:

عندما $a \rightarrow \infty$ $R \perp a$ ثابتة، فإن E تسعى إلى πL ، ما يماثل القيمة (6 - 18).
يلاحظ أيضاً، أنه من أجل a ثابتة و R كبيرة، فإن E تصبح:

$$E = \frac{\pi L a^2}{R^2} = \frac{I}{R^2} \quad (6 - 27)$$

حيث $I = L \cdot \pi a^2$ هي شدة المصدر (الفيض / ستيراديان) عندما يكون مشعاً في الاتجاه العمودي على مستواه، والنتيجة الأخيرة (6 - 27) صحيحة على العموم بالنسبة للمسافة الكبيرة من المصدر الصغير لأنه عندئذ يمكننا أن نكتب:

$$d\phi = I d\Omega$$

$$d\Omega = \frac{dA_{det}}{R^2} \quad \text{مع}$$

$$d\phi = \frac{I}{R^2} dA_{det} \quad \text{لذلك، فإن:}$$

$$E = \frac{d\phi}{dA_{det}} = \frac{I}{R^2} \quad (6 - 28) \quad \text{أو}$$

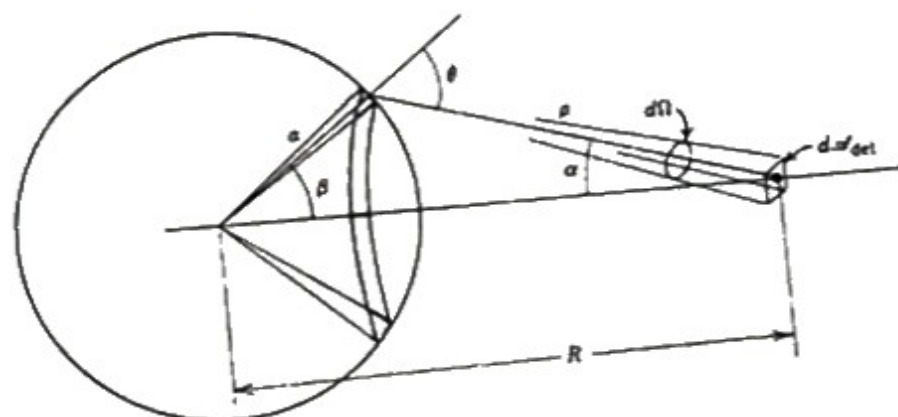
ب. الكرة. يوضح الشكل 17 الحالة بالنسبة للكرة، في هذه الحالة نعتبر قرصاً حلقياً كعنصر تفاضلي للمصدر، فسيكون الفيض على الكاشف مساوياً لـ:

$$d^2\Omega = L d\Omega A_s \cos\theta$$

حيث:

$$dA_s = 2\pi (a \sin\beta) a d\beta$$

$$d\Omega = dA_{det} (\cos\alpha) / \rho^2$$



شكل 17

شكل 17 الهندسة المترافقة مع مصدر لامبرت الكروي.

يفترض الآن أن $a \gg R$. حينئذ ذلك نقول α إلى الصفر (6 - 27) من أجل الضرب

$$d\Phi = L \frac{2\pi a'}{R} dA_{\text{em}} \sin\beta \cos\beta d\beta \quad \text{و } \theta = \beta \text{ هذا يقود إلى}$$

ومنه، فإن الفيض الكلي الواصل إلى dA_{em} هو

$$d\Phi = L \frac{2\pi a'}{R} dA_{\text{em}} \int_0^{\pi/2} \sin\beta \cos\beta d\beta = L \frac{\pi a'}{R} dA_{\text{em}}$$

$$P = \frac{d\Phi}{dA_{\text{em}}} = \frac{L}{R} \pi a'$$

و

وهذه نفس النتيجة التي حصلنا عليها في المعادلة (6 - 27) من أجل الضرب الذي نصف قطره a . وهكذا، فإن باعث لامبرت الكروي يظهر كما لو كان قرص منتظم بالنسبة لمشاهد بعيد.

2 - سطوح الصورة.

الآن نحسب الإنارة عند نقاط مختلفة داخل النظام المصري، وخصوصاً عند موضعي الصورتين النهائية والمتوسطة. أو بعبارة أخرى نحسب إنارة سطح الصورة أو نقطة معينة منه.

ولكن نحدد إنارة السطح في نقطة معينة، علينا أن نقرر قطعة صغيرة من Δs (شكل 18). ومقدار الفيض الصوتي الساقط على هذه القطعة من السطح يعطينا الإنارة في النقطة المعنية (6 - 29) بالصدر الذي تقترّب فيه dA من الصخر.

إن وحدات الإنارة هي اللوكس (Lux)، كما أسلفنا، واللوكس هو إنارة وحدة السطوح، التي يسقط عليها فيض صوتي منتظم التوزيع مقداره لومن واحد.

$$1 \text{ Lux} = \frac{1 \text{ lumen}}{1 \text{ m}^2}$$

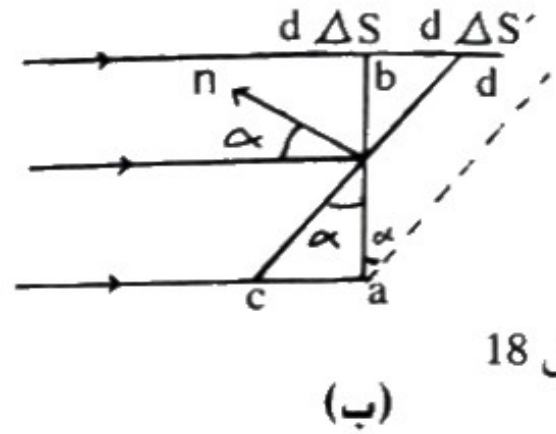
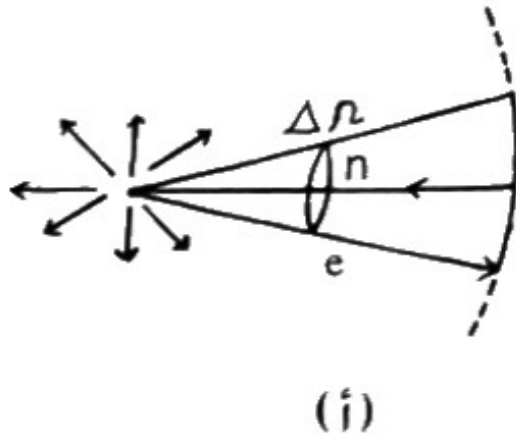
نصع في مركز السطح الكروي ذو نصف القطر R مصدراً نقطياً (شكل 18) مفرزين على الكرة مساحة dA_s تتلائم مع زاوية محسمة $\Delta\Omega$ ، نرسم مع مساحة الكاشف dA_{em} بالعلاقة (6 - 28). فإذا كانت شدة ضوء المصدر باتجاه المساحة تساوي I ، فسوف يسقط على dA_s فيض صوتي قدره $d\Phi = I d\Omega$ وبالتالي فإن

الإضاءة العمودية على إشعاع المساحة S تساوي:

$$E_o = \frac{d\phi}{dA_{det}} = \frac{I}{R^2}$$

لاحظ المعادلة (6 - 28)

وبهذا فإن الإضاءة o تتناقص مع زيادة المسافة R عن المصدر تبعاً للقانون I/R^2 ، الذي يعرف بقانون التربيع العكسي. وهذا عندما تكون هذه المساحة Ds عمودية على الشعاع الساقط الممثل بالعمود n (شكل 18 أ).



شكل 18

شكل 18 الإضاءة العمودية على شعاع المساحة.

الإضاءة عندما يسقط الشعاع مائلاً على المساحة:

نأخذ المساحة dA_s (المثلة بطول السطح cd) التي يسقط عليها الشعاع بزاوية α بالنسبة للعمود n (شكل 18 ب)). نختار هذه المساحة، بحيث أن الفيض الذي يمكن أن يسقط عليها هو نفسه ذلك الذي كان يمكن أن يسقط على المساحة dA_s (المثلة بالسطح ab). وكما نلاحظ من الشكل 18 ب فإن $dA'_s = dA_s / \cos \alpha$. وبالتالي، فإن إضاءة مثل هذه المساحة ستكون أقل من إضاءة المساحة العمودية dA_s بـ $1/\cos \alpha$ من المرات، لأن dA_s أكبر من dA'_s ، أي أن:

$$E_\alpha = E_o \cos \alpha = \frac{I}{R^2} \cos \alpha \quad (6 - 30)$$

حيث I هنا هي شدة ضوء المصدر النقطي في الاتجاه إلى النقطة المعينة المدروسة، R - المسافة من المصدر إلى النقطة المعنية α - الزاوية التي يسقط بها الشعاع على السطح، أي الزاوية بين اتجاه الشعاع والعمود على السطح.

تمثل الإنارة، الكمية الأساسية في الحسابات التقنوضونية الخاصة بالشدة والإنارة والسطوع، بمقدار ما أنه من أجل كل استثمار للضوء توجد قواعد عملية موضوعية للإنارة اللازمة، إعتماًداً على الغرض من الاستثمار. فمثلاً، يلزم من أجل القراءة إنارة قدرها 50 lux ، من أجل الأعمال الدقيقة جداً (مثل الحفر أو النقش، الرسم)، كذلك في الورش والمصانع، حيث تستخدم أجهزة قطع حادة، يلزم إضاءة قدرها 100 lux ، ... الخ. بواسطة الإنارة يمكن بسهولة تحديد شدة الضوء اللازمة لصناعة هذه الإنارة للمصدر الضوئي ومقدارها:

$$I = E R^2 / \cos \quad (6 - 31)$$

أي أن شدة ضوء أي عنصر سطحي، مخروطي الإشعاع تساوي:

$$I = I_0 \cos \alpha \quad (6 - 32)$$

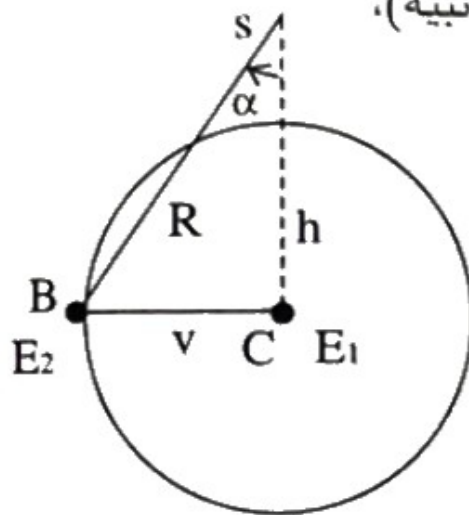
حيث I_0 شدة الضوء عند السطح في الاتجاه العمودي على العنصر.

إن العلاقة بين شدة ضوء المصدر I ومساحة أي نقطة من سطحه أو سطح الصورة (العمودية على الشعاع $\hat{S}$ أو المائلة بزاوية α بالنسبة للشعاع $\hat{S}$) تدعى بالسطوع ويعبر عنه كالتالي:

$$B = I/dA \left(\frac{\text{lm}}{\text{m}^2} \right) \quad (6 - 33)$$

مثال 4: مصباح كهربائي قوة ضوئية (100) شمعة، علق فوق طاولة دائرية نصف قطرها (80) سم وعلى ارتفاع (60) سم، أو جسد:

- (1) الإنارة في مركز الطاولة E_1 (الإنارة المركزية)،
- (2) الإنارة عند حافة الطاولة E_2 (الإضاءة الجانبية)،
- (3) الفيض الضوئي الساقط على الطاولة.



شكل 19

الحل: 1) بملاحظة الشكل (19) ولإيجاد الإضاءة عند مركز الطاولة C نستخدم العلاقة (28 - 6)

$$E = I / R^2 = I / h^2 = 100 \text{ cd} / (0.6\text{m})^2 = 278 \text{ lux}$$

حيث R دائماً هي بعد المصدر الضوئي عن النقطة المراد تحديد مقدار الإضاءة عندها.

2) الإنارة عند حافة الطاولة، أي الإنارة عند النقطة B التي تصنع زاوية α مع العامودي وتبعد عن المصدر بالمسافة $SB = R = h^2 + r^2$ ، تحسب وفقاً للمعادلة (31 - 6):

$$E = I \cos \alpha / (h^2 + r^2)$$

$$\frac{I}{(h^2 + r^2)} \frac{h}{\sqrt{h^2 + r^2}} = \frac{100 \text{ cd} \times h}{(h^2 + r^2)^{3/2}} = \frac{100 \times 0.6}{((0.6)^2 + (0.8)^2)^{3/2}} = 60 \text{ lux}$$

3) لإيجاد الفيض الضوئي الساقط على الطاولة نطبق القانون الأساسي للفوتومتري (13 - 6):

$$d\phi_e = I d\Omega^{(1)}$$

$$= I \cdot 2\pi \int_0^\theta \sin \theta d\theta = I \cdot 2\pi \cdot 2\pi (1 - \cos \theta)$$

$$= I \cdot 4\pi^2 \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

حيث - هي زاوية المخروط، يصنعها محوره مع مكوناته (حوافه) وتساوي عند قيمتها الصغرى (شكل 20)

$$\theta \cong \tan \theta = \frac{r}{h}$$

$$d\phi_e = 4\pi I \sin^2 \frac{1}{2} \cdot \frac{r}{h} \quad \text{إذن، ومنه، فإن}$$

$$= 4\pi \times 100 \text{ cd} \sin^2 \frac{1}{2} \cdot \frac{0.8}{0.6}$$

$$= 251.8 \text{ lm} \quad (1 \text{ lm} = 1 \text{ cd} \cdot 1 \text{ sr})$$

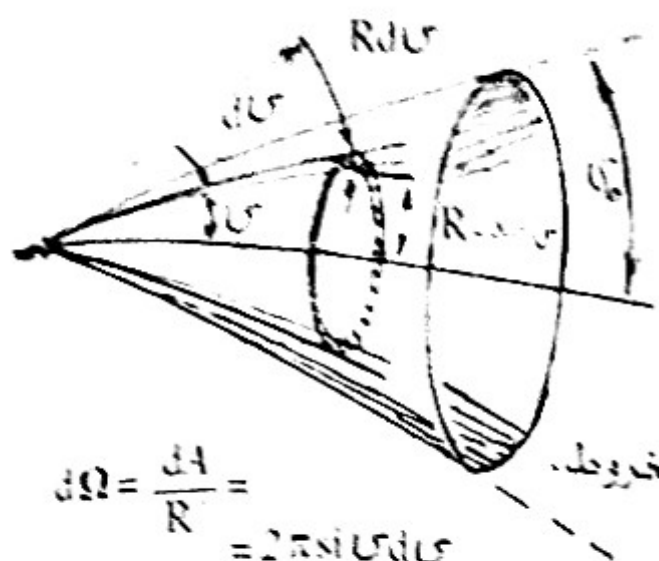
حساب الزاوية المجسمة:

(1) نحسب الزاوية المجسمة للمخروط وفقاً للمعادلة (7 - 6) مع الاستعانة بالشكل 20:

$$d\Omega = 2\pi \sin \psi d\psi \quad \Omega = 2\pi \int_s^v \sin \psi d\psi$$

$$= 2\pi (1 - \cos \psi) = 4\pi \sin^2 \frac{\psi}{2}$$

$$dA = 2\pi R \sin \theta d\theta$$



شكل 20

$$d\Omega = \frac{dA}{R^2} = \frac{2\pi R \sin \theta d\theta}{R^2} = 2\pi \sin \theta d\theta$$

(6 - 5) الفوتومتريات Photometers
تدعى أجهزة قياس شدة ضوء المصدر وكذلك أجهزة المقارنة بين الشدود الضوئية للمصادر المختلفة، بالمقاييس الضوئية أو الفوتومتريات. ومقارنة قوتي ضوء مصدرين ضوئيين تتم بطريقة عمل إضاءة متكافئة لنفس المساحة بواسطة هذين المصدرين، لأن المساحتين موجودتان تحت نفس الزوايا بالنسبة لاتجاهات الأشعة من كلي المصدرين. في هذه الحالة يكون لدينا من العلاقة (28 - 6):

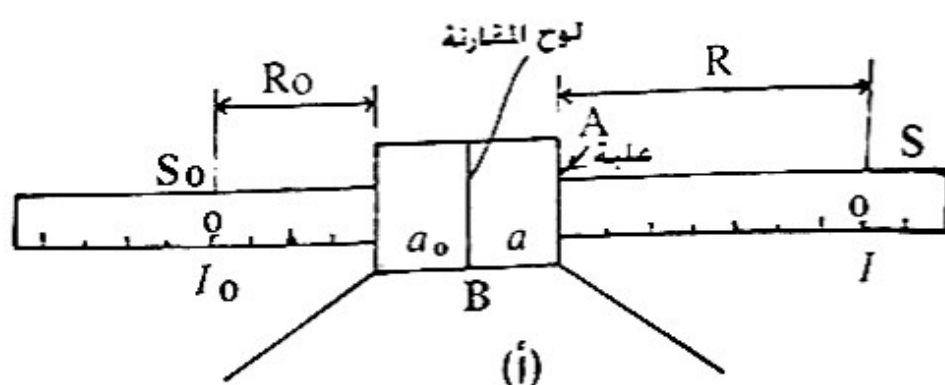
$$\frac{I_1}{I_2} = R_1^2 / R_2^2 \quad (6 - 34)$$

أي أن شدتي ضوء مصدرين ضوئيين يصنعان إضاءتين متكافئتين لنفس السطح الواحد، تتناسبان مباشرة مع مربع بعدهما عن هذين السطحين. فإذا كانت قوة ضوء أحد المصدرين معروفة، ولتكن I_0 ، فإن قوة ضوء المصدر الثاني ستكون:

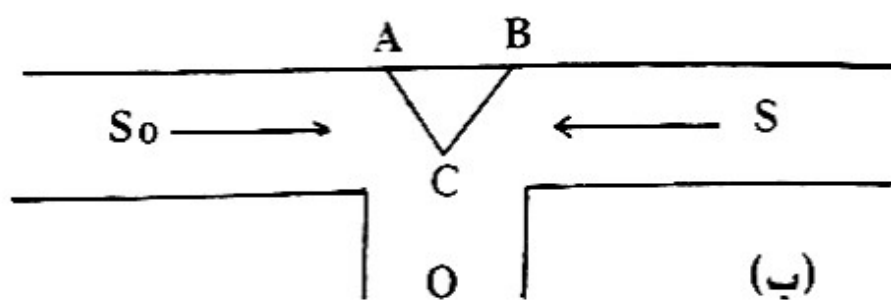
$$I = I_0 R^2 / R_0^2 \quad (6 - 35)$$

وتدعى هذه العلاقة بالصيغة المضوائية ويمثل المقياس الضوئي لجولي Photometer's Joly أحد أبسط المقاييس المضوائية، كما يوضحه الشكل 21 أ. بمقارنة مصدري الضوء، المصدر الخاضع للإختبار S، والمقياسي So، وذلك بتحريكهما على مسطرة مدرجة باتجاه صفيحتي بارافين (لوحا

بارافين مستطيلان) a_0 و a ، تستقران في علبة غير منفذة A ذات شباكين، ومفصولتان (الصفحتين) بورقة رقيقة. وتستمد حركة المصدر باتجاه الصفحتين حتى تبدوان متكافئتا الإضاءة. تتم المشاهدة خلال الشباك B في العلبة غير المنفذة للضوء. ومن ثم يعتمد في المقارنة على إحساس عين المشاهد بالتأثير المباشر لكل مصدر ضوء. إن أشكال هذا المقياس المضوئي موضحة على الشكل 21 (ب)، وهنا أُبدلت صفحتا البارافين بمنشور ثلاثي الحواف ABC. ملون باللون الأبيض وموضوع داخل أنبوبة ملونة باللون الأسود. ينظر المشاهد المنشور من الأنبوبة O. وعلامة تكافؤ إضاءة الحافتين AC و BC هي انعدام رؤية حافتي نقطتهما C.



شكل 21



شكل 21 فوتومتر جوليه.

هناك مقياس مضوئي. آخر أكثر بساطة. هو مقياس بنزن Photometer Bynzin. موضح على الشكل 22. ويتكون من شاشة ورقية في منتصفها بقعة مشحمة (مطالية بالجريز)، تُحرك بواسطة مسطرة مدرجة حتى تختفي البقعة المشحمة. وهذا يحصل عندما تكون الإضاءة متكافئة من الجانبين.

الشمعة مشعاً مخروطياً. أوجد:

(1) قوة الضوء في الاتجاه المعين.

(2) سطوع المصدر في الاتجاه المعين.

الحل: (1) نظراً لطول المسافة من مصدر الإشعاع إلى نقطة الاستفادة (5m) بالنسبة لمقاييس الشمعة. فإنه يمكن اعتبار الشمعة مصدراً نقطياً للضوء. ومن ثم تطبيق العلاقة (28 - 6):

$$I = ER^2 = 2 \text{ lux } 25\text{m}^2 = 2 \frac{\text{lm}}{\text{m}^2} 25\text{m}^2 = 50 \text{ lm}$$

(2) نطبق العلاقة (33 - 6) وهنا نأخذ مساحة الاسطوانة dA ببعدين، طولها أو ارتفاعها (40 cm) وعرضها أو قطرها (2.5 cm). وعليه، فإن:

$$B = \frac{50 \text{ lm}}{40 \times 10^{-2} \text{ m } 2.5 \times 10^{-2} \text{ m}} = 2 \times 10^3 \text{ lm/m}^2 = 2 \times 10^3 \text{ lux}$$

مثال 7: مصدر ضوئي شدته (100) شمعة وضع في مركز كرة نصف قطرها 20 سم. احسب كمية الضوء الساقطة على مساحة قدرها 30 cm^2 لمدة دقيقتين.

الحل: باستخدام المعادلات (3 - 6)، (11 - 6)، و(28 - 6)، نجد:

$$d\phi = \phi_e dt = E_e dA' dt = \frac{I}{R^2} \cdot dA' dt$$

$$\Delta Q = \frac{I \Delta s \Delta t}{R^2} = \frac{(100 \text{ cd}) \times (30 \text{ cm}) \times (2 \times 60 \text{ s})}{(20 \text{ cm})^2} = 900 \text{ cd} \cdot \text{sec} = 900 \text{ لومن}$$

مسائل

1. احسب قوة ضوء المصدر النقطي الذي فيضه الضوئي الكامل 1 لومن.
2. مصدر ضوئي نقطي يوجد في قمة مخروط دائري يبعث داخل المخروط فيضاً ضوئياً قدره 76 lm . احسب الزاوية المجسمة Ω للإشعاع وزاوية التدفق المخروطي ν ($\nu = 20$).
3. شمعة قوتها الضوئية $I = 100 \text{ cd}$ علقت على ارتفاع $h = 3 \text{ m}$ فوق الأرض وعلى مسافة 4 m من جدار. أوجد أ) إضاءة الجدار E_1 ، ب) إضاءة السطح الأفقي للأرض E_2 ، ج) إضاءة خط تقاطعهما.
4. شمعة قوتها الضوئية $I = 1 \text{ kcd}$ علقت على سارية ارتفاعها $h = 8 \text{ m}$.

اعتبر الشمعة مصدراً نقطياً للضوء، أوجد على أية مسافة l عن قاعدة السارية تصبح الإضاءة $E = 1 \text{ lux}$ ؟

5. علقت شمعة فوق مساحة دائرية، وكانت الإضاءة فوق مركز المساحة $E_1 = 40 \text{ lux}$ وعلى حافتها $E_2 = 5 \text{ lux}$. احسب زاوية سقوط الشعاع الضوئي على حافة المساحة.

6. على أي ارتفاع h فوق طاولة دائرية نصف قطرها 1 m يجب تعليق شمعة لكي تكون الإضاءة على حافة الطاولة مساوية لقيمتها العظمى.

ملاحظة للحل: اتبع قاعدة الاشتقاق، وأوجد الشرط الذي تحته تكون دالة الإنارة أو الإضاءة أكبر ما يمكن.

7. على ارتفاع $h = 1 \text{ m}$ فوق مستوي أفقي، علق قرص مضئ بصورة موازية للمستوي الأفقي. كانت شدة ضوء القرص باتجاه محوره $I_0 = 100 \text{ cd}$. اعتبر القرص مصدراً نقطياً ذا توزيع مخروطي لشدة الضوء، أوجد إنارة المستوي الأفقي عند نقطة A التي تبعد بمسافة $d = 3 \text{ m}$ عن النقطة التي تقع تحت مركز القرص.

الفصل السابع

التداول

هناك مشاهد شائعة وجميلة تُدخل البهجة والمسرة على الناظر إليها، ومن كثرة تكرارها أصبحت شيئاً مألوفاً في الحياة اليومية، ومن أمثلتها الألوان الجميلة التي نشاهدها خلال فقاعة الصابون عند النظر إليها في ضوء الشمس، أو قوس قزح الذي نشاهده بُعيد سقوط المطر، وخلال بقع الزيت الموجودة على أرصفة الشوارع المرصوفة. هذه المشاهد الخلابة هي في الواقع انعكاسات متعددة الألوان للضوء الساقط على فقاعة الصابون أو بقعة الزيت. لكن من الناحية الأخرى. فإن هذه المشاهد تُمثل مفاهيم ضوئية جديدة بالاهتمام والدراسة. ففي دراستنا للمرايا والعدسات والأجهزة الضوئية اعتمدنا نموذج البصريّات الهندسية، الذي على أساسه يُنظر إلى الضوء كشعاع (أو مجموعة أشعة) أو خطوط مستقيمة تنحني عند السطوح العاكسة أو الكاسرة. لكن هذا المفهوم الشعاعي للضوء يعجز عن تفسير سلوكات ضوئية كثيرة، ومن بينها الألوان في فقاعات الصابون والأغشية الزيتية. ولهذا كان لا بد من إيجاد مفهوم آخر للضوء يمكن أن يكسبه صفة أخرى غير شعاعية، يمكن على أساسها تفسير ظاهرة الألوان وغيرها، فكان أن ظهر المفهوم المموجي للضوء. فالأمواج وحدها القادرة على إنتاج هذا الطيف المتعدد الألوان بظاهرة تعرف بالتداخل. في هذا الفصل سندرس التداخل، أهم وأجمل الظواهر الضوئية. فعندما تتشابك الأمواج عند نقطة واحدة، فإن محصلة تفاعلها الكلي تعتمد على أطوارها وعلى ساعاتها أيضاً. عندما يمر الضوء خلال الثقوب أو حول العوائق، فإن الأشكال المتشكلة هي نتاج الطبيعة الموجية للضوء، ولا يمكن فهمها على أساس الأشعة. مثل هذه الآثار تصنف تحت عنوان «البصريّات الموجية».

سنتناول في هذا الفصل والفصل اللاحق عدة تطبيقات للبصريّات الموجية، من بينها محزرات الحيود، حيود الأشعة السينية، والتصوير المجسم.

(7 - 1) التداخل والمصادر المتشاكهة

في دراستنا للأمواج الكهرومغناطيسية (الفصل الأول من هذا الكتاب) اعتمدنا مفهوم الموجة الجيبية المفردة ذات التردد والطول الموجي المفردين. أما في البصريّات الموجية فالموجة الجيبية هي ميزة من ميزات الضوء

الأحادي (الضوء الوحيد اللون أو الوحيد الطاقة). رغم أن الموجة الأحادية اللون تماماً تظل شيئاً مثالياً. فالمصادر الشائعة للضوء، كالمصابيح الكهربائية المتوهجة أو اللهب، لا تُصدر ضوءاً أحادي اللون، بل توزيعاً مستمراً من الأطوال الموجية. ومع ذلك، يمكن الاقتراب عملياً من الضوء الأحادي، فبواسطة بعض المرشحات الضوئية يمكن حجز معظم الأطوال الموجية والسماح بالمرور لنطاق ضيق جداً منها، فمصابيح التفريغ الفازي، مثل مصباح بخار الزئبق، تصدر ضوءاً بطواقم متقطعة من الألوان، كل منها يشتمل على حزمة ضيقة من الأطوال الموجية. فالخط الأخضر الساطع في طيف مصباح بخار الزئبق يمتلك طولاً موجياً قدره 546.1 nm تقريباً بانتشار (انبساط) من رتبة $\pm 0.001 \text{ nm}$.

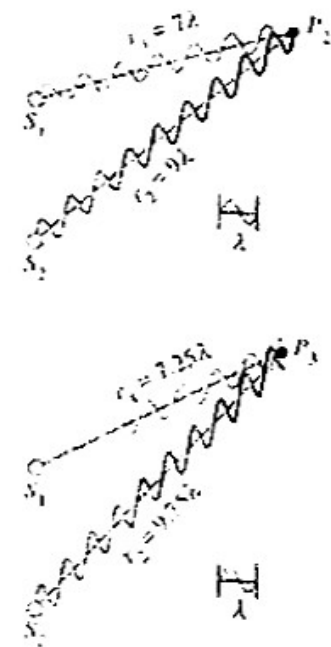
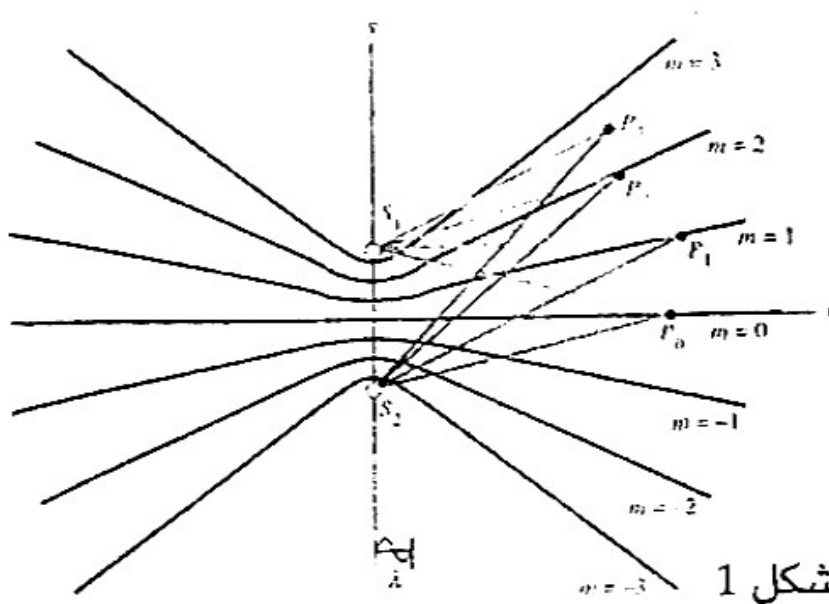
إن المصدر الضوئي الأحادي اللون في الوقت الحاضر هو الليزر، والنوع الشائع منه هو ليزر الهليوم - نيون، الباعث للضوء الأحمر بطول موجي 632.8 nm وبعرض خطي (نطاق الطول الموجي) من رتبة 0.000001 nm . وفي دراستنا الحالية واللاحقة سنفترض أن الضوء الذي نتعامل معه هو ضوء أحادي اللون.

إن عبارة «التداخل» تشير إلى أية حالة تتشابك فيها موجتان أو أكثر في الفضاء. وعندما يحصل التداخل فإن الإزاحة الكلية عند أية نقطة وفي أية لحظة من الزمن تتحدد وفقاً لمبدأ التراكب (الجمع) الخطي، الذي هو من أهم قوانين البصريات الفيزيائية على الإطلاق. وينص على «عندما تتشابك موجتان أو أكثر، فإن الإزاحة المحصلة عند أية نقطة وفي أية لحظة من الزمن قد توجد بجمع الإزاحات اللحظية، تلك التي يمكن أن تحصل عند هذه النقطة فيما لو كانت كل موجة بمفردها.»

إن مفردة «الإزاحة» تستخدم هنا بمعناها العام، فبالنسبة للأمواج على سطوح السوائل يقصد بها الإزاحة الفعلية للسطح فوق أو تحت مستواه العادي. وبالنسبة للأمواج الصوتية، تشير الإزاحة إلى تجاوز ضغط الموجة للضغط الجوي أو نقصانه عنه. أما بالنسبة للأمواج الكهرومغناطيسية، فهي تعني المركبة المميزة للمجال الكهربائي أو المغناطيسي.

لكي نقرب من جوهر مفهوم التداخل نعتبر مصدرين متطابقين للأمواج

الأحادية اللون، المنتشرة في الفضاء بمسافة معينة، تربطهما علاقة طورية ما بصورة دائمة، بمعنى أن الفرق الطوري بين المصدرين يساوي مقدار ثابت دائماً (نسبيتهما لاحقاً متطاوران أو في الطور). مثل هذان المصدران قد يكونا إشارتان في حوض التموج، مكبراً صوت يُنشِطان بواسطة نفس المضخم، هوائياً راديو يُغذيان بالقدرة بواسطة جهاز إرسال، ثقبان صغيران أو شقان في شاشة معتمة مُضاءان بنفس المصدر الضوئي الأحادي اللون. نضع المصدرين S_1 و S_2 بامتداد محور y وعلى مسافتين متساويتين من الأصل، كما هو موضح على الشكل 1. أ - نأخذ أية نقطة على محور x ، وبالتناظر فإن المسافتين من S_1 إلى P_0 ومن S_2 إلى P_0 متساويتان، وبالتالي، فإن الأمواج من المصدرين يلزمها زمنين متساويين للانتقال إلى P_0 . إن الأمواج التي تغادر S_1 و S_2 متطاورة تصل إلى P_0 متطاورة أيضاً. هذه الأمواج تجمع أزواجاً أزواجاً والإزاحة الكلية عند P_0 هي ضعف إزاحة كل موجة منفردة.



شكل 1 مصادر متطاورة. أ) منحنيان الشدة القصوى (تداخل بناء) للأمواج من مصدرين أحادي اللون، المسافة بينهما في هذا المثال 4λ . ب) يظهر التداخل البناء عندما يكون فرق المسار بين الموجتين اللتقيتين يساوي عدد صحيح من الأطوال الموجية، $m\lambda$. ج) التداخل التدميري يظهر عندما يكون فرق المسار نصف عدد صحيح من الأطوال الموجية.

وبالمثل، فإن المسافة من S_2 إلى النقطة P_1 أكبر منها من S_1 إلى P_1 بمقدار

طول موجي واحد تماماً. ولهذا فإن الموجة المنبثقة من S_1 تصل إلى P_1 قبل الموجة المنبثقة بنفس الوقت من S_2 بدورة واحدة، ومرة أخرى تصل الموجتان متطورتان، وبالنسبة للنقطة P_2 ، فإن فرق المسار يساوي طولين موجيين، ومرة أخرى فإن الموجتين تصلان متطورتان، وهلم جرا.

إن جميع السعات عند نقطة معينة عندما تصل الأمواج متطورة من مصدرين أو أكثر يدعى بالتداخل البناء أو التقوية (شكل 1 ب). فإذا كانت المسافة من S_1 إلى أية نقطة P هي r_1 ومن S_2 إلى P هي r_2 ، فإن شرط التداخل البناء هو أن يكون فرق المسار $\Delta = r_2 - r_1$ لأي مصدرين مضاعف صحيح للطول الموجي λ .

$$\Delta = r_2 - r_1 = m\lambda, \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 + \dots) \quad (7-1)$$

والنقاط التي تحقق هذا الشرط تقع جميعها على المنحنيات المبينة على الشكل 1 (أ)، كالنقاط $P_1, P_2, P_3, \dots$

وما بين هذه المنحنيات هناك طاقم آخر من المنحنيات التي يكون فرق المسار بالنسبة لها مساوياً لنصف عدد صحيح من الأطوال الموجية، بحيث أن الموجتين الواصلتين من المصدرين عند أية نقطة تقع على أحد هذه الخطوط، كالنقطة P_3 ، شكل 1 (أ)، تصلان خارج الطور بنصف دورة تماماً، فتصل قمة إحدى الموجتين بنفس الزمن الذي تصل فيه نظيرتها من موجة أخرى في الاتجاه المعاكس (من نصف الدورة المقابل)، شكل 1 (ج) لتكون السعة المحصلة هي الفرق بين سعتي الموجتين منفردتين، فإذا كانت سعتي الموجتين المنفردتين متساويتين، فإن السعة المحصلة تكون صفراً. هذا الشرط يدعى بالتداخل التدميري (الهدام). وشرطه:

$$\Delta = r_2 - r_1 = (m + \frac{1}{2})\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, + \dots) \quad (7.2)$$

والجزءان ب و ج من الشكل 1 يتوافقان مع العلاقتين الطوريتين للتداخلين البناء والهدام لموجتين.

(7-2) تداخل الشقين

تعتبر تجربة العالم الانجليزي توماس يونغ Thomas Young في العام 1800م

إحدى التجارب المبكرة لارائدة في تداخل الضوء. وفيها يحصل تداخل الضوء من مصدرين، كما أوضحنا في الفقرة السابقة. وأدوات يونغ التي استخدمها في تجربته هي الموضحة في الشكل 2.

يمر الضوء الأحادي اللون من شق ضيق S_0 (حوالي $1.0\mu m$) ليسقط على صفيحة ذات شقين ضيقين S_1 و S_2 بعرض لا يزيد على $1.0\mu m$ لكل منها، تفصلهما مسافة d ببضع ميكرومترات.

وطبقاً لمبدأ هايجنز Hygen's principle تنتشر جبهات موجية اسطوانية تتبع من الشق S_0 لتبلغ الشقين S_1 و S_2 وهي في الطور لأنها تقطع مسافات متساوية، ومن ثم فإن الأمواج من الشقين S_1 و S_2 ستكون دائماً في الطور، لذلك فإن S_1 و S_2 هما مصدران متشاكهان (شكل 2 ب)، لكن الأمواج الواصلة إلى النقطة P من هذين المصدرين ليست بالضرورة أن تكون في الطور، لأن ذلك يعتمد على فرق مساريهما $(r_2 - r_1)$ إلى P .

لتسهيل المسألة، نرض أن المسافة R من مستوي الشقين إلى الشاشة كبيرة جداً قياساً بالمسافة d بين الشقين بما يجعل من اعتبار الخطين من S_1 و S_2 إلى P متوازيين تقريباً، كما هو موضح على الشكل 2 ح. تحت هذه الشروط، فإن فرق المسار يساوي:

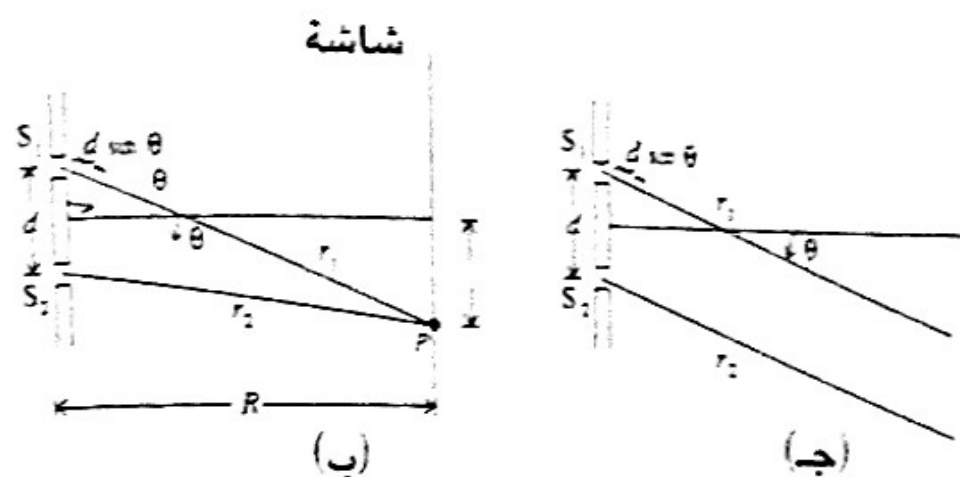
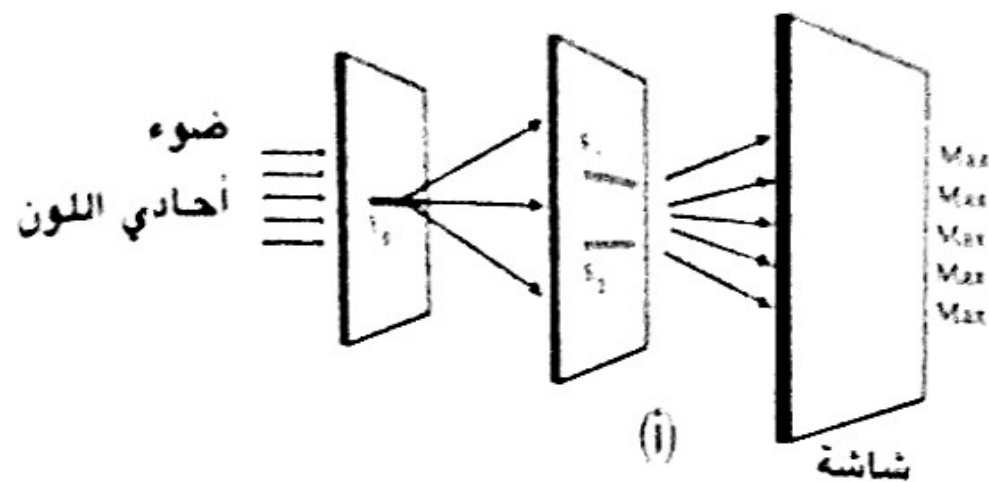
$$\Delta = r_2 - r_1 = d \sin\theta \quad (7 - 3)$$

وكما وجدنا في الفقرة (7 - 1)، فإن التداخل البناء يظهر عند النقطة P (بهيئة منطقة مضيئة على الشاشة) عندما يكون فرق المسار $d \sin\theta$ مساوياً لعدد صحيح من الأطوال الموجية، $m\lambda$ ، حيث $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$. وهكذا، فإن التداخل البناء يظهر عند زوايا θ التي بالنسبة لها:

$$d \sin\theta = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (7 - 40)$$

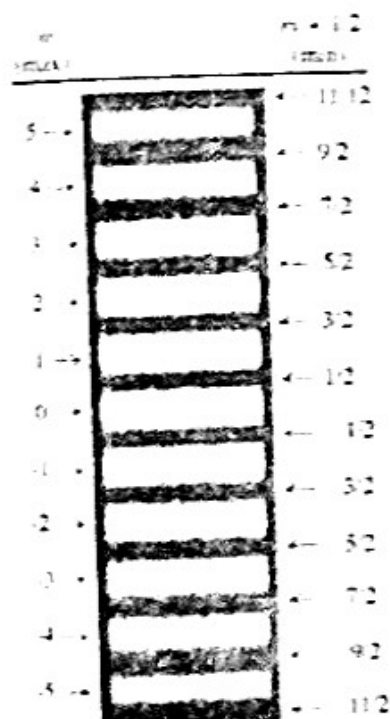
وبصورة مماثلة، فإن التداخل الهدام يظهر، مشكلاً مناطق مظلمة على الشاشة، عند النقاط التي بالنسبة لها يكون فرق المسار مساوياً لنصف عدد صحيح من الأطوال الموجية $(m + 1/2)\lambda$:

$$d \sin\theta = (m + \frac{1}{2})\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm \dots) \quad (7 - 5)$$



شكل 2: (أ) تداخل الأمواج الضوئية المارة خلال شقين. (ب) تحليل هندسي لتجربة يونغ. المشقوق أفقية وتبدو من الجانب في مقطع عرضي. (ج) تقريب هندسي عندما $d \ll R$.

وإذن، فإن شكلاً من الأشرطة المضيئة والمظلمة يظهر على الشاشة، كما توضحه الصورة الفوتوغرافية على الشكل 3.



شكل 3

شكل 3: أهداب تداخلية ناتجة بواسطة تجربة شقي يونغ.

موضع الهدب

يمكن اشتقاق تعبير لمواقع مراكز الأشرطة المضئية على الشاشة، وذلك بأن تقاس y على الشكل 2 (ب) من مركز الشكل التداخلي، بما يتطابق مع المسافة من مركز الشكل 2. فلتكن y_m المسافة من مركز الشكل التداخلي ($\theta = 0$) إلى مركز الهدب المضيء m ، وأن θ_m هي الزاوية التي ننظر بها إلى الهدب، حينذاك سيكون:

$$y_m = R \tan \theta$$

وفي التجربة المدروسة والتجارب المماثلة لها تكون y_m صغيرة جداً قياساً بـ R ، وبالتالي، فإن $\tan \theta$ صغير جداً ويقترب من $\sin \theta$ ،

$$y_m = R \sin \theta$$

وبالمقارنة مع المعادلة (4 - 7)، نحصل على:

$$y_m = R \frac{m\lambda}{d} \quad (7 - 6)$$

وفي التجارب العملية يمكن قياس R و d ، والشئ نفسه بالنسبة لمواقع الأهداب المضئية، ولهذا، فإن هذه التجربة هي قياس مباشر للأطوال الموجية للضوء.

قياس المسافة بين هدبية (Δ)

بالمماثلة مع المعادلة (6 - 6)، فإن موقع الهدب المضيء y هو:

$$y_{(m+1)} = R \frac{(m+1)\lambda}{d} \quad (7 - 6')$$

وبطرح المعادلة (7 - 6) من المعادلة (7 - 6')، نحصل على:

$$\Delta = y_{(m+1)} - y_{(m)} = R \frac{\lambda}{d} \quad (7 - 7)$$

وهي لا تعتمد على رتبة أو موضع الهدب، أي أنها ثابتة لجميع أهداب الشكل التداخلي وتتناسب عكسياً مع المسافة بين الشقين d .

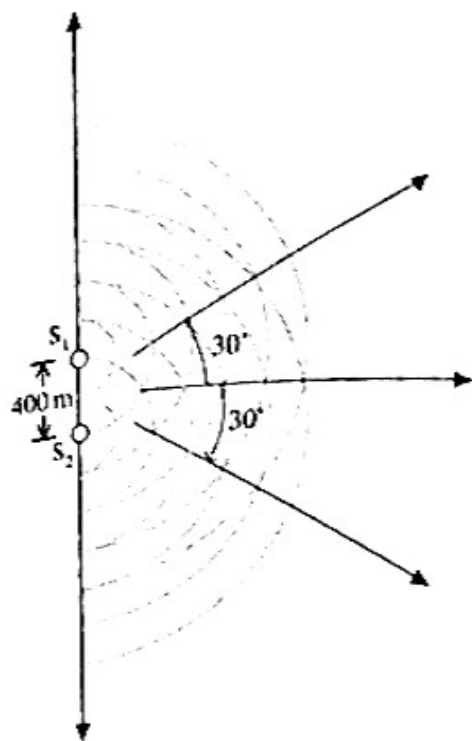
مثال 1.... في تجربة تداخل الشقين، وجد أن الهدب المضيء الثالث مُزاحاً بمقدار 7.5 mm عن مركز الهدب المركزي.

فإذا كانت المسافة بين الشقين 0.20mm ومستواهما يبعد عن الشاشة بمسافة 1.0mm، فما هو الطول الموجي للضوء المستخدم؟

الحل: بتطبيق المعادلة (6 - 7) بالنسبة لـ $m=3$ نجد:

$$\lambda = \frac{y_{md}}{mR} = \frac{(7.5 \times 10^{-1} \text{m})(0.20 \times 10^{-1} \text{m})}{(3)(1.0 \text{m})} = 500 \times 10^{-9} \text{m} = 500 \text{nm}$$

مثال 2. محطة راديو تعمل بتردد $1500 \text{kHz} = 1.5 \text{MHz}$ ولها هوائيان ثنائيان متطابقان يبعدان عن بعضهما بمسافة 400m ويتذبذبان في الطور. ما هي الاتجاهات التي تكون فيها شدة الإشعاع الشكل التداخلي المحصل أكبر ما يمكن وأقل ما يمكن؟



شكل 4

شكل 4 هوائيا راديو ينثران (يبثان) في الطور. وتظهر اتجاهات الشدة العظمى.

الحل: من الشكل 4 أعلاه يبدو الهوائيان مطابقان للمصدرين S_1 و S_2 في الشكل 2. وعليه، فإن الاتجاهات التي تأخذ فيها شدة الإشعاع قيمها العظمى تتحدد بقيمة θ التي عندها يصبح فرق المسار صفراً أو عدداً صحيحاً من الأطوال الموجية. كما يتبين ذلك من المعادلة (4 - 7):

$$\sin \theta = \frac{m\lambda}{d} = \frac{m}{400 \text{m}} (c/f) = \frac{m}{400 \text{m}} \left(\frac{3 \times 10^8 \text{m/s}}{1.5 \times 10^6 \text{s}^{-1}} \right)$$

$$\sin \theta = \frac{m}{2}, \theta = \sin^{-1} \left(\frac{m}{2} \right), m=0, \pm 1, \pm 2, \pm \dots$$

$$\theta = 0, \pm 30^\circ, \pm 90^\circ$$

أما قيم m الأكبر من $+2$ أو الأقل من -2 ، فهي تعطينا قيماً لـ $\sin =$ أكبر من 1 أو أقل من -1 ، وهي قيم غير ممكنة. إذن ليس هناك اتجاهات يكون بالنسبة لها فرق المسار مساوياً لثلاثة أطوال موجية أو أكثر. كما هو مُعطى بالمعادلة (7.4). وهكذا فإن قيم m من رتبة ± 3 لا معنى فيزيائي لها في هذا المثال.

أما زوايا الحد الأدنى للشدة (تداخل هدام)، فهي تعطى بالمعادلة (7.5) بقيم $m = -2, -1, 0, 1$ ، ومنه، فإن:

$$\sin \theta = \frac{m + \frac{1}{2}}{d} \lambda = \frac{m + \frac{1}{2}}{2} = \frac{m}{2} + \frac{1}{4}$$

$$\theta_1 = \sin^{-1}(-\frac{2}{2} + \frac{1}{4}) = \sin^{-1}(-0.75) = -48.6^\circ (m = -2)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1}(-\frac{1}{2} + \frac{1}{4}) = \sin^{-1}(-0.25) = -14.5^\circ$$

$$\theta_3 = \sin^{-1}(0 + \frac{1}{4}) = 14.5^\circ$$

$$\theta_4 = \sin^{-1}(\frac{1}{2} + \frac{1}{4}) = 48.6^\circ$$

أما قيم m الأخرى، فلا معنى فيزيائي لها.

(7 - 3) توزيع شدة الشكل التداخلي

في الفقرة السابقة وجدنا اتجاهات الشدة العظمى والدنيا في تداخل الشقين. والآن نريد إيجادها عند أية نقطة في الشكل التداخلي. لهذا الغرض يجب أن نوحّد المجالين المتغيرين جيبياً (الواردين من المصدرين) عند نقطة P في الشكل الإشعاعي، آخذين في الحسّاب الاختلاف الطوري للموجتين عند نقطة P ، الناشئ عن فرق مساري الموجتين. حينئذٍ ستتناسب الشدة طردياً مع مربع سعة المجال الكهربائي المحصل $(I \propto E^2)$.

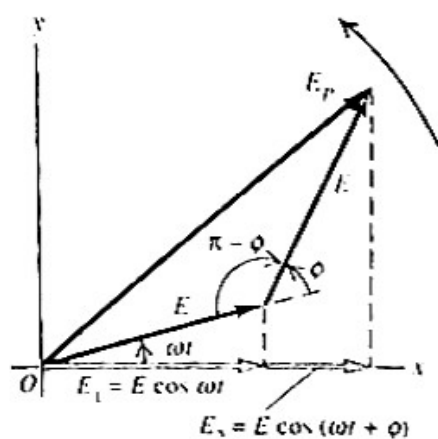
نفرض أن الدالتين الجيبيتين (المطابقتين للموجتين الواردين من المصدرين) تمتلكان سعة متساوية E_0 وأن مجاليهما $\vec{E}$ يقعان بامتداد نفس الخط (يمتلكان نفس الإستقطاب). هذا يفترض أن يكون المصدران متطابقين، مع إهمال الفرق السعوي البسيط الناجم عن لا مساواة طولي مسار الموجتين، نجد من المعادلة (18 - 1)، أن كل مصدر يعطي نفسه شدة قدرها $\frac{1}{2} \epsilon_0 c E_0^2$ عند النقطة P . فإذا كان المصدران في الطور فإن الموجتين الواصلتين إلى P تختلفان في الطور بمقدار يتناسب مع الفرق في طولي مساريهما $(r_1 - r_2)$ ، فإذا كانت الزاوية الطورية بين هاتين الموجتين الواصلتين إلى P هي ϕ ، فإن المجالين الكهربائيين المترابكان عند P قد يكونا:

$$E_1 = E_0 \cos \omega t,$$

$$E_2 = E_0 \cos(\omega t + \phi) \quad (7-8)$$

إن تراكب المجالين عند P هو دالة جيبية بسعة محصلة E_0 تعتمد على سعتي المجالين، وعلى الفرق الطوري بينهما. فإذا كانت سعة كل من الموجتين المتراكبتين E_0 والفرق الطوري بينهما ϕ معلومين، فإنه يمكن معرفة شدة الموجة المحصلة I_0 المتناسبة طردياً مع E_0^2 .

العلاقة بين شدة الموجة المحصلة I_0 والفرق الطوري بين المصدرين المتداخلين لجمع دالتين موجيتين جيبيتين بينهما فرق طوري، نستخدم تمثيل المتجه الدوار، الذي مسقطه على المحور الأفقي يمثل القيمة الآتية للدالة الجيبية. في الشكل 5، E_1 هي المركبة الأفقية للمتجه الدوار الممثل للموجة من المصدر S_1 ، و E_2 هي المركبة الأفقية للمتجه الدوار الممثل للموجة من S_2 . هذان المتجهان الدواران لهما نفس المقدار، ولكن E_2 تتقدم E_1 بالطور بزاوية ϕ ، كما هو مبين في الشكل 5.



شكل 5

شكل 5 تخطيط المتجه الدوار المستخدم لإيجاد السعة E_0 للمجال الكهربائي $\vec{E}_0$ عند نقطة P حيث تتراكب الأمواج ذات السعة المتساوية E_0 والفرق الطوري ϕ .

كلا المتجهان الدواران يدوران بعكس اتجاه عقارب الساعة بسرعة زاوية ثابتة ω ، ومجموع مسقطيهما على المحور الأفقي في أية لحظة من الزمن يعطي القيمة الآتية للمجال الكلي $\vec{E}$ عند النقطة P. وبالتالي، فإن السعة E_0 للموجة الجيبية المحصلة عند P هي مقدار المتجه المتحرك المرموز له بـ $\vec{E}_0$. ولإيجاد E_0 نستخدم قانون جيبس التمام، وحقيقة أن $\cos(\pi - \phi) = -\cos\phi$ ، نجد أن:

$$E_0^2 = E_0^2 + E_0^2 + 2E_0^2 \cos(\pi - \phi) = 2E_0^2 + 2E_0^2 \cos\phi = 2E_0^2(1 + \cos\phi)$$

وباستخدام المتطابقة $1 + \cos \phi = 2 \cos^2 \phi/2$ نحصل على:

$$E_{\theta}^2 = 4E_0^2 \cos^2 \phi/2 \quad (7-9)$$

عندما تكون الموجتان في الطور، فإن $\phi = 0$ ، وبالتالي، فإن $E_{\theta} = 2E_0$ ، وعندما تكونا خارج الطور بنصف دورة تماماً، فإن $\phi = \pi \text{ rad} = 180^\circ$ ، وبالتالي، فإن $\phi/2 = 90^\circ$ ، و $\cos \frac{\phi}{2} = 0$ ، وأن $E_{\theta} = 0$. وهكذا، فإن تراكب موجتان جيبيتان لهما نفس السعة والتردد، ولكن بينهما فرق في الطور، يعطينا موجة جيبية محصلة بسعة تتراوح بين 0 وضعف السعة البدئية لأي من الموجتين المتراكبتين وذلك اعتماداً على الفرق الطوري ϕ بينهما.

الآن لكي نحصل على الشدة (I) عند نقطة P نستعين بحقيقة أن شدة الموجة الكهرومغناطيسية I تتناسب مع مربع سعة مجالها الكهربائي E_0^2 :

$$I = \frac{1}{2\mu_0 C} E_0^2 \quad (7-10)$$

إن النسبة بين شدتي موجتين ضوئيتين يمكن التعبير عنها بوصفها النسبة بين مربعي سعتي مجاليهما الكهربائيتين. فإذا كانت I_0 هي شدة الموجة المحصلة عند النقطة P، و I_{θ} هي الشدة التي تؤثر بها كل موجة منفردة، حينذاك سيكون لدينا:

$$\frac{I_{\theta}}{I_0} = \left(\frac{E_{\theta}}{E_0} \right)^2 \quad (7-11)$$

وبالتعويض عن E من المعادلة (7-9)، نحصل على:

$$I_{\theta} = 4I_0 \cos^2 \frac{\phi}{2} \quad (7-12)$$

ومنه نلاحظ أن شدة الموجة المحصلة عند أية نقطة P تتغير من الصفر (بالنسبة للنقطة التي عندها تكون $\phi = \pi$) إلى أربعة أمثال شدة الموجة المنفردة (بالنسبة للنقطة التي تكون عندها $\phi = 0$).

العلاقة بين فرق الطور ϕ وفرق المسار Δ

يرتبط الفرق الطوري ϕ بين المجالين الكهربائيين للموجتين الضوئيتين المتراكبتين بهندسة الحالة الموجودة فيها الموجتان، أي يتناسب مع الفرق في طول المسارين من المصدرين إلى النقطة P. فعندما يكون فرق المسار مساوياً

الطول الموجي واحد، فإن فرق الطور ϕ يكون مساوياً لدورة واحدة وتكون $\phi = 2\pi \text{ rad} = 360^\circ$ وعندما يكون فرق المسار مساوياً لنصف طول موجي $\lambda/2$ تكون $\phi = 180^\circ$ وهلم جرا، وبمذه، فإن نسبة فرق الطور ϕ إلى 2π تساوي نسبة فرق المسار $(r_2 - r_1)$ إلى الطول الموجي λ :

$$\frac{\phi}{2\pi} = \frac{r_2 - r_1}{\lambda} \quad (7-13)$$

وهكذا، فإن فرق المسار $r_2 - r_1$ يسبب فرقاً في الطور يعطى بالعلاقة:

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (r_2 - r_1) = K(r_2 - r_1) \quad (7-14)$$

حيث K هو العدد الموجي ويساوي $K = \frac{2\pi}{\lambda}$.

إذا كانت المادة في الفضاء بين المصدرين والنقطة P أي شيء آخر غير الفراغ، فإننا يجب أن نستخدم الطول الموجي λ في المادة في المعادلة (7-14). فإذا كان للمادة معامل إنكسار n فإن الطول الموجي فيها λ يساوي الطول الموجي في الفراغ λ_0 مقسوماً على معامل إنكسار المادة n :

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad \text{و} \quad K = nK_0 \quad (7-15)$$

وبالتعويض عن فرق المسار $r_2 - r_1$ من المعادلة (7-3) في المعادلة (7-14)، نحصل على:

$$\phi = K.d \sin \theta = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta \quad (7-15)$$

ولو عوضنا عن قيمة ϕ هذه في المعادلة (7-12)، حصلنا على:

$$I_0 = 4I_0 \cos^2 \left(\frac{2\pi}{2\lambda} d \sin \theta \right) = 4I_0 \cos^2 \frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta \quad (7-16)$$

إن الاتجاهات التي تظهر فيها هذه الشدة بأعظم قيمها هي عندما تكون قيمتا الجيب تمام ± 1 ، وهذا يعني أن:

$$\phi = m\pi \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm \dots) \quad (6-17)$$

$$\frac{\pi d \sin \theta}{\lambda} = m\pi \quad \text{أو أن:}$$

$$d \sin \theta = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm \dots) \quad (7-18)$$

وهذا هو نفس شرط التداخل البناء الذي عبرنا عنه في العلاقة (7-4).

في الفقرة السابقة سبق لنا أنه بالإمكان وصف موقع الأهداب المضئية بالاستعانة بالأحداثي y (6 - 7). وذلك تأسيساً على حقيقة أن $R \gg y$. في الحالة ذاتها، إن $\sin\theta$ يساوي تقريباً y/R . وهذا يساعدنا على الحصول على أبسط تعبير لشدة التوزيع

$$I = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\pi dy}{R\lambda}\right) \quad (7 - 19)$$

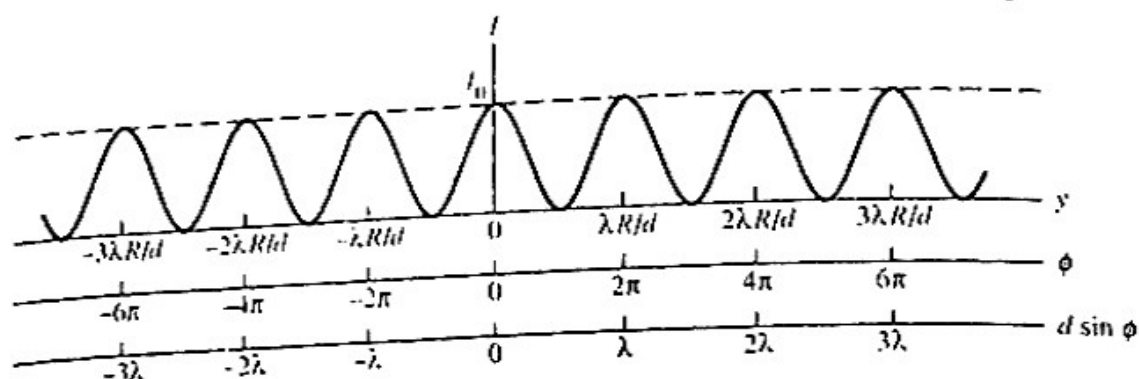
الذي ينتج منه، وفقاً للمعادلة (7 - 17) أن قيم y التي تحدد مواقع الأهداب المضئية بالنسبة إلى مركز الشكل التداخلي هي:

$$\frac{\pi dy}{R\lambda} = m\pi$$

ومنه، فإن

$$y_m = \frac{mR\lambda}{d} \quad (7 - 20)$$

وهي نفس العلاقة (6 - 7) التي حصلنا عليها سابقاً. فإذا رسمنا شكلاً بيانياً يبين اعتماد الشدة I_θ على المتغيرات الممكنة في تعبير الشدة (7 - 16) y ، ϕ ، و $d\sin\theta$ ، فسيكون بالهيئة:



شكل 6

شكل 6: التوزيع الشدي في شكل التداخل من شقين متطابقين وتظهر فيه ثلاثة مقاييس تبين المسافات y التي تحدد مواقع الأهداب المضئية (قمم الشدة بما فيها القمة الرئيسية $y = 0$) وفرق الطور ϕ بين الموجتين المتداخلتين في كل نقطة من نقاط الشكل التداخلي، وفرق المسار $d\sin\theta$ معبراً عنه بمضاعفات λ . فالقمم تظهر وفقاً للشروط (6 - 17)، (6 - 18)، و (6 - 20).

إن القمم في الشكل 6 تمتلك جميعها نفس الشدة، في حين أن الشدد في الصورة الفوتوغرافية (شكل 3) تبدو متخامدة كلما ابتعدنا عن مركز الشكل

التداخلي، وهذا ما سوف نفسره في الفصل القادم الخاص به الحيود.
 مثال 3 نفرض أن المصدرين في الشكل 4 كانا هوائيا محطة بث راديوي
 متطابقين تفصلهما مسافة 10 m ويبثان بتردد $f = 60 \text{ MHz}$ في جميع
 الاتجاهات. وكانت الشدة على مسافة 700 m في الاتجاه $+x$ (طبقاً لـ $\theta = 0$
 في الشكل 2) تساوي $I_0 = 0.02 \text{ W/m}^2$ (ما مقدار الشدة في
 الاتجاه $\theta = 4^\circ$ ؟

(ب) بأي اتجاه بالقرب من $\theta = 0$ تصبح الشدة مساوية لنصف قيمتها
 العظمى $I_{\theta} = \frac{4I_0}{2}$ (ج) بأي اتجاه تصبح الشدة صفراً؟

الحل: بسبب ضخامة بعد الشاشة عن نمط التداخل (700 m) قياساً
 بالمسافة بين الهوائيين (10m)، يمكن افتراض أن سعتي الموجتين متساويتين
 في جميع الاتجاهات. ولأن θ ليست صغيرة لذا لا يمكننا استخدام التقريب
 (19 - 6).

نجد أولاً الطول الموجي $\lambda = c/f = 3 \times 10^8 \text{ m/s} / 6 \times 10^6 \text{ s}^{-1} = 5.0 \text{ m}$
 نطبق المعادلة (16 - 6). نجد:

$$\begin{aligned} I_{\theta=4} &= 4I_0 \cos^2\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin\theta\right) = (0.02 \text{ W/m}^2) \cos^2\left(\frac{\pi(10\text{m})}{(5.0\text{m})} \sin\theta\right) \\ &= (0.02 \text{ W/m}^2) \cos^2(2\pi \text{ rad} \sin 4^\circ) \\ &= (0.02 \text{ W/m}^2) \cos^2(2\pi \text{ rad}(0.07)) \\ &= (0.02 \text{ W/m}^2) \cos^2(0.14 \pi \text{ rad}) \\ &= (0.02 \text{ W/m}^2) \cos^2(0.14(180^\circ)) \\ &= (0.02 \text{ W/m}^2) \cos^2(25.2) \\ &= (0.02 \text{ W/m}^2)(0.9) = 0.018 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

وهي تشكل حوالي 17% من قيمتها العظمى (عند $\theta = 0$).

(ب) تساوي الشدة نصف قيمتها العظمى $(\frac{1}{2} \frac{4I_0}{2})$ عندما يكون $\cos \frac{\phi}{2} = \pm \frac{1}{\sqrt{2}}$ أي عندما:

$$\left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{d \sin\theta}{2}\right) = \frac{\pi}{4}, \sin\theta = \frac{1}{8}, \theta = \pm 7.2^\circ$$

هذا الشرط يتحقق أيضاً عندما: $\sin\theta = \pm 3/8, \pm 5/8, \dots$

(ج) تصبح الشدة صفراً عندما: $\cos(2\pi d \sin\theta) = 0$ أي عندما

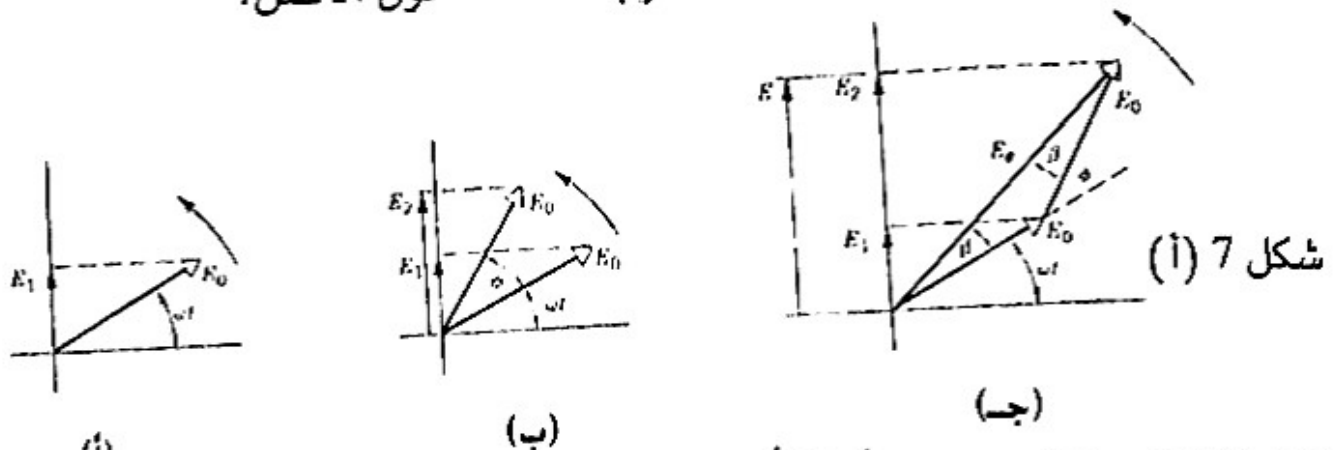
$$2\pi d \sin \theta = \pm \frac{\pi}{2}, \pm \frac{3\pi}{2}, \pm \frac{5\pi}{2}, \dots$$

$$\theta = \pm 14.5^\circ, +48.6^\circ \quad \text{أو أن:}$$

(7 - 4) جمع الاضطرابات الموجية

عندما يتطلب الأمر جمع أكثر من موجتين (اضطرابين موجيين) تصبح الطريقة الجبرية التي استخدمناها لحساب الموجة المحصلة لتداخل الشقين غير عملية لصعوبتها. في هذه الحالة نستخدم الطريقة البيانية المبنية على المتجهات الدوارة.

إن الاضطراب الجيبي الموجي كالذي وصفناه في المعادلة (8 - 7) يمكن أن يُمثل بيانياً باستخدام المتجه الدوار. ففي الشكل 7 (أ) يدور المتجه الدوار الذي مقداره E_0 حول المركز بعكس عقرب الساعة بتردد زاوي ω . وبمسقط هذا المتجه الدوار على المحور الرأسي يُمثل الاضطراب الموجي المختار (8 - 7) E_1 . أما الاضطراب الموجي الثاني E_2 في المعادلة (8 - 7)، وله نفس السعة E_0 ولكن بفرق في الطور قدره ϕ بالنسبة لـ E_1 ، فيُمثل بيانياً (شكل 7 ب) كمسقط للمتجه الدوار الثاني على المحور الرأسي الذي يمتلك نفس المقدار E_0 ويعمل زاوية ϕ بالنسبة للمتجه الدوار الثاني. إن مجموع $\vec{E}_1$ و $\vec{E}_2$ هو $\vec{E}$ وهو مجموع مسقطي المتجهين الدوارين على المحور الرأسي. وهذا يبدو أكثر وضوحاً إذا أعدنا رسم المتجهين كما في الشكل 7 ج، واضعين ذيل أحد السهمين عند رأس السهم الآخر، محافظين على فرق الطور المميز وجاعلين مجمل المجموعة تدور بعكس اتجاه عقرب الساعة حول الأصل.



شكل 7 (أ) الموجة المتغيرة زمنياً E_1 ممثلة بمتجه دوار أو طور دوار. (ب) موجتان E_1 و E_2 مختلفتان في الطور بمقدار ϕ . (ج) طريقة أخرى لرسم (ب).

في الشكل 7 ج، يمكن اعتبار E كمسقط للمتجه الدوار ذي الطول E_0 على المحور الرأسي. والذي هو المجموع الاتجاهي للمتجهين الدوارين ذاتا المقدار E_0 . ومن ذات الشكل. يمكن أن نكتب هذا المسقط بالصورة:

$$E_t = E_0 \sin(\omega t + B) \quad (7 - 21)$$

إن المهم في معظم مسائل البصريات هو السعة المحصلة E_0 وليس تغيرها الزمني. ذلك لأن العين ومعظم أجهزة القياس تستجيب للشدة المحصلة للضوء ولا تسجل التغيرات الزمنية الفجائية. لايجاد السعة المحصلة E_0 في الشكل 7 ج، ولأن الزاوية الخارجية تساوي مجموع الزاويتين الداخليتين المقابلتين لها (B و B) في المثلث الذي ساقاه E_0 وقاعدته E_0 . فإن $B = \frac{1}{2}\phi$.

ومن الشكل 7 ج أيضاً ومن قانون جيب التمام. نجد. بعد أن ننزل عموداً من رأس المثلث المتساوي الساقين لينصف القاعدة E_0 . إن:

$$E_0 = 2E_0 \cos \beta = 2E_0 \cos \frac{\phi}{2} \quad (7 - 22)$$

في الحالة الأكثر عمومية قد نجد أنفسنا إزاء مسألة إيجاد المحصلة لأكثر من اضطرابين موجيين جيبيين متغيرين. لهذا الغرض نتبع الطريقة العامة التالية:

1. ننشئ سلسلة المتجهات الدوارة الممثلة للدوال لنجمعها. نرسمها نهاية لنهاية. أي نرسم الواحد منها حيث ينتهي سابقه. مع المحافظة على خاصية العلاقات الطورية بين المتجهات الدوارة المتجاورة.
2. ننشئ مجموع أسهم هذه المتجهات الدوارة بطريقة تماثل مجموع المتجهات. وطول المتجه الدوار المحصلة يعطي سعة المجال الكهربائي. إن الزاوية بين المتجه الدوار المحصلة وهذا والمتجه الدوار الأول هي B . وهي طور المحصلة بالنسبة لطور المتجه الدوار الأول. وتعطى بالعلاقة:

$$\beta = \frac{\phi + 2\phi + 3\phi + \dots + n\phi}{n} \quad (7 - 23)$$

حيث n عدد المتجهات الدوارة.

أما طول المتجه الدوار المحصلة فهو سعة المجال الكهربائي (الاضطراب المحصلة) ويعطى بالعلاقة:

تراكب الأمواج التي ليست في الطور

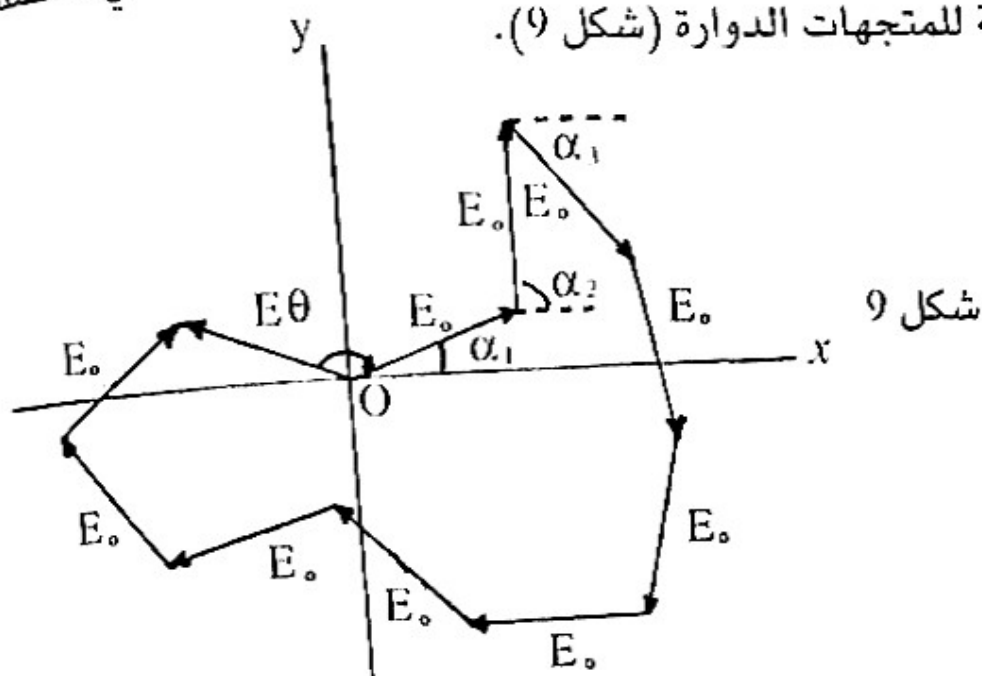
في الحالة عندما لا يكون هناك فرقاً طورياً ثابتاً (ϕ) بين الاضطرابات الموجية المتتالية، المتساوية في التردد والسعة والمتحركة بنفس الاتجاه، فإن كل موجة تسبق الأخرى أو تتأخر عنها بزاوية ما تحددها الصدفية البعثة. فإن طول المتجه الدوار المحصلة (سعة الاضطراب المحصلة) يعطى بالعلاقة:

$$E_1 = \sqrt{n} E_0 \quad (7-25)$$

أما الزاوية التي يصنعها المتجه الدوار المحصلة مع المتجه الدوار الأول (زاوية الاضطراب الموجي المحصلة B)، فهي:

$$\beta = \tan^{-1} \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (7-26)$$

حيث Δy هي محصلة المركبات الرأسية للمتجهات الدوارة، و Δx هي محصلة المركبات الأفقية للمتجهات الدوارة (شكل 9).



شكل 9 محصلة عشرة متجهات دوارة (تمثل عشر دوال) بأطوار عشوائية وبالتعويض عن E_0 و β من المعادلتين (7-25) و (7-26)، في المعادلة (7-21)، نحصل على الاضطراب الموجي المحصلة لعدد ($n = 9$) من الاضطرابات الموجية العشوائية الأطوار α :

فالاضطراب المحصلة هو موجة جيبية أيضاً، لها نفس التردد الزاوي w وتتحرك بنفس الاتجاه مع الأطوار الدوارة المتراكبة (مع اتجاه عقرب الساعة

أو عكس اتجاه عقرب الساعة).
في الحالة، عندما لا تكون أطوال المتجهات الدوارة متساوية، فإن طول المتجه الدوار المحصلة (سعة الاضطراب الموجي المحصلة) تعطى بالعلاقة:

$$E_{\theta} = \sqrt{(\Delta y)^2 + (\Delta x)^2} \quad (6 - 27)$$

وبالتعويض عن E_{θ} و B من المعادلتين (7 - 27) و (7 - 26)، على التوالي، في المعادلة (6 - 21)، نجد الموجة المحصلة (الاضطراب الموجي المحصل) لتراكب الأمواج غير الموجودة في الطور وغير متساوية السعات.

مثال 5 أوجد، بطريقة الرسم، محصلة الاضطرابات الموجية التالية:

$$E_1 = E_0 \sin wt, E_2 = E_0 \sin (wt + 15^\circ),$$

$$E_3 = E_0 \sin (wt + 25^\circ), E_4 = E_0 \sin (wt + 55^\circ)$$

الحل: هنا أيضاً يمكننا استخدام طريقة المتجه الدوار أيضاً، لكن بالنسبة لاضطرابات لا ترتبط مع بعضها بزاوية طور واحدة، بل بزاويا عشوائية $(30^\circ, 10^\circ, 15^\circ)$. نرسم المتجه الدوار الأول الممثل للدالة E_1 بزاوية wt مع محور x الموجب. ومن نهايته (من رأسه) نرسم المتجه الدوار الثاني بزاوية $(wt + 15^\circ)$ مع محور x ، والثالث بزاوية $(wt + 25^\circ)$ مع محور x ، والرابع بزاوية 55° مع محور x (شكل 10).

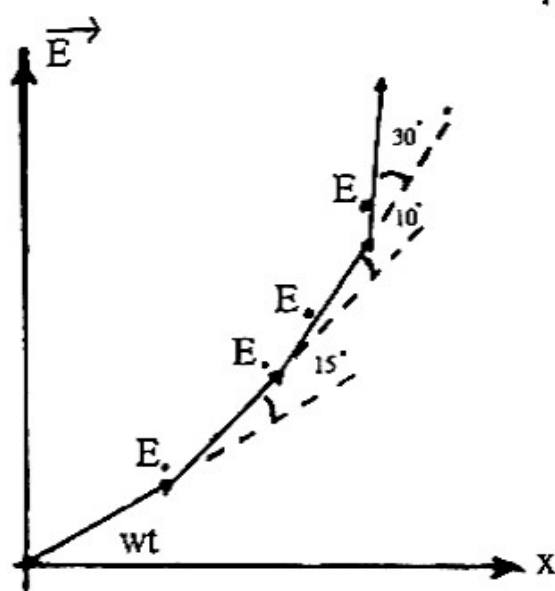
لإيجاد طول المتجه الدوار المحصلة E_0 نستخدم المعادلة (6 - 25):

$$E_{\theta} = \sqrt{4} E_0 = 2 E_0$$

ولإيجاد طورها نستخدم المعادلة (6 - 26).

لهذا نجد المركبات الرأسية والأفقية للمتجهات الدوارة.

شكل 10



شكل 10 جمع الاضطرابات الموجية غير متساوية الطور

$$\Delta y = E_0 \sin(0) + E_0 \sin 15^\circ + E_0 \sin 25^\circ + E_0 \sin 55^\circ$$

$$= 0 + 0.258E_0 + 0.42E_0 + 0.82E_0 = 1.5E_0$$

$$\Delta x = E_0 \cos(0) + E_0 \cos 15^\circ + E_0 \cos 25^\circ + E_0 \cos 55^\circ$$

$$= E_0 + 0.965E_0 + 0.91E_0 + 0.57E_0 = 3.44E_0$$

ومنه فإن:

$$\beta = \tan^{-1} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \tan^{-1} \frac{1.5}{3.44} = 23.56^\circ$$

ومنه، فإن الاضطراب الموجي المحصل (21 - 6) هو:

$$E_t = 2 E_0 \sin (wt + 23.56^\circ)$$

مثال 6 نفرض أن سعات الاضطرابات الموجية في المثال 5 كانت غير متساوية، بل تتضاعف تصاعدياً ($E_0, 2E_0, 4E_0, \dots$)، فما هو الاضطراب الموجي المحصل؟

الحل: بالنسبة لطور الاضطراب الموجي المحصل، فنجد باستخدام نفس المعادلة (26 - 6)، وهو نفسه كما في المثال 5. أما طول المتجه الدوار المحصلة (سعة الاضطراب الموجي المحصلة) فنجد باستخدام المعادلة.

$$E_0 = \sqrt{(1.5E_0)^2 + (3.44E_0)^2} = 3.75E_0 \quad (27 - 7)$$

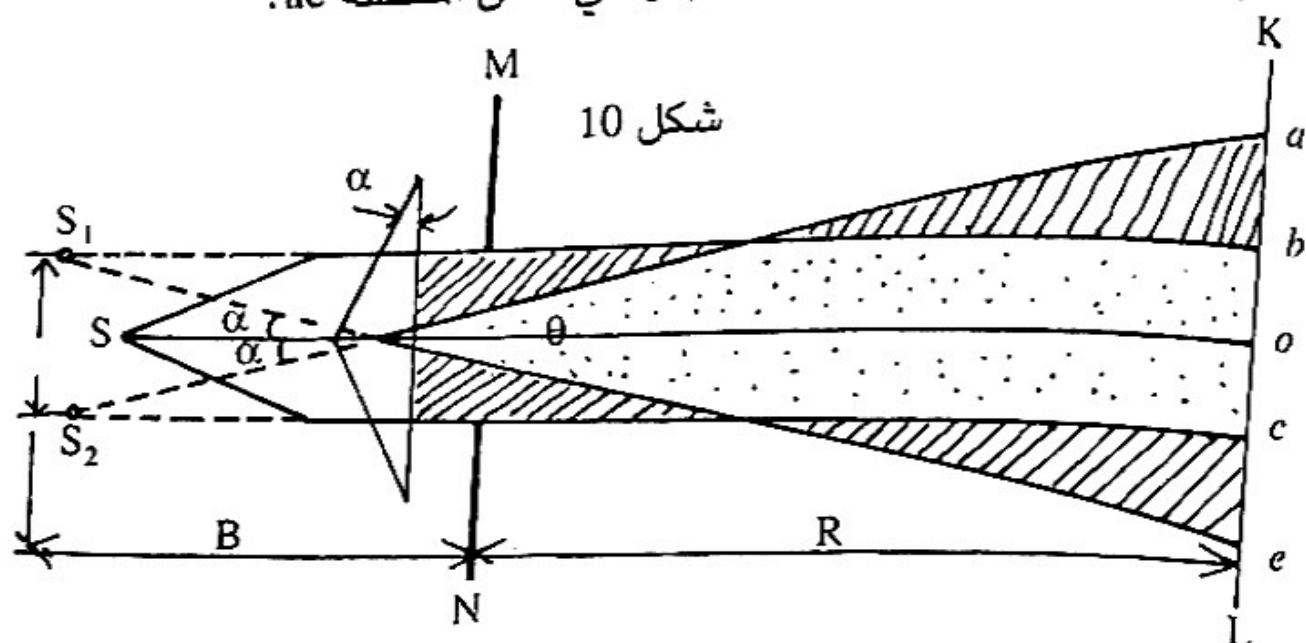
ولذلك فإن الموجة المحصلة هي، وفقاً للمعادلة (21 - 6):

$$E_t = 3.75 E_0 \sin (wt + 20.67^\circ)$$

(7 - 5) منشور فرنل المزدوج

فكرة عمل منشور فرنل المزدوج مبنية على تجزئة جبهة الموجة الساقطة إلى جزئين، حيث ينسكّر الضوء المنبعث من المصدر S (شكل 10) مكوناً حزمتين متراكبتين ac (المنشور الأسفل) و bc (المنشور الأعلى). وبهذا يماثل عمل منشور فرنل المزدوج عمل شقا يونغ (شكل 2 أ) بالحصول على حزم ضوئية متماسكة. ومنشور فرنل، فوق كل ذلك، جاء اثباتاً لصحة وجهة نظر يونغ، بأن الأهداب التي شاهدها في تجربته - تجربة الشقين - كانت فعلاً أهداب تداخلية وليست مجرد تحويلات معقدة حصلت للضوء الساقط بواسطة

الشقين. فإذا وضع حاجزان M و N، كما هو مبين على الشكل 10، فإن أهداب التداخل تشاهد في المنطقة bc فقط. وإذا أزيل الحاجزان من مسار الضوء المنكسر، فإن الحزمتين تتراكبان في كامل المنطقة ae.



شكل 10 رسم تخطيطي لتجربة منشور فرنل المزدوج.

ولو أُستبدلت الشاشة KL بلوح فوتوغرافي، لحصلنا على صورة تظهر في مركزها أهداب متقاربة ناتجة عن التداخل، وعند حوافها تظهر أهداب عريضة ناتجة عن الحيود الحاصل بواسطة رأسي المنشورين اللذان يعملان كحواف مستقيمة.

بهذه التجربة استطاع فرنل الحصول على التداخل دونما اعتماد على الحيود لتجميع الحزمتين المتداخلتين.

وكما في تجربة يونغ، فإن جميع القوانين التي توصلنا إليها تصح أيضاً لمنشور فرنل المزدوج.

قد يكون الهدف المباشر لكل من ترتيب يونغ ومنشور فرنل المزدوج هو إيجاد طول موجة الضوء المستخدم λ . بمعنى أن الصورتين التقديريتين S_1 و S_2 في منشور فرنل تقومان في الواقع بعمل شقي يونغ، ولكن كمصدرين تخيليين للضوء بدلاً من الشقين المصدرين الحقيقيين ليونغ. المسافة بين المصدرين التقديرين يمكن إيجادها من الانفصال الزاوي للمصدرين وذلك باستخدام المطياف، وبفرض أن:

$$d = |\beta|,$$

$$(7 - 28)$$

أ) هي زاوية فتحة المنشور وتساوي ضعف زاوية رأس المنشور (α) . فإذا كان الضوء الساقط المتوازي (الآتي من اللانهاية) يغير كامل المنشور بنصفه، فسوف تتكون صورتان للشق S (المصدر الأصلي)، وعندئذ يمكن بسهولة قياس الزاوية أ) بين الصورتين.

مثال 7 وجهت حزمة ضوء ليزرية ($\lambda_0 = 632.8 \text{ nm}$) بصورة عمودية على منشور فرنل المزدوج (شكل 10)، فتداخلت الحزم المنكسرة جزئياً من وجهي المنشور في منطقة تراكبها وظهرت الأهداف على المقطع bc من الشاشة. أجد أ) الفاصلة الهدبية. ب) عدد الأهداف. ج) شدة الضوء في الشكل التداخلي الناتج. إذا كانت المسافة بين المصدر الضوئي S والمنشور تساوي 1.0m وبين المنشور والشاشة 4.0m، وكانت زاوية رأسي المنشور تساوي $2 \times 10^{-3} \text{ rad}$ ومعامل انكسار مادة المنشور $n = 1.5$ وشدة الاضطراب الموجي المنفرد تساوي $3 \times 10^3 \text{ W / m}^2$.

الحل: لايجاد الفاصلة الهدبية نستخدم المعادلتين (7 - 7) و (7 - 28):

$$\begin{aligned} \Delta &= \frac{\lambda D}{d} = \frac{(B+R)\lambda}{BO} = \frac{(B+R)\lambda}{2\alpha B} \\ &= \frac{(1.0\text{m} + 4.0\text{m})(632.8 \times 10^{-9}\text{m})}{2(2 \times 10^{-3}\text{rad})(1.0\text{m})} = 791 \times 10^{-6}\text{m} \quad (7 - 29) \\ &= 791 \mu\text{m} \approx 0.8\text{mm} \end{aligned}$$

ب) عدد الأهداف في الشكل التداخلي لمنشور فرنل يساوي:

$$n = \frac{L(\text{طول لشكل التداخلي})}{\Delta(\text{الفاصلة الهدبية})} \quad (7 - 30)$$

ومن الشكل 10 نجد أن طول الشكل التداخلي $L = 2b_0$. وبدلالة زاوية فتحة المنشور θ (الصغيرة جداً)، فإن:

$$b_0 = \theta R$$

إذن

$$n = \frac{2\theta R}{\Delta} \quad (7 - 31)$$

وبالتعويض عن قيم θ ، R ، و Δ ، نجد أن:

$$n = \frac{2(2 \times 10^{-3} \text{ rad})(4.0 \text{ m})}{0.8 \times 10^{-3} \text{ m}} = 20 \quad \text{هدباً}$$

(ج) شدة الإضاءة في الشكل التداخلي المنشور فرنل نجدها بنفس المعادلة (12 - 7):

$$I = 4I_0 \cos^2 \frac{\phi}{2}$$

حيث ϕ هنا أيضاً هي زاوية فرق الطور بين حزمتي المصدرين التقديرين المنشور فرنل وتساوي أيضاً:

$$\phi = K\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \sin \theta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot B \theta \cdot \sin \theta = \frac{2\pi B \theta^2}{\lambda}$$

θ هنا هي زاوية فتحة المنشور المناظرة لتلك التي يصنعها المستقيم الذهاب من منتصف المسافة بين شقي يونغ والعمود على مستوي الشقين. بالتعويض عن المعطيات، نحصل على:

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{2(3.14 \text{ rad})(2 \times 10^{-3} \text{ rad})^2(1.0 \text{ m})}{632.8 \times 10^{-9} \text{ m}} \\ &= 0.158 \times 10^3 \text{ rad} = 158 \text{ rad} = (158 \text{ rad}) \frac{(180^\circ)}{(3.14 \text{ rad})} \approx 50^\circ \end{aligned}$$

ومنه، فإن شدة الاضطراب الموجي المحصل:

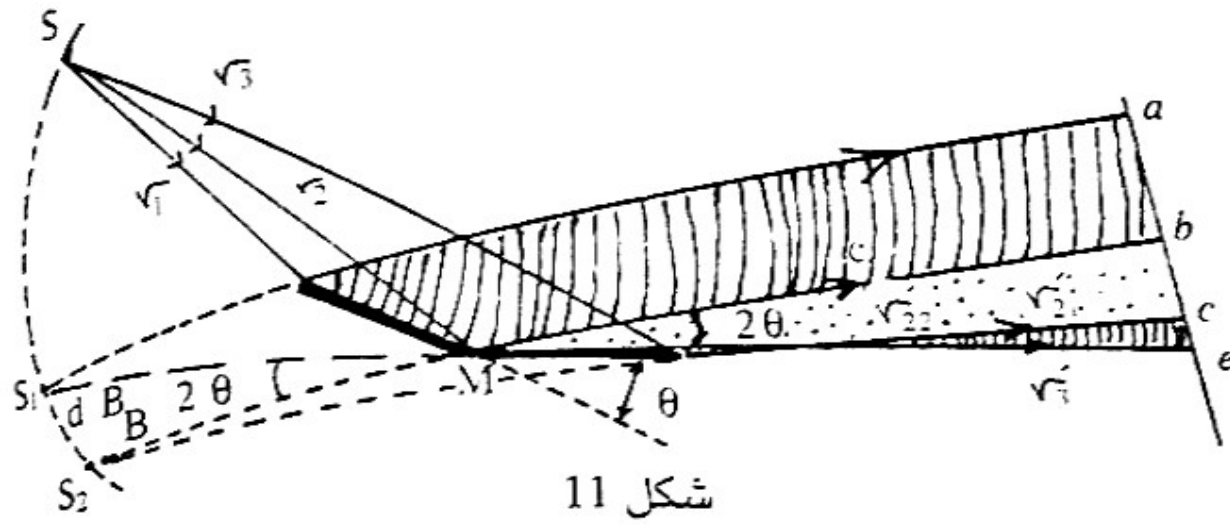
$$I = 4(3 \times 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}) \cos^2(\frac{50}{2}) = 9.85 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$$

(7 - 6) مرآة فرنل المزدوجة

كما في شقي يونغ ومنشور فرنل المزدوج، يمكن بواسطة مرآة فرنل المزدوجة (شكل 11)، الحصول على حزمتين متماسكتين ينتج عن تراكبهما شكل تداخلي يخضع لجميع قوانين تداخل الشقين. فالضوء النافذ خلال الشق S ينعكس بواسطة المرآتين المستويتين اللتين تتكون منهما مرآة فرنل المزدوجة (شكل 11).

وحيث أن المرآتان، المائلتان أحدهما على الأخرى بزاوية α صغيرة جداً، صورتين تقديريتين S_1 و S_2 للشق S، تقومان بوظيفة مصدرين تخيليين للحزم الضوئية المنعكسة المتماثلة، فتظهر أهداب تداخلية في منطقة bc حيث تتشابك الحزمتان. وتحدد منطقة التشابك bc هذه بزاوية فتحة المرآة θ ، التي تناظر زاوية فتحة منشور فرنل المزدوج. أما θ نفسها، فتساوي ضعف

زاوية ميل المرآتين على بعضهما α : أي أن $\theta = 2\alpha$.



شكل 11 رسم تخطيطي لمرآة فرنل المزدوجة.

آلية عمل مرآة فرنل المزدوجة تماثل تماماً ما يحصل في منشوره المزدوج. فحزمة الضوء الساقطة على المرآتين المكونتين لمرآة فرنل ينعكس جزء منها عند الحافة العليا للمرآة الأولى، متجهاً نحو a (الشكل 11)، فيبدو كما لو كان منبعثاً من S_1 . وجزء الحزمة r_2 الساقط على نقطة التقاء المرآتين M ينقسم إلى جزئين، الأول r'_{21} ينعكس من المرآة الأولى نحو b، فيبدو كما لو كان وارداً من S_2 . والثاني r'_{22} ينعكس من المرآة الثانية نحو c. فيبدو كما لو كان وارداً من S_1 . أما جزء الحزمة r_3 فينعكس من النهاية البعيدة للمرآة الثانية نحو e، ويبدو كما لو كان وارداً من S_1 (ويمكن التأكد من ذلك هندسياً). ولهذا، فإن منطقة تراكب الحزمتين الوارديتين من المصدرين التخيليين S_1 و S_2 هي bc. حيث تظهر أهداب التداخل. وبالتالي، فإن زاوية فتحة المرآة المزدوجة هي θ ، التي تبدو من هندسة الشكل أنها تساوي ضعف زاوية ميل المرآتين α الواحدة على الأخرى. ضف إلى ذلك، فإن S_1 ، S_2 تقع جميعها على محيط الدائرة التي مركزها نقطة التقاط المرآتين M. وبالتالي، فإن β في منشور فرنل المزدوج تقابل نصف قطر هذه الدائرة والمسافة من M إلى الشاشة تقابل بعد الشاشة عن منشور فرنل المزدوج.

مثال 8: إحسب الزاوية α بين سطحي مرآة فرنل المزدوجة، وعدد أهداب التداخل على شاشة تبعد 2.0m عن نقطة تقاطع المرآتين M (شكل 11)، إذا

كان المدر الضوئي S يبعد بـ 1.0m عن نقطة التقاطع، ومقدار الفاصلة الهدبية هو 1.0mm، والطول الموجي للضوء المستخدم $\lambda = 500 \text{ nm}$.
الحل: كما في المثال السابق، يمكن باستخدام المعادلتين (7-7) و (7-28)، أن نجد:

$$\alpha = \frac{\theta}{2} = \frac{(B+R)\lambda}{2B\Delta} = \frac{(1.0\text{m}+2.0\text{m})(500 \times 10^{-9}\text{m})}{2(1.0\text{m})(1 \times 10^{-3}\text{m})}$$

$$= 7.5 \times 10^{-4} \text{ rad} = 0.043^\circ$$

أما عدد أهداب التداخل، فهو، وفقاً للمثال السابق:

$$n = \frac{bc}{\Delta} = \frac{\theta R}{\Delta} = \frac{2(7.5 \times 10^{-4} \text{ rad})(2.0\text{m})}{(1 \times 10^{-3} \text{ m})} = 3$$

أهداب

(7-7) مرآة لويد

يبين الشكل 12 ترتيباً آخر لتحقيق التداخل بين الضوء المنعكس من مرآة طويلة والضوء الوارد من المصدر مباشرة، دون أن يعاني انعكاساً. فالموجة الكروية الصادرة من الشق S يسقط جزء منها على مرآة لويد المستوية فينعكس باتجاه يعمل مع الضوء الساقط زاوية تقترب من 90° (لاحظ الشكل 12). وعند التقاء الشعاعين، المنعكس والوارد مباشرة من المصدر عند أية نقطة في منقطة تراكبهما bc، فإنهما يتداخلان وينتجان شكلاً تداخلياً يقوم فيه المصدر S وصورته التقديرية S' بدور المصدر المزدوج للحزمتين المتداخلتين، الخاضع لنفس القوانين السارية في ترتيب يونغ وفرنل.

إن الميزة الهامة لمرآة لويد هي ظهور هذب مظلم في مركز الشكل التداخلي بدلاً من الهدب المضيء في شقي يونغ أو منشور فرنل.

هذا يحصل عندما توضع الشاشة (MN) ملاصقة لطرف المرآة (في الموضع ON على الشكل 12). حيث تأتي حافة المرآة O في مركز الهدب المظلم. هذا يعني أن إحدى الحزمتين عانت تغيراً (انقلاباً في الطور قدره π ، ما يؤدي إلى خسارة في مسارها بقدر $\frac{1}{2}\lambda$ ، وبالتالي فإن فرق الطور الكلي ϕ بين الحزمتين، المباشرة والمنعكسة عند أية نقطة بامتداد MN، هو:

$$\phi = K\Delta \pm \pi = \frac{2\pi}{\lambda} (x_1 - x_2) \pm \pi \quad (7-32)$$

وعليه، فإن شدة التداخل في مثل هذه النقاط هي (لاحظ معادلة (7-12)):

$$I = 4I_0 \cos^2 \frac{\phi}{2} \quad (7-33)$$

$$= 4I_0 \cos^2 \left[\frac{\pi}{\lambda} (x_1 - x_2) \pm \frac{\pi}{2} \right]$$

وهي عظمى عندما ϕ تساوي عدداً زوجياً من π
 $\phi = m\pi$, $m = 0, +2, +4, \dots$

ودنيا عندما ϕ تساوي عدداً فردياً من π
 $\phi = m\pi$, $m = 1, 3, \dots$

أما الإشارة ($\pm$) في المعادلة (7-33)، فهي تعتمد على معامل إنكسار مادة المرآة n . فإذا كان n للمرآة أكبر من n_0 للهواء أو الوسط المحيط بالمرآة. فمعنى ذلك أن الشعاع r_2 قد عانى تغيراً في طوره بقدر π أو خسر من طوره الموجي بقدر $\frac{\lambda}{2}$. ولهذا تؤخذ الإشارة (-). وإذا كانت المرآة مغمورة في وسط معامل انكساره أكبر من معامل انكسار المرآة، فإن الإشارة (+) هي التي تؤخذ. والحالة الأولى هي الشائعة في التطبيقات العملية. وعليه، فإن شدة التداخل في مرآة لويد يعبر عنها كالتالي:

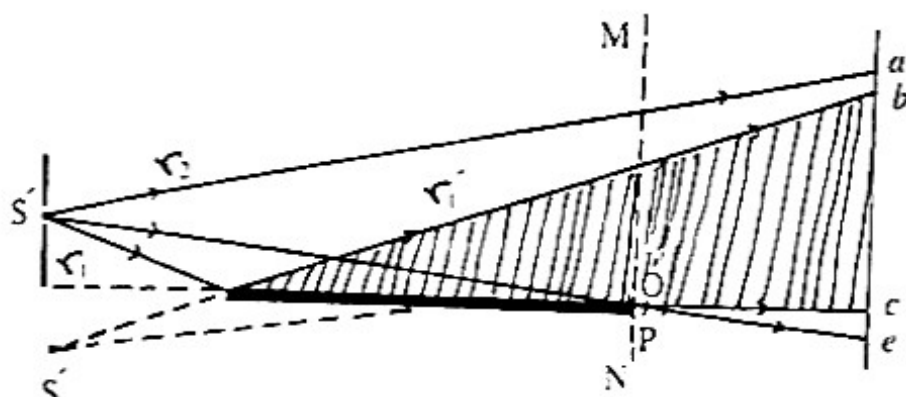
$$I = 4I_0 \cos^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} (x_1 - x_2) - \frac{\pi}{2} \right) \quad (7-34)$$

$$I = 4I_0 \sin^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} (x_1 - x_2) \right) \quad (7-35)$$

$$I = 4I_0 \sin^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta \right) = 4I_0 \sin^2 \left(\frac{\pi d}{\lambda} \cdot \frac{y_m}{D} \right)$$

$$= 4I_0 \sin^2 \left(\frac{\pi d}{\lambda} \cdot \frac{y_m}{D} \right)$$

(لاحظ المثال 9).



شكل 12

شكل 12 ترتيب لويد. حيث يظهر في مركز الشكل التداخلي، الذي هو حافة المرآة O هدباً مظلماً، وتظهر القمة الأولى عند النقطة P مزاحة عن المركز بمقدار نصف الفاصلة الهدبية $\left(\frac{\Delta y}{2} \right)$. والثانية عند $\frac{3}{2} \Delta y$ ، وهلم جراً.

من المعادلة (7 - 36) يظهر أن شدة التداخل دالة في بعد الهدف y_m عن مركز الشكل التداخلي الذي هو بمستوى المرآة الأفقي عند حافتها 0. ومن هنا يبدو بوضوح أن شدة التداخل في مرآة لويد تؤول إلى الصفر عند $y_m = 0$ ، أي عند مركز الشكل التداخلي. ولهذا، فإن حساب الرتبة m لا يبدأ من المركز ($m = 0$) كما عند يونغ وفرنل، بل يبدأ ببعد قدره نصف الفاصلة $\frac{A}{2}$ الهدبية ()، أي أن موقع القمة الأولى يصبح:

$$y_{\max,1} = \frac{\Delta y}{2} \text{ (First maxima)} \quad (7 - 37)$$

$$y_{\max,2} = \frac{3\Delta y}{2} \text{ (2nd maxima)} \quad (7 - 38)$$

وفي الحالة العامة، فإن موقع القمة m بالنسبة إلى مركز الشكل التداخلي O هو:

$$y_{m(\max)} = \frac{m\Delta y}{2} \quad (m = 1, 3, 5, \dots, \neq 0) \quad (7 - 39)$$

وهذا يطابق تماماً مواقع الأهداب المظلمة عند يونغ وفرنل.

مثال 9: في الشكل 12، نفرض أن المصدر S وضع فوق مستوي سطح المرآة بمسافة 1.25 mm، وعلى مسافة 1.10 m عن المصدر وضعت شاشة. أ) أوجد موقعي القمتين التداخليتين الأولى والثانية. ب) اكتب العلاقة بين شدتيهما لطول موجي $\lambda_0 = 780 \text{ nm}$.

الحل: من ملاحظة الشكل 12، واعتماد نفس الرموز التي لدى يونغ أو فرنل، ومن معطيات المثال، لدينا:

$$1.25 \text{ mm} = \frac{d}{2} = \frac{SS'}{2}, \quad d = 2.5 \text{ mm}$$

ومن المعادلتين (7 - 37) و (7 - 7)

$$y_{\max(1)} = \frac{\Delta y}{2} = \frac{\lambda D}{2d} = \frac{(780 \times 10^{-9} \text{ m})(1.10 \text{ m})}{2(2.5 \times 10^{-3} \text{ m})}$$

$$= 171.6 \times 10^{-6} \text{ m} = 0.172 \text{ mm}$$

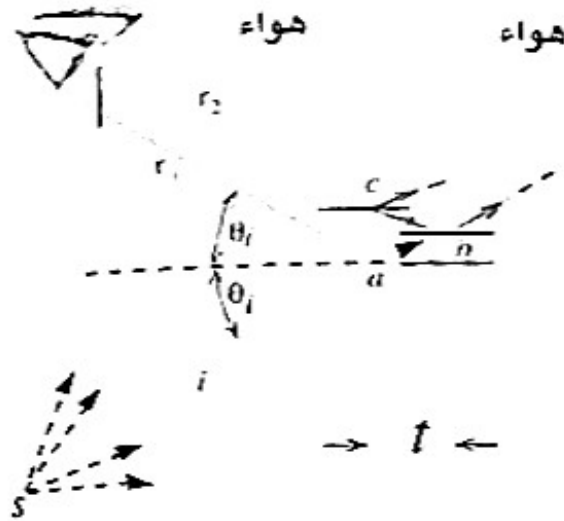
ب) من العلاقة (7 - 36)

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\sin^2\left(\frac{\pi d}{D\lambda} y_{\max 1}\right)}{\sin^2\left(\frac{\pi d}{D\lambda} y_{\max 2}\right)}$$

(7 - 8) التداخل في الأغشية الرقيقة

إن الألوان التي نشاهدها عند سقوط ضوء الشمس على فقاعة صابون، أو بقعة زيت ناتجة عن تداخل الأمواج الضوئية المنعكسة عن السطح الأمامي والخلفي للأغشية الشفافة لهذه المواد. فسمك الغشاء عادة هو من رتبة الطول الموجي للضوء، والأغشية الرقيقة تتفاعل مع المركبات الضوئية بطريقة تماثل عدسات الكاميرا. فتقل الانعكاس وتبرز شدة الضوء النافذ. إن الأغشية الرقيقة على الشبائيك يمكن أن تعزز الانعكاسية بالنسبة للإشعاع تحت الأحمر بينما تأثيرها قليل على الإشعاع المرئي. ويستخدم الطريقة يمكن تقليل الأثر الحراري لضوء الشمس على المباني. يمكن أن يكون الغشاء الرقيق عاكساً كلياً للضوء أو منفذاً كلياً له. وذلك اعتماداً على سمكه بالنسبة لطول موجي معين. كما يوضح ذلك الشكل 13.

شكل 13



شكل 13: غشاء رقيق شفاف بواسطة الضوء المنعكس الوارد من المصدر S. تدخل الأمواج المنعكسة من سطحي الغشاء الأمامي والخلفي. العين بالوضعية المبينة على الشكل. أما شدة الموجة المحصلة فتعتمد على الفرق الطوري بين الأمواج المتراكبة.

يبين الشكل 13 غشاءً شفافاً سمكه منتظم t ، مضاء بضوء وحيد اللون طوله الموجي λ من مصدر نقطي S. تتموضع العين بكنيفية بحيث أن الشعاع المنفرد، يدخلها بعد انعكاسه من السطح الأمامي للغشاء عند النقطة a بصورة الشعاع r_1 ، والجزء المتبقي من الشعاع i يدخل الغشاء عند نفس النقطة a كشعاع منكسر ومنعكس من السطح الخلفي للغشاء عند النقطة b، لينفذ بعد ذلك من السطح الأمامي عند النقطة C، ومن ثم يدخل العين

أيضاً بصورة الشعاع r_2 موازياً للشعاع r_1 ، وفق ما تساعد على ذلك هندسة الشكل 13. ونظراً لمنبعهما المشترك، فإن الشعاعين r_1 و r_2 متشاكهان، ومن ثم فهما قادران على التداخل. وبسبب قطع الشعاعان لمسارين مختلفين وارتحالهما في أوساط مختلفة، فإن فرقاً في الطور بينهما لا بد أن ينشأ وعليه تعتمد شدة الضوء الداخل للعين.

إن فرق المسار الهندسي للشعاعين عند السقوط العمودي ($\theta_i = 0$) للضوء i على الغشاء هو سمك الغشاء $2t$ ، وبالتالي، فإن فرق مسارهما الضوئي هو $2nt$ (حيث n معامل انكسار مادة الغشاء). إضافة إلى ذلك، فإن أحد الشعاعين r_1 أو r_2 يجب أن يعاني تغيراً في الطور مقداره π ($= 180^\circ$) عند انعكاسه على السطح البيني هواء - غشاء. وهو الشعاع المنعكس على السطح الأمامي للغشاء. أما الشعاع الثاني r_2 فلا يعاني أي تغير في الطور، سواءً عند نفوذه خلال السطح الأمامي للغشاء أو عند انعكاسه بواسطة السطح الثاني للغشاء، فهو يبقى بنفس طور الضوء الساقط i .

وبأخذ هذين العاملين في الحساب، عامل فرق المسار الضوئي $2nt$ وعامل التغير الطوري π ، الذي تنشأ عنه خسارة الشعاع r_1 لنصف طوله الموجي، يمكننا تحديد شرط حصولنا على شدة عظمية أو دنيا للضوء المنعكس المتداخل: فمن أجل الشدة العظمية (الأهداب المضيئة) يجب أن يكون فرق المسار الضوئي بين الشعاعين r_1 و r_2 مساوياً لعدد صحيح من الأطوال الموجي (وهو شرط التداخل البناء التقليدي):

$$\Delta = 2nt - \frac{\lambda}{2} = m\lambda$$

أو

$$2nt = (m + \frac{1}{2})\lambda$$

ومن أجل الشدة الدنيا (أهداب مظلمة)

$$\Delta = 2nt - \frac{\lambda}{2} = (m + \frac{1}{2})\lambda$$

أو

$$2nt = (m + 1)\lambda = m\lambda \quad (m=0, \pm 1, \pm 2, \pm \dots) \quad (7-41)$$

هاتان المعادلتان تصحان عندما يكون معامل انكسار مادة الغشاء أكبر أو أصغر من معامل انكسار الوسط على جانبي الغشاء.

إن التداخل في أغشاء ممكن فقط عندما يكون هذا الغشاء رقيقاً (سمكاً) لا يتجاوز طبع أطوال موجية الضوء). بحيث تظهر ألواناً متوسطة غير لغشاء، ومترابطة مع تداخلات أغشاء رقيقة. بالنسبة لغشاء سمكاً $i = 1 \text{ cm}$ ، فإن فرق المسار بين الشعاعين على الشكل 13 يساوي أطوال موجية كثيرة. وبالتالي، فإن فرق الطور عند نقطة معينة على الغشاء يتغير بصورة سريعة جداً حتى لو تحركنا مسافة صغيرة بعيداً عن E ، في حين أن في الغشاء الرقيق يظل فرق الطور بين الشعاعين دون تغيير مسافة معينة على الغشاء بعيداً عن E .

مثال 10

غشاء مائي ($n = 1.33$) في الهواء سمكه 320 nm أصبغ بضوء أبيض عند سقوط عمودي ($\theta_i = 0$). ما هي الألوان التي تظهر في الضوء المنعكس؟
الحل: ظيور ألوان في الضوء المنعكس معناه ظيور قمم تداخلية عظمى ودنيا تتركب فوق بعضها بحيث تقع قمة أحد الألوان فوق نهاية دنيا لون آخر تعقبها قمة لون آخر تقع فوق نهاية دنيا لون آخر. وهلم جراً هذه القمم (الأهداب الضيقة) المتعاقبة هي الألوان التي تظهر في التداخل (قد تكون مرئية أو غير مرئية) فمن أجل القمم العظمى، وفقاً للمعادلة (40 - 7)، فإن:

$$\lambda = \frac{2nt}{m + \frac{1}{2}} = \frac{2(1.33)(320 \text{ nm})}{m + \frac{1}{2}} = \frac{851 \text{ nm}}{m + \frac{1}{2}}$$

ومن أجل نهاية دنيا، وفقاً للمعادلة (41 - 7)، فإن:

$$\lambda = \frac{851 \text{ nm}}{m}$$

إن تظهر القمم العظمى والدنيا للأطوال الموجية التالية اعتماداً على الرتبة m :

m	0(max)	1(min)	1(max)	2(min)	2(max)
$\lambda, \text{ nm}$	1702	851	567	426	340

ومن الجدول أعلاه يبدو لنا أن هناك قمتين فقط تقعان في المنطقة المرئية من الضوء تطابقان الرتبة $m = 1$ ، قمة عظمى (567 nm) وقمة دنيا (426 nm).

مثال 11 تغطي العدسات غالباً بأغشية رقيقة من مادة شفافة مثل منغنيز الحديد MgF_2 ($n = 1.38$) لتقليل الانعكاس من السطح الزجاجي للعدسة. فما هو سمك الغشاء اللازم لإنتاج نهايات دنيا انعكاسية عند مركز الطيف المرئي ($\lambda = 550 \text{ nm}$) ؟

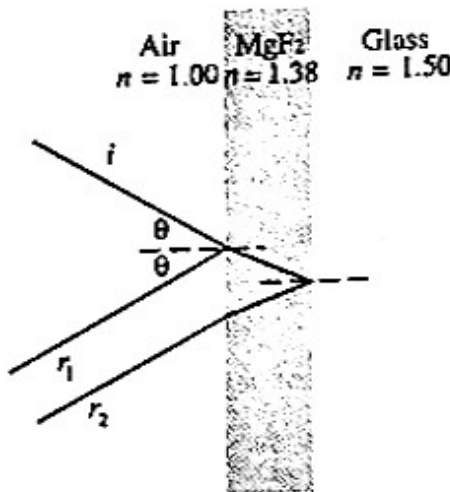
الحل: نفرض أن الضوء يرتطم بالعدسة بسقوط عمودي تقريباً ($\theta_i = 0$): ولأن الفرض من الغشاء هو تقليل الانعكاس، إذن نحن إزاء مسألة التداخل الهدام. وإن فرق المسار في هذه الحالة (وفي جميع حالات الأغشية المقللة للانعكاس) ناتج فقط عن سمك الغشاء، لأن الشعاعين المنعكسين r_1 و r_2 (شكل 14) يعاني كلاهما تغيراً (انقلاباً) في الطور قدره 180° بسبب انعكاس كل منهما بواسطة وسط معامل إنكساره أكبر من معامل إنكسار الذي ورد منه، لذلك فإن شرط التداخل (الهدام) هو:

$$2nt = (m + \frac{1}{2})\lambda$$

ولأن المطلوب هو سمك الغشاء في وسط الطيف المرئي، إذن $m = 0$. ومنه، فإن:

$$t = \frac{\frac{1}{2}\lambda}{2n} = \frac{(550\text{nm})}{4(1.38)} = 100\text{nm}$$

شكل 14



شكل 14 يمكن منع الانعكاس غير المرغوب فيه من الزجاج (عند طول موجي مختار) بتغطية الزجاج بغشاء ذي سمك مناسب.

التداخل في الغشاء الإسفيني الشكل

يبين الشكل 15 غشاءً هوائياً إسفينياً الشكل. إن التداخل بين الموجتين الضوئيتين المنعكستين من السطحين المتجاورين للغشاء الهوائي (مع إهمال الانعكاس الحاصل عند السطحين الأعلى للوح الأعلى والأسفل للوح الأسفل

لتسهيل المناقشة) هو تداخل في غشاء رقيق. فكما في الشكل 15. فإن فرق المسار بين الموجتين (أو الشعاعين) المنعكستين هو نتاج عاملين أيضاً الأول ناتج عن التغير (الانقلاب) في الطور الحاصل للشعاع المنعكس عن السطح الأسفل للغشاء الهوائي (هواء - زجاج). الشعاع المنعكس عن السطح الأعلى للغشاء الهوائي (هواء - زجاج) لا يعاني تغيراً في الطور لأن إنعكاسه داخل الوسط (الزجاج) نفسه. والثاني ناتج عن سمك الغشاء الهوائي سقوطاً وانعكاساً. وبالتالي. فإن فرق المسار الكلي المطابق لتداخل بناء للضوء المنعكس هو نفسه في المعادلة (40 - 7). ولكن بحسب كل فرق المسار بالنسبة للشعاع الثاني r_2 المنعكس عن السطح الأسفل للغشاء الهوائي عند كل نقطة:

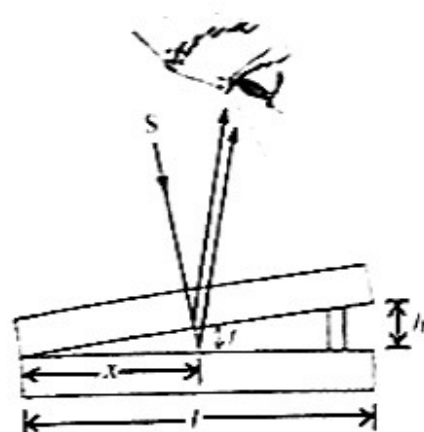
$$2nt + \frac{\lambda}{2} = m\lambda$$

$$2nt = (m - \frac{1}{2})\lambda \quad \text{أو}$$

$$2nt + \frac{\lambda}{2} = (m + \frac{1}{2})\lambda \quad \text{ومن أجل التداخل الهدام}$$

$$2nt = m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (7 - 43)$$

شكل 15



شكل 15 التداخل بين موجتين ضوئيتين منعكستين من جانبي غشاء هوائي اسفيني الشكل مقصولين بصفيحتي زجاج. ومن ثم. ففرق المسار هو $2t$.

عند انجاز التجربة المدروسة. تظهر أهداباً مضيئة وعظيمة. ولكنها متبادلة المواضع فعلى امتداد خط التماس بين اللوحين الزجاجيين نرى هدباً مظلماً. وليس مضيئاً كما هو تقليدياً.

مثال 12

نفرض أن لوحى الزجاج في الشكل 15 كانا شريحتا ميكروسكوب طول الواحدة منهما 10cm ، وتتماسان عند إحدى نهايتيهما، وعند النهاية الأخرى منفصلتان بقطعة ورق سمكها 0.020mm. ما مقدار الفاصلة الهدبية لأهداب التداخل الظاهرة في الضوء المنعكس S وما نوع الهدب الظاهر عند خط التماس؟ بفرض أن الضوء المستخدم كان وحيد اللون ($\lambda = 500 \text{ nm}$).

الحل: إن الأمواج المنعكسة من السطح الأسفل للغشاء الهوائي تعاني زحزحة في الطور (انقلاباً)، لذلك، فهي تفقد نصف طولها الموجي، وبالتالي، فإن الأهداب التداخلية عند خط التماس هي أهداب مظلمة. ومن شرط التداخل الهدام (43 - 7) لدينا:

$$2nt = m\lambda \quad (m = 0, +1, +2, +\dots)$$

ومن تماثل المثلثين في الشكل 15، فإن السمك t عند كل نقطة يتناسب طردياً مع المسافة x من خط التماس:

$$\frac{t}{x} = \frac{h}{L}$$

وباستثناء السمك من هاتين المعادلتين، نحصل على:

$$x = m \frac{\lambda L}{2nh} \quad (7 - 44)$$

وبالتعويض عن قيم λ ، L ، h و ($n = 1$) للهواء، نحصل على:

$$x = \frac{m(500 \times 10^{-9} \text{ m})(0.10 \text{ m})}{2(1)(0.020 \times 10^{-3} \text{ m})} = m(1.25 \text{ mm})$$

وهذا هو موقع الهدب المظلم m عن خط التماس، الذي يتحدد بحاصل ضرب رتبته m في الفاصلة الهدبية 1.25 mm.

مثال 13

إذا ملئت الفسحة الهوائية بين شريحتي الزجاج ($n = 1.52$) في المثال 12 بالماء ($n = 1.33$) بدلاً من الهواء، فما الذي يحدث؟

الحل: في هذه الحالة أيضاً تبقى التغيرات الطورية للشعاعين المنعكسين عن السطحين العلوي والسفلي للغشاء المائي هي نفسها كما للغشاء الهوائي،

وبالتالي، سنرى أهداباً مظلمة أيضاً عند خط التماس، ولكن بفاصلة هيدية مختلفة. فوفقاً للمعادلة (44 - 7)، نجد أن الفاصلة الهدبية لأهداب التداخل في الغشاء الإسفيني تتحدد بالمعادلة:

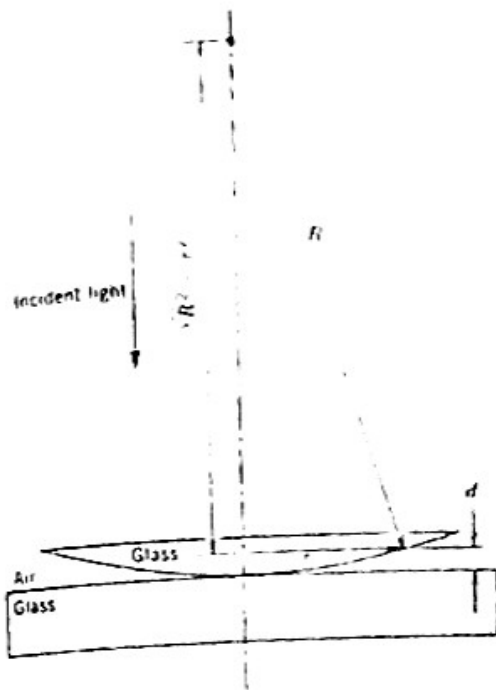
$$\Delta x = \frac{\lambda L}{2nh} \quad (7 - 45)$$

إذن الفاصلة الهدبية في المثال المدروس هي:

$$\Delta x = \frac{(500 \times 10^{-9} \text{ m})(0.10 \text{ m})}{2(1.33)(0.020 \times 10^{-3} \text{ m})} = 0.94 \text{ mm}$$

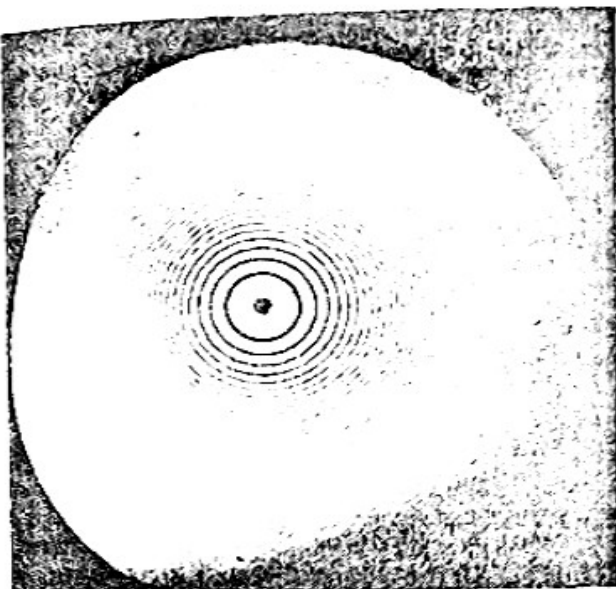
أي أنها نقصت بالعامل 1.33.

شكل 16 (i)



شكل 16 (i) أداة لرؤية حلقات نيوتن.

(ب) أهداب تداخلية دائرية (حلقات نيوتن) مشاهدة باستخدام الأداة في الشكل 16 (i).



(ب)

يبين الشكل 16 أ - عدسة مجمعة - مستوية نصف قطر انحنائها R تستقر على لوح زجاجي مستوي بانتظام ومضاءة من الأعلى بضوء طول موجته λ . عند النظر من الأعلى إلى هذه المنظومة البصرية نشاهد شكلاً تداخلياً مكوناً من أهداب دائرية بهيئات حلقية متمركزة حول نقطة تماس السطح المحدب للعدسة المجمعة - المستوية والسطح المستوي للوح الزجاجي، مثلما تظهر على الشكل 16 ب. هذه الأهداب التداخلية تدعى حلقات نيوتن. فالذي يحصل هو أن الفسحة الهوائية بين اللوح والعدسة تكون غشاء هوائياً له شكل إسفين. والضوء الذي يسقط من الأعلى على اللوح الزجاجي ينعكس عنه بنفس الاتجاه، ماداً خلال الغشاء الهوائي قادماً من قاعدته بدلاً من قمته. وبهذا فهو لن يعاني تغيراً في طوره، في حين أن الشعاع الذي انعكس من قمة الغشاء يتغير طوره بمقدار π . إذن شرط التداخل البناء هنا هو نفسه كما في المعادلة (40 - 7)، باستثناء أن $n = 1$ للهواء:

$$2t = (m + \frac{1}{2})\lambda \quad (m=0, \pm 1, \pm 2, \pm \dots) \quad (7 - 46)$$

ومن الشكل 16 (أ) يمكن أن نكتب:

$$t = R - \sqrt{R^2 - r^2} = R - R[1 - (\frac{r}{R})^2]^{1/2}$$

فإذا كانت $r \ll R$ ، فإن المقدار داخل القوس التربيعي ينشر بواسطة بديهية ذي الحدين، ومنه نحصل على:

$$[1 - (\frac{r}{R})^2]^{1/2} = 1 - \frac{1}{2} \frac{r^2}{R^2}$$

$$t = R - R(1 - \frac{r^2}{2R^2}) = R - (R - \frac{r^2}{2R}) = \frac{r^2}{2R}$$

وبالتعويض عن قيمة t هذه في المعادلة (42 - 7)، نحصل على:

$$2(\frac{r^2}{2R}) = (m + \frac{1}{2})\lambda \quad \text{أو}$$

$$r_m = \sqrt{(m + \frac{1}{2})\lambda R}$$

حيث r_m هو نصف قطر الحلقة المضئية التي رتبها m . ولكي نشاهد حلقات نيوتن معملياً، يجب أن يكون الضوء المستخدم أحادي

اللون، لأن مركبات الضوء الأبيض تنتج كل منها طاقمها الخاص بها الأهداب التداخلية الدائرية. وهذه الطواقم تتراكب فوق بعضها بحيث قمة أحد الألوان فوق قاع لون آخر، وهكذا.

نلاحظ من المعادلة (47 - 7)، إن $r > 0$ عندما تكون $m = 0$ ، وهذا معناه الحلقة المضيئة الأولى تكون عند $r > 0$ ، وبالتالي، فإن مركز حلقات نيبي يجب أن يكون مظلماً، وهذا يظهر جلياً على الشكل 16 ب.

مثال 6

حلقتان مضيئتان شوهدت في منظومة حلقات نيوتن (شكل 16 ب) قطريهما $D_1 = 4.0 \text{ mm}$ و $D_2 = 4.8 \text{ mm}$ وشوهدت بينهما ثلاث قمم مضيئة (ثلاث حلقات مضيئة) في الضوء المنعكس ($\lambda = 500 \text{ nm}$). أوجد: أ) نصف قطر انحناء العدسة المستخدمة في التجربة. ب) أقل سمك للغشاء الهوائي بين العدسة واللوح الزجاجي.

الحل: نفرض أن الحلقة المشاهدة ذات القطر D_1 كانت رتبته m ، إذن رتبة الحلقة ذات القطر D_2 هي $m+4$ نطبق المعادلة (47 - 7) بالنسبة للحلقة m نحصل على:

$$r_m = \frac{D_1}{2} = \sqrt{(m + \frac{1}{2}) R \lambda}$$

$$r_{m+4} = \frac{D_2}{2} = \sqrt{(m + 4 + \frac{1}{2}) R \lambda}$$

نربع المعادلتين ونقسمهما على بعض، نحصل على:

$$\frac{r_m^2}{r_{m+4}^2} = \frac{D_1^2/4}{D_2^2/4} = \frac{(m + \frac{1}{2}) R \lambda}{(m + 4 + \frac{1}{2}) R \lambda}$$

وبالتعويض عن D_1 و D_2 في هذه العلاقة نجد أن $m = 8.59 = 9$ والآن نعوض عن قيمة m في أي من المعادلتين، نجد:

$$\left(\frac{4.0 \times 10^{-3}}{2}\right)^2 = \left(9 + \frac{1}{2}\right) (500 \times 10^{-9} \text{ m}) R$$

ومنه، فإن:

$$R = 0.888 \text{ m} = 888 \text{ mm} = 88.8 \text{ cm}$$

ب) سمك الغشاء متغير وليس ثابتاً، فهو يعتمد على موضع الحلقة التداخلية المشاهدة أو رتبته.

فيكون أقل ما يمكن من أجل الحلقة القريبة من المركز أي من أجل الحلقة $m = 0$ ، ومن أجل الحلقة ذات الرتبة m فهو يساوي (من شرط التداخل البناء (7 - 40):

$$2t = (m + \frac{1}{2})\lambda \quad \text{ومنه، فإن}$$

$$t = \frac{(m + \frac{1}{2})\lambda}{2} = \frac{(9 + \frac{1}{2})(500\text{nm})}{2} = 2375 \text{ nm}$$

الخلاصة

1. الضوء الأحادي اللون (مونوكروماتيك) هو ضوء بتردد واحد.
- التشاكه هو علاقة طورية غير متغيرة ومحددة تماماً.
- إن تراكب الأمواج من مصدرين متشاكهين لضوء أحادي اللون يكون شكلاً تداخلياً.
- ينص مبدأ الإنضمام الخطي أن الاضطراب الموجي الكلي عند أية نقطة هو مجموع الاضطرابات من الأمواج المنفصلة.
- عندما يكون المصدران الضوئيان في الطور، فإن تداخلاً بناءً يظهر عند نقطة ما عندما يكون الفرق في طول المسار من المصدرين إلى النقطة صفراً أو مساوياً لعدد صحيح من الأطوال الموجية.
- عندما يصنع الخط الواصل بين منتصف مستوي الشقين والنقطة المرصودة P زاوية θ مع الخط العمود على مستوي الشقين الموصولين بالمسافة d، فإن شرط التداخل البناء هو:

$$d \sin \theta = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

وشرط التداخل الهدام هو:

$$d \sin \theta = (m + \frac{1}{2})\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

- عندما تكون θ صغيرة جداً، فإن موقع الهدب المضيء ذو الرتبة m يتحدد بالمعادلة:

$$y_m = R \frac{m\lambda}{d}$$

- عندما تتراكب موجتان جيبيتان ذاتا سعتين متساويتين E و فرق طوري ϕ ، فإن السعة المحصلة E_p هي:

$$E_p = 2E^2(1 + \cos\phi) = 4E^2 \cos^2 \frac{\phi}{2}$$

$$I = 4I_0 \cos^2 \frac{\phi}{2}$$

والشدة المحصلة I هي:

حيث I_0 شدة الموجة المنفردة المتداخلة.

- عندما ينعكس الضوء من كلا جانبي غشاء رقيق سمكه t ، فإن تداخلاً بناءً بين الموجتين المنعكستين يظهر عندما:

$$2nt = (m + \frac{1}{2})\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

حيث n معامل انكسار الوسط الذي ينتشر فيه الضوء.

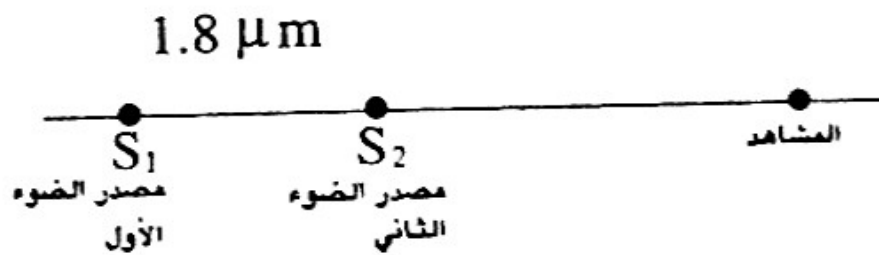
- عندما يبعث مصدران ضوئيان موجتين في الطور، فإن الفرق الطوري للموجتين الواصلتين عند النقطة P يرتبط بفرق المسار $(r_1 - r_2)$ بالعلاقة:

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(r_1 - r_2) = K(r_1 - r_2) = K\Delta$$

مسائل

(7 - 1) التداخل والمصادر المتشابهة

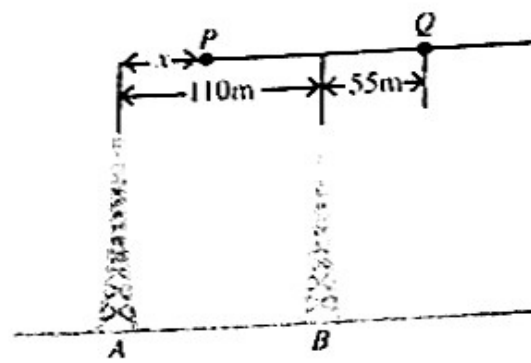
1. مصدرا ضوء أبيض متشابهان وهما في الطور ويبعدان عن بعضهما مسافة $1.80 \mu m$ ويقعان على خط واحد مع الناظر (شكل 17). ما هي الأطوال الموجية (من 400 إلى 700 nm) التي يمكن للمشاهد أن يراها ساطعة في تداخلها البناء؟



شكل 17 مسألة 1

التداخل الراديوي

2. هوائيا محطة راديو A و B يبثان في الطور. يقع الهوائي B على يمين A بمسافة 110m. نعتبر نقطة Q بامتداد الخط الرابط للهوائيين على مسافة أفقية 55m يمين الهوائي B (شكل 18). فإذا كان بالإمكان تغيير تردد المحطة. وبالتالي، أطوال الأمواج المبعثته، فما هو أطول طول موجب تبثه المحطة يعطينا تداخلاً هداماً عند Q؟ وما أطول طول موجي يعطينا تداخلاً بناءً؟



شكل 18 مسألة 2

3. محطة أمواج راديوية قصيرة تعمل بتردد 7.50MHz لها هوائيان متطابقان يشعان في الطور. يقع الهوائي B يمين A بمسافة 110 m (الشكل 12). إعتبر النقطة P بين الهوائيين وعلى امتداد الخط الرابط بينهما بمسافة أفقية x عن الهوائي A. ما هي قيم x التي يظهر عندها تداخلا بناءً عن P؟

(2 - 7) تداخل المصدرين

4. شقان تفصلهما مسافة 0.300 mm موضوعان على بعد 60 cm من شاشة. ما هي المسافة بين الخطين المظلمين الثاني والثالث في شكل التداخل عندما يضاء الشقان بضوء أحادي طوله الموجي 600 nm ؟

5. ضوء أحادي اللون من مصباح القوس - الزئبقي يمر خلال مرشح يغلق كل شيء ما عدا طيف خطي واحد في المنقطة الخضراء من الطيف ليسقط بعد ذلك على شقين مفصولين بمسافة 0.600 mm . فيظهر شكل تداخلي على شاشة تبعد 2.50 m عن مستوي الشقين وكانت الأهداب المضيئة منفصلة عن بعضها بمسافة 2.27 mm . ما هو الطول الموجي للضوء المستخدم؟

6. ضوء أخضر أحادي اللون طوله الموجي $\lambda_g = 554\text{ nm}$ يضيء شقين ضيقين متوازيين المسافة بينهما $7.7\text{ }\mu\text{m}$. احسب زاوية النظر للهدب المضيء ذي الرتبة $m = 3$ بالزوايا القطرية أولاً، وبالدرجات ثانياً.

7. أنجزت تجربة الشق المزدوج بالضوء الأخضر - المزرقي بطول موجي 512 nm ، وكان الشقان منفصلان بمسافة 1.2 mm ويبعدان عن الشاشة بمسافة 5.4 m . ما هي المسافة الفاصلة بين أهداب التداخل؟

8. في تجربة الشق المزدوج كانت المسافة بين الشقين 5.22 mm وهما يبعدان

بمسافة 1.36m عن الشاشة. وكان يمكن أن يُشاهد على الشاشة شكلًا للتداخل. الأول ناتج عن ضوء طوله الموجي 480 nm والثاني ناتج عن ضوء طوله الموجي 612 nm. أوجد الفاصلة الهدبية بين أهداب الرتبة الثالثة للشكلين التداخليين.

9. إذا كانت المسافة بين النهاية الدنيا الأولى والنهاية الدنيا العاشرة في شكل تداخل الشق المزدوج تساوي 18 mm، والشقان منفصلان عن بعضهما بمسافة 0.15 mm ويبعدان عن الشاشة بمسافة 50 cm. فما هو الطول الموجي للضوء المستخدم؟ (ملاحظة: أوجد y_m لكل نهاية دنيا وحاصل طرحهما هو 18 mm).

(7 - 3) الشدة في تداخل الشق المزدوج

10. ضوء طوله الموجي 600 nm يسقط على شقين ضيقين متوازيين مفصولين بمسافة 0.60 mm. ارسم شدة التداخل المُشاهد على شاشة بعيدة كدالة لزاوية انحراف الشعاع الضوئي عن اتجاهه الأصلي θ للقيم $0 \leq \theta \leq 0.004$ من الزوايا القطرية.

11. برهن أن نصف العرض $\Delta\theta$ لأهداب تداخل الشق المزدوج يعطى بالعلاقة:

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{2d}$$

(ملاحظة تساعد على الحل: طبق شرط التداخل البناء لهديين متتالين قريبين من مركز الشكل التداخلي - θ_1 و θ_2 صغيرتان، وتذكر أن عرض الهدب هو معدل الفرق بين زاويتي النظر).

12. شقان متباعدان بمسافة 0.200 mm عن بعضهما وضعوا على مسافة 0.80 m من شاشة وأضيئاً بضوء أحادي اللون طوله الموجي 500 nm. فإذا كانت الشدة عند مركز القمة المركزية ($\theta = 0$) تساوي $6.00 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$ (فاوجد: أ) المسافة من مركز القمة المركزية إلى النهاية الدنيا الأولى، ب) الشدة عند نقطة تقع منتصف المسافة بين مركز القمة المركزية وأول نهاية دنيا.

13. شقان تفصلهما مسافة 0.300 mm موضوعان على مسافة 0.600 m من

شاشة ومضاء ان بضوء أحادي اللون طوله الموجي 540 nm . فإذا كانت الشدة عند مركز القمة المركزية $I_0 (\theta = 0^\circ)$ ، فما هي (أ) المسافة من مركز القمة المركزية إلى أول نهاية دنيا؟ (ب) المسافة من مركز القمة المركزية إلى النقطة حيث تهبط الشدة إلى $I_0/2$ ؟

14. برهن أن المعادلة (12 - 7) تعطي شدة صفرية في اتجاهات تتوافق مع المعادلة (5 - 7).

15. شدة الاشارات الراديوية. محطة راديو AM ترددها 820 KHz . أستخدم فيها هوائيان متطابقان عند نفس الارتفاع (لاحظ المسألة 2)، تفصلهما مسافة 150 m ، وهما يشعان في الطور، فشاهد الشكل التداخلي عند مسافة من الهوائيين أكبر بكثير من 150 m . (أ) بأي اتجاه تكون الشدة أعظم ما يمكن؟ (ب) خذ الشدة في الفرع (أ) بأي اتجاه تكون الشدة أعظم ما يمكن؟ (ب) خذ الشدة في الفرع (أ) من المسألة لتكون I_0 ، حدد بدلالة I_0 الشدة في الاتجاه الذي يعمل زاوية 30° ، 45° ، و 90° مع اتجاه الشدة العظمى.

16. اعتبر الشكل التداخلي للشقين، الذي شدة توزيعه تعطى بالمعادلة (16 - 7). لتكن θ_m هي الوضع الزاوي للهدب المضيء m ، حيث الشدة هي $I_0 (= 4 I_0)$. افرض أن θ_m صغيرة، بحيث أن $\sin \theta_m \approx \theta_m$. لتكن $+\theta_m$ و $-\theta_m$ زاويتان على أي من جانبي θ_m التي بالنسبة لها $I = 1/2 I_0$. والكمية $|\Delta \theta_m| = |\theta_m^+ - \theta_m^-|$ هي نصف عرض الهدب m . احسب $\Delta \theta_m$. وكيف تعتمد الكمية $\Delta \theta_m$ على m ؟

(4 - 7) جمع الأمواج

17. إجمع بيانياً الكميات التالية، مستخدماً طريقة المتجه الدوار والطريقة الجبرية

$$y_1 = 10 \sin wt, \quad y_2 = 14 \sin (wt + 26^\circ), \quad y_3 = 4.7 \sin (wt - 41^\circ).$$

(ملاحظة: لايجاد β استخدم المعادلة (26 - 7) ولايجاد E_θ استخدم المعادلة (27 - 6)).

(8 - 7) التداخل في الأغشية الرقيقة.

18. يُراد تغطية شريحة زجاجية مستوية بمادة شفافة ($n = 1.25$) بحيث أن ضوء طوله الموجي 620 nm (في الفراغ) يسقط عمودياً على الشريحة ولا

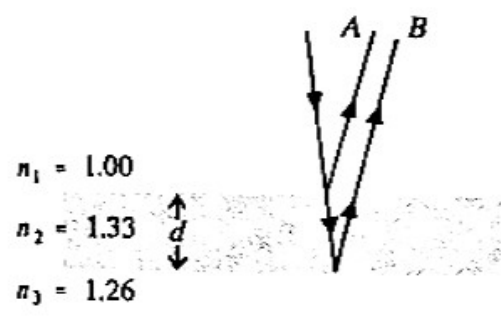
ينعكس. ما هو السمك الممكن تغطية الشريحة به؟ (ملاحظة تساعد على الحل: بما أن معامل انكسار الغطاء أقل (1.25) أقل من معامل انكسار الزجاج (1.5)، فإن الحكم الذي ينطبق على الهواء - زجاج ينطبق على الغطاء - زجاج. هذا من جهة ومن جهة أخرى، عدم الانعكاس يعني تطبيق شرط التداخل الهدام).

19. صهرنج معطوب يسرب الكيروسين في الخليج العربي مُحدثاً بقعة زلقة كبيرة فوق الماء ($n = 1.33$). فإذا نظرنا من الطائرة بصورة مستقيمة إلى الأسفل إلى منطقة البقعة حيث سمك الكيروسين فوق الماء هو 460 nm ، فما هو أكبر طول موجي يمكن رؤيته الضوء في المنعكس؟ (ب) إذا نظرنا مباشرة من تحت نفس منطقة البقعة هذه، فما هو الطول الموجي أو الأطوال الموجية التي يمكن رؤيتها في الضوء النافذ؟

(ملاحظة: في الضوء المنعكس، كلا الشعاعين المنعكسين عن السطحين الأمامي والخلفي للغشاء الفقاعي يعانيان انقلاباً في الطور بمقدار π لأن كليهما انعكس عن وسط معامل انكساره أكبر من وسط الورود. أما الشعاعين النافذين، فالنافذ الأول لم يعان انقلاباً طورياً، في حين عانى الشعاع النافذ الثاني انقلاباً في طوره بسبب انعكاسه الأول عن سطح الماء، ومن ثم، فإن مساره أكبر من مسار الشعاع.

$$2nd + \frac{\lambda}{2}$$

20. إذا كان الطول الموجي لضوء ساقط هو $\lambda = 572 \text{ nm}$ ، والشعاان A و B في الشكل 17 خارج الطور بمقدار 1.5λ أوجد سمك الغشاء t .



شكل 19

21. موجة مستوية لضوء أحادي اللون تسقط عمودياً على غشاء رقيق منتظم من الزيت يغطي لوحاً زجاجياً. والطول الموجي للمصدر يمكن أن يتغير باستمرار. شوهد تداخل هدام كامل للضوء المنعكس للطولين الموجيين

- 485 nm و 679 nm من دون أي أطوال موجية بينهما. فإذا كان معامل انكسار الزيت 1.32 والزجاج 1.50، فأوجد سمك الغشاء الزيتي.
22. قطعنا زجاج مستويين مسكتا سوية بطريقة بحيث أن الفضاء الهوائي بينهما كَوْن شكلاً إسفينياً رقيقاً جداً. ضوء طوله الموجي 480 nm اصطدام عمودياً بالسطح الأعلى وانعكس من السطح الأسفل للزجاج الأعلى والسطح الأعلى للزجاج الأسفل، منتجاً بذلك سلسلة من الأهداب التداخلية كم هو أكبر سمك الشكل الإسفيني الهوائي عند الهدب السادس عشر منه عند الهدب السادس؟
23. مصدر متمد للضوء ($\lambda = 680 \text{ nm}$) يضيء بصورة عمودية لوح زجاج طول كل منهما 120 mm، يتماسان عند إحدى نهايتيهما ويتباعدان عند النهاية الأخرى بواسطة سلك قطره 0.048 mm. ما عدد الأهداب المضيئة التي تظهر على المسافة 120 mm؟ (ملاحظة: في هذه الحالة تكون $X = L$).
24. في تجربة حلقات نيوتن كان نصف قطر انحناء العدسة المستخدمة 5m، وقطر الحلقة المضيئة المشاهدة 20 mm.
- (أ) ما هو عدد الحلقات المرئية؟ (ب) كم حلقة تشاهد لو غمر الترتيب في الماء بدلاً من الهواء؟
25. استخدمت أداة حلقات نيوتن لتعيين نصف قطر انحناء عدسة. فكان نصف قطري الحلقتين المضيئتين m و $m+20$ هما 0.162cm و 0.368 cm على التوالي. فإذا كان الطول الموجي للضوء المستخدم هو 546 nm، فما هو نصف قطر انحناء السطح الأسفل (المحدب) للعدسة؟
26. عندما وضع غشاء رقيق من البلاستيك الشفاف على إحدى الفتحتين في تجربة يونغ أستعمل فيها الضوء الأبيض أزرق 450 هدباً من مجال الرؤية. فإذا كان معامل إنكسار الغشاء 1.48 والطول الموجي الفعال للضوء 550 nm، (أ) ما هي الزيادة في المسار الضوئي؟ (ب) ما هو سمك الغشاء؟ (ج) ماذا يحصل لو استبدل الغشاء بقطعة من البلاستيك سمكها 1.00mm؟
27. في تجربة للتداخل بواسطة منشور فرنل كانت الشاشة تبعد عنه 180.0cm والشق 60.0cm. وجد أن الفاصلة الهدبية كانت 0.90mm لضوء طوله الموجي 589 nm. ما هي الزاوية بين سطحي المنشور الكاسرين (زاوية

رأس المنشور)؟ محسوبة بالزوايا القطرية وبالدرجات.

28. ما مقدار الزاوية (بالدرجات) بين سطحي مرآة فرنل المزدوجة لكري تتكون أهداب ضوء الصوديوم ($\lambda = 589.3 \text{ nm}$) التداخلية بفاصلة هيدية 1.0 mm . إذا كان الشق يبعد بمسافة 40.0 cm عن نقطة تقاطع المرأتين وكان ستار المشاهدة يبعد بمسافة 150.0 cm عن الشق؟

29. في ترتيب لويدي. وُضع المصدر فوق مستوي المرآة بمسافة 1.25 mm وعلى مسافة 1.10 m عن المصدر وضعت الشاشة. أوجد موضعي القمتين التداخليتين الأولى والثانية، واكتب العلاقة بين شدتيهما. إذا كان طول موجة الضوء المستخدم 780 nm .

الفصل الثامن

اجتزاة تداخلية وتطبيقات التداخل

تدخل ظاهرة تداخل الأمواج الضوئية في أساس معظم تفاعلات الضوء مع المادة، خصوصاً تلك المرئية منها. هذا الأمر استلزم أجهزة تقنية للكشف عن الجوانب التطبيقية لظاهرة التداخل. وقد اضافت هذه الأجهزة تغيرات كمية هائلة في أساسيات البصريات قادت مع تطوراتها النوعية إلى زيادة شفافية مفاهيم التداخل وتمكينها من تفسير الكثير من الظواهر البصرية.

(8 - 1) أهـاب هايدنجر التداخلية

أهـاب هايدنجر التداخلية هي نموذج لشكل تداخلي ينتج باستخدام مصدر ممتدد حيث تحدث الانعكاسات من شريحة مستوية - متوازية عازلة يحدث فيها تداخل الحزم المتوازية الحاصل في الأغشية الشفافة الرقيقة (7 - 8). بين الشكل 8 - 1 ترتيباً تجريبياً عادياً لمشاهدات أهـاب هايدنجر (Haidinger fringes). والمصدر هنا يجب أن يكون أحادي اللون بصورة ملموسة، ومجزء الحزمة هو لوح منفذ جزئياً يسمح بزاوية سقوط θ_1 صغيرة. أما العدسة اللامة في الترتيب فيمكن أن تكون في تليسكوب أو في عين المشاهد.

ينشطر الشعاع الضوئي المغادر للمصدر عند P_1 إلى حزمتين بالانكسارات الجزئية للضوء بواسطة اللوح، تغادران اللوح عند زاوية θ_2 وسيكون لها زحزحة طورية قدرها $\pi - \varphi$ ، حيث δ تعطى بالعلاقة (41 - 7) مع الأخذ في الحساب أن سقوط الضوء قد لا يكون عمودياً؛ ومن ثم فإن الزحزحة الطورية تصبح مساوية لـ:

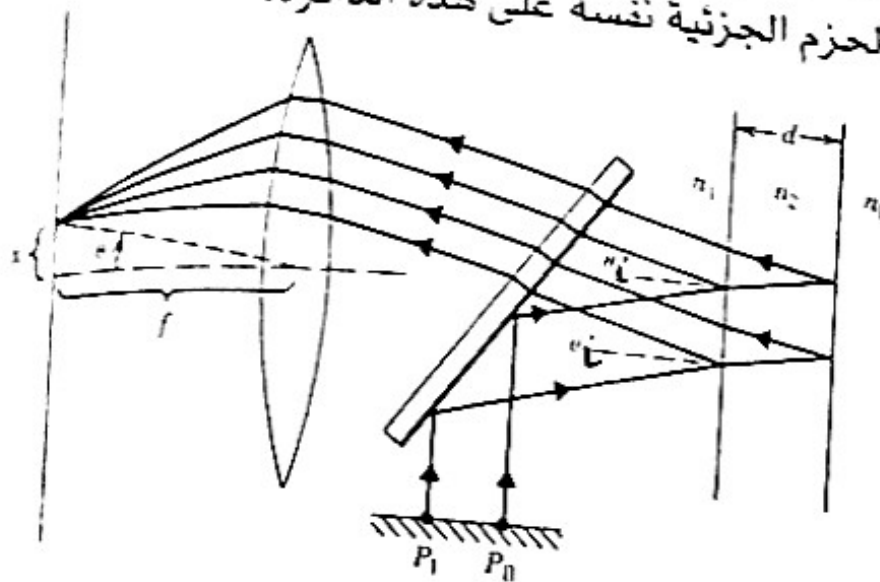
$$\Delta\varphi = \pi - \varphi = \pi - K\Delta = \pi - \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot 2nt \cos \theta_t = \pi - \frac{4\pi nt}{\lambda} \quad (8 - 1)$$

عند السقوط العمودي للضوء ($\theta_i = 0, \theta_t = 0$). إن شرط ظهور أهـاب هايدنجر هو نفس شرط ظهور الأهـاب المضئية في الأغشية الرقيقة معتمداً على فرق المسار (41 - 7).

ستدخل الحزمتان العدسة بزاوية θ_2 مع محور العدسة ولذلك ستُجلبان سوية في المستوى البؤري للعدسة وبعيداً عن محورها بمقدار $x = \theta_2 f$ ، حيث f البعد البؤري للعدسة.

الشعاع الثاني المغادر للمصدر عند P_{IT} بموازاة الأول ينشطر هو أيضاً إلى

حزمتين (بانعكاسين خارجي وداخلي بواسطة سطحي اللوح) ستكون لهما نفس الإزاحة الطورية (1 - 8) التي لحزمتي الشعاع الأول. بسبب التناظر الدوراني حول محور العدسة، فإن الإزاحة الطورية ستكون ثابتة على دائرة في المستوى البؤري الذي يقع ضمنه محور العدسة كمركز له. وسيكون التداخل بين الحزم الجزئية نفسه على هذه الدائرة.

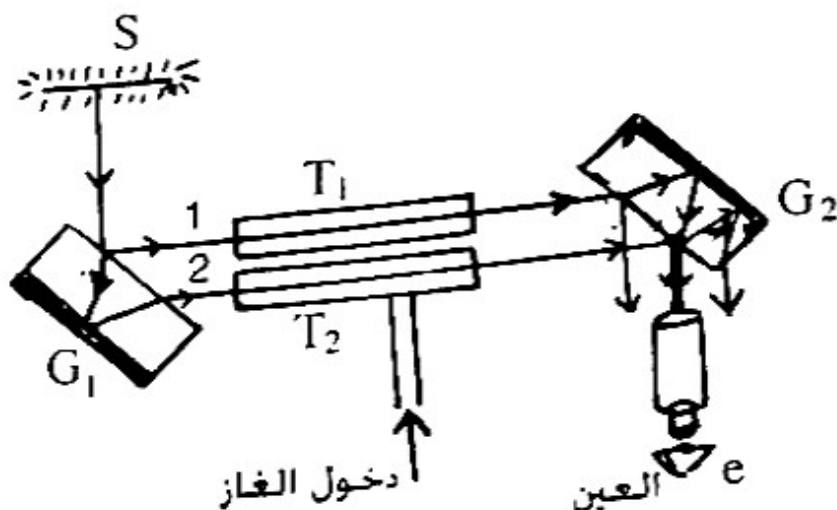


شكل 1

شكل 1 عرض تخطيطي لترتيب مشاهدة أهداب هايدنجر.

(8 - 2) مقياس جامين

يتكون مقياس جامين من لوحين زجاجيين سميكين G_1 و G_2 (شكل 2) نصف مفضضين، يدخل في الترتيب معهما تليسكوب ومصدر عريض S لضوء، وحيد اللون. اللوحان مرتبان بحيث يسقط عليهما الضوء بزاوية 45° (لاحظ الشكل). فعند سقوطها على اللوح الأول G_1 تنقسم الحزمة الضوئية بواسطة الانعكاس الخارجي الكلي والداخلي الكلي إلى حزمتين متوازيتين 1 و 2 على التوالي. تسقط الحزمتان على اللوح G_2 لتتقسم كل حزمة إلى حزمتين: تتحد الحزم بعد ذلك في بؤرة العدسة الشيئية لتليسكوب معد لهذا الغرض، فتنكون أهداب تداخلية بهيئة خطوط مستقيمة، تدعى أهداب بروستر. فإذا كان اللوحان متوازيين تماماً، فإن مساري الحزمتين 1 و 2 (يتراكب من الحزمة 1 إنعكاسها الداخلي الكلي على اللوح G_2 ومن الحزمة 2 إنعكاسها الخارجي) يكونان متساويين تماماً، بمعنى أن فرق مساريهما $\Delta = 0$.



شكل 2

شكل 2 رسم تخطيطي لمقياس جامين أثناء إجراء تجربة لقياس معامل انكسار مادة أو لمعرفة تغير معامل الانكسار عند تغيير درجة حرارته (صلب أو سائل) أو درجة حرارته وضغطه إذا كان غازاً. المعوض (الانبوبتان T_1 و T_2) يوضع للتحكم في فرق المسارين الحزمتين 1 و 2.

أما إذا كان اللوحان يعملان زاوية ما بينهما، فإن $\Delta \neq 0$ ويصبح لكل منهما زاوية إنكساره الخاصة (r_1 و r_2 على التوالي) ويعبر عن فرق مساريهما في هذه الحالة بالعلاقة:

$$\Delta = 2nt \cos r_1 - 2nt \cos r_2 = 2nt (\cos r_1 - \cos r_2)$$

حيث t سمك اللوح و n معامل انكساره.

ولأن r_1 تختلف قليلاً عن r_2 ، لذلك نرمز لـ $r_1 = r_2 + \delta r$ ، و $r_2 - r_1 = \delta r$ نجد:

$$\Delta = 2nt \sin r \delta r \quad (8 - 2)$$

وبالتعبير عن زاوية الانكسار r بزاوية السقوط i ، وعن الفرق $\delta r = r_2 - r_1$ بـ $\delta i = i_2 - i_1 = \epsilon$ ، حيث ϵ الزاوية بين اللوحين، نجد، تأسيساً على قانون الانكسار ($n_0 \sin i = n \sin r$)، حيث n_0 معامل انكسار الهواء) أن:

$$\delta r = \frac{\cos i}{n \cos r} \delta i$$

وعند الشروط العادية، عندما $i = 45^\circ$ و $n = 1.5$ ، تكون $Sr = 1/2 \delta i = 1/2 \epsilon$. على هذا الأساس يصبح فرق المسار (8 - 2) بالنسبة للحزم الساقطة عمودياً على كلا اللوحين، يصبح:

$$\Delta = t \epsilon \sin i \quad (8-3)$$

حيث ϵ هي الزاوية بين اللوحين. عند إضاءة اللوح الأول بحزمة متوازية من الأشعة ذات اللون الواحد، نحصل على ضوء أقل أو أكثر شدة وذلك اعتماداً على فرق المسار بين الأشعة المارة. ولو أضيء اللوح بضوء أبيض، فسوف يبدو وكأنه مصبوغ بصورة متساوية. أما لو أضيء اللوح بحزمة متفرقة من الأشعة، فسوف يبدو في المستوى البؤري لشيتية التليسكوب أشربة تداخلية متوافقة مع زاوية انكسار r واحدة، أي أشربة متساوية الميل. إن القمم التداخلية التي يمكن مشاهدتها هي فقط تلك التي فرق مسارها Δ يساوي:

$$\Delta = t \epsilon \sin i = m \frac{\lambda}{2} \quad (8-4)$$

حيث m عدد زوجي. أي أن شرط التداخل البناء هنا هو نفسه كما في تجربة شقي يونغ، وهو أن فرق المسار Δ يجب أن يساوي عدداً صحيحاً من الطول الموجي. أما الأهداب ذات الرتب الفردية m فهي نهايات دنيا. أما الفاصلة الهدبية، فهي هنا مسافة زاوية تتحدد بتغير الزاوية i بالمقدار Δi . ذلك الذي يتغير فوقه المسار بمقدار λ . أي أن:

$$\epsilon t \cos i \Delta i = \lambda$$

$$\Delta i = \frac{\lambda}{\epsilon t \cos i} \quad \text{أو} \quad (8-5) \quad \text{المسافة الزاوية}$$

ومن هنا ينتج أن المسافة الزاوية (المسافة بين شريطين متجاورين) تزداد بزيادة الطول الموجي وبنقصان الزاوية بين اللوحين. تتم مشاهدة الشكل التداخلي في عينية التليسكوب المضبوطة على المالا نهاية، حيث تشاهد عريضة. وهنا يجب صنع اللوحين بحيث يكونا سميكين (بحدود 20 mm فما فوق) لكي يمكن فصل الحزمتين 1 و 2 عن بعضهما قدر المستطاع حتى يمكن تغيير الشروط على طريق إحدى الحزمتين دون المساس بالأخرى. ولكي نغير الشروط في طريق إحدى الحزمتين يجب أن يكون لدينا معوض

المعادلة هي: $n_1 \lambda_1 = n_2 \lambda_2$ ، حيث n_1 معامل انكسار الهواء عند درجة الحرارة T_1 ، λ_1 هو طول الموجة في الهواء عند درجة الحرارة T_1 ، n_2 معامل انكسار الماء عند درجة الحرارة T_2 ، λ_2 هو طول الموجة في الماء عند درجة الحرارة T_2 .
 معادلة (8-6) هي: $n_1 \lambda_1 = n_2 \lambda_2$ ، حيث n_1 معامل انكسار الهواء عند درجة الحرارة T_1 ، λ_1 هو طول الموجة في الهواء عند درجة الحرارة T_1 ، n_2 معامل انكسار الماء عند درجة الحرارة T_2 ، λ_2 هو طول الموجة في الماء عند درجة الحرارة T_2 .
 معادلة (8-6) هي: $n_1 \lambda_1 = n_2 \lambda_2$ ، حيث n_1 معامل انكسار الهواء عند درجة الحرارة T_1 ، λ_1 هو طول الموجة في الهواء عند درجة الحرارة T_1 ، n_2 معامل انكسار الماء عند درجة الحرارة T_2 ، λ_2 هو طول الموجة في الماء عند درجة الحرارة T_2 .

$$n_1 \lambda_1 = n_2 \lambda_2 \quad (8-6)$$

فإذا كان $n_1 = 1$ للهواء، فإن معامل انكسار الشريحة

$$n = \frac{m \lambda_1}{\lambda_2} + 1 \quad (8-7)$$

عندما يراد معرفة معامل انكسار غاز ما عند درجة حرارة وتحت ضغط معين، يدخل الغاز ببطء في الأنبوبة T_2 (شكل 2) بعد تفريغها من الهواء، ويسخن للدرجة الحرارية المطلوبة وتحت الضغط المطلوب، وعند هذه اللحظة تحسب الأهداب التي تظهر في مجال الرؤية في عينية التليسكوب في جهاز جامين وتعاد كتابة المعادلة (8-6) بالصورة

$$\Delta n = \frac{\Delta m \lambda_1}{\lambda_2} = n_1 - n_2 \quad (8-8)$$

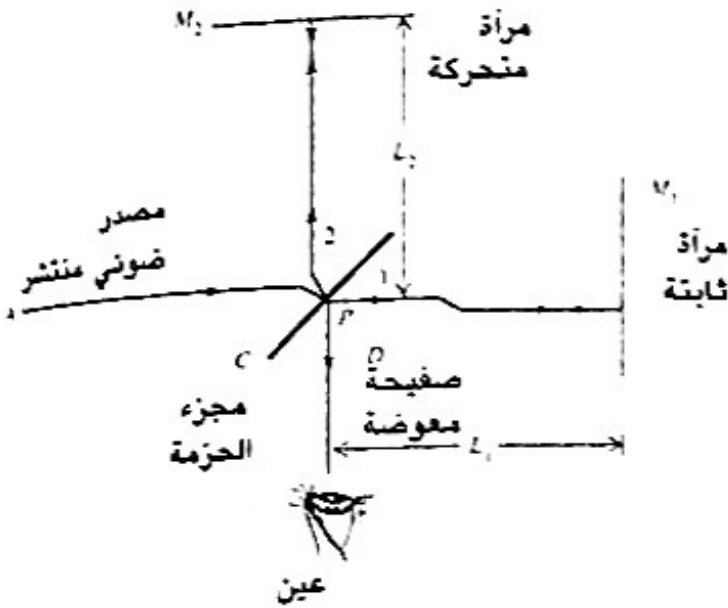
حيث n_2 معامل انكسار الغاز عند الدرجة الحرارية T_2 ، و Δn هو التعبير لحاصل معامل انكسار المادة المدروسة عند درجة الحرارة T_2

(3-8) مقياس تداخل مايكلسون

لعب مقياس تداخل مايكلسون (سنتسميه اختصاراً مدخل مايكلسون) دوراً هاماً في تاريخ العلم خلال الجزء الأخير من القرن التاسع عشر خصوصاً في تأسيس معايير للحقول، وذلك من خلال القياسات الصناعية لهذه في

أجريت بواسطة. وهو على العموم يتكون من منظومة أدوات بصرية. أولها مصدر ضوئي واحد عريض (بخلاف تجربة شتا يونغ التي يستخدم فيها الضوء من مصدرين ضيقين جداً) ممتدد أحادي اللون. يصدر منه شعاع واحد من النقطة A (شكل 3) ليصطدم بلوح زجاجي C يدعى مسجزي الحزمة. جانبه الأيمن مغطى بطبقة رقيقة من الفضة لعكس جزء من الضوء (الشعاع 2) عند النقطة P إلى مرآة متحركة M_2 . لينعكس منها أيضاً عائداً مرة أخرى إلى اللوح C لينفذ منه هذه المرة إلى عين المشاهد. أما الضوء المتبقي (الشعاع 1)، فهو يمر خلال السطح المفضض للوح C. ثم خلال لوح زجاجي عادي يعرف باللوح المعوض (لتعويض أو معادلة المسار الذي يقطعه الشعاع 2) يسقط من ثم على مرآة ثابتة M_1 .

شكل 3



شكل 3 مداخل مايكلسون يشاهد بواسطة شكل تداخلي ناتج عن فرق المسار بين الشعاعين 1 و 2. هذا الشكل التداخلي ينزاح بهدب واحد عندما تتحرك المرآة M_2 مسافة نصف طول موجي.

في الشكل 3، إذا كانت المسافتان L_1 و L_2 متساويتين تماماً والمرأتان M_1 و M_2 عند زاويتين قائمتين تماماً بالنسبة لبعضهما، فإن الصورة التخيلية للمرآة M_1 المتكونة بانعكاس الضوء الوارد منها بواسطة السطح المفضض للوح C، تتطابق مع المرآة M_2 . أما إذا لم تكن L_1 و L_2 متساويتين تماماً، فإن صورة M_1 تكون مزاحة قليلاً عن M_2 . وإذا لم تكن المرأتان متعامدتين تماماً، فإن صورة M_1 تعمل زاوية صغيرة جداً مع M_2 . ما يجعلهما تلعبان دور سطحي غشاء رقيق إسفيني الشكل (الفقرة 7 - 8) الفصل السابع، والضوء المنعكس

من هذين السطحين يشكل نفس النوع من الأهداب التداخلية - أهداب متساوية الميل ومختلفة السمك.

نفرض أن الزاوية بين المرآة M_2 والصورة التخيلية للمرآة M_1 كبيرة بما يكفي لظهور 5 أو 6 أهداب في مجال الرؤية. فإذا حركنا الآن المرآة M_2 ببضئ بمسافة نصف λ إلى الأمام أو إلى الخلف. فإن السمك الفعال للفشاء سيتغير بمقدار λ وسيتحرك كل هدب إلى اليسار أو إلى اليمين بمسافة تساوي الفاصلة الهدبية. أي بمقدار عرض هدب واحد الذي هو نصف λ . فإذا كنا نشاهد المواقع الهدبية خلال تلسكوب ذي عدسة عينية وعبرت m من الأهداب خلال تقاطع شعرتي العدسة عندما حركنا المرآة مسافة x . فإن:

$$x = m \frac{\lambda}{2} \quad (m = 1, 2, \dots) \quad (8 - 9)$$

فإذا كانت m بضع آلاف. فإن المسافة x أكبر من أن يمكن قياسها بدقة عالية للحصول على قيمة دقيقة للطول الموجي λ .

مثال 1 إذا أستخدم مدخال مايكلسون مع ضوء طوله 605.78 nm فما هو عدد الأهداب التي تعبر خلال تقاطع شعرتي التليسكوب عندما تتحرك المرآة M_2 مسافة 1 cm تماماً.

الحل: من المعادلة (8 - 9)

$$m = \frac{2x}{\lambda} = \frac{2(1 \times 10^{-2} \text{ m})}{605.78 \times 10^{-9}} = 33 \quad \text{هدباً}$$

إستخدامات أخرى لمقياس مايكلسون

في التطبيقات التكنولوجية يستخدم هذا الجهاز في قياس سمك الألواح العيارية بدقة عالية لا يتجاوز الخطأ فيها $0.005 \mu\text{m}$ وكذلك في دراسة استوائية السطوح المستوية. تحديد معاملات إنكسار بعض المواد. وأستعمل لأول مرة في قياس القيم المطلقة للأطوال الموجية.

إن التطبيق الأهم لمقياس تداخل مايكلسون هو في تجربة مايكلسون - مورلي (Michelson - Morley) التاريخية. ففي 1887 استخدم مايكلسون ومورلي هذه الأداة في محاولة لكشف حركة الأرض في الأثير. وقد ساعدت هذه المحاولة (التجربة) أنشتاين فيما بعد في تطوير نظرية النسبية الخاصة في

1905. فقد افترض أنشتاين أن سرعة الضوء لها نفس القيمة C بالنسبة إلى جميع المعالم العطالية، ما أوجب التخلي عن مفهوم الأثير.

(8 - 4) أجهزة تداخلية بأشعة ضوئية متعددة الانقسامات

تعاملنا لحد الآن مع حزمتين متداخلتين فقط، عندما تلتقي موجتان فقط بينهما فرق في الطور أو بعضه. لكن في حالة اللوح المتوازي السطحين يجب الأخذ في الاعتبار الانعكاسات العديدة للضوء عن السطحين الأمامي والخلفي للوح، وليس فقط الانعكاسين الأولين - الخارجي الأول (عن السطح الأمامي) والداخلي الأول (عن السطح الخلفي)، لأن جميع الحزم الثانوية المتشاكهة الناتجة عن الانعكاسات اللاحقة عن السطحين الأمامي والخلفي هي أيضاً متوازية فيما بينها وقادرة على التداخل، معطية أشرطة تداخلية متساوية الميل تتموضع في اللانهاية (لاحظ الفقرة (7 - 8))، ذلك لأن فرق المسار بين أي زوج من الأشعة المتجاورة هو $2nt \cos r$ ، حيث n معامل إنكسار اللوح (الشريحة أو الغشاء) و t سمكه، أما r فهي زاوية إنكسار الشعاع. فإذا كان n و t ثابتين، فإن الأشرطة التداخلية تتوافق مع قيمة معينة لـ r ، وبالتالي مع زاوية السقوط i . لذلك اشترطنا دائماً في الفصل السابق أن يكون سقوط الضوء على الشريحة عمودياً تقريباً لكي تكون $i = 0$ ومن ثم، فإن $r = 0$. وبالتالي، سيكون فرق المسار بين الشعاعين المتداخلين $2nt$ ، وهذا ما اعتبرناه دائماً.

غير ذلك، يجب الأخذ في الاعتبار أيضاً، أن شدة الأشعة 1، 2، 3، ... غير متكافئة، سواء أكانت في الضوء المنعكس أو في الضوء النافذ، وهذا يعتمد بالطبع على انعكاسية الشريحة أو الغشاء. فلو كان معامل الإنعكاس يساوي مثلاً 05%، أي أن هناك 05% من الضوء الساقط ينعكس، بينما ينفذ منه 95% ففي هذه الحالة، ستشكل شدة الحزمة المنعكسة الأولى r_1 05% من شدة الحزمة الساقطة I_0 والحزمة r_2 4.5%، وتشكل شدة الحزمة r_3 1% فقط من شدة الحزمة الساقطة.. بعبارة أخرى إن الحزمة الثالثة وبقية الحزم الأخرى التي ما بعدها تختفي عملياً. فاعتماداً على مقدار معامل الإنعكاس يزداد عدد الأشعة التي شددها ما زالت كافية لأن يمكن حسابها (عدد الأشعة

الفعالة)، وبالتالي، فإنه، كلما كان معامل الانعكاس أكبر، كلما كان عدد الأشعة التي تساهم في إنتاج الشكل التداخلي أكبر (شكل 4).
وكما في الفصل السابق، فإن شدة الحزمة المحصلة تعتمد على فرق الطور بين الحزم المتجاورة $\varphi = K\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2nt\cos r$ أو: $\varphi = K\Delta = \frac{2\pi}{\lambda}$
عندما يكون سقوط الضوء عمودياً على الشريحة (أو الغشاء - معادلة (40 - 7)).

فإذا كانت R ترمز لمعامل الانعكاس، أي الشدة الجزئية للحزمة المنعكسة، و T لمعامل النفاذ، فإن توزيع الشدة في الأشرطة التداخلية يعبر عنه، اعتماداً على فرق الطور ϕ كالتالي:

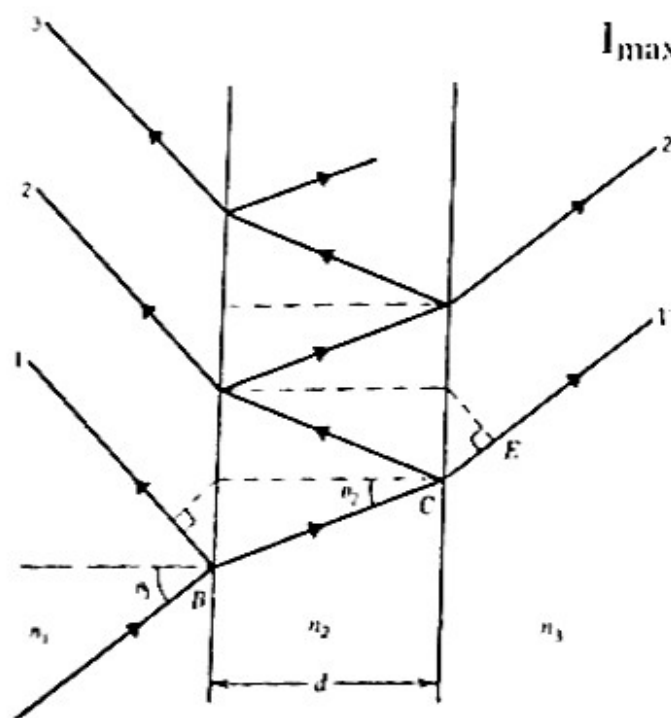
$$I = \frac{T^2}{(1-R)^2} \frac{I_0}{1 + \sin^2 \frac{\phi}{2} (4R/(1-R)^2)}$$

ولأن $\sin^2 \phi/2$ يتغير من 0 إلى 1، فإن الشدة I تتغير باستمرار:

$$I_{\max} = \frac{I_0 T^2}{(1-R)^2}, (\sin \frac{\phi}{2} = 0), I_{\min} = \frac{I_0 T^2}{(1+R)^2}, (\sin \frac{\phi}{2} = 1) \quad (8 - 11)$$

نلاحظ أنه عند $\sin^2 \frac{\phi}{2}$ ، فإن القيمة الدنيا للشدة لا تؤول إلى الصفر عند أي مكان، وقيمتها العددية تعتمد على R و T . فإذا اعتبرنا أن الشريحة العاكسة غير ماصة، أي أن $T + R = 1$ (في الحالة العامة يكون $T + R + A = 1$ ، حيث A معامل الامتصاص)، فإن القيمة العظمى للشدة:

$$I_{\max} = I_0 \quad (8 - 12)$$



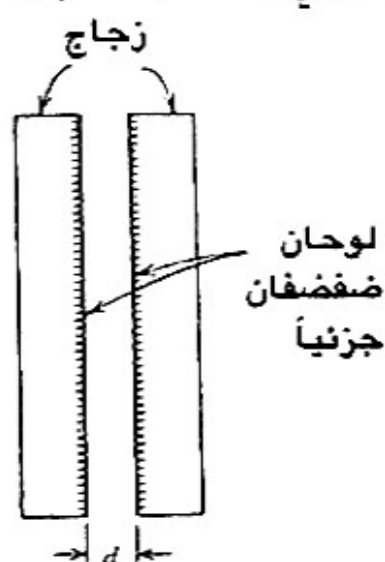
شكل 4

شكل 4 الانعكاسات المتعددة في الشريحة
أو الغشاء الرقيق المتوازي السطحين

بالتعبير عن فوق الطور ϕ في المعادلة (41 - 7) بـ $\phi = 2\pi m$ ، حيث m رتبة الهدب التداخلي، نجد أن الشدة العظمى تتوافق مع العدد الصحيح لـ m ، بينما الشدة الدنيا مع العدد نصف الصحيح لـ m ، وهي تقع بين قيمتين عظميين للشدة.

إن الشروط التي تضمن تداخل حزم كثيرة قريبة بشدتها بعضها لبعض، تتحقق بجهازين، أهمهما مقياس فابري - بيرو ولوح لومير - جيركه، سنشرح منهما:

مقياس فابري - بيرو، ويتكون من لوحين زجاجيين مستويين مفضيين تفضيضاً خفيفاً عند سطحيهما الداخليين المتقابلين، مرتبين بكيفية بحيث يكونا شديداً التوازي (شكل 5)، تفصلهما طبقة (فسحة) هوائية يتراوح سمكها بين 1 إلى 100 mm، (وتصل إلى 1m في المقاييس الخاصة). وبالتوافق مع ذلك، فإن الرتب المرئية للتداخل كبيرة جداً. ففي طبقة هوائية سمكها $t = 5$ mm هناك 20000 هدب ($m = 20000$) يمكن أن تظهر. أما سطوع الشكل التداخلي فهو يزداد بزيادة معامل الانعكاس R لسطحي اللوحين العاكسين، الذي يصل إلى 99% في الأغشية الزجاجية المكونة من عدة طبقات.



شكل 5

شكل 5 مقياس تداخل فابري - بيرو

يستخدم مقياس فابري - بيرو غالباً في العملية الإحصائية بالنظر خلاله عند المصدر المنتشر. وهذا ينتج أهداباً مماثلة تماماً لأهداب هايدنجر الدائرية (8 - 1)، ولكن النفوذ T الآن في الأهداب ليس دالة جيبيية للزحزة الطورية $\Delta\phi$ ولكنه يظهر قمماً حادة مع نهايات دنيا عريضة (شكل 6)، ما

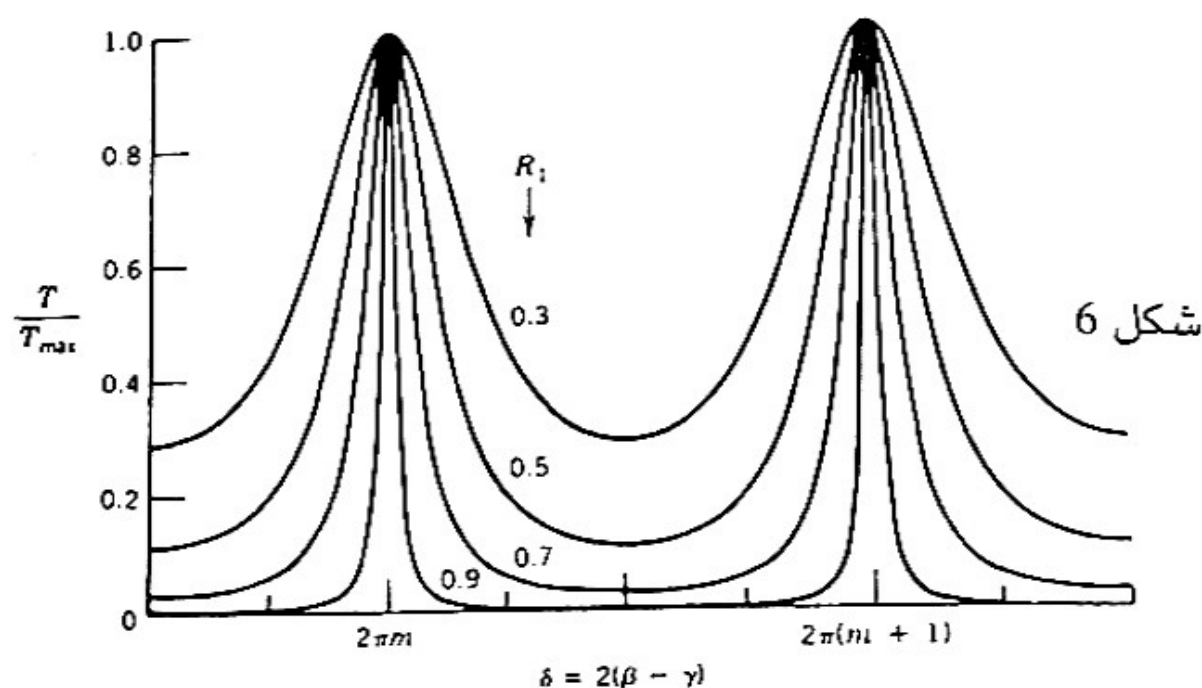
يحدث تغييراً لفرق الطور بين إسهامات الانعكاسات المضاعفة المتعاقبة قياساً بفرق الطور (41 - 7) إسهامات الانعكاسات المضاعفة المتعاقبة في الأغشية الرقيقة، بالصورة:

$$\beta = K\Delta - 2\gamma = \frac{4\pi nt}{\lambda_0} \cos\theta_t - 2\gamma \quad (8 - 13)$$

حيث n ، t ، و θ_t تقاس في الفجوة بين الصفيحتين. إن شرط القمم التداخلية في الشكل التداخلي لمقياس فابري - بيرو هو نفسه ذلك الذي للأغشية الرقيقة (41 - 7)

$$2nt \cos\theta_t = m\lambda_0 \quad \text{أو} \quad 2nt = m\lambda_0 \quad (\theta_t = 0) \quad (8 - 14)$$

حيث أهملت الزحزحة في الطور γ وذلك لصغرها قياساً بالكمية t/λ_0 . من هذه المعادلة نلاحظ أن بالإمكان إنتقاء الطول الموجي لمقياس فابري - بيرو، فمن أجل رتبة معينة m نجد أن الطول الموجي الأطول يعطي زيادة للقمم الحلقية عند أصغر قيم θ_t .



شكل 6 طبيعة دالة آيري لنفوذ الانعكاسية العالية.

شكل 6 بصريات 303

من الأهمية بمكان حساب شدة الضوء النافذ خلال المقياس فبقدر زيادة معامل الانعكاس R تبقى شدة القمم ثابتة بغياب الإمتصاص وتساوي شدة الحزمة الساقطة عند أية قيمة لـ R (المعادلة (6 - 7))، إن زيادة R تكتسب أهميتها من حقيقة أنها تزيد من تباين الشكل التداخلي، أي تنقص النهايات الدنيا عند القمم غير المتغيرة وعند وجود الامتصاص، فإن الشدة في القيمة تهبط. وفي هذه الحالة، فإن النفاذية T لا تساوي $(1 - R)$ ، وتحل محلها العلاقة $T + R + A = 1$. ومن ثم تعاد كتابة المعادلة (6 - 7) بالصورة:

$$I_{\max} = \frac{T^2 I_0}{(1-R)^2} = \frac{T^2 I_0}{(T+A)^2} \quad (8 - 15)$$

عند تغطية لوح مقياس فابري - بيرو بغطاء معدني جيد تقل الإمتصاصية إلى 1%، وفي هذه الحالة تبلغ الانعكاسات $R = 90\%$ ، و $T = 9\%$ وتشكل 80% من $I_{\max}$ شدة الضوء الساقط، عند $R = 95\%$ ، $T = 4\%$ ، تصبح $I_{\max} = 65\%$. وعلى العموم، يفضل في هذه الحالة الغطاء العازل للحصول على شدة عظمى على الغطاء المعدني الذي تهبط معه الشدة العظمى للتداخل عادة. كذلك يمكن تغيير R ، T ، و A ، وهذه ميزة للمقياس.

لمقياس فابري - بيرو ميزة أخرى، هي قدرته على التحليل. فلو وجد طولان موجيان λ و $\lambda + \Delta\lambda$ ، فإننا نشاهد تراكباً للأشكال التداخلية النافذة لكل طول موجي على حدة بـ $\Delta\lambda$ صغيرة في الرتبة m :

$$\Delta(\delta\lambda) = \Delta(4\pi nt \cos\theta_i) = 2\pi m \Delta\lambda \quad (8 - 16)$$

(8 - 5) التداخل عند فروق المسارات الكبيرة

تداخل الأشعة في مقياسي مايكلسون وفابري بيرو حصلت عند فروق كبيرة في مساراتها، تصل لحوالي مليون طول موجي، ولذلك تتطلب رؤية الأهداف التداخلية أحادية عالية في الضوء المستخدم. فمن المفهوم أنه إذا أصدرت الذرة مجموعة من بعض آلاف من الاهتزازات الجيبية الصحيحة، ومن ثم ينقطع إشعاعها (هذا النوع من الإشعاع ليس قريباً جداً من الإشعاع الوحيد اللون)، لذلك فإن التداخل يمثل هذا الفرق في المسار الذي يبلغ مئات الآلاف من الأطوال الموجية لن يحدث. فعندما تصل مقدمة قطار الأمواج السائر

بالطريق الأكثر طولاً، يكون قطار الأمواج التالي، في الطريق الأكثر قصراً، قد تجاوز تماماً النقطة المنشودة وأُستبدل بقطار أمواج أُرسِل من قبل ذرات أُخرى أو بواسطة فعل انبعاثي آخر. لهذا السبب ليس ثمة كلام عن قطارات أمواج متشاكهة ولا عن تداخل ممكن الحدوث.

من جانب آخر، كلما كان قطار الأمواج، المنبعث بواسطة الذرة، أطول، أي كلما كان الضوء عالي الأحادية اللونية، كلما كان التداخل ممكناً عند فرق المسار الكبير. ففي مصدر الضوء بواسطة التفريغ الغازي المستخدم في مقياس مايكلسون، أمكن مشاهدة التداخل عند فرق مسار حوالي نصف مليون طول موجي. هذا النوع من التجارب يمكن استخدامه لوصف عمليات إشعاع الذرة بيانياً. وعلى العكس من ذلك، امتلاك المصدر الضوئي الأحادي اللون يحقق تداخلاً عند فرق مسار كبير وحينذاك يمكن تحديد الطول الموجي بدقة كبيرة جداً. ففي ضوء ليزر الهليوم - نيود يمكن مشاهدة التداخل عند فرق مسار بحدود $10^8 - 10^{10}$ طول موجي. فصناعة مصادر ضوئية عالية الأحادية اللونية كالليزرات تساعد على استبدال مقاييس الأطوال التقليدية بمقاييس ضوئية غير عادية.

ولكي يبعث المصدر إشعاعاً أحادي اللون بدرجة كافية وبطول موجي ملائم يمكن إعادة إنتاجه، لا بد من إبعاد جميع الأسباب المؤدية إلى الإشعاعات الجانبية غير المرغوبة. فالإشعاع يجب أن يحدث في الأبخرة ذات الضغط المنخفض وبغياب التهيج الناتج عن تصادم الذرات وعند تيار تفريغ غير كبير لتقليل فعل الإثارة الناجم عن المجالات الكهربائية (أثر شتراك) المصاحبة للإلكترونات وأيونات البخار عند تركيزها العالي. لكن تبقى صعوبة التخلص من أثر دوبلر الناجم عن الحركة الحرارية للذرات المشعة والتعقيد المرتبط بينية الذرات المشعة. ولاضعافه على الأقل، يجب أن تكون الذرات المستخدمة للإشعاع من نوع ذوات الكتل الكبيرة، التي تُظهر مرونة بخارية مناسبة عند درجة حرارة منخفضة. إن تعقيد الخطوط المُشعَّة (وتعرف بالبنية فوق الدقيقة للخطوط الطيفية) مُشترط بعزم نواة الذرة على السحابة الإلكترونية. فوجود العزم النووي (برم الإلكترون) مرتبط بزوجية أو لا زوجية الوزن الذري. لكن الذرات الطبيعية تمثل دائماً خليطاً من النظائر،

ولذلك فإن الخطوط الطيفية هي منظومة مركبات مرتبة فوق بعضها بعض
بازدحام شديد .

إن نجاحات الفيزياء النووية صنعتها امكانيات الحصول على نظائر منفردة
فعلى سبيل المثال، عند تشعيع الذهب بالنيوترونات يمكن الحصول على
نظير الزئبق بكتلة زوجية ^{200}Hg الذي يجب أن لا يظهر بنية فوق دقيقة.
إن دراسة عدد كبير من الخطوط في أطياف إشعاعات سلسلة من مواد
قادت إلى ظهور عدد من الخطوط الطيفية ذات الأحادية التولية المعينة
عند ظروف معينة وبأطوال موجية يمكن إعادة إنتاجها.

(8 - 6) بعض استعمالات طرق البحث التداخلية

منذ زمن والحاجة تتزايد إلى قياسات دقيقة لتحديد الطول، ليس للأغراض
العلمية فقط، بل وللأغراض التقنية أيضاً. لهذا الغرض استخدم ما يعرف
بالتقاييس التداخلية، وهي عبارة عن صفائح فولاذية مختلفة لتخانات، عموماً
سطوحها المتقابلة بطريقة استثنائية وجعلت مستوية بدرجة صارمة وموزونة
لبعضها بعضاً؛ تُضغط لبعضها بإحكام لتشكل مجاميع مختلفة لأطوال
محددة بدقة عالية جداً. لبلوغ هذا الهدف استعملت طرق التداخل وأهمها
التداخل المتحقق في مقياس مايكلسون أو فابري - بيرو، فيكون أحد السطحين
العاكسة هو الصفيحة - النهائية، أما سمك الصفيحة فيحدد بالصفة إلى
السطح العاكس الثاني.

تساعد الطرق التداخلية أيضاً، إضافة إلى ذلك، وبدقة عالية، على تحديد
نوعية السطح الصقيل، فالدقة العالية والاستثنائية اللازمة عند تحضير
المرايا، العدسات، والمناشير هي شرط ضروري في صناعة الأدوات الضوئية
العصرية العالية النوعية.

إن استخدام الطرق التداخلية مبني عادة على استعمال المعيار النموذجي
المصنوع بمهارة عالية، فبواسطة شكل وعرض الأهداب التداخلية يمكن
الحكم على عدم دقة معالجة السطوح وتشخيص العيوب والنواقص فيها.
إذا فضض سطح الصفيحة المجربة والزجاج المجرب تشاهد، بفعل
الانعكاسات المتكررة، أشربة هدية أكثر ضيقاً وحدة، ما يساعد على رفع

دقة السيطرة إلى أقل من 0.003 مايكرومتر. أما إذا كان السطح المحرب ذو مقاييس كبيرة (تصل إلى بعض الأمتار) فالزجاج في هذه الحالة يصبح غير نافع. وهناك مقاييس تداخلية مخصصة لضبط نوعية المنظومات البصرية المعدة للاستعمال (كاعدسات الشيئية)، ليس فقط من حيث جودة السطح، بل وتجانس الزجاج الذي صنعت منه الأداة البصرية.

هناك أيضاً مقاييس تداخلية، مثل مقياس لينيك (B.P. Linik)، تساعد على ضبط استقامة سطح يصل طوله إلى 5 m. بدقة لا يتجاوز الخطأ فيها $1 \mu m$. وهناك مقياس لينيك الميكروي لضبط نظافة السطوح المعدنية المعاملة. تستخدم ظاهرة التداخل في الأغشية الرقيقة في مجموعة من الأجهزة كطريقة حساسة تساعد في الحكم على التغيرات الممكنة في سمك طبقة هوائية ما. فمثلاً، في مقياس التمدد لفيزو - أبي (dilometer) يسبب التمدد الحراري البسيط تغييراً في سمك الطبقة الهوائية بين الجسم المفحوص وزجاج المقياس.

يتألف مقياس تمدد فيزو - أبي من حلقة (k) من الصوان الشفاف المنصهر (كوارتز) تستقر عليها صفيحة زجاجية عيارية (P)، وداخل الحلقة توضع المادة المراد فحصها (R) بهيئة عمود بمستويات صقيلة. وهناك فرجة رقيقة (M) بين السطوح تضاء بضوء وحيد اللون فتعطي شكلاً تداخلياً.

عند تسخين الجهاز يتغير سمك الفرجة M نتيجة لاختلاف معاملي تمدد الحلقة K والمادة R، ونتيجة لذلك تحصل زحزحة للأشرطة التداخلية يمكن تعليمها بمساعدة العلامة m. وهنا كما في مقياس مايكلسون، زحزحة هدب واحد تعني زيادة أو نقصان سمك الفرجة الهوائية M بمقدار λ ، أي تغيير فرق المسار بمقدار λ . وبحساب الزيادة أو النقصان في سمك الفرجة وفقاً للمعادلة (3 - 7)، التي هي مقدار تمدد المادة، نستطيع معرفة معامل تمدد المادة. ومن خلال ذلك أيضاً يمكن حساب اعتماد معامل إنكسار الهواء على درجة الحرارة.

إن الطرق التداخلية تعطي إمكانية تحديد التغيرات الحاصلة لمعامل الإنكسار تحت تأثير درجات الحرارة وبدقة عالية. فالتغير في سمك الطبقة الهوائية (Δl)، المحسوب بعدد الأهداب المزاحة من مجال النظر مضروباً بنصف طول

الموجة هو في الحقيقة نصف فرق المسار الضوئي (معادلة (9 - 8))، أي أن:

$$n\Delta t = m \frac{\lambda}{2} \quad (8 - 17)$$

وهذا يماثل ما يقوم به مقياس إنكسار جامين tomeler jamin refrac وغيره من المقاييس، ذات الطبيعة التقنية المهيئة لقياس التغيرات غير الكبيرة في معاملات إنكسار الغازات والسوائل الناجمة عن الشوائب، مثل مقياس التداخل التقني لتحديد مكونات الغازات في المناجم أو لتحليل كميات الطبقات المذابة في الماء، وفي معامل التحاليل الطبية لدراسة التغيرات في تركيب الدم الناجمة عن الأمراض. إن تحديد معامل الإنكسار بهذه الطرق بلغت دقة عالية وصلت إلى أكثر من 8 أصفار.

تستخدم ظواهر التداخل أيضاً للتحديد الدقيق للزوايا. فلضبط صحة الزوايا في المناشير الزجاجية تستخدم ظواهر التداخل في الشرائح الرقيقة (مثل الفسحة الهوائية ذات الشكل الإسفيني) تُحضر الزاوية العيارية الزجاجية وتوضع فوق حافة المنشور، وبواسطة الأشكال التداخلية المحصلة من هذا الترتيب يمكن ضبط صحة زوايا المنشور بدقة، تتوافق مع الفسحة الهوائية ذات الشكل الإسفيني، التي ضلعها لا يتجاوز $0.03\mu m$.

أما مايكلسون فقد ذهب بعيداً في استخداماته للطرق التداخلية في المشاهدة عندما قام بتقييم المسافات الزاوية بين نجمتين وكذلك القطر الزاوي للنجمة. طريقة مايكلسون هذه تساوي ما قام به أيضاً لتحديد مقاييس الدقائق شبه الميكروسكوبية. طرق التداخل في القياس هذه تساعد أيضاً وبنفس الدقة على تحديد الأطوال الموجية المستخدمة في بحوث علم الأطياف (في دراسة البنية الدقيقة للخطوط الطيفية من حيث شكل وعرض الخط الطيفي). إن نقاط القوة والضعف في الطرق الطيفية للقياس ستناقش في الفصل اللاحق.

مسائل

1. حزمة ضوئية تسقط بزاوية $i = 49^\circ$ على لوح مقياس جامين، سمكه $t = 2 \text{ cm}$ ومعامل إنكساره $n = 1.5$ وتعطي قمة من الرتبة الخامسة عندما

استخدم ضوء أحادي اللون ($\lambda = 500 \text{ nm}$). أوجد الزاوية بين لوحين المقياس.

2. كيف يتغير شكل التداخل المحصل بواسطة لوح لومير - جيركه ($n = 1.5$) إذا فضض أحد سطحي اللوح بكاربونات الفضة ($n = 1.75$)؟

3. كيف يتغير قياس حلقة التداخل عند استبدال الفسحة الهوائية في مقياس فابري - بير بالزجاج ($n = 1.5$)؟
ملاحظة: المسافة الزاوية (5 - 7) بين الأشرطة التداخلية في مقياس فابري - بيرو في حالة الهواء:

$$\frac{\lambda}{2t \sin i}$$

وفي حالة الزجاج:

$$\delta i = n \frac{\cos r}{\cos i} \delta r = n \frac{\cos r}{\cos i} \frac{\lambda}{2t \sin i}$$

4. إذا تحركت المرآة M_2 في مدخال مايكلسون خلال 0.233 mm يمر أمام العين 792 هدباً بواسطة المقياس الضوئي، فما هو الطول الموجي للضوء المستخدم؟

5. غشاء رقيق معامل إنكساره $n = 1.42$ بالنسبة لضوء طوله الموجي 589 nm ، وضع في أحد ذراعي مدخال مايكلسون فأحدث زحزحة 7 أهذاب تداخلية، ما هو سمك الغشاء؟

(ملاحظة: في هذه الحالة نطبق المعادلة (31 - 6)، ولكن بدلاً من المسافة x ، التي تحركتها المرآة M_2 والتي هي في الأساس نصف فرق المسار L من m من الأهذاب، نضع $x - nt$. فتصبح المعادلة بالصورة $nt - x = \frac{1}{2} m \lambda$ $2nx - 2x = mx$ حيث السمك t هو الطول x نفسه).

6. حجرة مغلقة بإحكام طولها 5.0 cm تحتوي على شبك زجاجي، وضعت في أحد ذراعي مدخال مايكلسون، كما هو مبين على الشكل 16. استخدم ضوء طوله الموجي $\lambda = 500 \text{ nm}$. فرغ الهواء تدريجياً من داخل الحجرة باستخدام مضخة تفريغ؛ وأثناء تفريغ: الهواء شوهد 60 هدباً يمر خلال المشهد. أوجد معامل إنكسار الهواء عند الضغط الجوي.

(أنظر الملاحظة في آخر المسألة 23).

الفصل التاسع

كيود الضوء

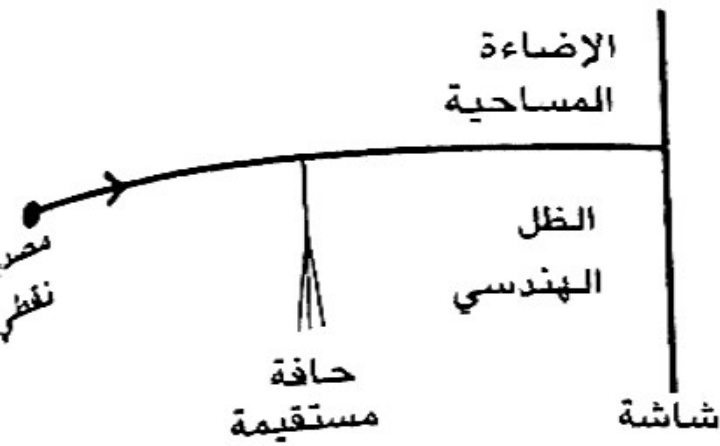
الحيود هو شيء أو إنبساط الأمواج عندما تتصادم مع جسم ما (حاجز أو فتحة) في مسارها، وهو يحدث لجميع أنواع الأمواج، فالأمواج الصوتية، مثلاً، تنحني بواسطة الأجسام العادية، ونتيجة لذلك نستطيع سماع الصوت حتى لو لم تكن على خط مباشر مع المصدر. ولكي يحدث الحيود يجب أن يكون قياس الجسم (العائق) من رتبة الطول الموجي للأمواج الساقطة، فعندما يكون الطول الموجي أصغر بكثير من قياس الجسم، فلا نشاهد حيوداً، بل ظلاً حاداً يلقيه الجسم.

يتألف الشكل الحيوي من عصابات (جمع عصبية التي هي شريط) مضيئة ومظلمة تماثل الأشكال التداخلية التي سبق لنا دراستها في الفصل السابع. بدراسة هذه الأشكال التداخلية نستطيع التعرف على الجسم المحيد (الذي سبب الحيود): فمثلاً، حيود الأشعة السينية هو طريقة مهمة لدراسة بنية الجسم الصلب، وحيود أشعة جاما يستخدم لدراسة الأنوية، رغم ذلك، فللحيود آثاره غير المرغوبة، كانتشار الضوء عند دخوله ثقب التليسكوب، ما يقلل من قدرته على التحليل، أو فصل النجوم التي تظهر قريبة الواحدة من الأخرى. وفوق ذلك كله، فالحيود هو ظاهرة تبرز فيها الصفات الموجية للضوء بشروط قريبة من شروط تطبيق الضوء الهندسي. ومن أكثر ظواهر الحيود تميزاً تلك التي تظهر في المناطق الفضائية التي تتغير فيها شدة الإشعاع الضوئي تغيراً حاداً من نقطة إلى أخرى.

(9 - 1) حيود فرنل وحيود فراونهوفر

طبقاً للبصريات الهندسية، عندما يوضع جسم معتم بين مصدر ضوئي نقطي وشاشة (شكل 1 أ) فإن ظل الجسم يشكل خطاً حاداً تماماً. فلا وجود للضوء عند جميع نقاط الشاشة داخل الظل الهندسي، بينما تكون المساحة خارج الظل الهندسي مضاءة بصورة منتظمة تقريباً (شكل 1). ولكن وكما شاهدنا في فصل التداخل، فإن الطبيعة الموجية للضوء تسبب حدوث أشياء كثيرة لا يمكن فهمها على أساس نموذج البصريات الهندسية البسيط. وأهم أنواع مثل هذه الآثار تظهر عندما يصدم الضوء حاجزاً فيه ثقب أو حافة (شكل 2 أ)، ففي هذه الحالة تتكون أشكال تداخلية تصنف تحت

موضوع الحيود، تظهر بهيئة سلسلة من أشرطة مضيئة ومظلمة متناوبة (شكل 2 ب)

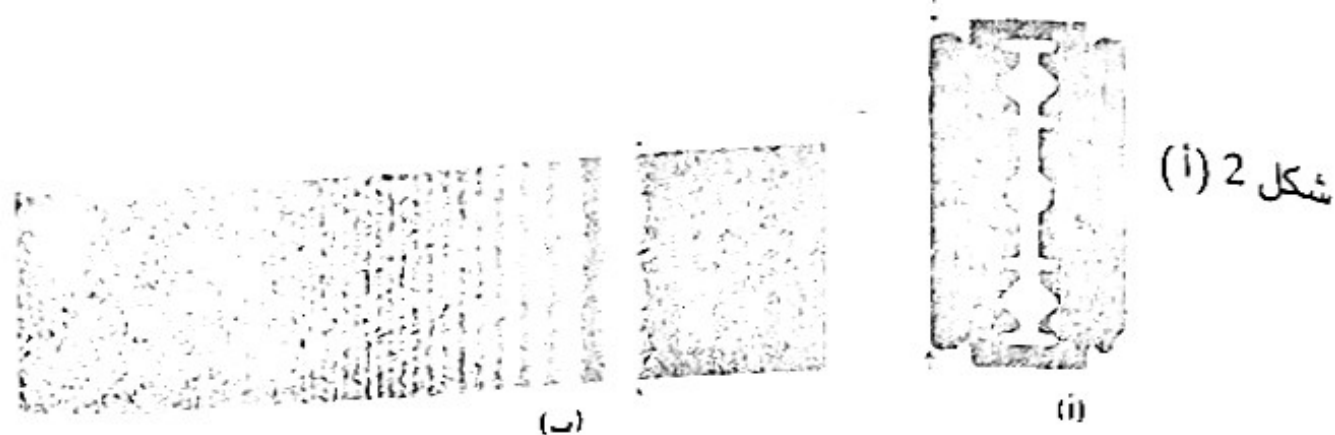


شكل 1

شكل 1 تتوقع البصريات الهندسية أن الحافة المستقيمة تعطي ظلاً بحدود حادة ومنطقة إضاءة منتظمة نسبياً فوقه (فوق الظل).

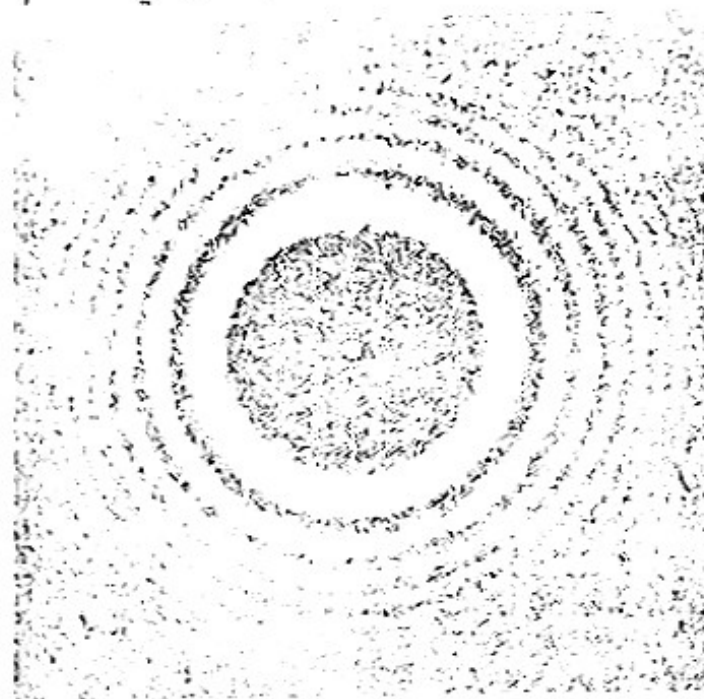
الصورة المبينة في الشكل 2 (أ) كانت قد عملت بوضع شفرة حلاقة في منتصف الطريق بين ثقب صغير مضاء بضوء وحيد اللون وفلم فوتوغرافي. فسجل الفلم ظل الشفرة. أما الشكل 2 (ب)، فهو تكبير للمنطقة القريبة من ظل الحافة اليسرى للشفرة، المشار لحظة (خط الظل) الهندسي بالسهم. وقد حددت المساحة خارج الظل الهندسي بعصابات مضيئة ومظلمة متبادلة. يلاحظ أيضاً بعض الضوء في منطقة الظل رغم أنها غير مرئية جيداً في الصورة. وأول هدب مضيء مجاور لمنطقة الظل الهندسي تماماً هو فعلاً أكثر إضاءة من بقية المنقة المضاء بانتظام في أقصى اليسار. هذه التجربة البسيطة تعطينا فكرة أولية عن غنى وتعقيد ظاهرة الظل بواسطة جسم معتم، التي تبدو بسيطة في مظهرها الخارجي. هذا النوع من الحيود لا يمكن مشاهدته في الحياة اليومية العادية لأن معظم مصادر الضوء العادية ليست أحادية اللون ولا نقطية.

رغم وصف الحيود أحياناً بأنه انثناء الضوء حول العوائق، لكن العمليات المسببة للآثار الحيودية موجودة في انتشار كل موجة. فعندما يُقطع جزء من الموجة بواسطة عائق ما، فإننا نشاهد الآثار الحيودية الناتجة من تداخل الأجزاء المتبقية للجبهات الموجية، فكل أداة بصرية تستخدم جزءاً محدوداً فقط من الموجة: فمثلاً، التليسكوب يستخدم فقط جزء الموجة المسموح به من قبل عدسته الشيئية. وهكذا يلعب الحيود دوراً في جميع الظواهر البصرية تقريباً.



شكل 2 (أ) ظل فعلي لشفرة حلاقة مضاءة بضوء أحادي اللون من مصدر نقطي - (ب) ظل مكبر للحافة المستقيمة للشفرة، والأسهم إلى الموضع الهندسي للظل.

لقد استخدمت ظاهرة التداخل بكل تنوعاتها كبرهان مقنع على الطبيعة الموجية للعمليات الضوئية. وعلى أساس هذه الظاهرة، خصوصاً بعد تجربة يونغ الرائدة، شرح فرنل الحيود، (French engineer Augustin Fresnel) (1788 - 1827) وتنبأ بالشكل (النمط) الحيودي المبين على الشكل 3، الناتج عند وضع جسم معتم (قرص) في مسار ضوء وحيد اللون، وتظهر فيه بقعة مضيئة ترى بوضوح، وتدعى بقعة بواسون، وهي تدعم نظرية فرنل الحيودية.



شكل 3

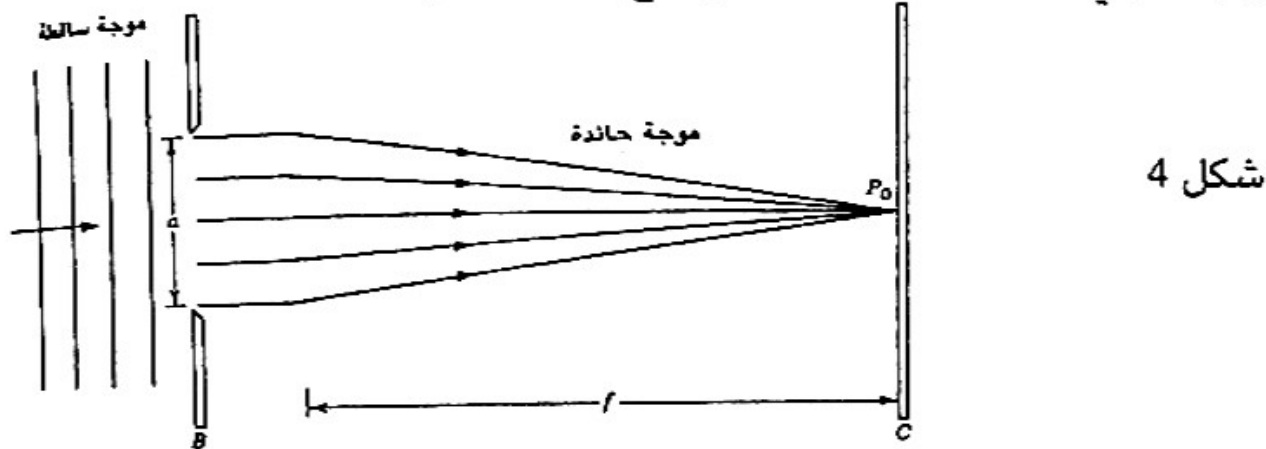
شكل 3 الشكل الحيودي للقرص، وتظهر في مركزه بقعة بواسون المركزية.

في الشكل 1 يقع كل من الحيودي النقطي والشاشة عند مسافات محدودة العائق المكون للشكل الحيودي. هذه الوضعية توصف بحيود الحقل - القرص أو حيود فرنل. أما إذا كان المصدر، العائق، والشاشة بعيدين عن بعض بعضاً بحيث يمكن اعتبار جميع الخطوط من المصدر إلى العائق ومن العائق إلى الشاشة متوازية، فإن ذلك يدعى بحيود الحقل - البعيد، أو حيود فراونهوفر، وهو أبسط من حيود فرنل نظراً لامكانية تحليله بالتفصيل. في النهاية يمكن التأكيد أن لا وجود لتمييز أساسي بين التداخل والحيود فتعبير التداخل أستخدم لوصف الآثار الناجمة عن تفاعل عدد صغير المصادر، عادة مصدرين، أما الحيود فيتضمن عادة توزيعاً مستمراً لموجات هيجنز عبر مساحة ثقب أو عبر عدد كبير جداً من المصادر أو الثقوب. فكما الظاهرتان تخضعان لنفس المبادئ الفيزيائية - الترصيف ومبدأ هيجنز.

(9 - 2) الحيود من شق واحد

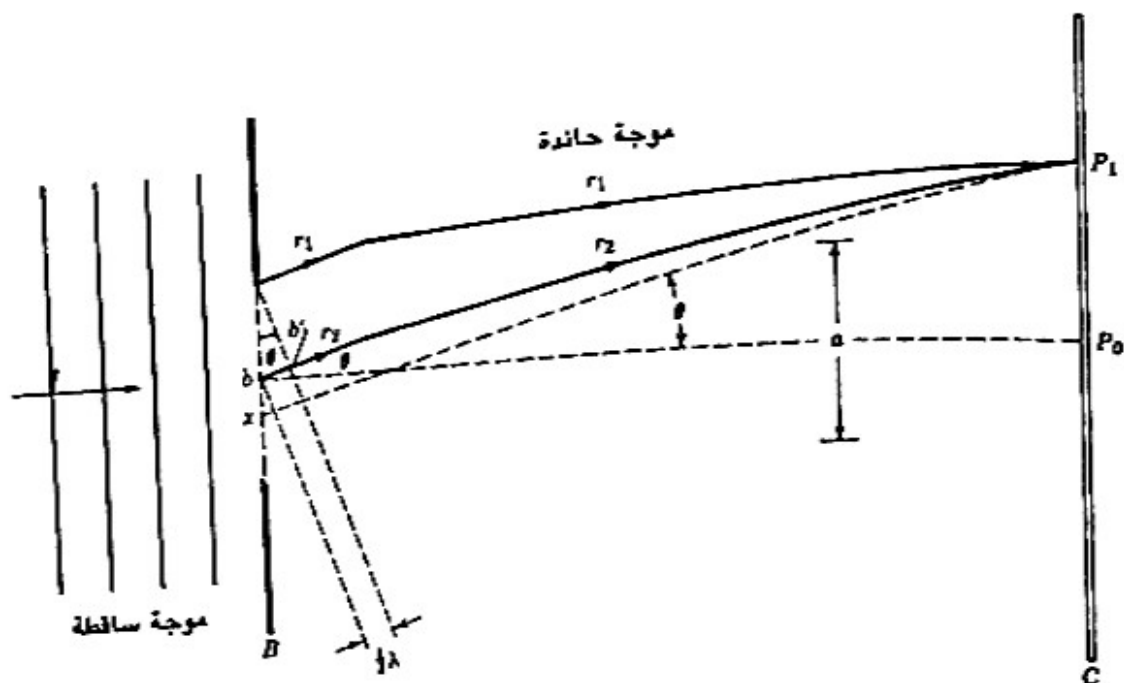
أبسط شكل (نمط) حيودي يمكن تحليله هو الحيود الناتج بواسطة شق ضيق طويل. والذي يهمنا في هذه الفقرة هو مناقشة مواقع النهايات الدنيا والعظمى في الشكل الحيودي كما هي موضحة على الشكل 1 ب. فتبعاً لهذه المواقع تتحدد شدة الضوء عند كل نهاية.

يبين الشكل 4 موجة مستوية تسقط عمودياً على شق عرضه a ، والأشعة التي تفاديه موازية للمحور المركزي الأفقي تجلب إلى بؤرة عدسة مجمعة عند النقطة المركزية P_0 على الشاشة C المنطبقة على المستوي البؤري للعدسة. هذه الأشعة تكون في الطور عند مستوي الشق وتبقى كذلك بعد تبئيرها. ولهذا فهي تتداخل تداخلاً بناءً وتنتج قمة عند P_0 .



شكل 4 الشروط عند القمة المركزية للشكل الحيودي

نعتبر الآن نقطة أخرى على الشاشة، تصلها الأشعة الضوئية المغادرة للشق بزاوية θ مع المحور المركزي (شكل 5). نأخذ الشعاع r_1 الصادر من قمة الشق والشعاع r_2 الصادر من مركزه.



شكل 5

شكل 5 الشروط عند أول نهاية دنيا للشكل الحيودي. الزاوية θ هي تلك التي تكون عندما المسافة bb' مساوية لنصف الطول الموجي للضوء الساقط.

أما الشعاع xP_1 ، فهو يمر خلال مركز العدسة دون انحراف، وبالتالي، فهو يحدد θ . فإذا أُختيرت θ بحيث تكون المسافة bb' في الشكل مساوية لنصف طول موجي، فإن الشعاعين r_1 و r_2 يكونان خارج الطور وسيكون التداخل هداماً عند P_1 . والشئ نفسه يحصل بالنسبة لشعاع آخر تحت r_1 تماماً وآخر تحت r_2 تماماً. فلكل شعاع يمر خلال النصف الأعلى للشق، يوجد شعاع مطابق يمر خلال النصف الأسفل، بحيث أن الشعاعين خارج الطور عند النقطة P_1 . ولذلك فإن كل شعاع يصل عند P_1 من النصف الأعلى للشق يتداخل إتلافياً مع نظيره الموضعي الوارد من النصف الأسفل للشق. ومن ثم، فإن الشدة عند P_1 ستكون صفراً، وستكون أول نهاية دنيا للشكل الحيودي. ولأن المسافة bb' تساوي $(a/2) \sin \theta$ ، فإن شرط أو لنهاية حيودية دنيا هو:

$$\frac{a}{2} \sin \theta = \frac{1}{2} \lambda, \text{ أو } \sin \theta = \frac{\lambda}{a} \quad (9-1)$$

وللنهاية الدنيا m (الهرب المظلم ذو الرتبة m) يكون:

$$\sin\theta = m \frac{\lambda}{a} \quad (9-2)$$

وهذا يبين أن الهدب المركزي يصبح أعرض كلما كان الشق شيقاً. فعندما يكون عرض الشق صغيراً بقدر طول موجي واحد ($a = \lambda$)، فإن النهاية الدنيا الأولى تظهر عند $\theta = 90^\circ$ ($\sin\theta = \frac{\lambda}{a} = 1$)، وهذا يفهم ضمناً أن القمة المركزية ($\theta = 0$) تملأ كامل نصف الكرة الأمامي.

إذا زاد عرض الشق عن ذلك ($a \leq \lambda$)، فإن القمة المركزية تصبح أكثر ضيقاً. فعند $a = 10\lambda$ ، تصبح القمة المركزية محصورة بين أول هديين عند $\theta = \pm 1.7^\circ$.

نجد أيضاً أنه إذا كانت المسافة من الشق إلى الشاشة هي R والمسافة الرأسية للهدب المظلم m عن مركز الشكل الحيودي هي y_m ، فإن $\tan\theta = y_m / R$ ومن أجل θ صغيرة، فإن $\sin\theta \approx \tan\theta$ أو θ . ومنه، فإن:

$$y_m = m\lambda R / a \quad (9-3)$$

وهي نفس الصيغة التي كانت لتداخل الشقين (6-7) ولكنها هنا من أجل هدب مظلم بدلاً من هدب مضئ في تداخل الشقين. كذلك $m = 0$ لا تعني هدباً مضئاً (الهدب المركزي) في الشكل الحيودي.

مثال 1 شق عرضه a مضئ بضوء أبيض. ما مقدار a التي من أجلها تقع النهاية الدنيا الأولى عند $\theta = 15^\circ$ بالنسبة للضوء الأحمر ($\lambda = 650 \text{ nm}$)؟
الحل: عند النهاية الدنيا تكون $m = 1$ في المعادلة (2-8). نجد المعادلة (2-8) بالنسبة لـ a :

$$a = \frac{m\lambda}{\sin\theta} = \frac{(1)(650 \times 10^{-9} \text{ m})}{\sin 15^\circ} = 2510 \text{ nm} = 2.51 \mu\text{m}$$

(9-3) الشدة في حيود الشق الواحد

يمكن اشتقاق تعبير للتوزيع الشدي لحيود الشق الواحد بنفس الطريقة التي اتبعناها للحصول على شدة تداخل الشقين (19-7). نتصور مرة أخرى أن

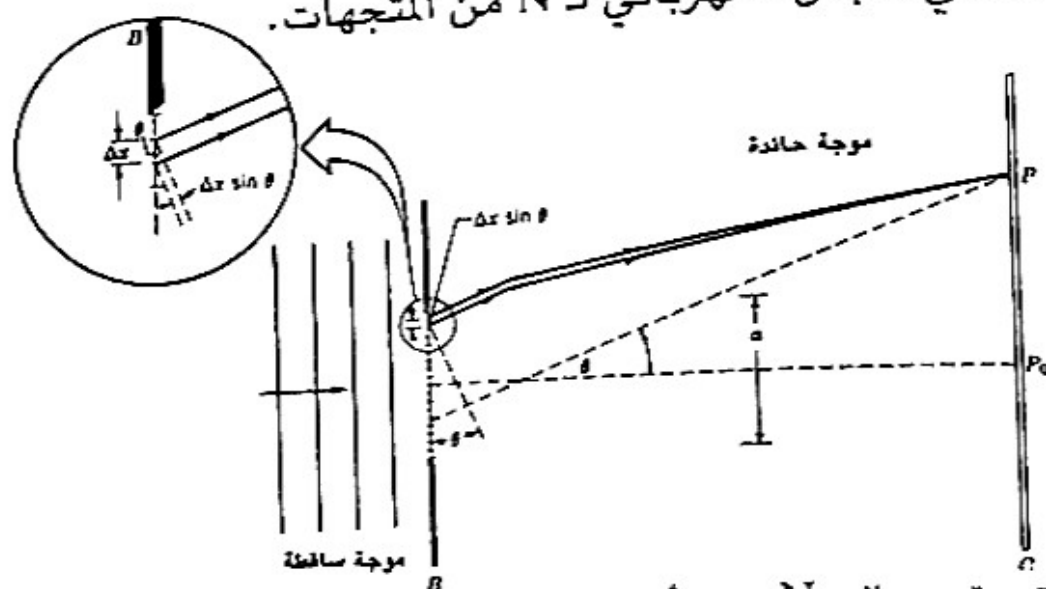
جبهة موجة مستوية عند شق مجزء إلى عدد N كبير من القطع (الأشرطة) المتوازية، عرض الواحدة منها Δx (شكل 6)؛ وهي ضيقة جداً، لدرجة يمكن اعتبار كل منها كمشع لموجيات هايجنز، والضوء الصادر من كل قطعة يصل النقطة P بنفس الطور.

إن الأمواج الواصلة لـ P من أي زوج من القطع المتجاورة لها نفس فرق الطور الثابت ΔB ، الذي يمكن إيجاده من العلاقة.

$$\Delta \beta = \frac{2\pi}{\lambda} (r_2 - r_1) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x \sin \theta \quad (9 - 4)$$

حيث $\Delta x \sin \theta$ ، كما يبين الشكل 5، هو فرق المسار بين شعاعين صادرين من نقطتين متناظرتين لشريطين متجاورين.

فإذا لم تكن θ كبيرة جداً، فإن كل شريط ينتج موجة بنفس السعة ΔE_0 عند النقطة P . وصافي التأثير عند P ينتج عن جمع N من المتجهات ذات السعة نفسها، والمختلف كل منها عن الذي يليه بالطور B . ولكي نجد الشدة عند P ، يجب أن نجد أولاً صافي المجال الكهربائي لـ N من المتجهات.



شكل 6

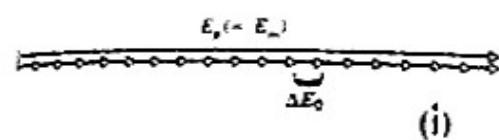
شكل 6 شق عرضه a مقسم إلى N من الأشرطة عرض الواحد منها Δx . والجزء المحصور في الدائرة من الشكل يبين بوضوح أكثر الشروط عند الشريط الثاني. في الغاية (أو الحد) التفاضلية يصبح عرض كل شق dx صغيراً للانهاية ويصبح عدد الأشرطة كبيراً للانهاية. هنا وفي الشكل اللاحق نأخذ $N = 14$.

في الفقرة (7 - 4) استخدمنا الطريقة البيانية لجمع الاضطرابات الموجية التي مكنتنا من حساب الشدة في تداخل الشقين. تلك الطريقة مبنية على

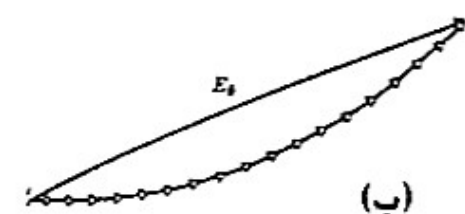
أساس تمثيل كل اضطراب موجي كمتجه دوار (الفاصور) وإيجاد سعة المتجه الدوار المحصلة بواسطة الجمع الاتجاهي. أخذين في الحسبان الطور النسبي المعطى بالمعادلة (4 - 9). إن المجال الكهربائي E_θ يتغير مع θ . لأن فرق الطور ΔB يتغير مع θ .

نعتبر أولاً المجال الكهربائي المحصلة عند النقطة P_0 (مركز الشكل الحيودي على الشاشة). في هذه الحالة تكون $\theta = 0$. والمعادلة (4 - 9) تعطينا $\Delta B = 5$ كفرق طوري بين القطع المتجاورة. نضع، طبقاً للطريقة البيانية المشار إليها أعلاه، المتجهات N ذات الطول ΔE_0 لكل متجه، بحيث ينطبق رأس كل متجه على ذيل سابقه ويوازيه ($\Delta \beta = 0$). نحصل على متجه محصلة E_0 طوله يساوي مجموع أطوال المتجهات N (شكل 7 أ) وهذه أكبر قيمة لمحصلة المتجهات N ، وسنرمز لها بـ $\vec{E}_m$.

عندما نتحرك بعيداً عن $\theta = 0$ ، يصبح لفرق الطور ΔB قيمة غير صفرية، وهنا نضع مرة أخرى المتجهات N رأساً لذي، بحيث يختلف الواحد عن سابقه في الاتجاه بمقدار ΔB . لنحصل من ذلك على محصلة E_θ (شكل 7 ب) أصغر من تلك التي حصلنا عليها عند $\theta = 0$ (شكل 7 أ).

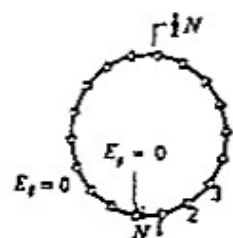


(أ)



(ب)

شكل 7



(ج)



(د)

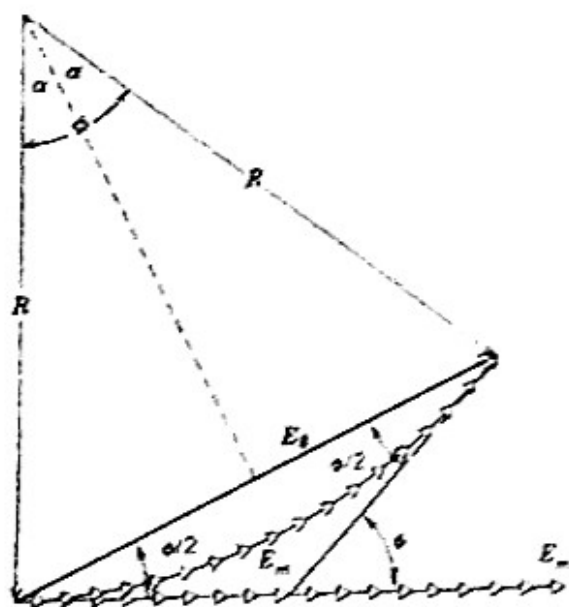
شكل 7 المتجهات الدوارة في حيود الشق الواحد، مبيناً الشروط عند (أ) القمة المركزية، (ب) الاتجاه المزال تدريجياً من القمة المركزية، (ج) النهاية الدنيا الأولى، و(د) النهاية العظمى الأولى بعد القمة المركزية، من أجل $N = 18$.

الآن نعتبر النهاية الدنيا الأولى للشكل الحيودي (النقطة P_1 في الشكل 5). هي هذه النقطة الشدة صفر، ولذلك، فإن E_0 يجب أن تكون صفراً أيضاً. هذا يعني أن المتجهات الدوارة N ، الموضوعة رأساً لذي، يجب أن تشكل حلقة مغلقة (شكل 7 ج).

بعد النهاية الدنيا الأولى يصبح الانزياح الطوري أكبر وتلف سلسلة المتجهات زاوية أكبر من 360° . وعند زاوية معينة يصبح للمجال المحصلة $\vec{E}_0$ أعظم طول داخل الحلقة (شكل 7 د) يطابق القمة الأولى. بعد القمة المركزية، التي شدتها أقل بكثير من شدة القمة المركزية، الممثلة في الشكل 7 أ. وفي النهاية، تنغلق هذه الحلقة على نفسها، لتعطي محصلة مقدارها صفر. نطابق النهاية الدنيا الثانية.

إن الهدف من إيجاد شدة حيود الشق الواحد هو لتقييم الانزياح الطوري طبقاً للمعادلة (4 - 9) ومن ثم المحصلة E_0 . كما في الشكل 7 ب، التي يعطينا مربعها الشدة النسبية، كما في الفقرة (7 - 3).

انضوء، الواصل عند النقطة P من قطعة معينة يصلها في الطور فقط إذا كانت هذه القطعة صغيرة للنهاية وعدد القطع طبقاً لذلك كبيراً. ومن ثم، فإن سلسلة المتجهات الدوارة في الشكل 7 ب تقترب من قوس دائرة، كما في الشكل 8. طوله E_m ، بينما يمثل الوتر E_0 سعة المجال المحصلة. أما الزاوية B فهي الفرق الطوري الكلي بين الموجة الواردة من الشريط القمة (في أعلى الشق) والموجة الواردة من الشريط القاعدة (في أسفل الشق). وهي أيضاً الزاوية بين نصفي القطر R .



شكل 8

شكل 8 شكل هندسي لحساب شدة حيود الشق الواحد، وهي تماثل الشكل 7 ب.

من الشكل اعلاه يمكن أن نكتب:

$$E_{\theta} = 2R \sin \frac{\beta}{2}$$

وبالقياس القطري، فإن β (باعتبارها زاوية مركزية) تساوي:

$$\beta = \frac{E_m}{R}$$

بالتعويض عن R من المعادلة الثانية في الأولى وقسمة بسط ومقام الطرف الأيمن للمعادلة الناتجة على 2، نجد:

$$E_{\theta} = E_m \frac{\sin \beta/2}{\beta/2} \quad (9-5)$$

وبالعودة إلى الشكل، نجد أن β هي الفرق الطوري بين الموجة الواردة من قمة الشق والموجة الواردة من قاعدته وأن فرق المسار المطابق هو $a \sin \theta$ ، لذا فإن:

$$\text{فرق الطور} = \frac{2\pi}{\lambda} \times \text{فرق المسار} \quad (\text{لاحظ المعادلة (9-4)})$$

ومنه، فإن:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} (a \sin \theta)$$

أو:

$$\beta = K \Delta$$

حيث K هو العدد الموجي، و Δ فرق المسار.

ومنه، فإن سعة الاضطراب الموجي لشكل حيود الشق الواحد عند أية زاوية حيود θ ، وفقاً للمعادلتين (9-5) و (9-6) هي:

$$E_{\theta} = E_m \frac{\sin(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta)}{\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta} \quad (9-8)$$

وبالتالي، فإن شدة الاضطراب الموجي المتناسبة طردياً مع مربع السعة (9-8) عند أية نقطة P على الشاشة (عند أية θ) هي:

$$I_{\theta} = I_0 \frac{\sin^2(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta)}{(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta)^2} \quad (9-9)$$

أو:

$$I_{\theta} = I_0 \frac{\sin^2 \beta/2}{(\beta/2)^2} \quad (9-10)$$

حيث I_0 هي الشدة العظمى عند مركز الشكل الحيودي ($\theta = 0$). إن I_0

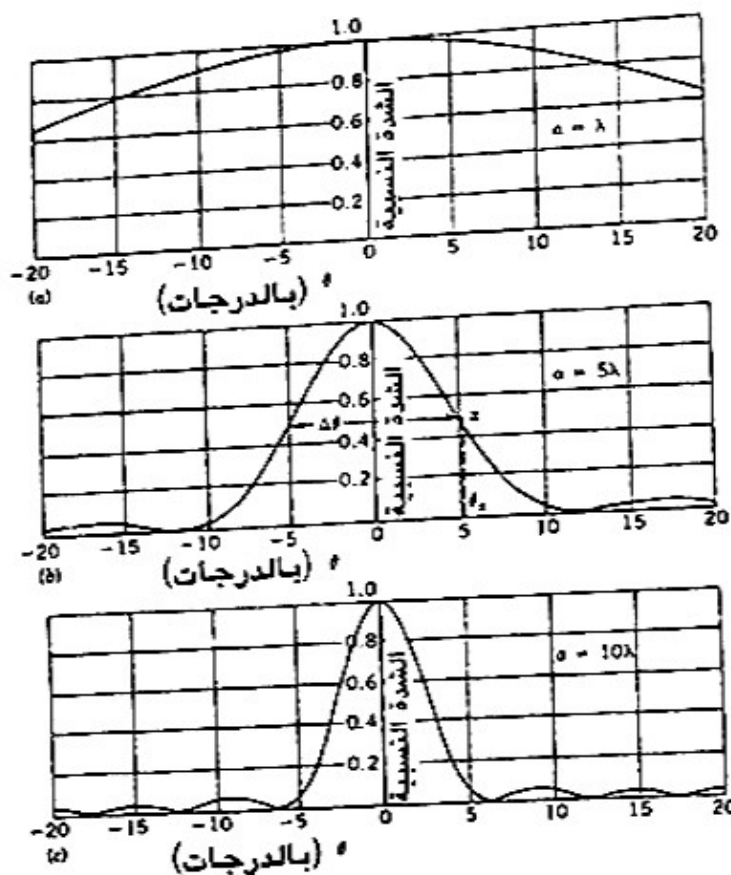
نقترب من 1_0 عندما تقترب زاوية الحيود θ من الصفر (المعادلة (9-9)).
 فحسب قاعدة هوبيتال، فإن $\sin \theta \approx \theta$ عندما تقترب θ من الصفر.
 نلاحظ من المعادلة (9-9)، أن شدة الاضطراب كدالة لزاوية الحيود
 تعتمد على النسبة a/λ . مثلما تبين ذلك الرسومات على الشكل 9 من أجل
 عدة قيم لـ a/λ . فكلما تزداد هذه النسبة يضيق الشكل الحيودي: فمثلاً
 بقمته المركزية (شكل 9 ج). وعندما تقل يزداد عرضاً، حتى يصبح أعرض
 ما يمكن عند $a = \lambda$ (شكل 9 (أ)).

نلاحظ من الشكل 9 أيضاً، أن القمة المركزية تهبط بسرعة عندما نبتعد من
 مركز الشكل الحيودي حتى تختفي بالقرب $\beta = \pm 2\pi$. أي أن النهايات الدنيا
 في الشكل الحيودي تظهر عندما β تساوي مضاعفات $m\pi$.

$$\beta = 2m\pi, \quad m = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (9-11)$$

وبالتعويض عن β في المعادلة (6-8)، نجد أن شرط النهايات الدنيا هو

$$a \sin \theta = m\lambda, \quad m = \pm 1, \pm 2, \pm \dots \quad (9-12)$$



شكل 9

شكل 9 توزيع الشدة في حيود الشق الواحد
 لثلاث قيم مختلفة للنسبة $\frac{a}{\lambda}$. إن أضيق
 قمة حيودية هي التي تتوافق مع عرض
 شق (شكل 9 ج) وأعرض قمة يعطيها
 عرض شق (شكل 10 أ) أما الشكل 9 ب
 فيبين أن عرض القمة المركزية هو $\Delta\theta$.

أما القمم الثانوية فتظهر عندما تبلغ الدالة الجيبية في المعادلة (9-10)
 القيم ± 1 ، أي عندما $\beta = \pm \pi, \pm 3\pi, \pm 5\pi$ ، أي نصف عدد صحيح من π .

$$\beta = (2m+1)\pi, \quad m = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (9-13)$$

وهذا صحيح إلى حد ما لأنه وبسبب العامل $\beta/2$ في مقام المعادلة (9-10). فإن القمم الثانوية تتزاح قليلاً نحو المركز. فالأولى منها تظهر على جانبي القمة المركزية بالقرب من $\beta = \pm 3\pi$ ($\approx 2.86\pi$). والثانية بالقرب من $\beta = \pm 5\pi$ ($\approx 4.918\pi$). وهكذا. فإن الخطأ في المعادلة (9-13) ينتهي عند القيم الكبيرة لـ m . بتعويض قيم B (9-13) في المعادلة (9-10)، ينتج:

$$I_{\theta} = I_0 \frac{\sin^2(m + \frac{1}{2})\pi}{((m + \frac{1}{2})\pi)^2}$$

ولأن ظهور القمم يشترط أن تكون قيم الدالة الجيبية ± 1 ، إذن:

$$\frac{I_{\theta}}{I_0} = 1/(m + \frac{1}{2})^2$$

حيث I_{θ} هي شدة القمة الثانوية عند $\theta \neq 0$. و I_0 شدة القمة المركزية عند $\theta = 0$. هذه المعادلة تعطينا سلسلة من الشدود قيمها $0.0450 I_0, 0.0162 I_0, 0.0083 I_0, \dots$ وهكذا. ولكن القيم الفعلية لهذه الشدود، الموافقة للقيم الفعلية لـ β ، هي:

$$0.0472 I_0, \quad 0.0165 I_0, \quad 0.0083 I_0, \dots$$

ومنه نلاحظ كيف تهبط شدة القيم الثانوية بسرعة جداً، حتى أن شدة القمة الثانوية الأولى (الموافقة لـ $m = 1$) تشكل أقل من 5 بالمائة من قيمة الشدة المركزية I_0 . والشكل 9 يوضح ذلك.

بالنسبة للضوء، فإن الطول الموجي العادي λ هو أصغر بكثير من عرض الشق a ، وقيم θ في المعادلتين (9-6) و (9-10) هي من الصفر لدرجة يصبح معها التقريب $\sin \theta \approx \theta$ موضوعي جداً. عند هذا التقريب، فإن موقع النهاية الدنيا الأولى بجانب القمة المركزية، والمطابقة لـ $\beta = 2\pi$ ، هو من المعادلة (9-6)

$$\beta = 2\pi = \frac{2\pi}{\lambda} (a \sin \theta), \quad \sin \theta \approx \theta$$

إذن

$$\theta_1 = \frac{\lambda}{a} \quad (9-14)$$

هذه المعادلة تميز عرض القمة المركزية ($\Delta \theta = 2\theta_1$) المتناسبة عكسياً مع عرض الشق a عندما يكون تقريب الزاوية الصغيرة صحيحاً، فإن القمة

المركزية تكون ضعف عرض الشق تماماً أو ضعف كل قمة ثانوية.. وعندما يكون عرض الشق a من رتبة السنتيمتر أو أكثر، فإن θ_1 تكون صغيرة لدرجة يمكن معها اعتبار كل الضوء متمركز عملياً عند البؤرة الهندسية. ولكن عندما يكون عرض الشق a أقل من الطول الموجي λ ، فإن القمة المركزية تتبسط فوق 180° ولا تشاهد الأهداب عند جميع النقاط.

مثال 2 أ) في شكل حيود الشق الواحد، ما هي الشدة عند نقطة في الشكل حيث فرق الطور الكلي بين الموجات الواردة من قمة الشق وتلك الواردة من قاعدته هو (66 rad) ؟ ب) إذا كانت هذه النقطة تبعد بمقدار 7.0° من القمة المركزية، فكم طولاً موجياً يساويه عرض الشق؟

الحل: لدينا $\beta = 66 \text{ rad}$ ، إذن $\beta / 2 = 33 \text{ rad}$. الآن نطبق المعادلة (10 - 9).

$$I_\theta = I_0 \frac{\sin^2(33 \text{ rad})}{(33 \text{ rad})^2} = I_0 \frac{\sin^2\left(\frac{33 \text{ rad}}{3.14 \text{ rad}}\right)(180^\circ)}{(33 \text{ rad})^2} = (9.17 \times 10^{-4}) I_0$$

وهذه شدة القمة الثانوية العاشرة التي تظهر عند:

$$\beta = 66 \text{ rad} = \frac{66 \text{ rad}}{3.14 \text{ rad}} = 21\pi$$

بين النهايتين الدنيتين عند $\beta = 20\pi$ و $\beta = 22\pi$.

ب) لايجاد عرض الشق a نطبق المعادلة (6 - 9)، ومنها نجد:

$$a = \frac{\lambda \beta}{2\pi \text{ rad} \sin \theta} = \frac{(66 \text{ rad}) \lambda}{(2\pi \text{ rad}) \sin 7.0^\circ} = 86\lambda$$

مثال 3: اشتق عرض القمة المركزية $\Delta\theta$ في حيود الشق الواحد لفراوت هوفر (لاحظ شكل 9 ب)، الممثل بزاوية بين نقطتين في الشكل الحيودي حيث تكون الشدة نصف قيمتها التي في المركز.

الحل: نقطة x في الشكل 9 ب هي نقطة مختارة بحيث أن $I_\theta = \frac{1}{2} I_0$

$$\frac{1}{2} = \frac{\sin^2 \beta_{x/2}}{(\beta_{x/2})^2}$$

هذه المعادلة يمكن إعادة كتابتها بالصورة

$$\beta_x = 2\sqrt{2} \sin \beta_{x/2}$$

وبواسطة الحاسب الآلي نجد أن $\beta_x = 2.78312$. بإدخال هذه القيمة في المعادلة (6 - 9)، نجد:

$$\theta_x = \sin^{-1} \frac{\lambda \beta_x}{2\pi a}$$

وبفرض أن $a = 5\lambda$ ، نجد:

$$\theta_x = \sin^{-1} \left(\frac{\phi_x}{10\pi} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{2.78312 \text{ rad}}{31.4 \text{ rad}} \right) = \sin^{-1} (0.088634394) = 5.08^\circ$$

ومنه، فإن عرض الشق $\Delta\theta$ يساوي:

$$\Delta\theta = 2 \theta_x = 10.16^\circ$$

(9 - 4) الحيود عند الثقب الدائري

في تبئير (تجميع) الصورة، تمرر العدسة الضوء الذي يسقط داخل محيطها الدائري فقط. من وجهة النظر هذه، تسلك العدسة مثل ثقب دائري في ستار (شاشة) معتم؛ وهذا الثقب يكون شكلاً حيودياً يماثل الشكل الذي يكونه الشق الواحد. إن الآثار الحيودية لهذا الشكل تحد من قدرة التليسكوب وأجهزة بصرية أخرى على تكوين صور دقيقة للأجسام.

إن الصورة المتكونة بواسطة العدسة يمكن أن تشوه بعوامل أخرى، كاللونية والزيغ الكروي. هذه العوامل يمكن تقليلها بصورة جوهرية أو التخلص منها بواسطة شكل مناسب لسطوح العدسة أو بإدخال عناصر مصححة إلى الجهاز البصري. وعلى أية حال، فليس ثمة تصحيحاً معيناً يمكن أن يعد من آثار الحيود التي تتحدد فقط بمقياس الثقب (قطر العدسة) وبطول موجة الضوء، ففي الحيود تفرض الطبيعة قيوداً أساسية على دقة الأجهزة.

فالشكل الحيودي المتكون بواسطة ثقب دائري يتألف من بقعة مركزية مضيئة محاطة بسلسلة من الحلقات المضيئة والمظلمة (شكل 10)، تخبو شدة المضيئة فيها كلما ابتعدنا عن المركز، وتدعى البقعة المركزية المضيئة بقرص آيري (Airy Disk)، إجلالاً للفلكي الانجليزي جيورجي آيري (Georgy Airy) (1801 - 1892)، الذي أول من اشتق تعبيراً لشدة الشكل الحيودي الحاصل لضوء جسم بعيد، جُمع بواسطة عدسة تليسكوب. إن صورة هذا الجسم ليست نقطة مضيئة كما توحي بذلك معالجة البصريات الهندسية، بل هي قرص دائري مضيء محاط بعدة حلقات مضيئة ثانوية، تبهت تصاعدياً، وتتخللها حلقات مظلمة، كما ذكر آنفاً.

قرص
آيري

شكل 10

شكل 10 الشكل الحيودي المتكون بواسطة ثقب دائري قطره D ، مؤلفاً من بقعة مركزية مضيئة وحلقات مظلمة ومضيئة متعاقبة مبيناً فيه القياس الزاوي للحلقة المظلمة الثانية.

يمكن وصف الشكل الحيودي المتكون بواسطة الثقب الدائري بدلالة الزاوية θ ، ممثلة للقياس الزاوي لكل حلقة. فإذا كان قطر الثقب D وطول موجة الضوء المستلم λ ، فإن القياس الزاوي θ_1 لأول حلقة مظلمة، محسوبة من المحور المركزي، يعطى بمعادلة تقارن بالمعادلة (9 - 1).

$$\sin \theta_1 = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (9 - 15)$$

وتختلف عنها بالعامل 1.22. إن القياسات الزاوية للحلقتين المظلمتين التاليتين تعطى بـ: (9 - 16)

$$\sin \theta_2 = 2.23 \frac{\lambda}{D} \quad \sin \theta_3 = 3.24 \frac{\lambda}{D} \quad (9 - 16)$$

بين هذه الحلقات المظلمة توجد حلقات مضيئة، تعطى قياساتها الزاوية بـ:

$$\sin \theta = 1.63 \frac{\lambda}{D}, \quad 2.68 \frac{\lambda}{D}, \quad 3.7 \frac{\lambda}{D} \quad (9 - 17)$$

وهكذا...

عندما يكون قطر الثقب D أكبر بكثير من الطول الموجي λ ، وهي الحالة العادية للأجهزة البصرية، فإن الشدة القمية في مركز الحلقة الأولى تشكل 1.7 % فقط من قيمة الشدة عند قرص آيري، وعند مركز الحلقة المضيئة الثانية 0.4 %، أي أن معظم الشدة (85 %) تقع عند قرص آيري. والشكل 11

يبين شكلاً حيودياً من ثقب دائري عرضه 1.0 mm .

شكل 11

شكل 11 شكل حيودي متكون بواسطة ثقب دائري قطره 1.0mm، ويظهر فيه قرص آيري منوراً، ما يساعد على رؤية الحلقات الأخرى.

إن حقيقة كون الصور المتكونة بواسطة العدسة هي أشكال حيودية، تكتسب أهمية عندما نريد أن نميز بين جسمين نقطيين بعيدين تفصلهما مسافة زاوية صغيرة، والشكل 12 يبين الهيئات (أو المظاهر الخارجية) المرئية وشدة الحيود المطابقة لها لجسمين نقطيين بعيدين (نجمين، مثلاً) بفاصلتين زاويتين صغيرتين وشدتين مركزيتين متساويتين تقريباً، في الشكل 12 (أ) الجسمان غير مفصولان: بمعنى أنهما لا يُميزان من الجسم النقطي الواحد في الشكل 12 (ب) مفصولان تقريباً، وفي الشكل 12 (ج) مفصولان كلياً. في الشكل 12 (ب)، الفاصلة الزاوية لمصدرين نقطيين هي أن القمة المركزية للشكل الحيودي لأحدهما تقع فوق النهاية الدنيا الأولى للشكل الحيودي للآخر. وهذا يدعى بمعيار رايلي للصور المتميزة. ومن المعادلة (9 - 1)، فإن الجسمين المتميزين بالكاد بواسطة معيار رايلي يجب أن يمتلكا فاصلة زاوية θ_R تساوي:

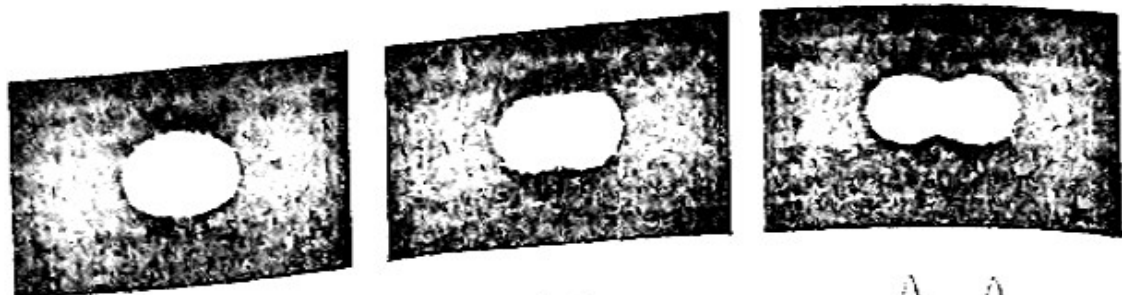
$$\theta_R = \sin^{-1} \left(\frac{1.22 \lambda}{D} \right) \quad (9 - 18)$$

ولأن الفواصل الزاوية θ_R هي من الصفر بمكان، بحيث يمكن استبدال

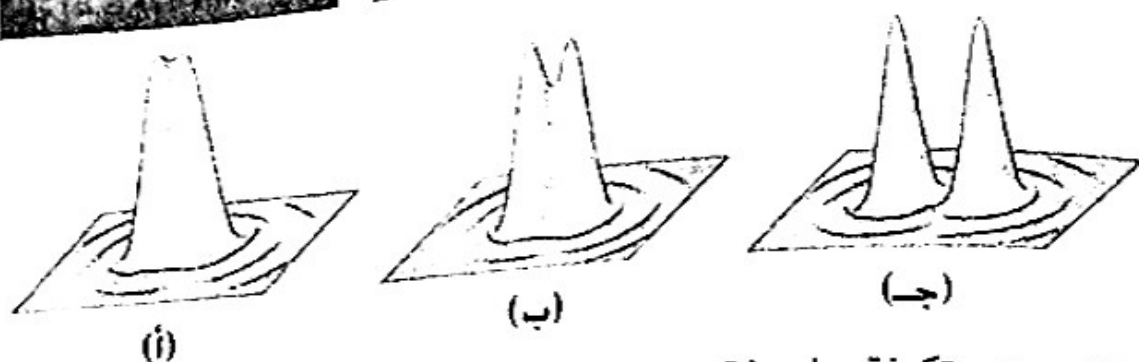
$\sin \theta_R$ بـ θ_R ، لذلك، فإن:

$$\theta_R = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (9 - 19)$$

حيث θ_R تحسب بالزوايا القطرية. إن شرط تمييز الجسمين هو أن تكون الفاصلة الزاوية بينهما أكبر من θ_R .



شكل 12



شكل 12 صور لنجمين متكونة بواسطة عدسة مجمعة (كثقب حيودي) قطرها 10 cm، لذلك فإن $\frac{a}{\lambda} = 200000$ ما يساعد على تمييز قمتيهما الحيوديتين.

- (أ) النجمان متقاربان جداً.
- (ب) أكثر تباعداً.
- (ج) النجمان مستمران بالتباعد أكثر.

مثال 4 عدسة مجمعة قطرها 32mm وطولها البؤري $f = 24$ cm (أ) ما هي الفاصلة الزاوية التي يجب أن يمتلكها جسمان نقطيان بعيدان لكي يتحقق معيار رايلي؟ بفرض أن $\lambda = 550$ nm (ب) كم يتباعد مركزي الشكلين الحيوديين في المستوي البؤري للعدسة بعضهما عن بعض؟
الحل من المعادلة (9 - 15) نجد:

$$\theta_R = 1.22 \frac{\lambda}{D} = (1.22) \frac{(550 \times 10^{-9} \text{ m})}{32 \times 10^{-3} \text{ m}} = 2.10 \times 10^{-4} \text{ rad}$$

(ب) الفاصلة الخطية بين مركزي الشكلين الحيوديين للجسمين المرصودين تتحدد بالمعادلة:

$$\Delta x = f\theta_R \quad (9 - 20)$$

$$= (24 \times 10^{-2} \text{ m}) (2.10 \times 10^{-4} \text{ rad}) = 5.0 \mu\text{m}$$

أو هي حوالي تسعة أطوال موجية.

عندما يكون لدينا عدة شقوق بدلاً من شقي تداخل يونغ (7 - 2) أو شق الحيود الواحد (9 - 2)، تظهر خصائص إضافية مهمة في الشكل التداخلي الناتج. فلو ألقينا نظرة سريعة على شكل تداخل الشقين (7 - 2)، وافترضنا أن الشقين ضيقين جداً، لوجدنا، تأسيساً على ذلك، أن بالإمكان الافتراض أن الضوء ينتشر من كل شق إلى الخارج بصورة منتظمة في جميع الاتجاهات يمين الشق. هذا الافتراض كان قد ساعد في حساب الشكل التداخلي الموصوف بالمعادلة (12 - 7) أو (19 - 7)، والمتضمن لسلسلة من القمم المتساوية الفواصل والشدد. هذا من جهة، ومن الجهة الأخرى، عندما يكون للشقين عرض محدود فإن القمم في شكليهما التداخليين تدار (يتم التحكم فيها) بواسطة الشكل الحيودي للشق الواحد، الذي هو مميزة من ميزات عرض كل شق.

يبين الشكل 13 (أ) الشدة في شكل حيود الشق الواحد بعرض a ، والشكل 13 (ب) يبين الشكل التداخلي المتكون بواسطة شقين ضيقين جداً تفصلهما مسافة d بقدر خمسة أضعاف عرض الشق الواحد ($d = 5a$) المبين في الشكل 14 (أ). هذا يعني أن النهايات الدنيا في شكل حيود الشق الواحد مفصولة عن بعضها بعضاً بمسافة خمسة أمثال نظيرتها في شكل تداخل الشقين (انظر المعادلتين (4 - 7) و (2 - 9)). فالتباعد بين النهايات الدنيا يعتمد عكسياً على عرض الشق في الحيود وعلى المسافة بين الشقين في التداخل. نفرض أننا الآن زدنا عرض كل شق من الشقين الضيقين (شكل 13 (ب)) إلى نفس عرض الشق الواحد a (شكل 13 (أ))، فإننا نحصل على شكل حيودي من شقين عرض الواحد منهما a والمسافة بين مركزيهما d . إن أثر العرض المحدود للشقين هو تراكم شكلي حيودهما، بحيث تتضاعف شدتي الشكلين عند كل نقطة، وتبقى ذراهما (قممهما الأساسية) في نفس مواقعها السابقة، ولكن شددها تدار بواسطة شكل حيود الشق الواحد (شكل 13 ج)، منتجة شدة محصلة تتناسب طردياً مع حاصل ضرب شدة تداخل الشقين (12 - 7) وشدة حيود الشق الواحد (10 - 9). (مع إجراء بعض التعديلات البسيطة في الرموز).

$$I_{\theta} = I_{\theta, \text{int}} = I_{m, \text{int}} \cos^2 \frac{\phi}{2} \quad (9 - 21)$$

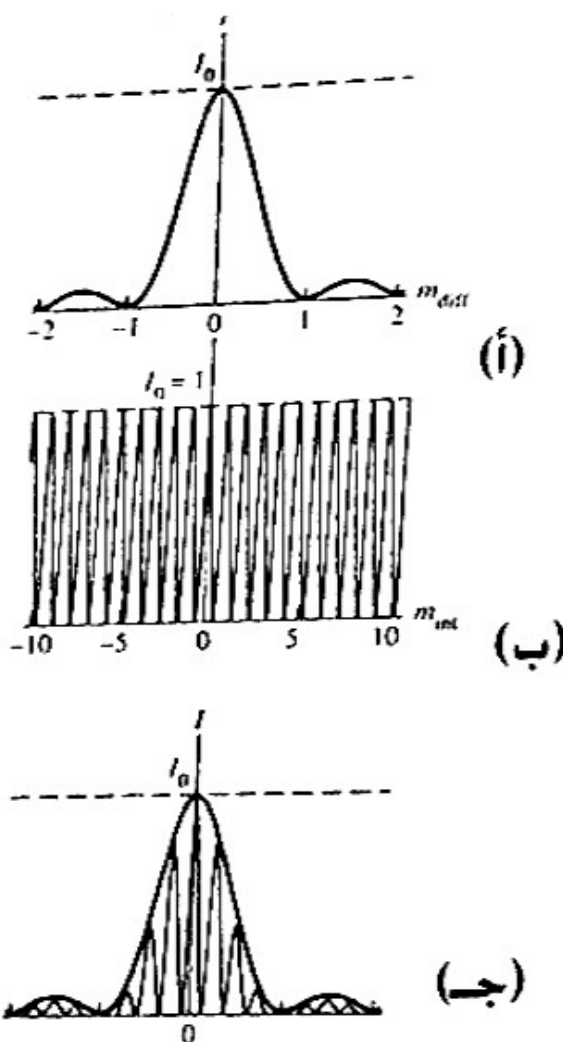
$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta \quad (9 - 22)$$

حيث d هي المسافة بين مركزي شقي يونغ. أما شدة الموجة الحائدة من أي من الشقين، المعطاة بالمعادلة (9 - 10)، مع تغيير بسيط في الرموز، فهي:

$$I_{\theta, \text{dif}} = I_{m, \text{dif}} \frac{\sin^2 \beta/2}{(\beta/2)^2} \quad (9 - 23)$$

شكل 13 (i)

شكل 13 (i) الشكل الحيودي من شق واحد لشق عرضه a .



(ب) الشكل التداخلي للشق المزدوج من شقين ضيقين فاصلتهما d تساوي خمسة أضعاف عرض الشق a . (ج) تداخل الشق المزدوج لـ $d:5a$. كل قمة خامسة عند الجانبين تختفي بسبب انطباق القمة التداخلية مع النهاية الدنيا الحيودية.

حيث:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta \quad (9 - 24)$$

إن الأثر الاتحادي لتداخل الشقين (شكل 13 ب) وحيود الشق الواحد (شكل 13 أ) يمكن الحصول عليه بحساب $I_{m, \text{int}}$ (9 - 21) كسعة متغيرة يتم التحكم فيها بواسطة $I_{m, \text{dif}}$ (9 - 23). أي أن الشدة المحصلة للشكل الاتحادي تتناسب

طردياً مع عاملي التداخل والحيود:

$$I_{\theta} = I_m \cos^2 \frac{\Phi}{2} \frac{\sin^2 \beta/2}{(\beta/2)^2} \quad (9 - 25)$$

ويعبر عن ذلك بالكلمات كالتالي: عند أية نقطة على الشاشة، تعطى الشدة الضوئية المتاحة من كل شق بالشكل الحيودي لذلك الشق (شكل 13 ج). إن الشكلين الحيوديين للشقين يحتلان نفس الموقع لأن الأشعة المتوازية في حيود فراونهوفر تتجمع عند نفس البقعة. ولأن الموجتين الحائدتان من كل شق في نفس الطور، فإنهما تتداخلان.

إن أثر التداخل هو إعادة توزيع الطاقة المتاحة على الشاشة ينتج عنه طاقماً من الأهداب؛ وكما ذكرنا في بداية هذه الفقرة. أنه إذا كان عرض الشق أقل بكثير من الطول الموجي ($a \ll \lambda$)، فإن الطاقة المتاحة توزع بانتظام على الشكل التداخلي على الشاشة، بما يعطي لكل هدب نفس الشدة. ولكن إذا تحررنا من الشرط $a \ll \lambda$ ، فإن توزيع الطاقة لن يكون كذلك، بل يعطى بواسطة الأثر الحيودي للشق ذي العرض المحدود a . وفي هذه الحالة سيكون للأهداب شدد تحدّد بشدة الشكل الحيودي عند موقع الهدب المعين. ويعبر عن ذلك رياضياً بالمعادلة (9 - 25) ورسمها البياني 13 (ج) للحالة المعينة $d = 4a$.

وهي حالة تداخل وحيود في الآن ذاته. فليس ثمة اختلاف أساسي بين التداخل والحيود. فالحيود هو مجرد تداخل جميع الموجات الصادرة من مختلف عناصر الجبهة الموجية الحائدة وأن الشكل بأكمله هو شكل تداخلي مُدار بواسطة الحيود (تحت تأثيره).

إن تأثير الحيود على الشكل التداخلي لا يكمن فقط بإعادة توزيع الطاقة الضوئية بصورة غير منتظمة على الشكل بأكمله، بل وحتى في فقدان بعض القمم التداخلية، والتي تدعى بالقمم المفقودة. وهذا يحصل عندما تتزامن نهاية دنيا حيودية مع قمة تداخلية رتبته M ، تتوافق مع النسبة $(M = \frac{d}{a})$. كما هو موضح على 13 (ج)، حيث الرتبة المفقودة هي الرابعة على جانبي القمة التداخلية المركزية في الشكل الحيودي. وتكدّد هذه الرتب دورياً عند كل النهايات الدنيا الحيودية بمضاعفات $\frac{d}{a}$. فعندما تكون $\frac{d}{a} = 5$ ، فإن

الرتب المفقودة هي:
(9 - 26)

$$M = \frac{d}{a} = 5, 10, 15, \dots$$

وسيكون عدد القمم التداخلية في الشكل الحيودي (تحت القمة الحيودية المركزية):

$$N = 2 \frac{d}{a} - 1 \quad (9 - 27)$$

بما فيها القمة المركزية وعددها تحت القمة الحيودية الثانوية:

$$n = \frac{d}{a} - 1 \quad (9 - 28)$$

مثال 5 في تجربة الشق المزدوج، إذا كان عرض أي من الشقين محدوداً، ومقداره ($a = 0.02 \text{ mm}$)، والطول الموجي للضوء المستخدم $\lambda = 670 \text{ nm}$ ، وعدد أهداب التداخل في القمة المركزية للحيود 9 أهداب، فأوجد أ) الانفصال الزاوي للقمة المركزية للحيود، ب) عرض القمة المركزية للحيود، ج) عدد أهداب التداخل الكاملة في القمة الثانوية للحيود، د) النسبة بين شدة إضاءة هدب التداخل الثاني إلى شدة إضاءة القمة التداخلية المركزية. الحل أ) يتحدد الانفصال الزاوي للقمة المركزية للحيود بموقع النهاية الدنيا الأولى (9 - 2):

$$\theta = \sin^{-1} \frac{\lambda}{a} = \sin^{-1} \left(\frac{670 \times 10^{-9} \text{ m}}{0.02 \times 10^{-3} \text{ m}} \right) = 1.92^\circ$$

ب) عرض القمة المركزية للحيود ($\Delta\theta$) = ضعف الانفصال الزاوي
 $\Delta\theta = 2\theta = 3.84^\circ$

ج) من المعادلة (9 - 27) نجد النسبة $\frac{d}{a}$:

$$\frac{d}{a} = \frac{N}{2} + \frac{1}{2} = \frac{9}{2} + \frac{1}{2} = 5$$

ومنه، فإن عدد الأهداب التداخلية في القمة الثانوية للحيود (9 - 28)

$$n = 5 - 1 = 4 \quad \text{أهداب}$$

د) من المعادلة (9 - 25) نجد أن شدة الإضاءة في أي هدب تداخلي تتحدد بقيمة فرق الطور الكلي في تداخل الشقين (15 - 7) عند الهدب التداخلي الثاني.

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_2$$

حيث: $d \sin \theta = 2\lambda$ من أجل الهدب المضي الثاني ومنه. فإن:

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2\lambda = 4\pi$$

وبقيمة فرق الطور الكلي β بين الموجتين الحادثتين عند θ_2 نفسها (6 - 9)

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} (a \sin \theta_2)$$

حيث $\sin \theta_2$ نجده من معادلة الهدب التداخلي الثاني $\sin \theta = \frac{2\lambda}{d}$ نعوض ذلك في β

$$\beta = \frac{2\pi a}{\lambda} \cdot \frac{2\lambda}{d} = 4\pi \frac{a}{d}$$

ومن الفرع (ح)، فإن $\frac{a}{d} = \frac{1}{5}$ إذن:

$$\beta = \frac{4\pi}{5} = 80^\circ$$

نعوض عن ϕ و β في المعادلة (21 - 8):

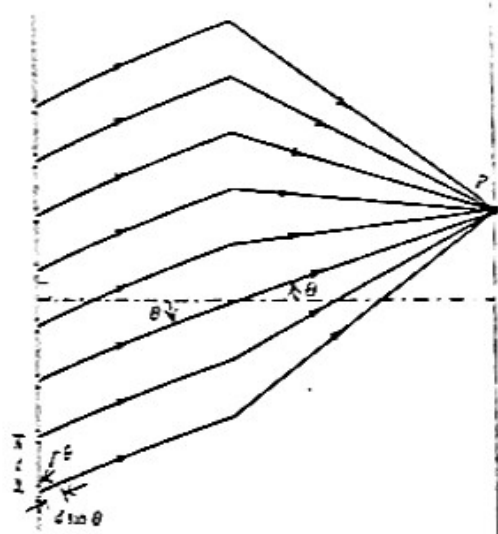
$$\frac{I_{\theta_2}}{I_m} = \cos^2\left(\frac{4\pi}{2}\right) \frac{\sin^2\left(\frac{4\pi}{10}\right)}{\left(\frac{4\pi}{10}\right)^2} = 0.5$$

نعتبر الآن الأشكال الناتجة من عدة شقوق ضيقة جداً. ونفرض أن كل شق صغير جداً قياساً بالطول الموجي، لذلك فإن الشكل الحيودي ينبسط بانتظام تقريباً. يبين الشكل 14 ترتيباً لثمانية شقوق ضيقة، بمسافة d بين الشقوق المتجاورة. في هذه الحالة يظهر التداخل البناء بين الأشعة التي تعمل زاوية θ مع العمود على مستوي الشقوق والواصلة إلى النقطة P عندما يكون فرق المسار بين أشعة الشقوق المتجاورة مساوياً لعدد صحيح من الأطوال الموجية:

$$d \sin \theta = m \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (9 - 29)$$

شكل 14

شكل 14 في حيود الشقوق المتعددة، تصل الأشعة من كل شق في الطور لتعطي قمة حادة إذا كان فرق المسار بين الشقوق المتجاورة مساوياً للعدد الكلي للأطوال الموجية.



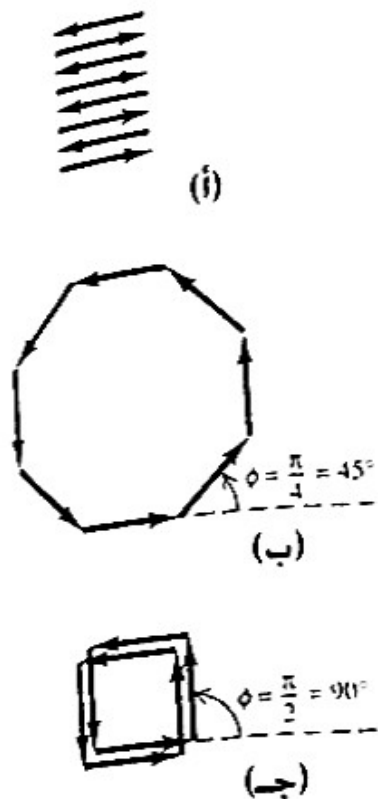
بمعنى آخر، تحصل تقوية عندما يكون فرق الطور ϕ عند P للأشعة الواردة من شقوق متجاورة مساوياً لمضاعفات صحيحة 2π ، أي $2m\pi$. (وهذا يمكن استنتاجه من المعادلتين (9 - 18) و (9 - 29). هذا يعني أن القمم في الشكل الحيودي من عدة شقوق تظهر عند المواقع ذاتها تلك التي للشقين بنفس الفاصلة.

ولكن ماذا يحدث بين القمم؟ في تداخل الشقين هناك نهاية شدة دنيا واحدة تماماً بين كل زوج من القمم تتطابق مع الزوايا التي بالنسبة لها.

$$d \sin \theta = (m + \frac{1}{2}) \lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (9 - 30)$$

أو التي بالنسبة لها يكون فرق الطور بين الأمواج من المصدرين مساوياً $\pi, 3\pi, 5\pi, \dots$ أي لقيم فردية من π . في الشكل الحيودي من ثمانية شقوق هناك أيضاً نهايات دنيا للشدة لأن الضوء الوارد من الشقوق المتجاورة يلغي بعضه بعضاً أزواجاً أزواجاً، طبقاً لتخطيط المتجهات الدوارة المبين على الشكل 15 أ. ولكن في هذه الحالة توجد نهايات دنيا إضافية. فمثلاً عندما يكون فرق الطور ϕ من مصدرين متجاورين مساوياً $\pi/4$ ، فإن تخطيط المتجه الدوار يأخذ الهيئة المبينة على الشكل 15 ب. بمعنى أننا نقسم زاوية فرق الطور الكلي (2π) على عدد المتجهات الدوارة الممثلة للشقوق، بحيث يكون فرق الطور بين متجه دوار والذي قبله أو بعده مساوياً $\pi/4$ حتى تكمل الدورة، وفي هذه الحالة تكون الشدة صفراً. عندما تكون $\phi = \pi/2$ ، نحصل على تخطيط للمتجه الدوار بالهيئة المبينة على الشكل 15 ج. ومرة أخرى تكون الشدة صفراً. وبعمومية أكثر، كلما كانت ϕ مضاعفات صحيحة للقيمة $\pi/4$ ، فإن الشدة تكون صفراً، باستثناء تلك الحالة، عندما تكون ϕ مضاعفات 2π . وهكذا توجد سبع نهايات دنيا لكل قمة، كما هو مبين على الشكل 16. إن مواقع هذه القمم هي نفسها كما للشقين ولكنها أكثر حدة.

يمكن للطالب أن يبرهن بنفسه أنه عندما يكون لدينا N من الشقوق، فإن النهايات الدنيا تظهر كلما تكون $\phi = \frac{2\pi}{N}$ وأنه يوجد $N - 1$ من هذه النهايات بين كل زوج من القمم.



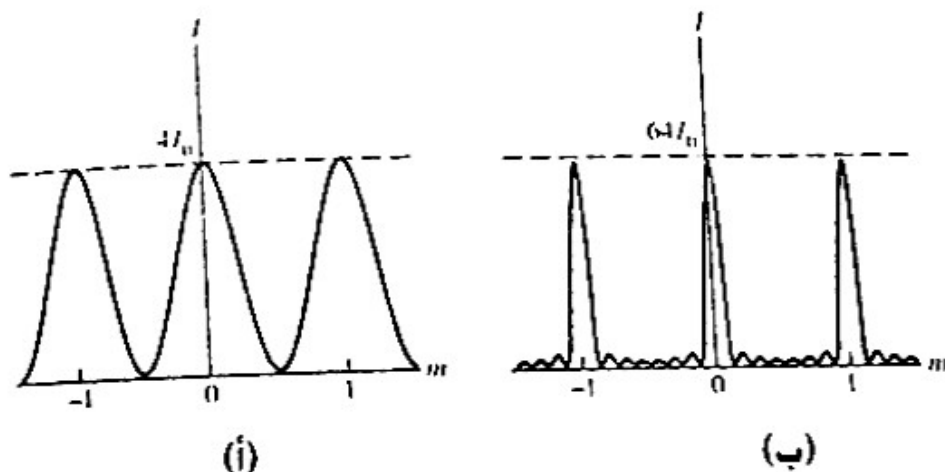
شكل 15 تظهر القمم عندما يكون فرق الطور $\phi = 0.2\pi, 4\pi, \dots$. بين هذه القمم توجد نهايات

دنيا تتطابق مع قيم ϕ
 $\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{4}, \pi, \frac{5\pi}{4}, \frac{3\pi}{2}, \frac{7\pi}{4}$

إن تخطيطات المتجه الدوار موضحة على الشكل من أجل:

(أ) $\phi = \pi$ ، (ب) $\phi = \pi/4$

(ج) $\phi = \pi/2$



شكل 16

شكل 16. الأشكال التداخلية لعدة شقوق ضيقة بفاصلة d بين الشقين المتجاورين. (أ) شقان، وتظهر نهاية دنيا واحدة بين القمتين المتجاورتين. (ب) ثمانية شقوق، وسبع نهايات دنيا تظهر بين كل زوج من القمم المتجاورة الأكثر ضيقاً. إن القياسات الرأسية مختلفة. فإذا كانت الشدة العظمى لشق واحد هي I_0 ، فإنها $N^2 I_0$ من الشقوق N .

تزداد حدة القمة الرئيسية بزيادة عدد الخطوط، وهذا يمكن فهمه بيانياً بواسطة المتجهات الدوارة. فالشكلين 17 (أ) و 17 (ب) يبينان الشروط عند القمة المركزية لشقين ولخمس شقوق، حيث الأسهم الصغيرة تمثل سعات الاضطرابات الموجية الواصلة للشاشة عند موقع القمة الرئيسية، التي بالنسبة لها تكون الرتبة $m = 0$ وزاوية الحيود $\theta = 0$ في المعادلة (9 - 29).

هناك على أي من جانبي القمة المركزية توجد نهاية دنيا صفرية الشدة تقع عند زاوية $\delta\theta_0$ خارج المحور المركزي (فوق أو تحت، يساراً أو شمالاً) كما هو موضح على الشكل 18. يوضح الشكلان 17 (ج) و 17 (د) المتجهات الدوارة عند هذه النقطة. إن فرق الطور بين الأمواج الواصلة من الشقوق المتجاورة، الذي هو صفر عند القمة الرئيسية المركزية، يجب أن يزداد بمقدار $\Delta\theta$ ، ويتم اختياره بحيث أن منظومة المتجهات الدوارة تنغلق على نفسها تماماً، مُعطية شدة محصلة تساوي صفراً، فمن أجل $N = 2$ تكون $\Delta\phi = \frac{2\pi}{2} = 180^\circ$ ، ومن أجل $N = 5$ ، تكون $\Delta\phi = \frac{2\pi}{5} = 72^\circ$ ، وعلى العموم، فإن مقدار فرق الطور بين أي زوج من المتجهات الدوارة المتجاورة لـ N من الشقوق هو:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{N} \quad (9 - 31)$$

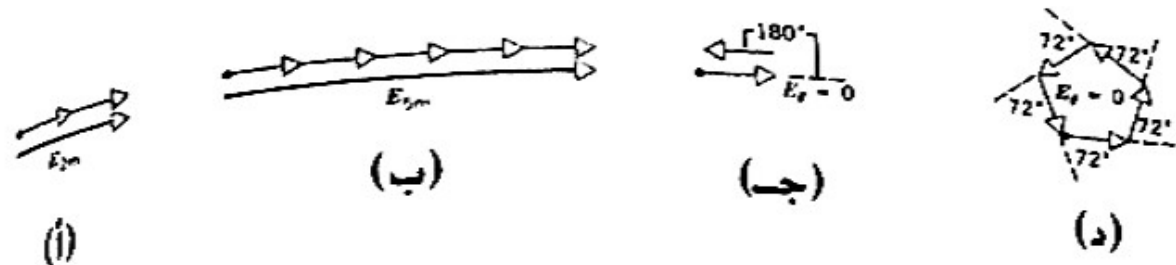
وهذه الزيادة في فرق الطور لموجتين متجاورتين تتطابق مع الزيادة في فرق المسار ΔL المعطاة بالعلاقة (لاحظ المعادلة (9 - 4)).

$$\frac{\Delta L}{\lambda} = \frac{\Delta\phi}{2\pi} \quad \text{أو} \quad \frac{\text{فرق المسار}}{\lambda} = \frac{\text{فرق الطور}}{2\pi}$$

$$\Delta L = \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right) \Delta\phi = \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right) \left(\frac{2\pi}{N}\right) = \frac{\lambda}{N} \quad (9 - 32)$$

من الشكل 14 ينتج أن الزيادة في فرق المسار ΔL عند أول نهاية دنيا تعطى أيضاً بـ $d \sin \delta\theta_0$ ، لذلك يمكن القول أيضاً أن:

$$d \sin \delta\theta_0 = \frac{\lambda}{N} \quad \text{أو} \quad \sin \delta\theta_0 = \frac{\lambda}{Nd} \quad (9 - 33)$$



شكل 17

شكل 17 (أ، ب) الشروط عند القمة المركزية لشقين ولمحز زدي خمسة شقوق. (ج، د) الشروط المطابقة عند النهاية الدنيا للشدة الصفيرية التي تقع على أي من جانبي القمة المركزية.

وبما أن $N \ll 1$ للمحزز الفعلي، فإن $\sin \delta\theta_0$ صغير جداً، ما يساعد على استبدال $\sin \delta\theta_0$ بـ $\delta\theta_0$ (بحدود تقريب جيد)، محسوبة بالزوايا القطرية (راديان):

$$\delta\theta_0 = \frac{\lambda}{Nd} \quad (9-34)$$

وهو عرض القمة الرئيسية المركزية.

تبين هذه المعادلة على وجه الخصوص أننا لو زدنا عدد الخطوط N من أجل d و λ معينين لنقصت $\delta\theta_0$ ، ما يعني أن القمة الرئيسية المركزية تصبح أكثر حدة.

يمكن، بالنسبة لأية قمة مركزية، اعتبار هندسة الشكل 18 التي تظهر فيها القمة المركزية m عند زاوية θ . تُزحزح القمة المركزية بمقدار $\delta\theta$ للوصول إلى النهاية الدنيا التالية؛ تؤخذ $\delta\theta$ كمقياس للعرض الزاوي للقمة. عند القمة يكون فرق المسار بين الأشعة الواردة من شقين متجاورين $m\lambda$ (لاحظ المعادلة (9-29)). عند النهاية الدنيا اللاحقة يصبح فرق المسار $m\lambda + \frac{\lambda}{N}$ (المعادلة (9-32)). فمن أجل $N = 10$ ، مثلاً، يكون فرق المسار الإضافي بين شقين متجاورين عند النهاية الدنيا 0.1λ . وعليه، فإن فرق المسار بين أي شقين غير متجاورين من هذه الشقوق العشرة يساوي حاصل ضرب عدد الشقوق بين هذين الشقين في مجموع فرق المسار للقمة $m\lambda + \frac{\lambda}{N}$ الإضافي $\frac{\lambda}{N}$. ففرق المسار بين الشق الأول والسادس أو الثاني والسابع أو الثالث والثامن هو:

$$(6-1) (m\lambda + 0.1\lambda) = 5m\lambda + 0.5\lambda$$

ومنه ينتج أن فرق المسار بين هذين الخطين (الشعاعين) يختلف بنصف عدد صحيح (0.5λ) من الأطوال الموجية، لذلك فهما يتداخلان تدميراً، والشئ نفسه بالنسبة للأشعة الأخرى المذكورة أعلاه. فعندما يكون فرق المسار الإضافي $\frac{\lambda}{N}$ ، فإن الأشعة الواردة من نصف الشقوق السفلى $\frac{N}{2}$ تتداخل تدميراً مع نصف الشقوق العليا $\frac{N}{2}$ أزواجاً أزواجاً.

إن فرق المسار بين أي شقين متجاورين عند زاوية $\theta + \delta\theta$ هو $d \sin(\theta + \delta\theta)$ ويساوي:

$$d \sin(\theta + \delta\theta) = (d \sin\theta \cos\delta\theta + \cos\theta \sin\delta\theta) = d \sin\theta + (d \cos\theta) \delta\theta$$

بافتراض أن $\delta\theta$ صغيرة، ما يسمح بتقريب $\cos\delta\theta \approx 1$ و $\sin\delta\theta \approx \delta\theta$. وبوضع فرق المسار هذا مساوياً لقيمته عند النهاية الدنيا $m\lambda + \frac{\lambda}{N}$ ، نحصل على:

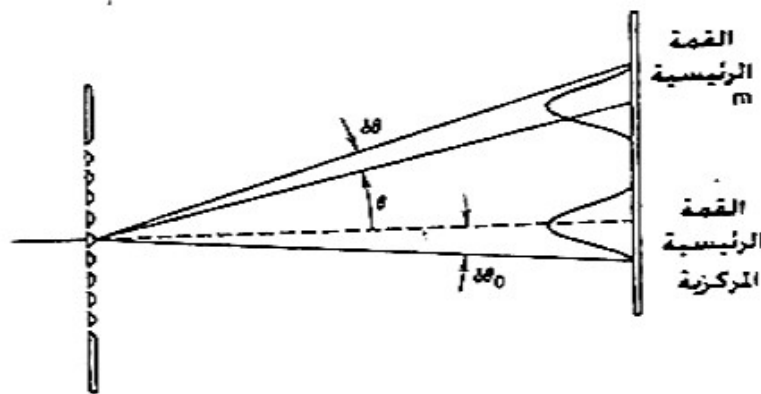
$$d \sin\theta + (d \cos\theta) \delta\theta = m\lambda + \frac{\lambda}{N}$$

ومنه، فإن (انظر المعادلة (9 - 29))

$$\delta\theta = \frac{\lambda}{N d \cos\theta} \quad (9 - 35)$$

وهو العرض الزاوي للقمة الرئيسية التي تظهر عن الزاوية θ ، مطابقة للرتبة المعينة m .

شكل 18



شكل 18 قمة رئيسية تقع عند موقع معطى بالزاوية θ ، وتظهر النهاية الدنيا الأولى عند الزاوية $\delta\theta$ من هذه القمة. إن عرض القمة المركزية معطى بالزاوية $\delta\theta_0$.

يمكن ملاحظة أن المعادلة (9 - 35) تتحول إلى المعادلة (9 - 34) عند القمة المركزية ($\theta = 0$). و d ، N ، و λ معطاة، فإن القمة المركزية هي الأضيق (لأن $\cos\theta = 1$)، فعرض القمة يزداد كلما ذهبنا نحو θ أكبر (ومن ثم، نحو رتب m

عليها). تبين المعادلة (35 - 9) أيضاً، أن $\delta\theta$ تصبح أصغر (تصبح القمم أضيق) عندما يزداد حاصل الضرب Nd ، الذي يعني العرض الكلي للمحز. وهكذا تصبح القمم أكثر ضيقاً عندما يزداد عرض المحز.

مثال 6

محز معين عدد شقوقه 10^4 بفاصلة $d = 2.1 \mu m$ ، أضيء بضوء الصوديوم الأصفر ($\lambda = 589 \text{ nm}$). أوجد: (أ) الموقع الزاوي لجميع القمم المركزية المشاهدة و(ب) العرض الزاوي لقمة أكبر رتبة.
الحل: من المعادلة (29 - 9)، نجد:

$$\sin\theta = \frac{m\lambda}{d} = \frac{m(589\text{nm})}{2100\text{nm}} = m(0.28)$$

من هذه النتيجة نلاحظ أن عدد القمم التي يمكن مشاهدتها هي ثلاث قمم (بما يبقي $\sin\theta \leq 1$). ومنه، فإن قيم θ :

$$\theta_1 = \sin^{-1} 1(0.28) = 16.3^\circ, \quad \theta_2 = \sin^{-1} 2(0.28) = 34.1^\circ,$$

$$\theta_3 = \sin^{-1} 3(0.28) = \sin^{-1} (0.84) = 57.3^\circ.$$

(ب) يتحدد العرض الزاوي للقمة من المعادلة (35 - 9)

$$\delta\theta = \frac{\lambda}{Nd \cos\theta_3} = \frac{589\text{nm}}{10^4(2100\text{nm})\cos 57.3^\circ} = 5.2 \times 10^{-5} \text{ rad} = 0.0030^\circ$$

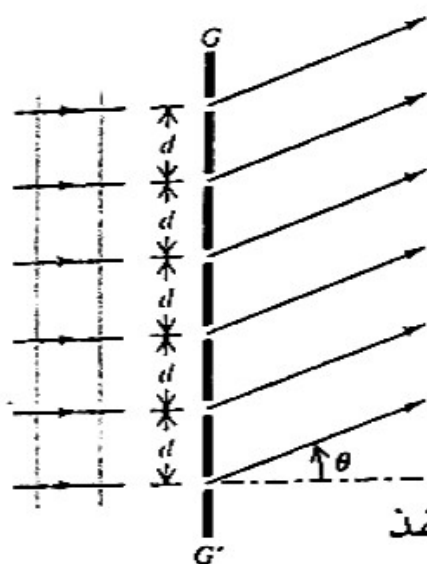
وهذه قمة رئيسية فائقة الضيق.

(9 - 6) محز الحيود

رأينا في الفقرة السابقة كيف أن التجارب التداخلية بيّنت أن زيادة عدد الشقوق مع الإبقاء على الفاصلة d ثابتة بين الشقين تنتج أشكالاً بقمم لها نفس المواقع تلك التي للشقين، ولكنها أكثر حدة وضيقاً، إن الصفوف المنظمة لعدد كبير من الشقوق ذات العرض الواحد a تدعى محز حيود. وأول محز حيود صنعه فراونهوفر، مستخدماً لهذا الغرض سلكاً رقيقاً، ومن حيث المبدأ يمكن صنع المحز باستخدام حافة ماسية لحفر (أو خدش) عدة ثلمات أو أخاديد متساوية الفواصل (d) على سطح زجاجي أو معدني، ومن ثم فإن

عرض المحرز يُقدر دائماً بحاصل ضرب عدد الشقوق N في الفاصلة (Nd) وعندهما يكون عرض المحرز Nd يضع سنتيمترات، فإن القمم تكون حادة جداً، ما يسمح بقياسها بدقة عالية، إن الوظيفة الأساسية للمحزرات هي لتحديد الأطوال الموجية ودراسة بنية وشدة القمم الرئيسية. أي بنية دورية منتظمة يمكن أن تؤدي وظيفة محرز حيود، ومثال ذلك، الخدوش على الأقراص المدمجة التي تنتج شكل قوس قزح عندما ينعكس عليها الضوء.

إن ما نسميه بشقوق المحرز، تدعى أيضاً بالتسطير أو الخطوط. في الشكل 19، GG' هو المقطع العرضي لمحرز شقوقه عمودية على مستوى الورقة (العلامة *) وتظهر ستة منها فقط، على أن المحرز الفعلي يحتوي عدة آلاف من الشقوق. وتدعى الفاصلة d بين مراكز الشقوق المتجاورة بفاصلة المحرز، وهي تقليدياً بحدود 0.002 mm . نلاحظ على الشكل 19 أيضاً، أن موجة ضوئية مستوية تسقط عمودياً على المحرز من جهة اليسار، فإذا افترضنا شروط الحقل البعيد، فإن جميع الأشعة التي تبرز (أو تمرق) من المحرز في اتجاه معين تكون متوازية وتكوّن شكلاً تداخلياً على شاشة بعيدة بما يكفي.



وكم في الفقرة السابقة، فإن الاتجاهات التي تظهر فيها القمم الرئيسية لشدة الحيود من عدة شقوق هي نفس تلك التي للشقين، وهي الاتجاهات التي يكون بالنسبة لها فرق المسار لشقين متجاورين مساوياً لعدد صحيح من الأطوال الموجية.

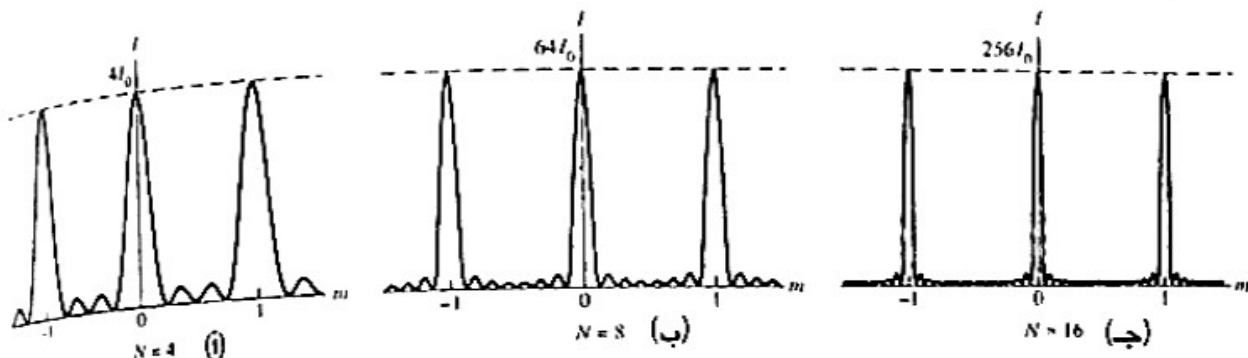
شكل 19 جزء من محرز حيود منفذ

لذلك فإن مواقع القمم تعطى مرة أخرى بالعلاقة (29 - 9)

$$d \sin \theta = m \lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 1, \pm \dots)$$

يعرض الشكل 20 توزيعات شديدة لأشكال تداخلية من أعداد مختلفة من الشقوق، مبيناً الزيادة المتنامية في حدة القمم كلما زاد عدد الشقوق.

عندما يُضاء المحرز المحتوي على مئات أو آلاف الشقوق بحزمة متوازية لضوء أحادي اللون، فإن الشكل التداخلي الناتج هو سلسلة من الخطوط الحادة عند زوايا تتحدد بالمعادلة (29 - 9). ويدعى الخطان $m = \pm 1$ بـ خطي الرتبة الأولى، والخطان $m = \pm 2$ بـ خطي الرتبة الثانية. وهكذا. أما إذا أضيء المحرز بضوء أبيض ذي توزيع مستمر من الأطوال الموجية، فإن كل قيمة m تتطابق مع طيف مستمر في الشكل التداخلي. وتتحدد الزاوية لكل طول بالمعادلة (29 - 9)، التي تبين أن لقيمة معينة m ، تقع الأطوال الموجية الطويلة (النهاية الحمراء من الطيف) عند زوايا أكبر (تكون منحرفة أكثر عن الاتجاه الرئيسي - المستقيم) مما للأطوال الموجية القصيرة عند النهاية البنفسجية للطيف.



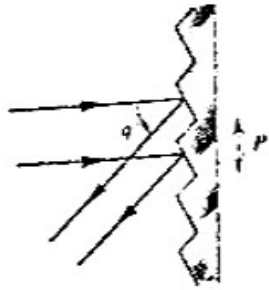
شكل 20

شكل 20 أشكال تداخلية من N من الشقوق الضيقة جداً والمتساوية الفواصل. عندما يزداد عدد الشقوق تصبح القمم أضيق وأعلى. إن عرض القمة يتناسب عكسياً مع عدد الشقوق وارتفاعها يتناسب مع مربع هذا العدد.

كما تبين المعادلة (29 - 9)، فإن جيوب زوايا انحراف القمم تتناسب طردياً مع λ/d . لهذا فإن الانحراف الملموس لهذه القمم يتطلب أن تكون قيمة الفاصلة d من رتبة الطول الموجي λ . ولكي تستخدم المحزرات في الطيف المرئي فيجب أن يكون للمحز ما بين 500 و 1500 شق بالمليمتر الواحد. لذلك، فإن قيمة d هي بحدود بضع ميكرومترات. أي من رتبة 1000 nm.

كما توجد محزرات تستطيع إنتاج صورها في الضوء النافذ (شكل 19). توجد أيضاً محزرات انعكاس (شكل 21) تستطيع إنتاج صورها في الضوء.

المنعكس. ففي الشكل 19، هناك تغير دوري في السعة (ولا تغير في الطور) الضوئية كدالة للموقع عبر المحرز. ومن الممكن أيضاً جعل المحرز مسبباً لتغير دوري في طور (وتغير مهمل في السعة) الضوء كدالة للموقع عبر المحرز. إن أغلب المحزرات المستخدمة في الطيف المرئي، سواءً أكانت عاكسة أم منفذة، هي محزرات طورية (أي تحدث تغييرات في طور الضوء). فالشكل 21 يبين مقطعاً عرضياً لنوع محرز عاكس شائع، (إذا كان المحرز شفافاً، فمن الممكن استخدامه كمحزر طوري منفذ. لأن الضوء المار خلال ثخانات مختلفة تحصل له تغييرات مختلفة في الطور). يتم اختيار زوايا الأخاديد بحيث أن الضوء من رتبة معينة ينعكس في اتجاه معين. بهذه الطريقة، فإن شدة إحدى الرتب المعينة يمكن أن تفوق الرتب الأخرى. ومعظم المحزرات المستخدمة اليوم مقطوعة بهذه الطريقة.

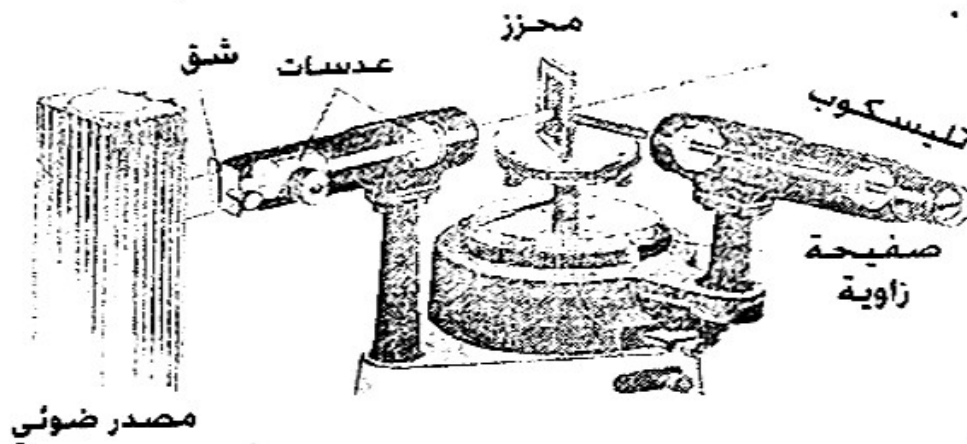


شكل 21

شكل 21 مقطع عرضي لمحزر عاكس موضعاً الحزم الضوئية الساقطة والمنعكسة و فرق المسار بينها $d \sin \theta$.

مقياس طيف المحرز

تستخدم محزرات الحيود بصورة واسعة في القياسات الطيفية كأداة تفريق للحزمة الضوئية إلى أطيايف. فإذا كانت فاصلة المحرز d معلومة، فبالإمكان قياس زوايا الأطوال الموجية المختلفة في الحزمة الضوئية، ومن ثم استخدام المعادلة (29 - 9) لحساب الطول الموجي. إن الترتيب التقليدي لهذه الأداة موضح على الشكل 22.



شكل 22

شكل 22 مقياس طيف محرز الحيود، تُكوّن العدسات بين المصدر الضوئي

والمحزح حزمة من الأشعة المتوازية تسقط على المحزح؛ تحيد الحزمة إلى رتب مختلفة في الاتجاهات التي تفي بالمعادلة (29 - 9). وتشاهد الحزمة الحادثة بواسطة تليسكروب مزود بشعرتين متعامدتين، ما يسمح بقياسات دقيقة لزاوية الحيود θ .

مثال 7 عرض طيف المحزح

تمتد الأطوال الموجية للطيف المرئي من البنفسجي 400 nm تقريباً إلى الأحمر 700 nm. أوجد العرض الزاوي لطيف الرتبة الأولى المرئي الناتج بواسطة محزح مستوي يحتوي على 600 بالمليمتر الواحد عندما يسقط عليه ضوء أبيض بصورة عمودية.

الحل: يتطابق طيف الرتبة الأولى مع $m = 1$ ، أما فاصلة المحزح d فتحسب بالعلاقة:

$$d = \frac{1}{\text{عدد الخطوط (أو الشقوق) / متر}} = \frac{1}{600 \text{ lines/(1mm)}} = \frac{10^{-3} \text{ m}}{600} = 1.67 \times 10^{-6} \text{ m}$$

الآن نعوض في المعادلة (29 - 9) لنجد الانحراف الزاوي للضوء البنفسجي θ_v للرتبة $m = 1$:

$$\sin \theta_v = \frac{400 \times 10^{-9} \text{ m}}{1.67 \times 10^{-6} \text{ m}} = 0.240, \quad \theta_v = 13.9^\circ$$

وبالنسبة لانحراف الضوء الأحمر $m = 1$

$$\theta_r = \frac{700 \times 10^{-9} \text{ m}}{1.67 \times 10^{-6} \text{ m}} = 0.419, \quad \theta_r = 24.8^\circ$$

ومنه، فإن العرض الزاوي لطيف الرتبة الأولى للضوء الأبيض هو:

$$\Delta \theta = \theta_r - \theta_v = 24.8^\circ - 13.9^\circ = 10.9^\circ.$$

مثال 8

في الحالة المعروضة في المثال 7، بين أن النهاية البنفسجية لطيف الرتبة الثالثة تتراكب مع النهاية الحمراء لطيف الرتبة الثانية.

الحل: نجد الانحراف الزاوي للونين في رتبة كل منهما. فإذا كان نطاق طيف الرتبة الثالثة للون البنفسجي يقع ضمن نطاق طيف الرتبة الثانية للون الأحمر، فهذا معناه أنهما يتراكبان.

فمن المعادلة (29 - 9) نجد أن انحراف الرتبة الثالثة للنهاية البنفسجية هو:

$$\sin \theta_v = \frac{3(400 \times 10^{-9} \text{m})}{d} = \frac{1.20 \times 10^{-6} \text{m}}{d}$$

وانحراف الرتبة الثانية للنهاية الحمراء هو:

$$\sin \theta_r = \frac{2(700 \times 10^{-9} \text{m})}{d} = \frac{1.40 \times 10^{-6} \text{m}}{d}$$

ومن هاتين النتيجةين يتضح أن النهايتين تتراكبان.

مثال 9

محز حيويد يحتوي على 10^4 خطاً على 25.00mm بفواصل فضائية منتظمة. أضيء هذا المحز بضوء أصفر سقط عليه عمودياً ويتضمن طولان موجيان 589nm و 589.59nm (أ) بأية زاوية تظهر قمة الرتبة الأولى للطول الموجي الأول من هذين الطولين؟ (ب) ما هو الانفصال الزاوي بين الرتبة الأولى لهذين الخطين؟

الحل: نجد أولاً فاصلة المحز d :

$$d = \frac{1}{10^4 \text{ lines} / (25.00 \text{ mm}) \left(\frac{10^{-3} \text{m}}{1 \text{mm}} \right)} = \frac{25.00 \times 10^{-3} \text{m}}{10^4} = 2.5 \times 10^{-6} \text{m}$$

الآن نطبق المعادلة (25 - 9) بالنسبة للطول الموجي الأول بـ $m = 1$

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left(\frac{m\lambda}{d} \right) = \sin^{-1} \frac{(1)(589 \times 10^{-9} \text{m})}{2.5 \times 10^{-6} \text{m}} = \sin^{-1}(0.2356) = 13.626^\circ$$

(ب) نجد θ'_1 للطول الموجي الثاني كما في (أ)

$$\theta'_1 = \sin^{-1} \left(\frac{m\lambda}{d} \right) = \sin^{-1} \frac{(1)(589.59 \times 10^{-9} \text{m})}{2.5 \times 10^{-6} \text{m}} = \sin^{-1}(0.2358) = 13.638^\circ$$

إن الانفصال الزاوي بين الطولين الموجيين هو:

$$\Delta\theta = \theta'_1 - \theta_1 = 13.638^\circ - 13.626^\circ = 0.012^\circ$$

(7 - 9) التفريق وقدرة التحليل

تحدد قدرة المحز على إنتاج أطيف تسمح بقياسات دقيقة للأطوال

الموجية بخاصيتين جوهريتين له، هما (1) عرض الخطوط الطيفية أو حداثتها، و(2) الفاصلة الزاوية $\Delta\theta$ بين الخطوط الطيفية (لاحظ المثال 9) المختلفة في الطول الموجي بمقدار صغير $\Delta\lambda$. وتدعى العلاقة بين $\Delta\theta$ و $\Delta\lambda$ بتفريق المحرز D:

$$D = \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} \quad (9 - 36)$$

وحداته الراديان / متر (rad / m)، أي زاوية قطرية بوحدة الطول. ولكي تظهر الخطوط الطيفية ذات الأطوال الموجية القريبة من بعضها منفصلة قدر المستطاع يلزمنا محرز بأعلى تفريق ممكن. لكن السؤال المطروح هو عن الخاصية الفيزيائية التي تحدد تفريق المحرز. للإجابة عن ذلك، نفاضل المعادلة (9 - 25)، معتبرين θ و λ كمتغيرين، نجد:

$$d\cos\theta d\theta = m d\lambda$$

أو بعبارة الاختلافات الصغيرة بدلاً من التفاضلات، فإن:

$$d\cos\Delta\theta = m\Delta\lambda \quad (9 - 37)$$

وبالتعويض عن $\Delta\theta/\Delta\lambda$ من هذه المعادلة في المعادلة (9 - 36)، نجد:

$$D = \frac{m}{d\cos\theta} \quad (9 - 38)$$

نستنتج من هذه المعادلة، أن التفريق يزداد عندما تقل الفاصلة d بين الشقوق المتجاورة. يمكن أيضاً أن نزيد التفريق عندما نعمل عند الرتب العليا. نلاحظ أيضاً أن التفريق لا يعتمد على عدد شقوق المحرز.

قدرة التحليل

إذا كان المحرز ينتج خطوطاً عريضة، فإن قمم الخطوط الطيفية ذات الأطوال الموجية القريبة بعضها قد تتراكب، ما يجعل من الصعوبة تحديد ما إذا كانت هذه الخطوط تمتلك مركبة واحدة أو أكثر، ويقلل أيضاً من إمكانية إجراء قياسات دقيقة للأطوال الموجية للخطوط، وبالتالي، فإن المطلوب هو محرز ينتج خطوطاً ضيقة قدر المستطاع.

تقليدياً يُعرف عرض الخط الطيفي (يسمى اختصاراً العرض الخطي) بوصفه المدى أو النطاق الزاوي $\delta\theta$ من القمة إلى النهاية الدنيا الأولى. إن

غاية تحليل المحرز تظهر عندما يكون هناك خطان في الطيف مفصولان بنطاق طول موجي $\Delta\lambda$ بحيث أن الفرق $\delta\theta$ بين موقعيهما الزاويين (مثال 6) يعطى بالمعادلة (9 - 35). نعرف قدرة تحليل المحرز R على أنها:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad (9 - 39)$$

فإذا كان الخطان ضيقين ($\delta\theta$ صغيرة)، فإن النطاق الطول موجي المطابق $\Delta\lambda$ يجب أن يكون صغيراً، وتبعاً لذلك، يجب أن تكون قدرة تحليل المحرز (9 - 39) كبيرة.

لكي نجد الخاصية الفيزيائية التي تحدد قدرة المحرز على التحليل، نحل المعادلة (9 - 37) بالنسبة لـ $\Delta\theta$ ونضع هذه النتيجة مساوية للعرض الزاوي (9 - 35)، نجد:

$$\frac{m \Delta\lambda}{d \cos\theta} = \frac{\lambda}{N d \cos\theta}$$

نحل هذه المعادلة بالنسبة لـ $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$ ، نجد:

$$R = Nm \quad (9 - 40)$$

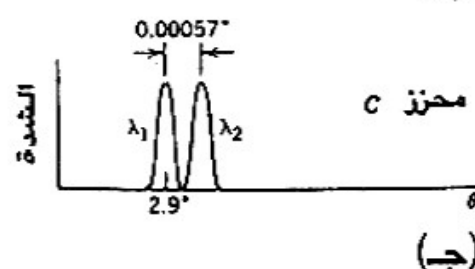
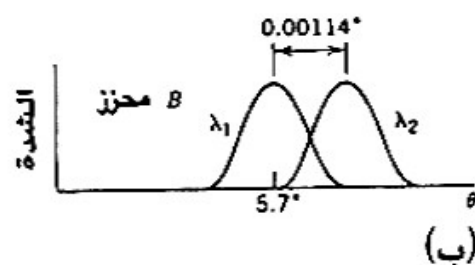
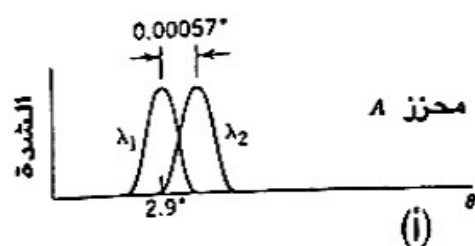
إن قدرة التحليل (9 - 40)، مثل التفريق (9 - 38)، تزداد بزيادة العدد الرتبي m ، ولكنها تختلف عن التفريق باعتمادها على عدد الخطوط N وعدم اعتمادها على الفاصلة d . ولرفع قدرة التحليل يتم اختيار محرز بأكبر عدد من الخطوط. فلشق وفاصلة d معينين، فإن المحرز الأكبر عرضاً كلياً (Nm) هو الأكبر. قدرة تحليلية، بمعنى أنه الأكثر قدرة على إنتاج خطوط طيفية أضيق.

يُقاس التفريق وقدرة التحليل نسبتيْن مختلفتين لقدرة محرز الحيود على إنتاج خطوط طيفية مفصولة على نحو نظيف. فلو اعتبرنا، مثلاً، ثلاثة محززات A، B، و C خصائصها المختارة مدونة في الجدول 1. ولنفرض أن هذه المحززات أُضيئت بضوء مكون من خطين ثنائيين عند 500 nm مفصولين بمدى $\Delta\lambda = 0.1 \text{ nm}$. يمكن اختيار خواص المحرز A بحيث أن خطي الثنائي في قمة الرتبة الأولى كانا عند غاية فصلهما، أي أن قمة أحدهما تقع على النهاية الدنيا للآخر، كما هو مبين على الشكل 23 (أ). أما

المحز B، فيتم اختياره بحيث يكون تفريقه ضعف تفريق A ولكن له نفس القدرة التحليلية، وينتج طيفاً كالموضح على الشكل 23 (ب). وعلى العكس من B، فإن المحز C له ضعف القدرة التحليلية لـ A ولكن له نفس التفريق. ولهذا فإن الذرى (القمم الرئيسية) تظهر في الشكل 23 (ج) بنفس الانفصال الزاوي كما في الشكل 23 (أ)، ولكن بعرض أصغر. فقمة إحدى الذرى الآن تسقط بوضوح خارج النهاية الدنيا للآخر، والخطان أصبحا أكثر وضوحاً في تمييزهما الواحد عن الآخر.

جدول 1 خواص ثلاث محزرات

المحز	N	d(nm)	θ	R	D(10^{-4} rad / nm)
A	5.000	10.000	2.9°	5.000	1.0
B	5.000	5.000	5.7°	5.000	2.0
C	10.000	10.000	2.9°	10.000	1.0



شكل 23

شكل 23 شكل الشدة لخطين عند $\lambda = 500$ nm مفصولين بـ $\Delta\lambda = 0.10$ nm، ناتج بواسطة المحزرات الثلاثة المدونة في الجدول 1. يمتلك المحز B أكبر تفريق ويمتلك المحز C أكبر قدرة تحليل.

إن الأعراض (جمع عرض) الكلية للمحزرات الثلاثة تساوي Nd، وهي بالنسبة للمحز A 50 mm، وبالنسبة للمحز B 25 mm، و 100 mm للمحز C. ونلاحظ من الشكل 23 أن أعراض الذرى تعتمد عكسياً على عرض المحز، وهذا يتوافق مع المعادلة (35 - 9).

مثال 10 محز عدد خطوطه 9600 خط موزعة فضائياً على عرض $W = 3.00 \text{ cm}$ مضاء بضوء من بخار الزئبق. (أ) ما هو التفريق المتوقع في الرتبة الثالثة، في المنطقة المجاورة للخط الأخضر.

(ب) $\lambda = 546 \text{ nm}$ ما هي قدرة التحليل لهذا المحز في الرتبة الخامسة؟

الحل: نجد أولاً فاصلة المحز التي هي في هذه الحالة = عرض المحز / عدد خطوطه :

$$d = \frac{W}{N} = \frac{3.00 \times 10^{-2} \text{ m}}{9600} = 3125 \times 10^{-9} \text{ m} = 3125 \text{ nm}$$

والآن يجب أن نجد الزاوية θ (المعادلة (29 - 9)) التي يظهر عندها الخط الطيفي المذكور في السؤال:

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{m\lambda}{d} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{(3)(546 \text{ nm})}{3125 \text{ nm}} \right) = 31.6^\circ$$

والآن نحسب التفريق من المعادلة (38 - 9)

$$D = \frac{m}{d \cos \theta} = \frac{3}{(3125 \text{ nm})(\cos 31.6^\circ)} = 1.13 \times 10^{-3} \frac{\text{rad}}{\text{nm}} = 0.0646^\circ/\text{nm}$$

(ب) في هذه الحالة نجد قدرة التحليل من المعادلة (40 - 9):

$$R = Nm = (9600)(5) = 48000 = 4.8 \times 10^4$$

وهكذا نجد أنه يمكن رصد (تحليل) فرقاً في الطول الموجي λ ، يقع بالقرب من الطول الموجي $\lambda = 546 \text{ nm}$ ، يتحدد مقداره بالمعادلة (39 - 9):

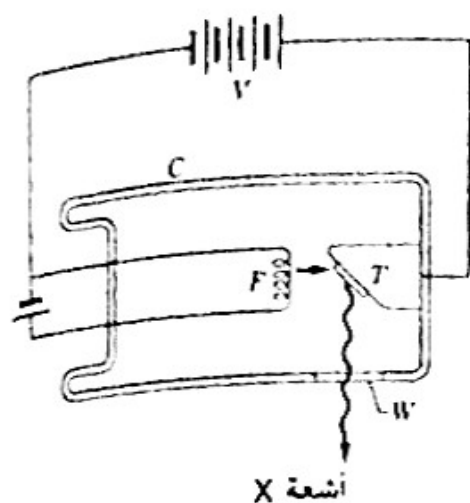
$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{R} = \frac{546 \text{ nm}}{4.8 \times 10^4} = 0.011 \text{ nm}$$

(8 - 9) حيود الأشعة السينية

الأشعة السينية هي إشعاع كهرومغناطيسي بأطوال موجية قصيرة جداً من رتبة 0.1 nm (قياساً بالطول الموجي التقليدي للضوء المرئي من رتبة 500 nm)

nm. تنتج الأشعة السينية بواسطة الإلكترونات المسرعة بفرق جهد عالي وتصادمها مع هدف معدني (T): والشكل 24 يبين ذلك مبدئياً.

شكل 24



شكل 24 تتولد الأشعة السينية (أو اشعاعات X) عندما تسرع الإلكترونات المتحررة من شمعة ساحنة خلال فرق جهد عالي من رتبة 10^6 V وتصطدم بهدف معدني (T) في حجرة مفرغة C. الشباك W شفاف لاشعاعات X.

بالنسبة للأطوال الموجية الصغيرة جداً، كالأطوال الموجية للأشعة السينية (من 0.0001 nm إلى 1 nm) يصبح محرز الحيود التقليدي أداة غير نافعة لدراسة حيودها. فلو أخذنا محزراً فاصلته $d = 3000$ nm، فإن زاوية رصد قمة الحيود الأولى ($m = 1$) لأشعة سينية طولها الموجي 0.1 nm هي، وفقاً لقانون المحزرات $d \sin \theta = m \lambda$

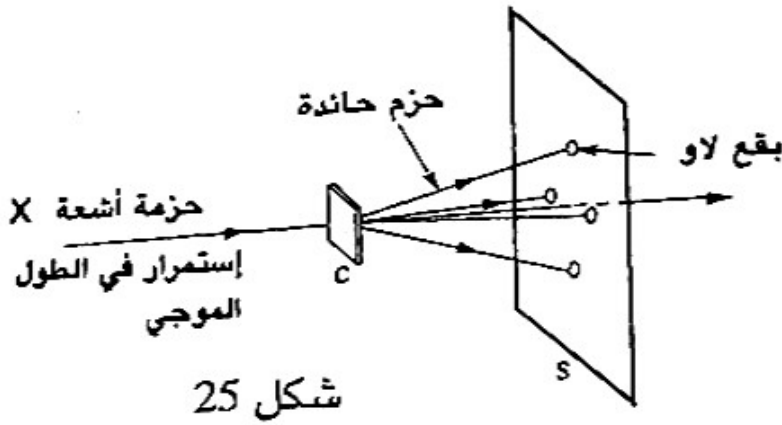
$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{m \lambda}{d} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{1 \times 0.1 \text{ nm}}{3000 \text{ nm}} \right) = 0.0019^\circ$$

وهي قريبة جداً من القمة المركزية، الأمر الذي يصعب معه، أن لم يكن مستحيلاً، تمييزها. ولو كانت d في المعادلة أعلاه قريبة من λ لحصلنا على زاوية فصل θ معقولة، لذا من الضروري أن يكون المحرز بـ $d \approx \lambda$. ولكن لأن الأطوال الموجية لاشعاعات X تساوي تقريباً الأقطار الذرية (من رتبة 10^{-12} m)، فإن صنع مثل هذا المحرز مستحيل ميكانيكياً.

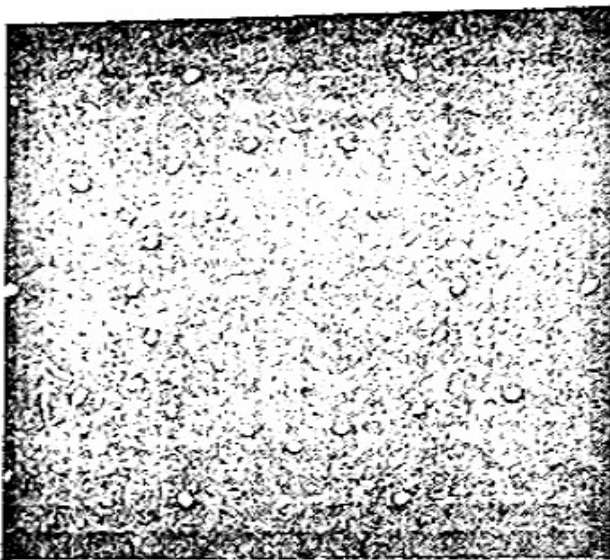
في 1912 ظهر للفيزيائي ماكس فون لاي Max Von Laue أن الصلب البللوري المحتوي على صفوف منتظمة من الذرات يمكن أن يشكل محرز حيود طبيعي بثلاثة أبعاد لاشعة X.

يبين الشكل 25، أنه إذا سُمح لحزمة مسددة من الأشعة السينية، موزعة

بصورة مستمرة في الطول الموجي (أي بطيفها المستمر) أن تسقط على بلورة، مثل بلورة ملح الطعام، فإن حزماً أكثر شدة (مطابقة لتداخل بناء من المراكز الحيودية المتعددة التي تتكون منها البلورة) تظهر في اتجاهات معينة محددة جداً. فإذا سقطت هذه الحزم على فلم تصوير، فإنها تكون مجموعات من بُقع لأي (laue Spots). إن المثال الفعلي لهذه البقع يبينه الشكل 26، الذي يُظهر أن فرخيات لاي صحيحة حقاً، فالترتيبات الذرية في البلورة يمكن أن يستدل عليها من الدراسة المتأنية لمواقع وشدد بُقع لاي بما يشبه كثيراً بنية المحرز الضوئي التي يمكن الاستدلال عليها بدراسة مواقع وشدد الخطوط في الشكل التداخلي وهناك اليوم الكثير من الترتيبات العملية التي حلت محل تقنية لاي ولكن المبادئ الأساسية لم تتغير.



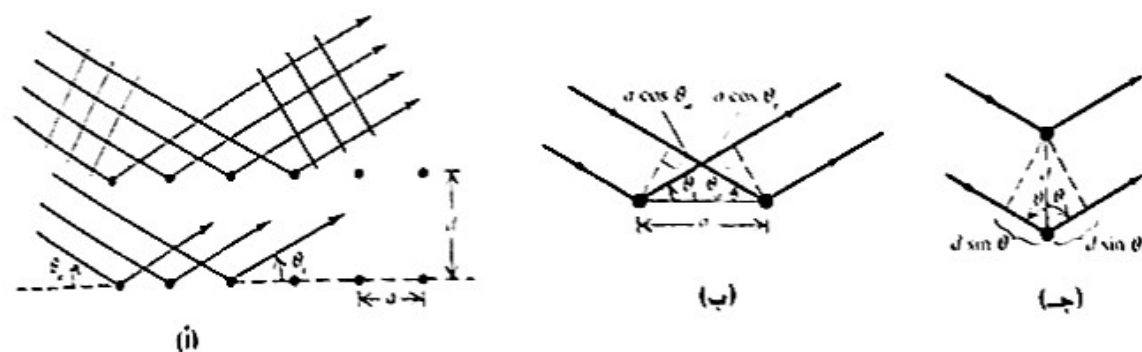
شكل 25 حزمة من الأشعة السينية تصدم بلورة C، فتظهر حزماً حائدة قوية في اتجاهات محددة جداً، مشكلة بذلك ما يعرف بنمط لاي على فلم تصوير S.



شكل 26

شكل 26 حيود لاي لأشعة X من بلورة كلوريد الصوديوم.

لتوضيح الأفكار الأساسية، نعتبر أولاً حالة الاستطارة ببعدين. (شكل 27) وفيها تسقط موجة مستوية على صف مستطيل من مراكز الاستطارة (المراكز التي تبعثر الضوء الساقط). في هذه الحالة تحت الموجة الكهرومغناطيسية الساقطة (أمواج أشعة X) ثنائي قطب كهربائي هزاز في كل جسم مستطير (نسبته جسم مبعثر، وجمعه مبعثرات) وهذه الثنائيات تؤثر كهوائيات، باعثة أمواجاً مستطارة أو مبعثرة. تتداخل فيما بينها لتعطي تراكباً لجميع الأمواج المبعثرة، هذه الوضعية تختلف عما هي الحالة عليه في محرز الحيود، حيث تنبعث الأمواج من جميع الشقوق من طور واحد (بالنسبة لموجة مستوية عند السقوط العمودي). ففي الأمواج المبعثرة ليس جميعها في الطور بسبب اختلافات أبعادها عن المصدر. ولحساب الشكل التداخلي، يجب الأخذ في الاعتبار جميع الاختلافات المسارية للأمواج المستطارة، بما فيها المسافات من المصدر إلى الجسم المستطير. ومن الجسم المستطير إلى المشاهد (مسارات الأشعة 1، 2، و 1' و 2').



شكل 27

شكل 27 (أ) استطارة الأمواج بواسطة صف مستطيل (أو قائم). (ب) تداخل الأمواج المستطارة بواسطة ذرات متجاورة في الصف هو تداخل بناء عندما $a \cos \theta_a = a \cos \theta_r$. أي عندما تساوي زاوية السقوط θ_a زاوية الانعكاس θ_r . (ج) التداخل من صفوف متجاورة هو أيضاً تداخلاً بناء عندما يساوي فرق المسار $2d \sin \theta$ عدداً صحيحاً من الأطوال الموجية، كما في المعادلة (41 - 9).

كما يبين الشكل 27 ج، فإن طول المسار من المصدر إلى المشاهد هو نفسه لجميع الأشعة المستطارة في صف واحد إذا كانت الزاويتان θ_a و θ_r

متساويتين، كما يوضح ذلك الشكل. إن الأشعاع المستطارد من صفوف متجاورة يكون في الطور أيضاً إذا كان فرق المسار للصفوف المتجاورة هو عدد صحيح من الأطوال الموجية. وكما يبين الشكل 27 ج، فإن فرق المسار هذا يساوي $2d\sin\theta$. وبالتالي، فإن شروط وصول الأشعاع إلى المشاهد من صف كامل من الذرات في طور واحد هي:

(1) زاوية السقوط تساوي زاوية الاستطارة، (2) فرق المسار لصفوف متجاورة يجب أن يساوي $m\lambda$ ، حيث m عدد صحيح. والشرط الأخير يمكن التعبير عنه كالتالي.

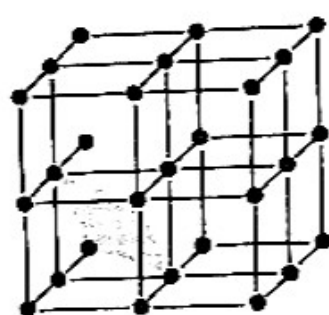
$$2d\sin\theta = m\lambda \quad (9 - 41)$$

ففي الاتجاهات التي يتحقق فيها هذا الشرط نشاهد قمة قوية في نمط التداخل. هذا التداخل يمكن أن يوصف بدلالة إنعكاسات الموجة من صفوف أفقية للأجسام المستطيرة في الشكل 27 أ. فالانعكاس القوي (تداخل بناء) يظهر عند زوايا سقوط واستطارة متساوية مع تنفيذ الشرط (9 - 41).

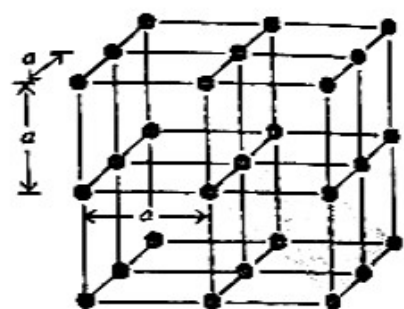
وكعرف ساد هذه الحالة، فإن θ تقاس بالنسبة إلى سطح البلورة، عكس ما ألفناه في قياس θ ، الذي يتم بالنسبة إلى العمود على مستوي صف الشقوق أو المحرز. هذا بالإضافة إلى أن معادلة حيود أشعة x (9 - 41) تختلف عن معادلة حيود المحرز التقليدي، والتي هي نفسها معادلة تداخل شقي يونغ

$$d\sin\theta = m\lambda$$

يمكن توسيع هذه المناقشة لتشمل صف بثلاثة أبعاد، وذلك بأخذ مستويات المبعثرات بدلاً من صفوفها. والشكل 28 يبين طواقم متعددة مختلفة لمستويات متوازية تمر من خلال جميع المبعثرات.



شكل 28



شكل 28 شبكة بلورية تكعيبية تبين عائلتين مختلفتين من المستويات البلورية. فاصلة المستويات في الجزء أ من الشكل هي $d = a / \sqrt{2}$ ، هذا يعني أن المستويات في الجزء ب من الشكل تتفصل بـ $d = a / \sqrt{3}$. هناك أيضاً ثلاثة طواقم من المستويات توازي أوجه المكعب بفاصلة قدرها a .

إن الأمواج الواردة من جميع المبعثرات في مستوي معطى تتداخل تداخلاً بناءً إذا كانت زوايا السقوط والاستطارة متساوية. هناك أيضاً تداخلاً بناءً بين المستويات عندما تتحقق المعادلة (41 - 9)، حيث d هي الآن المسافة بين المستويات المتجاورة. ولأن هناك طواقم كثيرة مختلفة من المستويات المتوازية، فإن هناك قيماً كثيرة لـ d وطواقم كثيرة من الزوايا، ما يعطي تداخلاً بناءً لكامل الشبكة البلورية. هذه الظاهرة تعرف بانعكاس براغ، والمعادلة (41 - 9) تدعى بشرط براغ، تخليداً لاسم وليم براغ وابنه لورنس براغ الرائدان في تحليل أشعة x . وهنا ننبه إلى أن عبارة الانعكاس يجب أن لا تحجب حقيقة أننا نتعامل مع ظاهرة تداخلية. فالانعكاسات من مستويات مختلفة تماثل تماماً الظواهر التداخلية في الأغشية الرقيقة (الفقرة (7 - 8)). كما يُظهر الشكل 26، يحدث الغاء تام تقريباً للأمواج أشعة x في جميع الاتجاهات باستثناء اتجاهات معينة خاصة جداً، حيث يحدث تداخلاً بناءً وتتشكل بقعاً مضيئة، هي المعروفة ببقع لاي. مثل هذا الشكل الحيودي يدعى عادة بشكل حيود أشعة x .

إذا كانت فاصلة الشبكة البلورية d معروفة، فإنه بالإمكان تحديد الطول الموجي لأشعاعات x ، بالطريقة نفسها التي حددنا بها الأطوال الموجية للضوء المرئي بقياس الأشكال الحيودية من الشقوق أو المحزرات، فمثلاً، بالإمكان تحديد فاصلة الشبكة البلورية لكلوريد الصوديوم من كثافتها ومن عدد أفوجادرو؛ ومن ثم، حالما تتم معرفة الطول الموجي لأشعة x ، يكون بالإمكان استخدام حيود أشعة x لشرح بنية البلورة وفاصلتها الشبكية. لحيود أشعة x أهمية بالغة كأداة تجريبية في بحث البنية البلورية للصلب؛ حيث يمكن قياس الفضاءات الذرية بدقة، وكذلك البنى الشبكية للبلورات معقدة. كذلك يلعب حيود أشعة x دوراً هاماً في دراسة بنيات السوائل والمركبات العضوية، وهو واحد من التقنيات التجريبية الرئيسية في إنجاز نجاحات هامة في مجال بنيات الـ DNA وعلم الجينات الجزيئي.

مثال 11

وُجّهت حزمة من أشعة x بطول موجي 0.145 nm نحو مستويات معينة

لبلورة سيليكون. عندما ازديت زاوية السقوط من الصفر شوهدت أول قمة تداخلية قوية من تلك المستويات عندما عملت الحزمة زاوية 34.5° مع مستويات البلورة. أ) كم تتباعد المستويات بعضها عن بعض؟ ب) هل توجد قمة تداخلية أخرى من هذه المستويات عند زوايا أكبر؟

الحل: لكي نجد فاصلة المستويات d نحل معادلة براغ بالنسبة لـ d واضعين $m = 1$

$$2d \sin \theta = m\lambda$$

$$d = \frac{m\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{(1)(0.145 \times 10^{-9} \text{ m})}{2 \sin 34.5^\circ} = 0.136 \text{ nm}$$

وهذه المسافة بين المستويات المتجاورة (وهي تتقاسم مع λ لـ x).
ب) لكي نحسب الزوايا الأخرى نحل معادلة براغ بالنسبة لـ θ :

$$\sin \theta = \frac{m\lambda}{2d} = m \frac{0.145 \text{ nm}}{2(0.136 \text{ nm})} = m (0.566)$$

ومنه نجد أن قيم m الأكبر من 1 تعطينا قيماً لجيب الزاوية θ أكبر من 1، وهذا غير ممكن؛ إذن لا توجد قمم تداخلية أخرى ولا زوايا أخرى نشاهد منها هذه القمم.

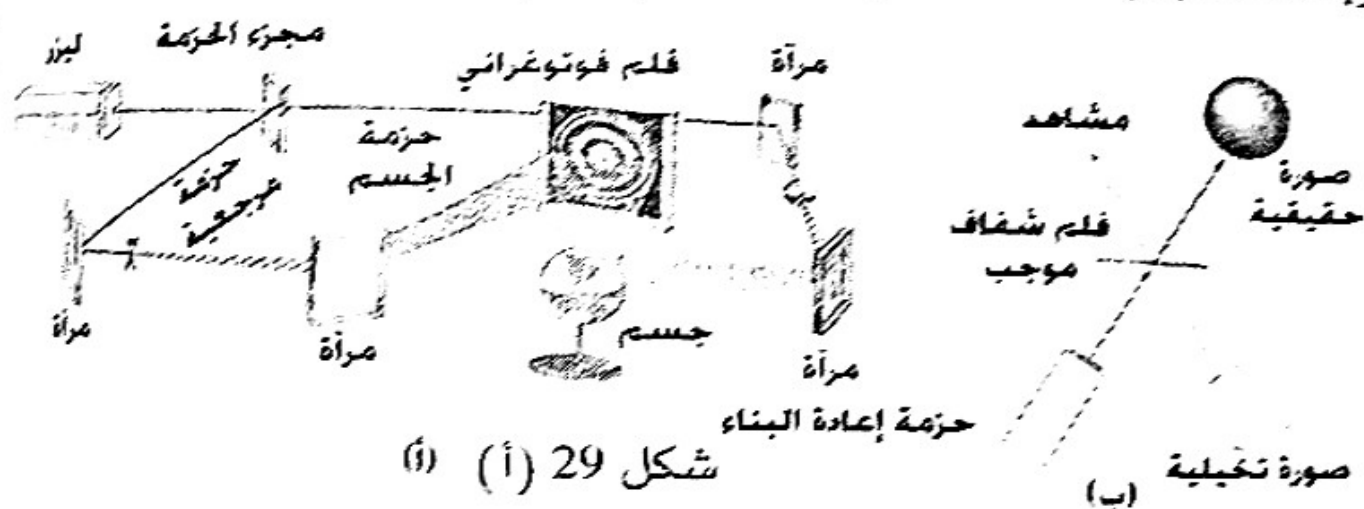
(9-9) الهولوجرافي (أو التصوير الجسم)

يتضمن الضوء المنبعث من الجسم معلومات كاملة عن حجمه وشكله يمكن اعتبارها مخزونة في الجبهات الموجية للضوء المنبعث من الجسم. هذه المعلومات يمكن أن تظهر بهيئة تغيرات في شدد واطوار الحقول الكهرومغناطيسية لهذه الأمواج. فإذا أمكن تسجيل هذه المعلومات، يمكن بعد ذلك إعادة إنتاج صور كاملة للجسم بثلاثة أبعاد، تدعى الصورة الجسم أو الهولوجرام.

فالهولوجرام هو تقنية إعادة تسجيل وإعادة إنتاج صورة الجسم دون استخدام العدسات. وكما هو معروف، فإن أفلام التصوير العادية أو النظام التليفزيوني التقليدي جميعها ثنائية الأبعاد وتسجل تغيرات الشدة فقط،

وهي غير حساسة لتغيرات الصور: ومن ثم، ليس ممكناً استخدام الفلم
النسب (أو ما يعرف بالنتجنت) لإعادة بناء الصورة الثلاثية الأبعاد. عرف
كان حيود الأشعة السينية بواسطة بللورة إستثناءً على هذا الاطار. فبسبب
النظام القضاة النظرية للبلورة، يمكن بسهولة تتبع الأطوار النسبية للأشعة
المتحدة الواصلة للفلم من ذرات مختلفة. وقد تحقق ذلك على يد أوليم براغ
حينما اضاء الفلم النسب لتشكل حيود أشعة X. وبالتالي إعادة بناء صورة
البلورة. بهذه الطريقة «طريقة الحيود المضاعف» يعطي حيود الأشعة من
الشكل الحيوي صورة للجسم الأصلي ثلاثية الأبعاد بحيث يمكن مشاهدته
من اتجاهات ومسافات مختلفة لأظهار جوانبها المختلفة ومشاهدتها المتغيرة.
إن الطريقة الأساسية لصناعة الهولوجرام موضحة على الشكل... وتلخص
في الآتي:

يضاء الجسم يُسجل حجباً بضوء أحادي اللون، ثم يوضع الفلم
الفوتوغرافي بحيث يصدم بالضوء المتبعثر (المستطار) من الجسم (حزمة
الجسم) وكذلك بالضوء المباشر من المصدر (الحزمة المرجعية)، وعملياً
يجب أن يكون المصدر الضوئي ليزرياً، وذلك لما لشعاع الليزر من خصائص
ضرورية لصناعة الهولوجرام لا يمكن توفرها في مصادر الضوء التقليدية.
إن التداخل الحاصل بين الضوء المباشر والضوء المتبعثر يؤدي إلى تكوين
وإعادة تسجيل شكلاً تداخلياً معقداً على الفلم.



شكل 29 (أ) الهولوجرام هو تسجيل على فلم لشكل تداخلي متكون بضوء من مصدر
متشابه وضوء مستطار من الجسم. (ب) تتكون الصور عندما يسقط الضوء خلال
الهولوجرام.

بعد ذلك ولتكوين الصور، نسقط ضوءاً (حزمة إعادة البناء) خلال الفلم المظهر (المحمض)، كما هو موضح في الشكل 29 (ب)، فتتكون صورتان، أحدهما تخيلية بجهة الفلم قرب المصدر، والأخرى حقيقية في الجهة الثانية من الفلم. ولتفسير ذلك، يمكن مبدئياً، اعتبار الشكل التداخلي المتكون على الفلم الفوتوغرافي بواسطة تراكب موجة مستوية ساقطة وموجة كروية (شكل 30 (i)). تتولد الموجة الكروية عند المصدر النقطة P على مسافة b_0 من الفلم، و P هذا قد يكون جسماً صغيراً يتبعثر عليه جزء من الموجة المستوية الساقطة، ومن ثم يمكن الافتراض أن الموجتين، المستوية الساقطة على الجسم P، والكروية المتولدة عنده - الجزء المتبعثر من الموجة المستوية، أحاديتا اللون ومتشاكهتان وعلاقتهما الطورية تساعد على ظهور تداخل بناء عند النقطة O على التخطيط. حينذاك سيظهر أيضاً تداخلاً بناءً عند أية نقطة Q على الفلم أبعد من P عن O بمقدار عدد صحيح من الأطوال الموجية، بمعنى أنه إذا كان $b_m - b_0 = m\lambda$ ، حيث m عدد صحيح، عند ذلك فقط يحدث تداخل بناء إن النقاط التي يتحقق فيها هذا الشرط تشكل دوائراً متمركزة عند O بانصاف أقطار تعطى بالعلاقة:

$$b_m^2 = b_0^2 + r_m^2$$

$$b_m = \sqrt{b_0^2 + r_m^2}$$

وبطرح b_0 من طرفي المعادلة، نجد

$$b_m - b_0 = \sqrt{b_0^2 + r_m^2} - b_0 = m\lambda$$

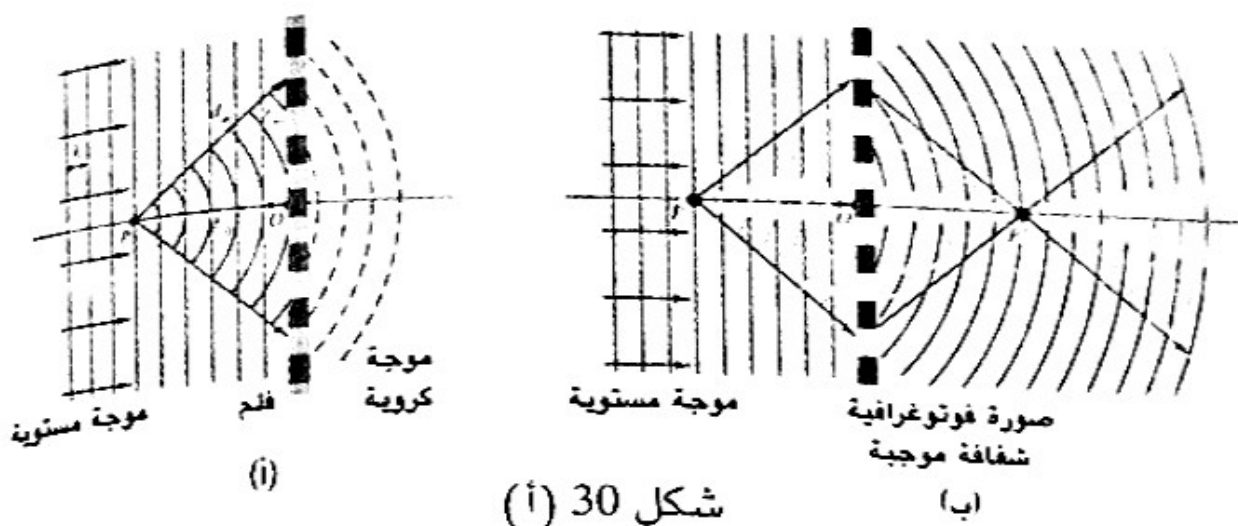
حيث $b_m - b_0$ هو فرق المسار بين الأمواج الواصلة إلى O من P وبين تلك التي تصل إلى Q، وبحل هذه المعادلة بالنسبة إلى r_m^2 ، نحصل على

$$r_m^2 = \lambda (2mb_0 + m^2\lambda)$$

ولأن b_0 تكون عادة أكبر بكثير من λ ، لذلك يمكن إهمال الحد الثاني في القوسين أعلاه، ومنه نجد:

$$r_m = \sqrt{\lambda (2mb_0)} \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (9 - 42)$$

يتضمن الشكل التداخلي سلسلة من الأهداب الدائرية المضيئة بانصاف أقطار تتحدد بالمعادلة (9 - 42). بين الأهداب المضيئة هذه هناك أهداب مظلمة أيضاً.



شكل 30 (أ)

شكل 30 (أ) تداخل بناء لأمواج مستوية وكروية يظهر في مستوي الفلم عند كل نقطة Q تكون بالنسبة لها المسافة b_m من P أكبر من المسافة b_0 من O لـ P بعدد صحيح من الأطوال الموجية $m\lambda$. بالنسبة للنقطة المبينة على الشكل، $m = 2$. (ب) عندما تصدم موجة مستوية فلماً مظهراً، فإن الموجة الحادثة تتألف من الموجة المتجمعة عند P' والمتفرقة بعد ذلك والموجة المتفرقة التي تظهر لتولد عند P . هاتان الموجتان تكونان صوراً حقيقية وتخيلية، على التوالي.

الآن يُظهر (يحمض) الفلم وتستخرج الصورة الشفافة الموجبة بحيث تكون مساحات الأهداب المضيئة على الفلم هي الأكبر. حينذاك يضاء الفلم بأمواج ضوئية مستوية أحادية اللون لها نفس الطول الموجي λ الذي أُستخدم في البداية. في الشكل 30 (ب) تعتبر النقطة P' عند مسافة b_0 من الفلم بامتداد المحور. تختلف مراكز الأهداب المضيئة في مسافاتهما من P' بعدد صحيح من الأطوال الموجية، وبالتالي، فإن القمة القوية في الأمواج الحادثة تظهر عند P' . هذا يعني أن الضوء يتجمع عند P' ومن ثم يتفرق منها على الجهة المقابلة. بمعنى أن p' هي الصورة الحقيقية لـ P .

• يظهر الحيود عندما يمر الضوء خلال ثقب ما أو حول حافة ما. وعندما يكون المصدر والمشاهد بعيدين جداً عن السطح العائق بحيث يمكن اعتبار الأشعة الواردة متوازية. فإن هذا الحيود يدعى حيود فراونهوفر. ويدعى حيود فرنل إذا كان المصدر أو المشاهد على مسافة محدودة من العائق.

• بالنسبة لشق مفرد ضيق عرضه a . فإن شرط التداخل الهدام (الأهداب المظلمة) عند نقطة ما مثل P عند زاوية θ هو $(m = \pm 1, \pm 2, \pm \dots)$ $\sin \theta = m\lambda / a$ وشدة الإضاءة I عند أية زاوية θ في الشكل التداخلي للضوء الحائد هي:

$$I_{\theta} = \frac{I_0 \sin^2 \beta / 2}{(\beta / 2)^2}, \quad \beta = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta$$

• يتكون محزز الحيود من عدد كبير من الشقوق الرقيقة المتوازية، المفصولة بمسافة d . وشرط الشدة العظمى في الشكل التداخلي لمحزز الحيود هو $d \sin \theta = m\lambda$, $(m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm \dots)$

وهو نفس شرط التداخل البناء لشقي يونغ. ولكن القمم في محزز الحيود تكون حادة جداً وضيقة.

• تستخدم البلورة كمحزز حيود ثلاثي الأبعاد بالنسبة لأشعاعات x باطوال موجية من نفس رتبة القضاءات الشبكية للبلورة. فطاقم من المستويات البلورية المفصولة بمسافة d . يظهر التداخل البناء عندما تتساوى زاويتا السقوط والاستطارة (مقاستان من المستويات البلورية)، وعندما يتحقق الشرط المعروف باسم شرط براغ:

$$2d \sin \theta = m\lambda, \quad (m = 1, 2, 3, \dots)$$

• يتكون الشكل الحيودي الناتج من ثقب دائري قطره D من بقعة مركزية مضيئة، تدعى قرص آيري، ومن سلسلة من الحلقات المتمركزة المظلمة والمضيئة. إن القياس الزاوي للحلقة المظلمة الأولى منها، والذي يساوي القياس الزاوي لقرص آيري، يعطى بالعلاقة:

$$\sin \theta = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

وطبقاً لمعيار رايلي، فإن جسمين نقطيين بعيدين (نجمين) يتميزان بالكاد عندما تعطى فاصلتهما الزاوية θ بالمعادلة:

$$\theta_R = \sin^{-1} \left(1.22 \frac{\lambda}{D} \right) \approx 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

من أجل θ_R صغيرة.

• الهولوجرام هو تسجيل صورة ضوئية للشكل التداخلي المتكون بواسطة الضوء المستطار (المتبعثر) من الجسم والضوء الوارد مباشرة من المصدر. وهو يكون صورة حقيقية ثلاثية الأبعاد للجسم.

الحيود من شق واحد

1. ضوء أحادي من مصدر بعيد يسقط على شق عرضه 0.8 mm ، فيتكون شكل حيودي على شاشة تبعد عن الشق مسافة 3.00 m . قيست المسافة من القمة المركزية إلى النهاية الدنيا الأولى فكانت 1.8 mm . احسب الطول الموجي للضوء المستخدم.

2. أشعة متوازية من ضوء الزئبق الأخضر طولها الموجي 546 nm تمر خلال شق مغطى بعدسة طولها البؤري 40.0 cm . في المستوى البؤري للعدسة كانت المسافة من القمة المركزية إلى النهاية الدنيا الأولى 12.0 mm . ما هو عرض الشق؟

3. ضوء أحمر طوله الموجي 633 nm من ليزر الهليوم - نيون يمر خلال شق عرضه 0.300 mm فيتكون له شكل حيودي على شاشة تبعد مسافة 4.0 m عن مستوي الشق. إعتبر عرض الهدب المضيء كمسافة بين النهايتين الدنيتين على جانبيه، وأوجد أ) عرض الهدب المضيء المركزي؟ ب) عرض الهدب المضيء الأول على أي من جانبي الهدب المركزي.

4. ضوء طوله الموجي 589 nm من مصدر بعيد يسقط على شق عرضه 0.850 mm وينتج عن ذلك شكل حيودي يشاهد على شاشة تبعد 2.00 m عن مستوي الشق. ما هي المسافة بين الهدبين المظلمين على أي من جانبي الهدب المضيء المركزي؟

5. شق عرضه a وضع أمام عدسة طولها البؤري 0.900 m وأضيء بضوء متوازي طوله الموجي 600 nm فتكون شكل حيودي على شاشة وضعت في المستوى البؤري للعدسة (شكل 8 ب). فإذا كانت الصورة الفوتوغرافية للشكل

8 ب تمثل تكبيراً لضعف القياس الفعلي، فما هو عرض الشق؟

6. في تجربة حيود من شق واحد، وُجد أن المسافة بين المنطقتين المظلمتين الأولتين على يمين ويسار القمة المركزية 5.2 mm على شاشة تبعد 80 cm عن مستوي الشق، وكان الطول الموجي للضوء المستخدم 546 nm . أوجد عرض الشق.

7. عندما سقط ضوء وحيد اللون على شق عرضه 0.022 mm شوهدت أول نهاية حيودية دنيا عند زاوية 1.8° من اتجاه الحزمة الساقطة. أوجد الطول الموجي الساقط.

8. ضوء أحادي اللون طوله الموجي 441 nm يسقط على شق ضيق. على شاشة تبعد 2.16 m شوهدت النهاية الحيودية الدنيا الثانية على مسافة 1.62 cm (أ) احسب زاوية حيود النهاية الدنيا الثانية. (ب) أوجد عرض الشق.

9. أضواء شق منفرد بضوء له طولين موجيين λ_a و λ_b ، بحيث انطبقت النهاية الحيودية الدنيا الأولى للطول الموجي λ_a مع النهاية الحيودية الدنيا الثانية للطول الموجي λ_b .

(أ) ما هي العلاقة بين الطولين الموجيين؟ (ب) هل هناك نهايات دنيا أخرى في شكلي حيود الطولين الموجيين يمكن أن تنطبق؟

10. شق عرضه 1.16 mm أضواء بضوء طوله الموجي 589 nm فشاهد شكل للحيود على شاشة تبعد 2.94 m . أوجد المسافة بين أولى نهايتين حيوديتين دنيتين على نفس الجانب من القمة المركزية.

الشدة في حيود الشق الواحد

11. ضوء أحادي اللون طوله الموجي 538 nm يسقط على شق عرضه $25.2 \mu\text{m}$ ، ويبعد عن الشاشة مسافة 3.48 m . اعتبر النقطة P على مسافة 1.13 cm من القمة المركزية.

(أ) احسب زاوية الحيود θ . (ب) احسب زاوية فرق الطور الكلي β . (ج) نسبة الشدة عند النقطة P إلى الشدة عند القمة المركزية.

12. احسب عرض القمة المركزية في شكل حيود الشق الواحد الذي فيه عرض الشق a يساوي 10 أمثال طول موجة الضوء المستخدم ($a = 10\lambda$).

13. (أ) برهن أن قيم زاوية فرق الطور الكلي β التي تظهر عندها القمم

العظمى لحيود الشق الواحد يمكن أن تتوجد تماماً بتفاضل المعادلة (8-10) بالنسبة إلى β ومساواة هذا التفاضل بصفر، والحصول على الشرط $\tan\beta = B$

(ب) أوجد قيم β التي تحقق هذه العلاقة برسمك للمنحني $y = \tan\beta$ والمستقيم $y = B$ ومن ثم إيجاد نقاط تقاطعهما.

14. أضيء شق عرضه 0.200mm بأشعة متوازية لضوء طوله الموجي 500nm فشاهد الحيود على شاشة تبعد 4.0m عن الشق، وكانت الشدة عند القمة المركزية ($\theta = 0$) $5.00 \times 10^{-6} \text{ W / m}^2$.

(أ) ما هي المسافة على الشاشة من القمة المركزية إلى النهاية الدنيا الأولى.
(ب) احسب الشدة عند نقطة على الشاشة بمنتصف هذه المسافة.

15. تكون شكل حيودي عند مرور أشعة متوازية طولها الموجي 500nm خلال شق عرضه 0.250mm . ما هي زاوية فرق الطور (فرق الطور بين الموجات الواصلة من قمة الشق ومن قاعدته) عند (أ) مركز القمة المركزية: (ب) النهاية الدنيا الثالثة خارج القمة المركزية: (ج) 5° من القمة المركزية؟

16. في شكل حيودي بواسطة شق واحد عرضه 0.400mm كانت زاوية فرق الطور الكلي β تساوي $\pi/2 \text{ rad}$ عند زاوية حيود $\theta = 4^\circ$ من القمة المركزية. ما هو الطول الموجي للضوء؟ (ليس ضرورياً أن يكون الضوء في المنطقة المرئية من الطيف).

الحيود عند الثقوب الدائري

17. إذا كان المصباحان الأماميان لسيارة يبتعدان عن بعضهما بمسافة 1.42m . (فبأي أ) انفصال زاوي، (ب) أكبر مسافة تميزهما العين؟ بفرض أن قطر بؤبؤ العين يساوي 5.00mm وأن الطول الموجي للضوء هو 562nm ؟

18. رائد فضاء في تابع ارضي يتطلب أن يكون قادراً على التمييز بالكاد بين مصدرين نقطيين على الأرض يقعان أسفله بمسافة 1.63km . (احسب أ) الانفصال الزاوي، (ب) الانفصال الخطي للمصدرين، مفترضاً الشروط المثالية، خذ $\lambda = 540\text{nm}$ وقطر بؤبؤ عين رائد الفضاء 4.9mm .

19. أوجد فاصلة نقطتين على سطح القمر يمكن تمييزهما تماماً بواسطة تليسكوب الطول البؤري لعدسته 5.08 m عند قمة جبل، مفترضاً أن هذه المسافة الفاصلة تتحدد بواسطة الأثرين الحيوديين للنقطتين؛ إذا كان الطول الموجي 565 nm ، (لاحظ المثال 4).

20. لنفرض أن الإنسان الخارق أو السوبرمان الحقيقي له القدرة على رؤية الأشعة تحت الحمراء عند طول موجي 0.12 nm وقطر بؤبؤ عينيه 4.3 mm ، فبأي أقصى ارتفاع يستطيع أن يميز تفاصيل أقل ما يفصل بينها هو 4.8 cm .

21. حجاب حاجز دائري قطره 60 cm يتذبذب عند تردد 25 KHz في مصدر صوتي تحت الماء يستخدم لكشف الفواصات. فإذا كانت شدة الصوت تتوزع بعيداً منه كشكل حيودي لثقب دائري قطره يساوي قطر الحجاب الحاجز نفسه، فأوجد الزاوية بين العمود على الحجاب الحاجز واتجاه النهاية الدنيا الأولى. خذ سرعة الصوت في الماء لتكون 1450 m/s .

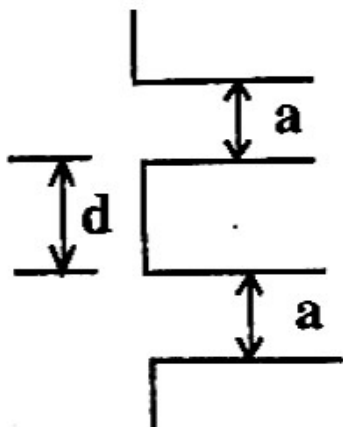
22. ضوء أحادي طوله الموجي 480 nm يمر خلال ثقب دائري قطره $2.40\text{ }\mu\text{m}$. شوهد شكل حيودي على شاشة تبعد 5.00 m من الثقب. ما مقدار قطر قرص آيري على الشاشة؟

الحيود من شقوق عدة

(أ) الحيود من شقين

23. أضئ شقان عرض الواحد منهما a ومفصولان بمسافة d بحزمة ضوئية أحادية اللون طولها الموجي λ . ما هي الفاصلة الخطية لأهداب التداخل المشاهدة على شاشة تبعد بمسافة D عن مستوي الشقين؟

شكل 31



24. (أ) في الشكل 31 إذا كانت $d = 2a$ ، فكم هدباً تداخلياً يقع في الغطاء الحيودي المركزي.

(ب) إذا جعلت $d = a$ يتحول الشقان إلى شق واحد عرضه $2a$. برهن أن معادلة حيود الشقين (19 - 8) تتحول إلى معادلة حيود لمثل هذا الشق.

- (ب) الحيود من عدة شقوق
25. اعتبر شكلاً تداخلياً ناتجاً من ثمانية شقوق ضيقة متساوية الفواصل حيث توجد نهاية تداخلية دنيا عندما يكون فرق الطور بين الضوء الوارد من شقين متجاورين مساوياً لـ $\pi/4$ ، كما هو مبين على الشكل 16 ب. لأي زوج من الشقوق يحدث تداخلاً هداماً كلياً.
26. اعتبر شكلاً تداخلياً ناتجاً من أربعة شقوق ضيقة متساوية الفواصل برهن بواسطة تخطيط المتجه الدوار أنه توجد نهاية دنيا عندما يكون فرق الطور ϕ من شقين متجاورين (أ) $\pi/2$ (ب) π ، (ج) $3\pi/2$. بين في كل حالة، لأي زوج من الشقوق يوجد تداخل هدام كلياً؟
27. عدد الأهداب في القمة الحيودية.
- في الشكل 14 تضم القمة الحيودية المركزية سبعة أهداب تداخلية تماماً. وفي هذه الحالة يكون $d/a = 4$ وفقاً للمعادلة (23 - 8). (أ) ماذا يجب أن تكون النسبة d/a إذا ضمت القمة المركزية خمسة أهداب فقط؟ (ب) في الحالة (أ) كم يكون عدد الأهداب داخل القمة الحيودية الأولى على أي من جانبي القمة المركزية؟

محزز الحيود

28. ما الطول الموجي لضوء منحرف في الرتبة الأولى بزاوية 16° بواسطة محزز منفذ عدد خطوطه 6000 خط / سم؟ (ب) ما مقدار انحراف الرتبة الثانية لهذا الطول الموجي؟ مفترضاً أن الضوء يسقط عمودياً.
29. أمواج مستوية أحادية اللون بطول موجي 600 nm تسقط عمودياً على محزز مستوي منفذ عدد خطوطه 600 خط / مم. أوجد زوايا انحراف الرتبة الأولى، الثانية، والثالثة.
30. سَطَّر محزز منفذ ب 5000 خط / سم. فإذا كان α و δ خطا الهيدروجين الذري وطوليهما 656 nm و 410 nm على التوالي. احسب الانفصال الزاوي بالدرجات بين هذين الخطين (أ) في طيف الرتبة الأولى، (ب) في طيف الرتبة الثانية، مفترضاً السقوط العمودي للضوء.

الأشعة السينية (أشعة x)

31. اشعاعات x بطول موجي قدره 0.0820 nm تتبعثر من ذرات بللورة ما. فإذا أظهرت القمة الثانية في انعكاس براغ عندما كانت الزاوية θ في الشكل 27 (أ) هي 21.4° ، فما هي الفاصلة بين المستويات الذرية المتجاورة في البللورة؟

32. سقطت إشعاعات x الوحيدة اللون على بللورة ذات فاصلة مستويات ذرية 0.400 nm فظهرت قمة الرتبة الأولى في انعكاس براغ عندما عملت اشعاعات x الساقطة والمنعكسة (المتبعثرة) زاوية قدرها 33.0° مع المستويات البلورية. ما هو الطول الموجي لاشعاعات x؟

33. حزمة اشعاعات x طولها الموجي 29.3 Pm تسقط على بللورة كاربونات الكالسيوم ذات الفاصلة الشبكية 0.313 nm . أوجد أصغر زاوية بين المستويات البلورية والحزمة التي ستنتج في الانعكاس البناء لاشعاعات x.

الفصل العاشر

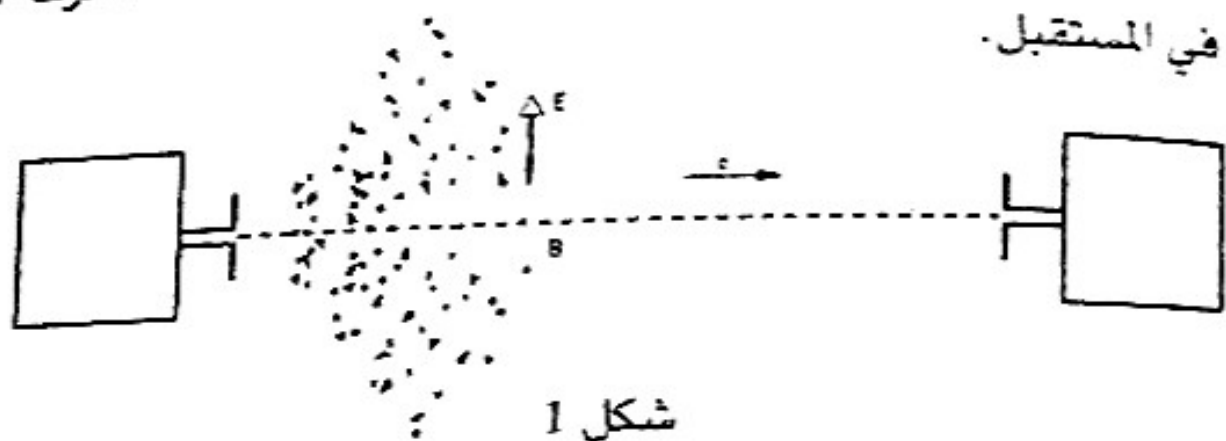
الاستقطاب

نبدأ في دراستنا للأمواج الكهرومغناطيسية (الفصل الأول) المنتشرة ان منجتي المجالين الكهربائي $\vec{E}$ والمغناطيسي $\vec{B}$ متعامدان الواحد بالنسبة للآخر وكلاهما عمودي على اتجاه انتشار الموجة. هذا يعني أن الأمواج الكهرومغناطيسية هي أمواج مستعرضة.

سنعتبر في هذا الفصل استقطاب الضوء وأمواج كهرومغناطيسية أخرى. إن اتجاه الاستقطاب يعزى إلى اتجاه متجه الموجة $\vec{E}$. وسنتناول في المناقشة نماذجاً مختلفة من الاستقطاب. بضمنها الخطي والدائري. ونتعرف على بعض التقنيات التجريبية لإنتاج الضوء المستقطب والتنبؤ به.

(10 - 1) الاستقطاب

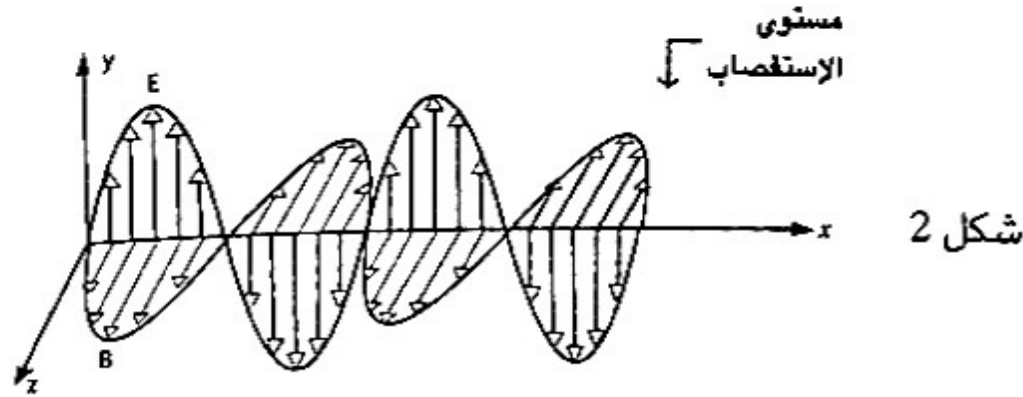
نعتبر الترتيب التجريبي المبين في الشكل 1. وهو يمثل مرسله أمواج مايكروية على اليسار. موصولة بهوائي ثنائي. تُنتج الشحنات المتماوجة أعلى وأسفل في الهوائي موجة كهرومغناطيسية تمتلك متجهها $\vec{E}$ (عند أكبر مسافة من الثنائي) موازياً لمحور الهوائي (لاحظ اتجاه الهوائي العمودي على اتجاه انتشار الموجة). وعندما تسقط هذه الموجة على هوائي مستقبل أمواج مايكروية عند اليمين، فإن متجه الموجة الساقطة $\vec{E}$ يجعل شحنات الهوائي تتحرك إلى الأعلى وإلى الأسفل. ومن ثم، فإن هذه الشحنات المتحركة تُنتج إشارة في المستقبل.



شكل 1 الموجة الكهرومغناطيسية المتولدة بواسطة المرسله هي موجة مستقطبة في مستوى الصفحة. ومتجهها الكهربائي $\vec{E}$ يوازي محور هوائي المرسله. يستطيع هوائي المستقبل أن يسجل هذه الموجة بكفاءة عالية إذا كان هذا الهوائي يقع أيضاً في مستوى الصفحة ويوازي التجه $\vec{E}$. إذا دار هوائي المستقبل خلال زاوية 90° حول اتجاه الانتشار، فلن يسجل أية إشارة.

إذا دارت المرسلات بزاوية 90° حول اتجاه انتشار الموجة، فإن الإشارة في المستقبل تهبط إلى الصفر، لأن متجه الموجة الساقطة E أصبح بزاوية قائمة بالنسبة إلى محور الهوائي المستقبل، وفي لن تسبب الموجة الساقطة حركة الشحنات بامتداد الهوائي، وبالتالي، فليست ثمة إشارة في المستقبل، ونفس النتيجة تحصل عند دوران المستقبل بدلاً من المرسلات.

يمثل الشكل 2 موجة كهرومغناطيسية كالتي في شكل 1، وكما هي العادة دائماً، المتجهين $\vec{E}$ و $\vec{B}$ عموديان الواحد على الآخر وعلى اتجاه انتشار الموجة، الذي هو الصورة الأساسية للموجة المستعرضة. وكعرف سائد، يعرف اتجاه استقطاب الموجة بأنه اتجاه المتجه $\vec{E}$ (الاتجاه y في الشكل 2). والمستوي المحدد بالمتجه $\vec{E}$ واتجاه انتشار الموجة (المستوي xy في الشكل 2) يدعى مستوي استقطاب الموجة. وهنا تجدر الإشارة أن الاتجاهين الواسفين للموجة الكهرومغناطيسية (اتجاه الانتشار واتجاه المتجه $\vec{E}$) يعينان تماماً الموجة، لأن اتجاه $\vec{B}$ مثبت بواسطة هذين المتجهين.

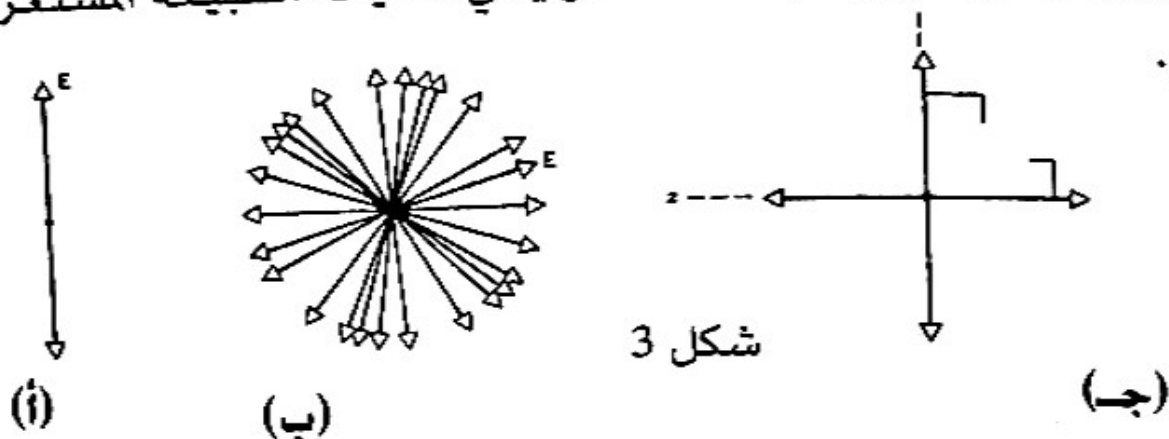


شكل 2 لقطة فوتوغرافية لحظية لموجة كهرومغناطيسية منتقلة تبين المتجهين الكهربائي $\vec{E}$ والمغناطيسي $\vec{B}$ للموجة، والموجة مستقطبة خطياً في الاتجاه y . يُحدد مستوي الاستقطاب ليكون المستوي الذي يحتوي المتجه $\vec{E}$ واتجاه الانتشار، وهو في الحالة المدروسة المستوي (xy) .

إن الموجة المعروضة على الشكل 2 يقال عنها إنها مستقطبة استقطاباً خطياً (ويقال أيضاً استقطاباً مستوياً). هذا يعني أن المتجه $\vec{E}$ يبقى باتجاه ثابت (الاتجاه y في الشكل 2) عندما تنتشر الموجة.

وكما هو مبين في التجربة في الشكل 1، فإن الأمواج الكهرومغناطيسية المستقطبة خطياً في منطقتي الأمواج المايكروية أو أمواج الراديو يمكن أن تُنتج بواسطة توجيه محور هوائي المرسله الثنائية باتجاه معين. فمثلاً، الأمواج المستخدمة لإرسال الاشارات التلفزيونية من مراكز إعادة بث الإرسال في الجماهيرية الليبية هي أمواج مستقطبة في مستوى أفقي، ولذلك السبب تكون هوائيات التلفزيون المستقبلية مثبتة على سقوف البيوت في مستوى أفقي. وفي بريطانيا ترسل الإشارات التلفزيونية بمستوي استقطاب رأسي.

إن حركات الالكترونات في هوائي الأمواج المايكروية في الشكل 1 هي حركات متشاكهة، وبالتالي، فهي تعمل بإنسجام لإرسال موجة كهرومغناطيسية مُستقطبة (شكل 3 أ). في المصادر العادية للضوء، كالمصابيح الكهربائية المتوهجة والشمس، تسلك الذرات بصورة مستقلة وتبعث أمواجاً ذات مستويات استقطاب متوجهة عشوائياً حول اتجاه الانتشار (شكل 3 ب). هذا الضوء مستعرض ولكنه غير مستقطب، بمعنى أنه ليس هناك ثمة مستوي استقطاب له أولوية على مستويات الاستقطاب الأخرى. فالتماثل حول اتجاه الانتشار يلغي حقيقة الطبيعة المستعرضة للأمواج.



شكل 3 موجة مستقطبة خطياً، كذلك التي في الشكل 2، مُشاهدة من امتداد اتجاه الانتشار، وهي تتحرك خارج مستوي الصفحة، حيث يظهر اتجاه $\vec{E}$ فقط. (ب) موجة غير مستقطبة، تلك التي يمكن اعتبارها انضماماً عشوائياً لعدة امواج مستقطبة. (ج) الطريقة المكافئة لظهور الموجة غير المستقطبة كموجتين مستقطبتين خطياً بزائتين قائمتين الواحدة بالنسبة للأخرى وبفرق طوري عشوائي بينهما. إن توجه المحورين y و z حول اتجاه الانتشار هو توجه عشوائي تماماً.

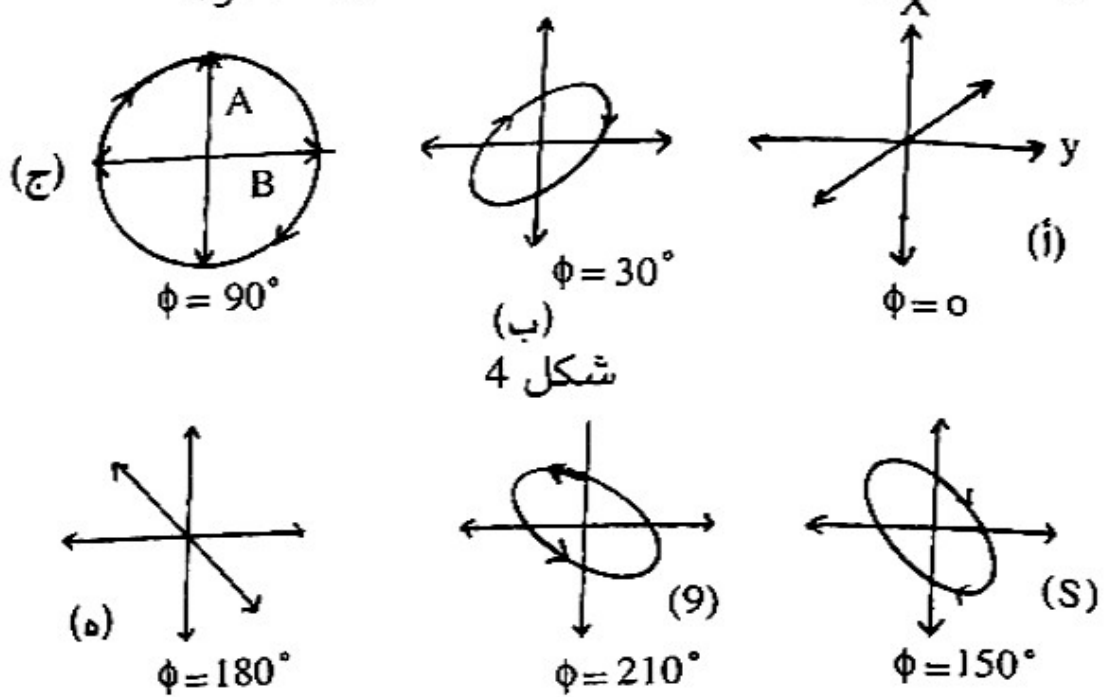
فالمصادر الطبيعية للضوء تمتلك توجهات عديدة للانبعاث الذري، فكل مصدر مجهدي (ذرات، جزيئات) يصدر في كل فعل ضوئي له رتلاً من الأمواج المستقطبة (المهتزة باتجاهات محددة) يدوم لزمن يقترب من 10^{-8} ثانية. هذه الأمواج تكون متكافئة الترددات، لكنها لا تمتلك علاقات طورية جزئية، أي أنها غير متماسكة لزمن يكفي لمشاهدة. وعند تراكبها تنتج موجة محصلة لها نفس الاستقطابية المعطاة وتدوم لنفس المدى الزمني $S \sim 10^{-8}$ ، وهكذا تتوالى الارتال الموجية الجديدة غير المتماسكة (أو المترابطة) بعضها مع بعض، مُنتجة بذلك حالة من الاستقطاب الضوئي تتغير بكيفية عشوائية لا يمكن التنبؤ بها عموماً. ومثل هذا الضوء الذي لا تدوم حالة استقطابه إلا لفترة وجيزة ($S \sim 10^{-8}$) يدعى بالضوء الطبيعي أو غير المستقطب.

وفي الضوء الطبيعي يتصالب الحقلان الكهربائي $\vec{E}$ والمغناطيسي $\vec{B}$ بصورة حرة بالنسبة إلى اتجاه انتشار الجبهة الموجية أو الشعاع. وفي كل حالة منفردة هناك حالة من التوجهات $\vec{E}$ و $\vec{B}$ بالنسبة إلى الشعاع لا تمثل محور تناظر للأمواج الكهرومغناطيسية. وعلى العموم يمكن اعتبار مثل هذه الأمواج كما لو أنها كانت مستقطبة بهيئة أهليجية (أو بيضوية) بكل الاشكال والتوجهات المتغيرة بسرعة عالية وبصورة عشوائية. بعبارة أخرى، يمكن تصور الموجة الضوئية كترابك (أو انضمام) حالتين استقطاب متعامدتين وغير مترابطتين تعرفان بالحالتين P (حالتين المتجه E_x و E_y)، وهما حالتين ذاتا سعتين متكافئتين ولكن علاقتهما الطورية ϕ متغيرة سريعاً جداً وبصورة عشوائية.

إن الضوء لا يكون عادة مستقطب كلياً ولا غير مستقطب، بل هو خليط من هذا وذاك، وبالتالي، فإن حالتين الاستقطاب P ، المعبرتين عن الموجة، سوف تمتلكان سعات غير متكافئة تماماً. وحتى العلاقة الطورية بينهما ϕ قد لا تكون هكذا متغيرة بصورة عشوائية، بل أن لاهتزازات أحد الاتجاهات غلبة على اهتزازات الاتجاهات الأخرى. إن ضوء كهذا يمكن النظر إليه بوصفه خليطاً من ضوء طبيعي وآخر مستقطب خطياً. وفي مثل هذه الحالات يقال إن الضوء مستقطب جزئياً (جزء منه مستقطب والآخر طبيعي).

للاستقطاب الجزئي مقياس معين يعرف بدرجة الاستقطاب، تحدد النسبة المثوية للضوء المستقطب. وليس معنى ذلك أن ليس هناك ضوء مستقطب كلياً. فهناك مصادر تصدر ضوءاً مستقطباً استقطاباً تاماً كالليزرات، وهناك طرقاً فنية يمكن الحصول بمساعدتها على ضوء مستقطب كلياً (لاحظ الفقرة (10 - 1)).

ويدعى الضوء مستقطب استقطاباً تاماً، إذا أنجزت ذبذبتا متجه الحزمة الضوئية $\vec{E}$ (E_y, E_x) المتعامدتان، إذا أنجزتا بفرق طور ثابت في الزمن. ومهما يكن من أمر، فإن حالة استقطاب الضوء يمكن تصورها عادة بمساعدة حالة الاستقطاب الأكثر شيوعاً، وهي حالة الاستقطاب الأهليجي، التي يكون فيها مسار نهاية المتجه $\vec{E}$ على مستوي الاستقطاب عمودياً على الشعاع، كما هو موضح على الشكل 4 وتمتلك حالتها الاستقطاب الحديثين، الخطية - عندما يعبر عن الاستقطاب الأهليجي بهيئة قطعة خط مستقيم (أ و هـ) تحدد وضع مستوي الاستقطاب، والدائرية - عندما يتحول الأهليج إلى دائرة (الحالة (ج))، أهمية كبيرة في دراسة الحالات الاستقطابية للضوء.



شكل 4 استقطابات مختلفة للشعاع الضوئي عند فروقات مختلفة للطور بين المركبتين المتعامدتين $\vec{E}_y$ و $\vec{E}_x$ لمتجه الحزمة الضوئية $\vec{E}$ ، حيث أن مستوي كل الرسومات عمودي على اتجاه الانتشار. فالرسمين (أ) و (هـ) يمثلان استقطابين خطيين، الرسم (ج) - استقطاب دائري، الرسوم (ب)، (س)، (و) - تمثل استقطاباً أهليجياً.

الاتجاه وتهتز بنفس التردد ولكنها سوف تكتسب طوراً بدئياً جديداً. هو محصلة طوري الموجتين المتبادلتين التأثير:

$$\vec{E}(x,t) = \vec{E}_z(x,t) + \vec{E}_y(x,t)$$

محصلة الاضطراب هذه تتغير بتغير العلاقة الطورية بين الموجتين التراكبتين، ففي اللحظات الخاصة. عندما يكون فرق الطور $\phi = 0$ أو مضاعفات ± 2 ، تكون الموجتين متفقتين في الطور وتكون الموجة المحصلة كالتالي:

$$\vec{E}(x,t) = (E_{0z}\hat{k} + E_{0y}\hat{j}) \cos(\omega t - kx) \quad (10 - 3)$$

وسعتها

$$E_{0z}\hat{k} + E_{0y}\hat{j} = \hat{c} \cos t \quad (10 - 4)$$

هي مقدار ثابت، وهي مستقطبة استقطاباً مستوياً. في الحالة، عندما يكون فرق الطور بين الموجتين (10 - 2) مساوياً لعدد فردي من $\pm$ (معادلة 10 - 1)، فإن المجالين المتراكبين يكونان خارج الطور، وتكون محصلة تأثيرهما المتبادل هي:

$$\vec{E}(x,t) = (E_{0z}\hat{k} - E_{0y}\hat{j}) \cos(\omega t - kx) \quad (10 - 5)$$

وسعتها هي:

$$E_{0z}\hat{k} = E_{0y}\hat{j} = \cos t \quad (10 - 6)$$

وهي مستقطبة استقطاباً مستوياً (الحالة P) مثل 1: لتكن الموجتان

$$\vec{E}(x,t) = (E_{0z}\hat{k} = E_{0y}\hat{j}) \cos(\omega t - kx),$$

و

$$\vec{E}(x,t) = (E_{0z}\hat{k} - E_{0y}\hat{j}) \cos(\omega t - kx)$$

كلاهما تعبران عن الاستقطاب المستوي للاضطراب الضوئي (الحالة P). بين ان مثل هاتين الموجتين لا يمكن أن تكونا متعامدتين عموماً، وإذا حصل أن تعامدتا، فتحت أي ظرف يمكن أن يحدث ذلك؟
الحل: نحاول بداية معرفة، ما إذا كان حاصل ضرب سعتي الموجتين لا يساوي صفراً، وفي هذه الحالة تكونان غير متعامدتين:

$$\vec{E}_0 \cdot \vec{E}'_0 = E_0 E'_0 \cos \theta$$

حيث ϕ - زاوية بين الحقلين وهذا يسوي -
 (9 - 11) $\cos \phi = \frac{\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2}{E_1 E_2} = \frac{E_{1x} E_{2x} + E_{1y} E_{2y} + E_{1z} E_{2z}}{E_1 E_2}$
 وبإستخدام (9 - 11) في (10 - 10) نحصل أن:

$$\cos \phi = \frac{E_{1x} E_{2x} + E_{1y} E_{2y} + E_{1z} E_{2z}}{E_1 E_2}$$

وهذا معناه أن موجتين غير متعامتين في لحظة معينة نحصل:

$$E_{1x} E_{2x} + E_{1y} E_{2y} + E_{1z} E_{2z} = E_1 E_2 \cos \phi$$

فإن $\phi = 90^\circ$ أي أن $\cos \phi = 0$ وهذا معناه أن موجتين متعامتين، وبمعنى يعكس
 الاستنتاج أن شرط تعامد موجتين هو أن تكون:
 $E_{1x} = E_{2x}$ ، $E_{1y} = E_{2y}$ ، $E_{1z} = E_{2z}$

(10 - 11) الاستقطاب الدائري

عندما يحل متجه $\vec{E}$ ثابت في قيمة الخلقه $(\vec{E})$ وفي تغير اتجاهه بصورة
 منتظمة على محيط دائرة، يحصل ما يعرف بالاستقطاب الدائري. نلاحظ
 أن الحالتين المتعامتين (الحالتين - F) متجهان خطيين متوازيين
 فيمكن حينئذ نسبياً (الوحدة بالنسبة للأخري) قدره:

$$0 = \frac{\phi}{2\pi} = 2m\pi \quad (m=0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

أي أن:

$$\phi = -\pi, -2\pi, -3\pi, -4\pi, -5\pi, -6\pi, \dots$$

عندئذ، إذا كانت سعتيهما القياسيتين متساويتين، بحيث أن $E_{1x} = E_{2x} = E_0$
 فإن الاضطرابين يعبر عنهما كالتالي:

$$\vec{E}_x(z,t) = i E_0 \cos(kz - \omega t)$$

$$\vec{E}_y(z,t) = j E_0 \sin(kz - \omega t) \quad (10 - 12)$$

ومحصلتهما هي:

$$\vec{E} = \vec{E}_x + \vec{E}_y = i E_0 \cos(kz - \omega t) + j E_0 \sin(kz - \omega t)$$

$$= E_0 (i \cos(kz - \omega t) + j \sin(kz - \omega t)) \quad (10 - 13)$$

إن مقدار $\vec{E}$ هو E_0 وهو مقدار ثابت، ولكن اتجاه $\vec{E}$ هو دائرة لـ z و ω ، وكما
 يظهر على الشكل 5 أ، فإن متجه المجال الكهربائي يدور باتجاه عقارب

الساعة (بالنسبة للناظر نحو المصدر). ولأن السعة هي كمية ثابتة، فإن النقطة النهائية للمتجه $\vec{E}$ (رأس المتجه) تتدفع خارج الدائرة بتردد يساوي ترددي الموجتين الأساسيتين. مثل هذا المجال يقال إنه مستقطب استقطاباً دائرياً، طبقاً للحالة R.

وبنفس الطريقة، عندما يكون الطور النسبي ϕ مساوياً لـ:

$$\phi = \pi/2 - 2m\pi \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

أي أن:

$$\phi = \pi/2, -3\pi/2, 5\pi/2, \dots$$

فإن الجيب تمام يتزحزح إلى جيب سالب، يعطى بالعلاقة

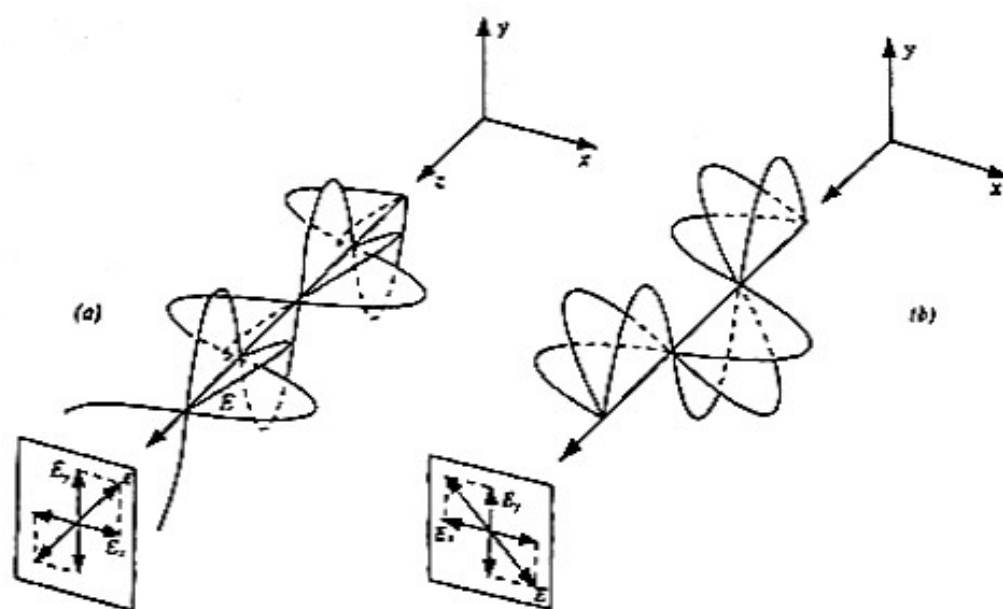
$$E_x(z,t) = \hat{i} E_0 \cos(kz - \omega t)$$

$$E_y(z,t) = -\hat{j} E_0 \sin(kz - \omega t) \quad (10 - 11)$$

ومحصلتهما هي

$$E(z,t) = E_0 (\hat{i} \cos(kz - \omega t) - \hat{j} \sin(kz - \omega t)) \quad (10 - 12)$$

ومرة أخرى يمتلك المتجه $\vec{E}$ مقداراً ثابتاً، ولكنه الآن يدور بعكس اتجاه عقارب الساعة (بالنسبة للناظر نحو المصدر)، كما هو موضح على الشكل 5. والمجال هنا هو مجال مستقطب استقطاباً دائرياً يسارياً، يوافق حالة تعرف بالحالة α .

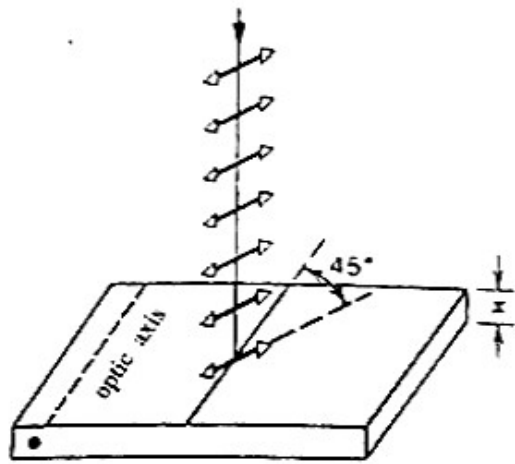


شكل 5

شكل 5: حالتا الاستقطاب الدائري R و α ذاتا الدلالة في الوصف الكمومي، حيث أنهما تتوافقان مع كمية الحركة الزاوية للفوتون.

كيف يحصل الاستقطاب الدائري للضوء؟
 للإجابة على هذا السؤال، نعتبر ضوءاً مستقطباً استقطاباً خطياً تردده
 الزاوي ω يسقط عمودياً على شريحة من الكالسيت قُطعت بكيفية بحيث أن
 محورها البصري يوازي وجهها (شكل 6). ستبزغ من البلورة الكالسيت
 موجتان مستقطبتان خطياً عند زوايا قائمة الواحدة بالنسبة للآخرى، وإذا
 كان مستوى الاهتزاز عند 45° بالنسبة للمحور الضوئي، فسيكون للموجتين
 سعتان متساويتان. وبما أن الموجتين تسيران خلال البلورة بسرعتين
 مختلفتين، فإن هناك فرقاً في الطور بينهما مقداره ϕ عندما يبزغان من
 البلورة. فإذا أُختير سمك البلورة بحيث يصبح فرق الطور $\phi = 90^\circ$ (لتردد
 معين للضوء)، فإن الشريحة تدعى بـ صفيحة - ربع الموجة، والضوء البازغ
 من الشريحة يدعى بالضوء المستقطب استقطاباً دائرياً.

شكل 6

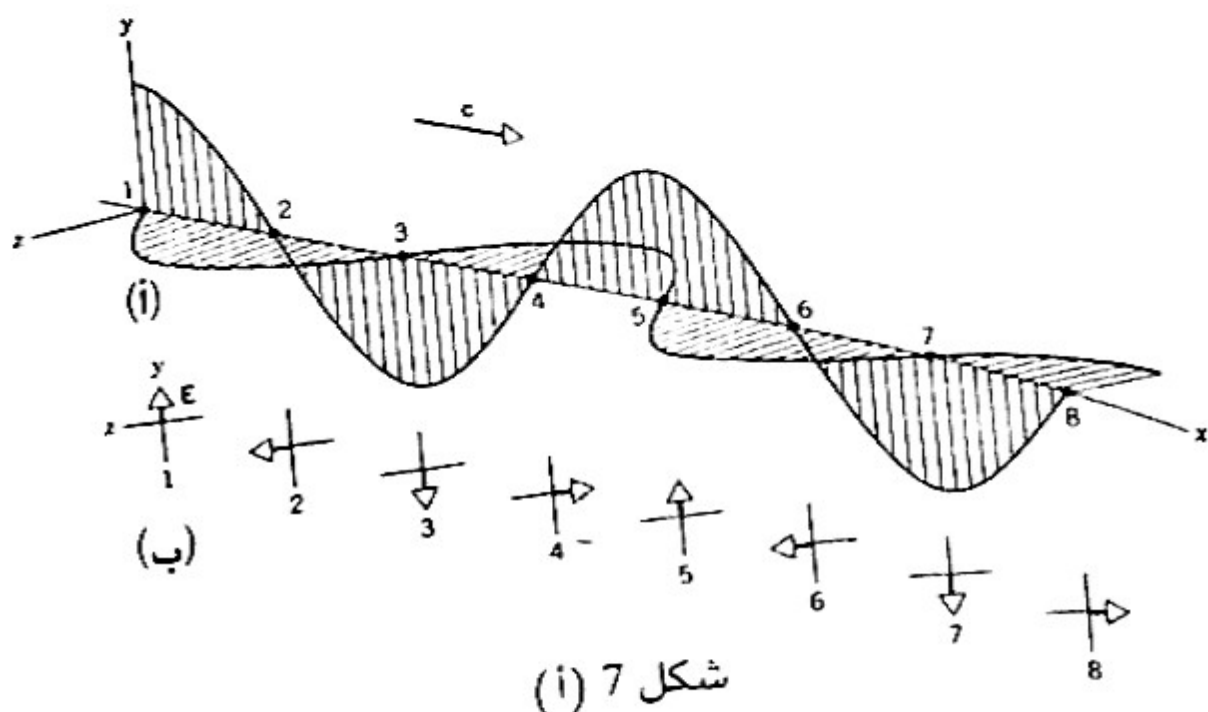


شكل 6 ضوء مستقطب خطياً يسقط على
 لوح شائبي الانكسار قُطع بحيث كان
 محوره الضوئي موازياً لسطحه، ويعمل
 مستوي استقطاب الضوء الساقط زاوية
 45° مع المحور الضوئي للوح.

جميع حالات الاستقطاب يمكن أن تبوّب (توصّف) خارج حالتها الاستقطاب
 R و α .

إن حالتها الاستقطاب المتعامدين (الحالتين P) التين اعتبرنا أن الموجة
 الضوئية هي نتاج انضمامهما لبعضهما تمثلاً في الحقيقة موجتان
 مستقطبتان خطياً تهتزان عند زوايا قائمة بفارق في الطور 90° يمكن أن
 تُمثلاً كمستقطبين على محورين متعامدين لمتجه دوار بتردد زاوي ω حول
 اتجاه الانتشار.

هذا الوصف ينطبق على الضوء البازغ في الشكل 6. هذان الوصفان للضوء المستقطب دائرياً، متكافئان تماماً، والشكل 7 يوضح العلاقة بينهما.



شكل 7 (i)

شكل 7 (i) موجتان متساويتا السعة ومستقطبتان خطياً في اتجاهين عموديين تسيران في الاتجاه x ، ويظهر المتجهان $\vec{E}$ فقط، وهما تختلفان في الطور، بحيث تصل الواحدة منهما فمتها عندما تكون الثانية صفراً. (ب) السعة المحصلة للموجة المقترنة كما تبدو لمشاهد عند عدة مواضع ظاهرة على محور x .

نفرض أن ضوءاً مستقطب دائرياً، كالضوء في الشكل 7، يسقط على لوح مستقطب، سيكون الضوء البازغ مستقطب خطياً، لنحسب شدة الضوء البازغ من اللوح: يمكن تمثيل الضوء المستقطب دائرياً كما دخل اللوح بأي من المعادلتين (9 - 10) أو (11 - 10).

$$\begin{aligned}\vec{E}_y(x,t) &= \hat{j} E_m \cos(kx - \omega t), \\ \vec{E}_z(x,t) &= \hat{k} E_m \sin(kx - \omega t)\end{aligned}$$

أو هكذا ببساطة

$$\begin{aligned}E_y &= E_m \cos \omega t, \\ \vec{E}_z &= E_m \sin \omega t\end{aligned}\quad (10 - 13)$$

حيث y و z يمثلان محوران عشوائيان متعامدان للموجة المنتشرة في الاتجاه

x. هاتان المعادلتان تمثلان التكافؤ بين الموجة المستقطبة دائرياً والموجتان المستقطبتان خطياً بسعتين متساويتين E_0 وفرق طوري قدره 90° . إن الشدة المحصلة في الموجة الساقطة المستقطبة دائرياً تتناسب مع $\vec{E} = \vec{E}_y + \vec{E}_z$ والتي تساوي E_m^2 عندما تُعطى مركبتا المجال الكهربائي بالمعادلة (10-13). لذلك، فإن:

$$I_{cp} \propto E_m^2 \quad (10-14)$$

حيث I_{cp} هي شدة الموجة المحصلة المستقطبة دائرياً. يمكن اتجاه استقطاب اللوح يعمل زاوية عشوائية θ مع محور y. كما هو مبين على الشكل 8. حينذاك ستكون السعة الأنيبة للموجة المستقطبة خطياً النافذة بواسطة اللوح هي:

$$\begin{aligned} E &= E_z \sin\theta + E_y \cos\theta \\ &= E_m \cos\omega t \sin\theta + E_m \sin\omega t \cos\theta \\ &= E_m \sin(\omega t + \theta) \end{aligned} \quad (10-15)$$

ومنه، فإن شدة الموجة النافذة بواسطة اللوح، المتناسبة مع E^2 هي:

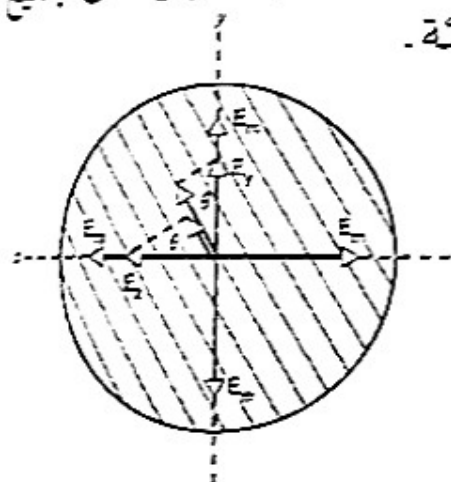
$$I \propto E_m^2 \sin^2(\omega t + \theta) \quad (10-16)$$

وبما أن العين وأجهزة القياس الأخرى تستجيب فقط إلى متوسط الشدة I_{av} التي وجدت بتعويض $\sin^2(\omega t + \theta)$ بمتوسط قيمته لدورة واحدة أو أكثر ($\frac{1}{2}$). لذلك فإن:

$$I_{av} \propto \frac{1}{2} E_m^2 \quad (10-17)$$

بمقارنة هذه النتيجة مع المعادلة (9-14)، نجد أن اللوح المستقطب المدخل في التجربة يُنقص الشدة إلى نصفها. ويلاحظ هنا أيضاً أن لا تزيير لتوجه اللوح بالنسبة لاتجاه الموجة الساقطة، لأن θ لا تظهر في المعادلة (9-17). وهذا ما يمكن توقعه إذا مُثل الضوء المستقطب دائرياً بمتجه دوار، لأن جميع التوجهات الممكنة للوح حول اتجاه الانتشار متكافئة.

شكل 8



شكل 8 ضوء مستقطب دائرياً يسقط على شريحة مستقطبة. $\vec{E}_y$ و $\vec{E}_z$ قيمتان لحظيتان للمركبتين اللتين تمتلكان قيمتين عظميين $\vec{E}_m$.

عندما يسقط ضوء غير مستقطب على لوح مُستقطب، فإن شدة الضوء النافذ تنقص أيضاً إلى نصف قيمتها، غير معتمدة على توجه اللوح، ولذا، فإن لوحاً مُستقطباً بسيطاً لا يمكن استخدامه للتمييز بين ضوء غير مستقطب وضوء مستقطب دائرياً، فمن أجل ذلك يلزمنا صفيحة ربع - الموجة، فلو سقط ضوء مستقطب دائرياً على صفيحة ربع - الموجة ذات محور بعدي عشوائي التوجه اختلفت مركبتيه الموازية للمحور البصري والعمودية عليه بفرق طوري قدره 90° ، بعد مرور المركبتين خلال الصفيحة ينشأ فرق طور إضافي قدره 90° ، يضاف أو يطرح إلى فرق الطور السابق اعتماداً على توجه محور الصفيحة، وفرق الطور المحصل قد يكون صفراً أو 180° ، وهذا معناه، إن استقطاب المركبتين بامتداد المحورين المتعامدين يبلغ قيمتيه العظميين بنفس اللحظة من الزمن، إن المجال المحصل $\vec{E}$ هو مجموع متجهي المركبتين ويعمل معهما زاوية 45° ، ومن ثم، فإن الضوء البازغ من الصفيحة الربع موجية هو ضوء مُستقطب خطياً باتجاه يعمل زاوية $45^\circ \pm$ مع المحور البصري للصفيحة، والذي يمكن التأكد منه بوضع لوح مُستقطب في مساره وتدويره لظهور انطفاء الشدة.

هذه التجربة تعاكس في الواقع ما هو موضح على الشكل 6، حيث هنا حصلنا على ضوء مستقطب دائرياً بزغ عندما سقط ضوء مستقطب خطياً على صفيحة ربع - الموجة، بينما هناك كان العكس، وهذا مثل على الطبيعة العكسية للضوء وتدعى بـ التماثل الزمني المعكوس في الطبيعة، فلو عكسنا جميع الحركات في الوضعية الفيزيائية، فإن النتيجة يجب أن تكون وضعية فيزيائية مسموح بها أيضاً، في حين أن قوى معينة ضعيفة جداً بين الجسيمات الأولية قد لا تتبع هذا التماثل، بينما جميع القوى المعروفة الأخرى، بما فيها القوى الكهرومغناطيسية، قوى الجاذبية، تتبع التماثل الزمني - العكسي على نحو صارم.

مثال 2

صفيحة كوارتز ربع - موجة استخدمت مع ضوء الصوديوم ($\lambda = 589 \text{ nm}$). ما هو أقل سمك لمثل هذه الصفيحة؟

الحل: عند اختراقه لصفيفة الكوارتز ينشطر الضوء إلى موجة عادية e وموجة فوق عادية e^- تتفان خلال الشريحة طبقاً لمعادلي انكسار رئيسيين موضحين في الجدول (n) $n_0 = 1.544$, $n_e = 1.553$. فإذا كان سمك البلورة d ، فإن عدد الأطوال الموجية للعادية المحتواة في البلورة هو:

$$N = \frac{d}{\lambda_0} = \frac{dn_0}{\lambda} \quad (10 - 18)$$

حيث λ_0 هو الطول الموجي للموجة العادية في البلورة و λ هو الطول الموجي للضوء الساقط في الهواء. وبالنسبة للموجة فوق العادية e^- ، فإن:

$$N_e = \frac{d}{\lambda_e} = \frac{dn_e}{\lambda} \quad (10 - 19)$$

حيث λ_e هو الطول الموجي للموجة فوق العادية في البلورة. والفرق بين عدد الأمواج فوق العادية N_e وعدد الأمواج العادية N_0 مرتبط بالصفة الموجية للصفيفة المستقطبة (صفيفة ربع موجة أو نصف موجة أو ...) ويجب أن يساوي.

$$N_e - N_0 = \frac{1}{4} + m \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (10 - 20)$$

إن أقل سمك للصفيفة يتطابق مع $m = 0$ ، وعليه، فإن

$$\frac{1}{4} = \frac{d}{\lambda} (n_e - n_0)$$

ومنه، فإن:

$$d = \frac{\lambda}{4} (n_e - n_0) \quad (10 - 21)$$

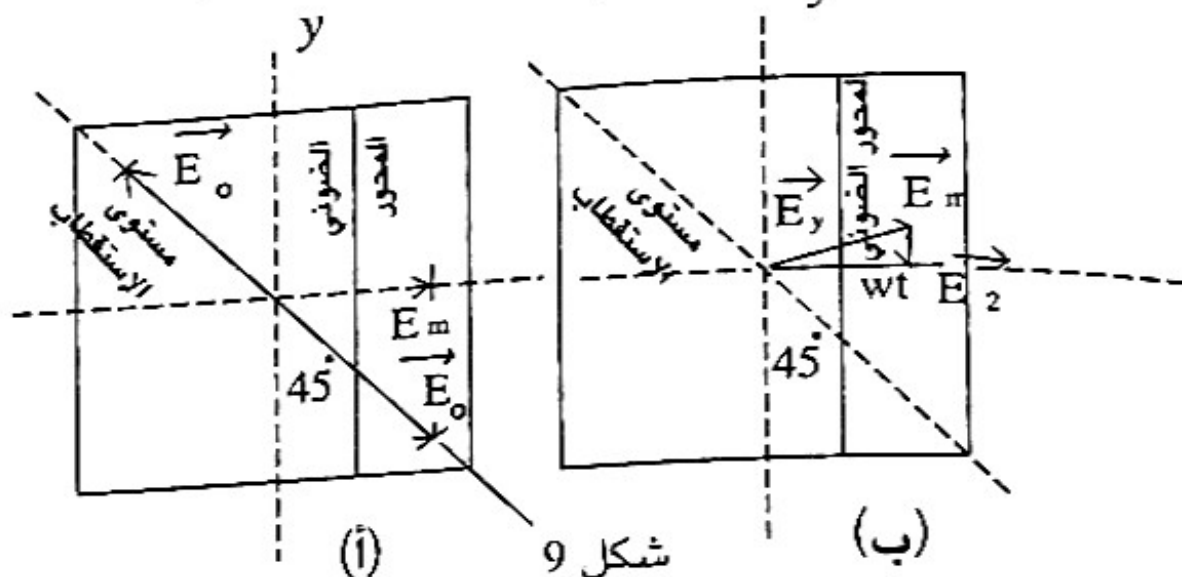
وبالتعويض عن قيم λ ، n_e و n_0 ، نجد:

$$d = \frac{589 \text{ nm}}{4} (1.553 - 1.544) = 0.016 \text{ mm}$$

وهي صفيفة رقيقة للغاية، ومعظم صفائح ربع - الموجة تصنع من المايكا. مثال 3 - موجة ضوئية مستقطبة خطياً سعتها I_0 تسقط على صفيفة ربع - الموجة الكوارتزية ذات مستوي استقطاب عند 45° مع محورها البصري المأخوذ كمحور y (شكل 9). سيكون الضوء البازغ (النافذ خلال الصفيفة) مستقطب دائرياً. بأي اتجاه يظهر المتجه الكهربائي دائرياً؟ إذا كان اتجاه الانتشار خارج مستوي الصفحة.

الحل: يمكن أن تُمثَّل المركبة الموجية التي ذبذباتها موازية للمحور البصري (الموجة - e) عندما تبزغ من الصفيحة بالمعادلة.

$$E_y = E_0 \cos 45^\circ \sin \omega t = \frac{1}{\sqrt{2}} E_0 \sin \omega t = E_m \sin \omega t$$



شكل 9

شكل 9 مثل 3 ضوء مستقطب خطياً يسقط (من خلف الصفيحة) على لوح كوارتز - موجي؛ وهو مستقطب عند 45° مع محوري y و z. (i) عند زمن معين $t = 0$ ، كان المتجه $\vec{E}$ متجهاً في الاتجاه -z. (ب) بعد مرور فترة قصيرة من الزمن t_1 دار المتجه $\vec{E}$ إلى موضع جديد، بعكس اتجاه عقرب الساعة، كما يشاهد بواسطة مشاهد على محور x وجهه نحو المصدر الضوئي.

أما المركبة الموجية التي ذبذباتها بزوايا قائمة بالنسبة للمحور البصري (الموجة - o)، فيمكن تمثيلها بالمعادلة:

$$E_z = (E_0 \sin 45^\circ) \sin(\omega t - 90) = -\frac{1}{\sqrt{2}} E_0 \cos \omega t = -E_m \sin \omega t$$

وهاتان المركبتان يمثلان الحالتين P السالف ذكرهما في مقدمة هذه الدراسة.

زحزة الطور بمقدار 90° تمثل هنا فعل الصفيحة الربع - موجة. نلاحظ هنا أن E_z تبلغ قيمتها العظمى بربع دورة بعد أن تأخذ E_y قيمتها العظمى، لأن E_z (الموجة - o) تتنقل ببطء في بلورة العالسييت قياسها بالموجة E_y (الموجة - e).

لتحديد اتجاه دوران متجه المجال $\vec{E}$ نضع رأس المتجه الكهربائي الدائر عند لحظتين من الزمن $t = 0$ (شكل 9 أ) وبعد ذلك بزمان قصير t_1 (شكل 9 ب) يتم اختياره بحيث أن wt_1 تكون زاوية صغيرة.

عند $t = 0$ يكون احداثيا رأس المتجه الدائر (شكل 9 أ)

$$E_y = 0, E_z = -E_m$$

عند $t = t_1$ يصبح هذان الاحداثيان، تقريباً،

$$E_y = E_m \sin wt_1,$$

$$E_z = -E_m \cos wt_1 \approx -E_m.$$

والشكل 9 ب يبين أن المتجه المحتل للضوء البازغ المستقطب دائرياً دائراً بعكس عقارب الساعة، ووفقاً للتعريف، فإن مثل هذا الضوء يدعى ضوء مستقطب استقطاباً دائرياً - يسارياً.

مثال 4: حدد حالة استقطاب الموجة التالية:

$$\vec{E}(z,t) = E_0 [\hat{i} \sin(kz - \omega t) - \hat{j} \cos(kz - \omega t)]$$

لتحديد حالة الاستقطاب يلزم بدءاً تحديد الشكل الهندسي للاستقطاب، فيما إذا كانت سعة المتجه $\vec{E}$ ثابتة. وهنا يكون الاستقطاب دائرياً، أو متغيراً، فهو إذن استقطاباً مستوياً. ومن المعادلة المعطاة نلاحظ أن مقدار المتجه $\vec{E}$ أي $(\vec{E} \cdot \vec{E})^{1/2}$ هو مرة أخرى ثابت عند E_0 ، ولذلك فإن الموجة هي موجة دائرية. ولكي نعرف ما إذا كان الاستقطاب يسارياً أم يمينياً نفحص سلوك الموجة المعطاة في بعض نقاط ثابتة في الفضاء ولتكن $z = 0$ من أجل لحظات زمنية مختلفة:

$$t = 0, T/4, T/2, 3T/4, T$$

وبعد التعويض عن قيم t هذه في المعادلة المعطاة نجد أن $\vec{E}(0,t)$ يمتلك القيم التالية:

$$-E_0\hat{j}, -E_0\hat{i}, E_0\hat{j}, E_0\hat{i}, -E_0\hat{j}$$

على التوالي.

ومنه فإن الوجه مستقطب استقطاباً دائرياً يمينياً، لأن المجال $\vec{E}$ يدور مع عقارب الساعة (مبتدئاً بقيم سالبة، ثم موجية، ومن ثم سالبة).

ذكرنا سابقاً، أن حالتى الاستقطاب الخطي والدائري هما حالتان خاصتان لحالة الاستقطاب الاهليجي، الحالة العامة والأكثر شيوعاً. في الاستقطاب الاهليجي لا يُشترط أن تكون لاهتزازات المتجهات $\vec{E}$ قيمة خاصة للعلاقة الطورية بين مركبتى المتجه $\vec{E}$ ، كما هو عليه الحال في الاهتزازات الخطية والدائرية، ولا يستوجب الأمر تساوي سعتيه. فسعة المتجه $\vec{E}$ هنا تمتاز بتغيرها مقداراً واتجهاً وباختلاف مراكزها في فترات زمنية قصيرة. كما أن نهاية المتجه $\vec{E}$ تتدفع باستمرار خارج الاهليج. ومع ذلك يظل $\vec{E}$ محصوراً في المستوي xy ، بمعنى أنه يدور بانتظام حول اتجاه الشعاع القطري للاهليج، متغيراً بمقداره واتجاهه، بحيث أن نهايته تصنع شكلاً اهليجياً (شكل 10). نكتب مرة أخرى المركبتين P ، وفي هذه المرة نكتبهما بهيئة قياسية:

$$\vec{E}_x = \vec{E}_{ox} \cos(kz - \omega t), \vec{E}_y = \vec{E}_{oy} \cos(kz - \omega t + \phi) \quad (10 - 22)$$

ولإيجاد معادلة الحركة نستثنى الزمن من هذين التعبيرين: فمن التعبير الأول، نجد:

$$\cos \theta = \vec{E}_x / E_{ox}, \theta = (kz - \omega t)$$

ومن التعبير الثاني في المعادلة (22 - 9) نجد:

$$\vec{E}_y = \vec{E}_{oy} \cos(\theta - \phi) = E_{oy} \cos \theta \cos \phi - E_{oy} \sin \theta \sin \phi$$

$$\vec{E}_y / E_{oy} = \frac{E_x}{E_{ox}} \cos \phi - \sqrt{1 - E_x^2 / E_{ox}^2} \sin \phi$$

وبإعادة ترتيب حدود المعادلة، نحصل على:

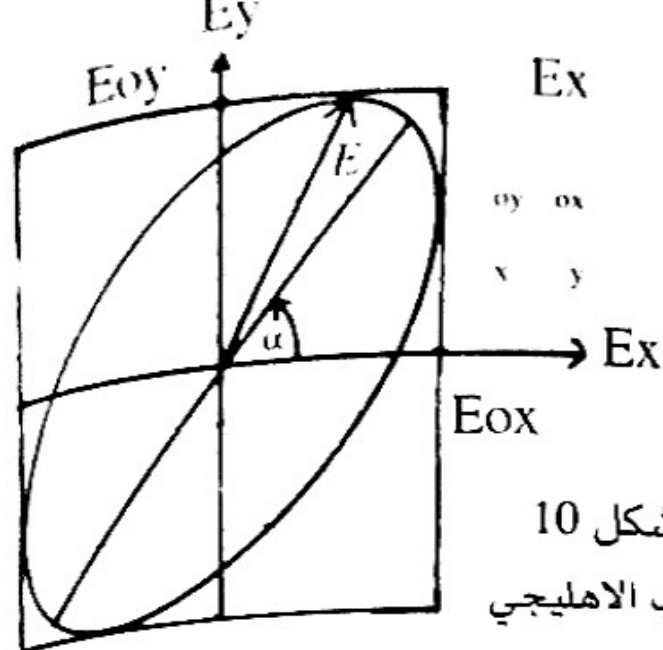
$$\frac{E_x}{E_{ox}} \cos \phi - \frac{E_y}{E_{oy}} = \sqrt{1 - E_x^2 / E_{ox}^2} \sin \phi$$

بتربيع الطرفين وترتيب الحدود ذات المعاملات المشتركة، نحصل على:

$$\left(\frac{E_x}{E_{ox}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{oy}}\right)^2 - 2 \frac{E_x E_y}{E_{ox} E_{oy}} \cos \phi = \sin^2 \phi \quad (10 - 23)$$

وهذه هي معادلة قطع ناقص توجّه محوريه بصورة حرة بالنسبة إلى x و y بزاوية ميل قدرها α بالنسبة إلى محور x ، تعطى بالعلاقة:

$$\tan 2\alpha = \frac{2 E_{ox} E_{oy}}{E_{ox}^2 - E_{oy}^2} \cos \phi \quad (10 - 24)$$



شكل 10
شكل 10 الاستقطاب الاهليجي

مثال 5. برهن أن الضوء الخطي هو حالة خاصة للضوء الاهليجي. نعود إلى الفقرة (10 - 2)، وتحديدًا إلى تعريف الاستقطاب الخطي. المعبر عنه بالعلاقة (10 - 1). فهذا الاستقطاب يحصل عندما تكون العلاقة الطورية بين مركبتي المجال المتعامدين تساوي:

$$\phi = 2m\pi \quad \text{or} \quad \phi = (2m + 1)\pi, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

ففي الحالة الأولى، عندما $\phi = 2m\pi$ يكون $\cos\theta = -1$ و $\sin\theta = 0$. ومنه فإن معادلة الاهتزازات أو الضوء الاهليجي (10 - 23) تؤول إلى:

$$\left(\frac{E_y}{E_{oy}}\right)^2 + \left(\frac{E_x}{E_{ox}}\right)^2 + 2 \frac{E_x E_y}{E_{ox} E_{oy}} = 0$$

وهذا هو مربع كامل يُعطى كالتالي:

$$\left(\frac{E_x}{E_{ox}} + \frac{E_y}{E_{oy}}\right)\left(\frac{E_x}{E_{ox}} + \frac{E_y}{E_{oy}}\right) = 0 \quad \text{or} \quad E_y = -\frac{E_{oy}}{E_{ox}} E_x$$

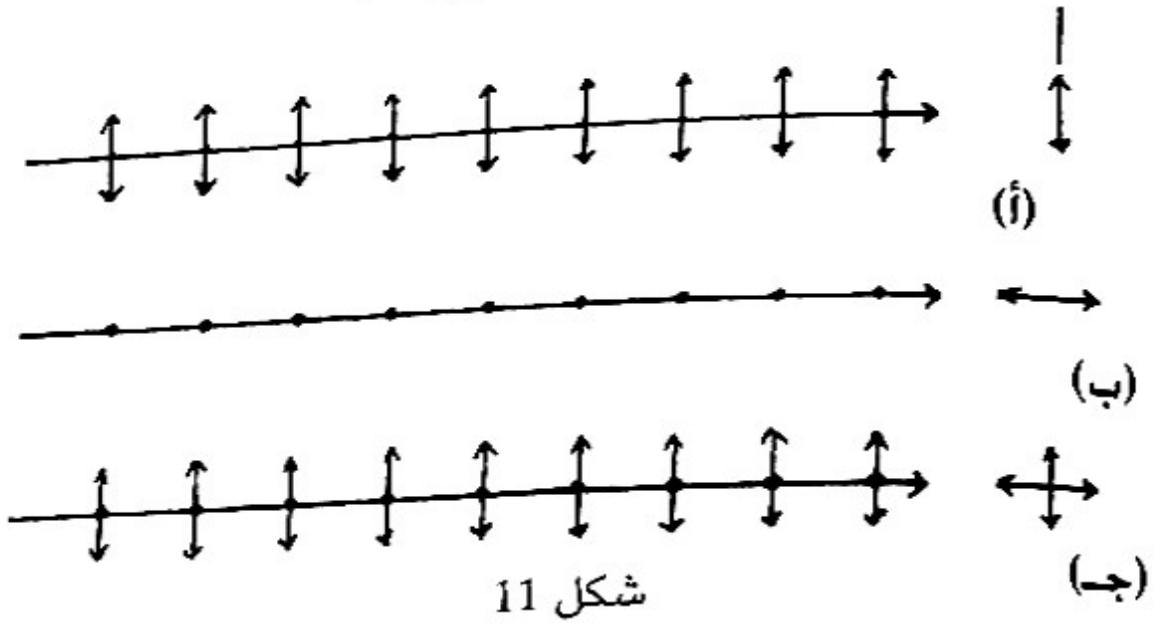
وهذه هي معادلة خط مستقيم، حيث الاحداثيين هما E_x و E_y ، يمر خلال النقطة $E_x = 0$ ، $E_y = 0$ وميله هو $-E_{oy}/E_{ox}$ ، وبصورة مماثلة. عندما تكون $\phi = 0$ أو عدد زوجي من مضاعفات π ، فإن $\cos\phi = 1$ و $\sin\phi = 0$ ومن ثم نحصل على:

$$\left(\frac{E_y}{E_{oy}}\right)^2 + \left(\frac{E_x}{E_{ox}}\right)^2 - 2 \frac{E_x E_y}{E_{ox} E_{oy}} = 0$$

أو

$$E_y = \frac{E_{oy}}{E_{ox}} E_x$$

ومرة أخرى هذا خط مستقيم ميله موجب (E_{oy} / E_{ox}). في الختام يمكن القول دائماً، إنه يمكننا تصور الضوء، كما لو كان لدينا ذبذبات متعامدتان متساويتا السعة لكنهما غير متفقتين في الطور، كل منهما بمثابة محصلة عدد غير محدود من الذبذبات المنفردة ذات الاطوار العشوائية، التي، وبسبب هذه العشوائية، لا تتصف بالترباط التام، ويوضح الشكل 11 طريقة مألوفة لتصوير هذه الاهتزازات.



شكل 11

شكل 11 تمثيل أمامي وجانبي لحزمتين ضوئيتين أحدهما مستقطبة (أ) و(ب) والأخرى غير مستقطبة (ج).

فالجزئان (أ) و(ب) يمثلان المركبتين المستقطبتين استقطاباً مستوياً، ويمثل الجزء (ج) المركبتين معاً في حزمة غير مستقطبة. تمثل النقاط الاهتزازات الخطية كما ترى من طرفها، وتمثل الاسهم الثنائية الرأس الاهتزازات الواقعة في مستوي الصفحة.

(5 - 10) درجة الاستقطاب

ذكرنا في فقرة سابقة أن مؤشر أو مقياس عدم الاستقطاب الكلي للضوء أو جزئته يدعى بدرجة الاستقطاب. وذكرنا أيضاً أن سبب هذه الجزئية في الاستقطاب يعود إلى التغير السريع في العلاقة الطورية ϕ بين مركبتي المجال الكهربائي $\vec{E}$ ، الممثل للموجة الضوئية (المركبتين المتعامدتين E_x و E_y).

ولأن هذا التغير يتم خلال زمن أقل بكثير من زمن قياس حالة استقطاب الضوء، فإن درجة الاستقطاب تكون كمية متغيرة القيمة، تُعبر عن غلبة اهتزازات المتجه $\vec{I}$ في أحد الاتجاهات على غيرها في اتجاهات أخرى، وفقاً للتعبير التالي:

$$P = \frac{I_p}{I_p + I_u} \quad (10 - 25)$$

حيث $I_p = I_{\max} - I_{\min}$ هي شدة الضوء المستقطب أما I_u فهي شدة الضوء الطبيعي، الذي يمكن تحليله دائماً إلى مركبتين متعامدتين باتجاهين كيين: واحدة بموازاة الضوء الخطي والأخرى عمودية عليه، وهما متساويتان وكل منهما تساوي $I_u/2$ ، أي أن $I_{\max} = I_{\min} = I_u/2$ وعليه، فإن درجة الاستقطاب (10 - 24) يمكن التعبير عنها كالتالي:

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min} + 2I_{\min}} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (10 - 26)$$

فمن أجل الضوء المستقطب استقطاباً مستوياً تكون $I_{\min} = 0$ ، وبالتالي، فإن $P = 1$ ، ومن أجل الضوء الطبيعي تكون $I_{\max} = I_{\min}$ ، وبالتالي، فإن $P = 0$. ومن أجل الضوء المنعكس تكون $I_{\max}$ هي المركبة العمودية على مستوي السقوط والـ $I_{\min}$ هي الموازية، وبالتالي فإن P للانعكاس هي:

$$P_r = \frac{I_{\perp} - I_{\parallel}}{I_{\perp} + I_{\parallel}} \quad (10 - 27)$$

أما من أجل الضوء النافذ فتكون $I_{\max}$ هي الموازية والـ $I_{\min}$ هي العمودية، وبالتالي فإن درجة استقطاب الضوء النافذ تساوي

$$P_{\text{trans}} = \frac{I_{\parallel} - I_{\perp}}{I_{\perp} + I_{\parallel}} \quad (10 - 28)$$

مثال 6: كم تساوي درجة الاستقطاب لضوء جزئي الاستقطاب (خليط من ضوء مستقطب وضوء طبيعي) إذا كانت نسبة شدة الضوء المستقطب إلى شدة الضوء الطبيعي (أ) 0.1، (ب) 1.

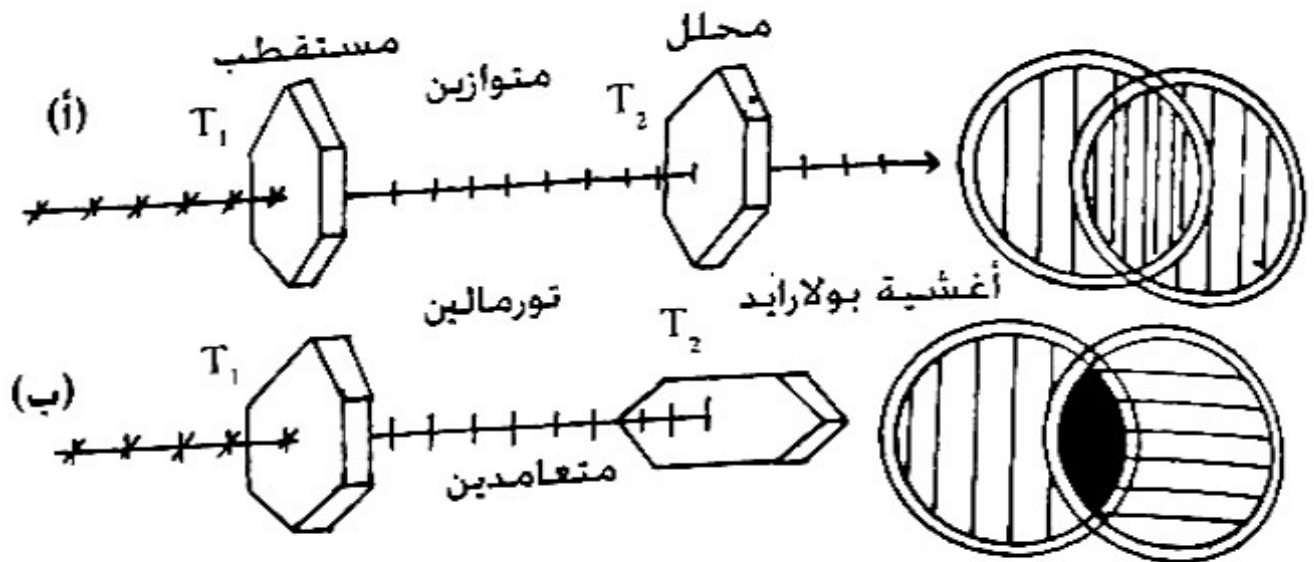
الحل: نطبق العلاقة (10 - 25)

$$P = \frac{I_p}{I_p + I_u} = \frac{I_p}{I_p + \frac{1}{10}I_p} = \frac{10}{11} = 90\% \quad (أ)$$

$$P = \frac{I_p}{I_p + I_u} = \frac{I_p}{I_p + I_p} = \frac{1}{2} = 50\% \quad (ب)$$

(10 - 6) الاستقطاب بواسطة البلورات ثنائية اللون

تمتاز هذه البلورات بخاصية الامتصاص الانتقائي لأحدى المركبتين المتعامدتين للضوء العادي. ويبيد عدد من الخامات المعدنية وبعض المركبات العضوية ظاهرة الثنائية اللونية. وبلورة التورمالين هي إحدى أحسن هذه البلورات المعدنية، فإذا سقط ضوء عادي (أبيض) بصورة عمودية على شريحة رقيقة من التورمالين T_1 (شكل 12)، فإن الضوء النافذ يكون مستقطباً. ويمكن التحقق من هذا بواسطة بلورة تورمالين ثانية T_2 .



شكل 12

شكل 12 بلورات ثنائية اللون وأغشية مستقطبة في الوضع (أ) متوازي وب) متعامد يجعل T_1 و T_2 متوازيين، فإن الضوء النافذ من البلورة T_1 ينفذ أيضاً من T_2 . الآن لو دورنا T_2 حول اتجاه الشعاع الضوئي الساقط عليها، فإن شدة الضوء النافذ تبدأ بالتناقص حلاً حتى تنعدم تماماً عندما نكون قد دورنا T_2 بزاوية 90° (انظر الفقرة 1 (10 - من هذه الدراسة)).

هذه الظاهرة تعود إلى خاصية الامتصاص الانتقائي بواسطة التورمالين لجميع الأشعة الضوئية التي تتذبذب في مستوي معين (تدعى بالاهتزازات (0) وتسمح بالنفاذ فقط لتلك الأشعة التي تتذبذب بموازاة حافاتها الطويلة (بموازاة محورها الضوئي). بعبارة أخرى، إن بلورة التورمالين تمتص نصف الطاقة الضوئية في الحزمة الساقطة عليها، ممثلة بالأمواج التي تهتز

باتجاهات عمودية على محور البلورة وتسمح بالنفاذ لتلك التي تهتز بمحورها الصوتي. ولو استمرينا بتدوير T_2 بزاوية أكبر من 90° ، فإن شدة الضوء النافذ تبدأ بالزيادة حلاً حتى تبلغ قيمتها القصوى عندما تصير الزاوية بين T_1 و T_2 تساوي $\alpha = 180^\circ$ ومن ثم تؤول إلى الصفر مرة أخرى عند $\alpha = 270^\circ$ ، ثم عظمى عند $\alpha = 360^\circ$ ، وهلم جرّاً، وبين كل مرحلة دوراً وأخرى، أي بين الزوايا 90° ، 180° ، 270° ، 360° هناك قيماً انتقالية للشدة النافذة I_2 تعتمد على α وتتناسب مباشرة مع $\cos^2 \alpha$:

$$I_2 = I_1 \cos^2 \alpha, I_1 = I_0 / 2 \quad (10 - 29)$$

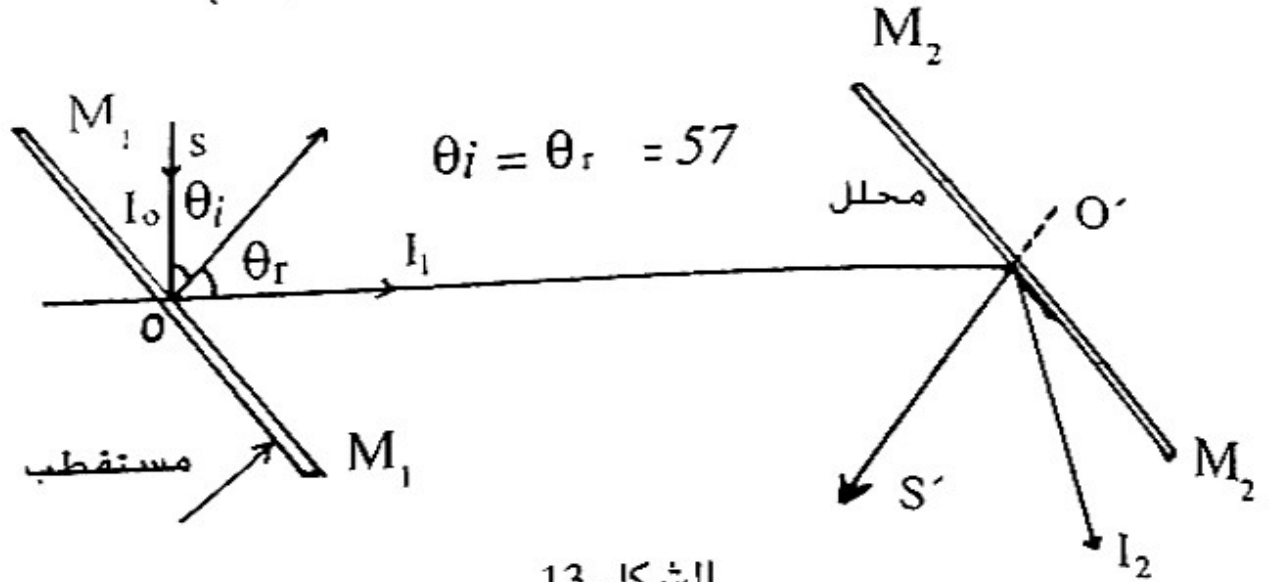
حيث α - الزاوية بين محوري البلورتين، $I_1 = I_0 / 2$ هي شدة الضوء النافذ خلال البلورة T_1 و I_2 شدة الضوء المار خلال T_2 ، و I_0 هي شدة الضوء الساقط على T_1 .

في الختام من المفيد أن نشير إلى أن كل ما يصح بالنسبة للمتجه الكهربائي $\vec{E}$ في الموجة الضوئية يصح أيضاً وبنفس القوة بالنسبة لمتجهها المغناطيسي $\vec{B}$ ، وأن الموجة الضوئية المارة خلال البلورة تمر بمتجهيها في الآن ذاته وتفسير ذلك يكمن في حقيقة أن الموجة الضوئية أساساً يمكن النظر إليها على أنها مكونة من تراكب موجتين أو حالتين متعامدتين (الحالتين P) متماثلتين في الشدة واتجاه الانتشار، هذا معناه أن المتجه الكهربائي للموجة الأولى $\vec{E}_1$ يكون منطبقاً دائماً على المتجه المغناطيسي للموجة الثانية $\vec{B}_2$ ، والعكس صحيح أيضاً، وبالتالي فإن ما يمر خلال البلورة هو موجة بمنتهى كهربائي $\vec{E}$ ومغناطيسي $\vec{B}$ ، يقع كل منهما في مستوي عمودي على مستوي الآخر، يدعى الأول بمستوي الاهتزاز ويدعى الثاني أحياناً بمستوي الاستقطاب. ولكن من أجل أن يكون تفسير ظاهرة الاستقطاب بواسطة التورمالين مفهوماً، يفضل الأخذ بمتجه واحد، هو المتجه الغالب $\vec{E}$.

(10 - 7) الاستقطاب بواسطة الانعكاس

وهي أبسط الطرق للحصول على ضوء مستقطب، إكتشفها ماليوس (MALUS) عام 1808، الذي لاحظ بالصدفة، أنه عند تدوير البلورة حول الشعاع المنعكس عن الزجاج، فإن شدة الضوء النافذ خلالها تقل وتزداد دورياً. وهذا معناه أن

الانعكاس يؤثر في الضوء بصورة مماثلة لتأثير بلورة التورمالين. فإذا سقطت حزمة ضوء عادي متوازية بزاوية معينة ($\theta_i = 57^\circ$ مثلاً) على صفيحة زجاجية مصقولة جيداً أو مرآة $M_1 M_2$ مثبتة على مفصل O كما هو موضع على الشكل 13. فإن الضوء المنعكس على وجه المرآة يكون مستقطباً استقطاباً مستوياً، ويمكن التأكد من ذلك بواسطة بلورة تورمالين T_2 بنفس الأسلوب المتبع في الفقرة السابقة. ويمكن استبدال بلورة التورمالين T_2 بمرآة ثانية M_2 ، حيث تعمل الأولى كمستقطب والثانية كمحلل (الشكل 13).



الشكل 13

الشكل 13 مرآتان $M_1 M_1$ و $M_2 M_2$ ، الأولى كمستقطب والثانية كمحلل.

ويفضل أن تُطلى المرآتان من الخارج بطلاء أسود لكي يلاحظ الانعكاس عن سطح واحد فقط. فإذا جعلت المرآتين متوازيتين، فإن الضوء ينعكس عن المرآة الثانية بنفس الزاوية التي يسقط فيها على المرآة الأولى، مثلما هو موضح على الشكل 13.

الآن لو دَوَّرنا المرآة الثانية $M_2 M_2$ حول الشعاع المُستقطب OO' الساقط عليها، فإن شدة الضوء المنعكس عنها $O'S'$ سوف تتناقص تدريجياً حتى تبلغ الصفر عند الزاوية 90° . ويحفظ دوران $M_2 M_2$ حول OO' زاوية سقوطه عليها θ_i ، وإن الذي يتغير أثناء الدوران هو الزاوية بين المرآتين α . ومع استمرار تدوير المرآة $M_2 M_2$ حول الشعاع OO' يظهر الشعاع المنعكس $O'S'$ ثانية وتزداد شدته بالتدريج حتى تصل نهايتها العظمى عند 180° ، ومن ثم

تتعدم لو استمرينا بالدوران لغاية 270° وتظهر ثانية بقيمتها العظمى عن 360° وهلم جراً. على أن بلوغ شدة الضوء المنعكس $O'S'$ قيمتها الصفرية $I_{min} = 0$ يتحقق فقط في تلك الحالة. عندما تكون زاوية سقوط الضوء الطبيعي على المرآة الأولى M_1 مساوية لـ 57° ، $\theta_i = 57^\circ$. أما إذا اختلفت زاوية السقوط هذه عن الـ 57° ، فإن الشدة الدنيا للشعاع $O'S'$ لن تبلي قيمتها الصفرية أبداً، بل تقترب منها وتدعى زاوية السقوط $\theta_i = 57^\circ$ بزاوية الاستقطاب أو الزاوية الحرجة. وهي تختلف تبعاً لنوع الزجاج المستخدم في صناعة المرآتين ومقدارها يتحدد بمعامل انكسار مادته وفقاً لعلاقة تدعى بقانون بروستر Brewster's Law:

$$\tan \theta_p = n \quad (10 - 30)$$

حيث θ_p هي زاوية الاستقطاب التام. (لاحظ الفقرة اللاحقة)

قانون بروستر Brewster's Law

أشرنا في فقرات سابقة، أنه لو سقط ضوء غير مستقطب على سطح جسم عازل، كالزجاج مثلاً، بزاوية ϕ_p ، كما في الشكل 14، فسوف يكون هناك دائماً شعاع منعكس OR ومنكسر OT. وثمة تجربة شبيهة بتجربة الاستقطاب بواسطة الانعكاس (شكل 13) تبين أن الشعاع المنعكس OR يكون مستقطباً استقطاباً جزئياً، وأنه عند زاوية معينة فقط، حوالي 57° من أجل الزجاج العادي، يكون مستقطباً استقطاباً مستوياً أو خطياً.

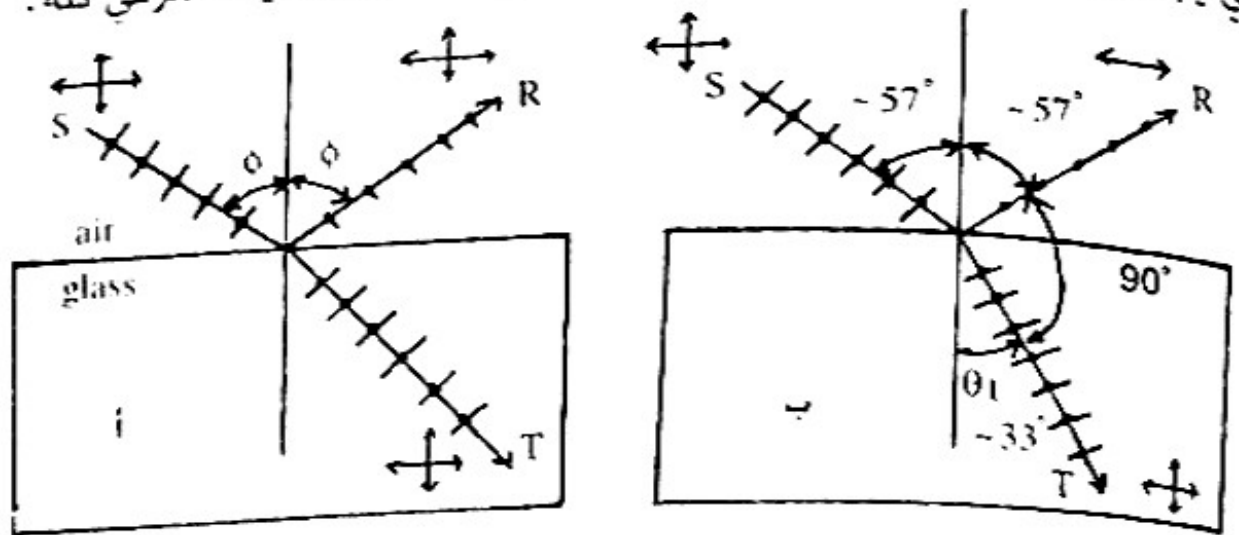
ولقد كان بروستر أول من اكتشف، أنه عند زاوية الاستقطاب ϕ_p هذه يكون الشعاعات المنعكس والمنكسر متعامدين. ساعد هذا الاكتشاف الرائع على إيجاد علاقة بين زاوية الاستقطاب ϕ_p ومعامل إنكسار مادة العازل: فلدينا من قانون سنل أن:

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$$

ونظراً لأن الزاوية $ROT = 90^\circ$ ، إذن يكون $\sin \theta_i = \cos \theta_t$ ، حيث θ_i - زاوية السقوط، و θ_t هي زاوية الانكسار، ومنه نجد أن:

$$\tan \theta_p = \frac{n_t}{n_i} = n \quad (10 - 31)$$

حيث n_i - معامل انكسار الهواء - زجاج ويساوي 1، و n_t - معامل انكسار الزجاج ويساوي n . وهذا هو قانون بروسستر، الذي يبين أن زاوية سقوط النهاية العظمى للاستقطاب تتوقف فقط على معامل الانكسار. ولهذا فهي تختلف قليلاً باختلاف الموجي للضوء الساقط، إلا أن التفريق للزجاج العادي يكون بالقدر الذي يجعل زاوية الاستقطاب θ_p تتغير قليلاً جداً خلال الطيف المرئي كله.



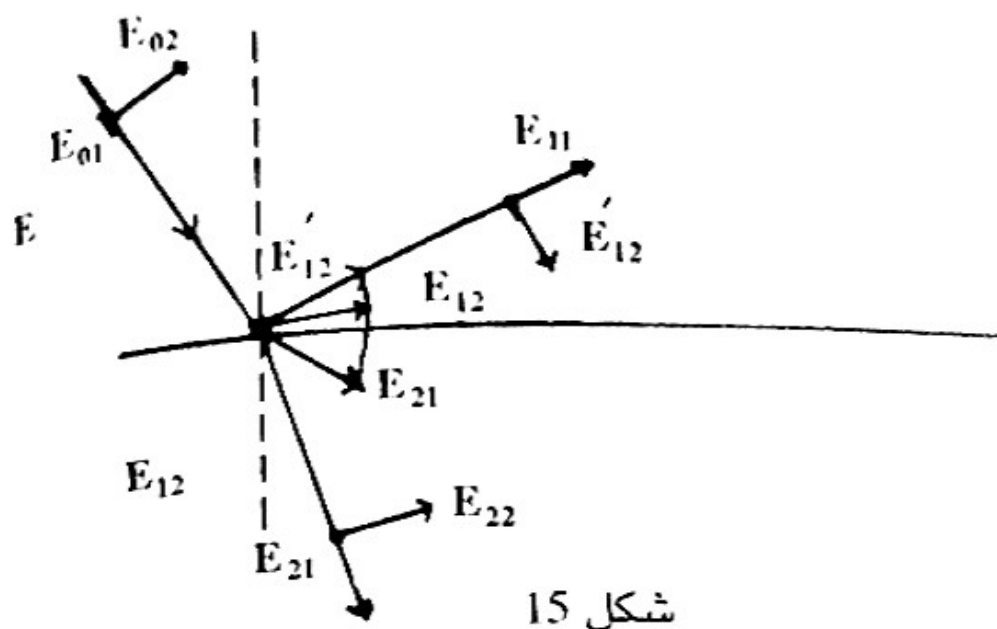
شكل 14

شكل 14 (i) الاستقطاب بالانعكاس والانكسار ب) قانون بروسستر لزاوية الاستقطاب.

تفسير قانون بروسستر

يعرف الانعكاس أو الانكسار على أنه إعادة اشعاع الضوء الساقط على الجسم العاكس أو الكاسر من جديد. وهما نتيجة مباشرة للتفاعل المتبادل الحاصل بين الضوء والمادة، فالموجة الضوئية الساقطة تحرض الكثرونات ذرات المادة على الاهتزاز وإعادة الاشعاع فتصبح بدورها مصدراً ثانوية للأمواج. التي تتداخل مع بعضها منتجة أمواجاً منعكسة أو منكسرة. وعندما ننظر للأمواج المنعكسة عند 90° بالنسبة للضوء المنكسر، فإننا لا نرى إلا الاهتزازات العمودية على مستوى السقوط فقط. أما الاهتزازات التي تقع في مستوى السقوط، فليس لها مركبة مستعرضة مع الاتجاه 90° ، وهي بالتالي، لا يمكنها الاشعاع بهذا الاتجاه. وكما أوضحنا سابقاً، أنه يمكن النظر إلى الموجة الضوئية على أنها مركبة من موجتين متعامدتين (أو حالتين متعامدتين P - States). بمعنى أننا نستطيع استبدال ذبذبة المتجه الكهربائي

في الضوء العادي المساقط بمجموع مركبتين متعامدتين (الشكل 15).



شكل 15

شكل 15 تفسير قانون بروستر

إحدهما تقع في مستوي السقوط $(\vec{E}_{02})$ ، والأخرى $(\vec{E}_{01})$ عمودية وبمقدار ما أن مركبة المتجه الكهربائي، العمودية على مستوي السقوط تكون متساوية في الأمواج الساقطة، المنعكسة والمنكسرة، لذلك فإن الذبذبات المناظرة يمكن أن تحدث باحتمالية متكافئة سواء في الشعاع المنعكس $\vec{E}_{11}$ أو المنكسر $\vec{E}_{21}$. أما فيما يخص مركبة المتجه الكهربائي المكافئة للمتجه $\vec{E}_{02}$ ، فإنها ستكون متجهة في الموجة المنكسرة بالاتجاه $\vec{E}_{22}$ وتصبح غير موازية لـ $\vec{E}_{02}$. وهذا نابع من الاختلاف بين زاويتي السقوط θ_i وزاوية الانكسار θ_r وعرضية الموجة الكهرومغناطيسية (التي هي الشعاع المنكسر). وهكذا فإن المركبة $\vec{E}_{22}$ الواقعة في مستوي السقوط، يجب أن تكون عمودية على الشعاع المنكسر، ولكي نجد المركبة الثانية للمتجه الكهربائي في الضوء المنعكس الواقعة في مستوي السقوط، نحلل $\vec{E}_{12}$ في نفس المستوي (مستوي السقوط) إلى مركبتين متوجّهتين بامتداد الشعاع المنعكس $(\vec{E}'_{12})$ وعمودية عليه $(\vec{E}_{12})$. وبقوة عرضية الموجه الضوئية يمكن أن توجد مركبة واحدة فقط للمتجه $\vec{E}_{12}$ متوجهة عمودياً على الشعاع (الذبذبة $\vec{E}'_{12}$). هذا يعني أنه في الضوء المنعكس لا تكون مركبتا المتجه الكهربائي $\vec{E}_{11}$ و $\vec{E}_{12}$ متكافئتين، بل أن الاتجاه

الغالب للاهتزاز يتطابق مع اتجاه المركبة العمودية $\vec{E}_{11}$. وبالتالي، فإن الضوء المنعكس يكون مستقطباً جزئياً، فضلاً عن أن اتجاه الذبذبة الغالبة ($\vec{E}_{11}$) يكون عمودي على مستوي السقوط، فإذا وُجِدَ الضوء الساقط تحت تلك الزاوية على الحد العازل، بحيث أن الشعاعين المنعكس والمنكسر يشكلان زاوية 90° ، أي أن الضوء المنعكس يكون قد انتشر بامتداد المتجه $\vec{E}_{12}$ العمودي على اتجاه انتشار الشعاع المنكسر، فإنه من الواضح، أن الاهتزاز في الضوء المنعكس سوف يحدث فقط باتجاه $\vec{E}_{11}$ ؛ والضوء المنعكس سيكون في هذه الحالة مستقطباً استقطاباً كلياً، والاهتزاز سوف يحدث بصورة عمودية على مستوي السقوط.

ولكن ليس دائماً يسقط الضوء بزاوية الاستقطاب، بل قد يسقط بأية زاوية كانت. وفي هذه الحالة تُحسب شدتي المركبتين، الموازية لمستوي السقوط $I_{||}$ ، والعمودية عليه $I_{\perp}$ ، تحسبان وفقاً لمعادلتَي فرنل المعبر عنهما بصيغتيهما النهائيّتين التاليتين:

$$I_{||} = \frac{I_0 \tan^2(\theta_i - \theta_t)}{2 \tan^2(\theta_i + \theta_t)}$$

$$I_{\perp} = \frac{I_0 \sin^2(\theta_i - \theta_t)}{2 \sin^2(\theta_i + \theta_t)}$$

وهنا لا يكون أي من الشعاعين، المنعكس أو المنكسر، مستقطباً استقطاباً كلياً، فعند الانعكاس يكون الضوء المنعكس مستقطباً استقطاباً جزئياً ودرجة استقطاب تحسب وفقاً للعلاقة (27 - 10):

$$P_{\text{refl}} = \frac{I_{\perp} - I_{||}}{I_{\perp} + I_{||}}$$

أما درجة استقطاب الضوء المنكسر، فتحسب بالعلاقة (28 - 10)

$$P_{\text{trans}} = \frac{I_{||} - I_{\perp}}{I_{||} + I_{\perp}}$$

ويحسب معامل الانعكاس R^2 وفقاً للصيغة التقليدية المعروفة:

$$R^2 = \frac{I_r}{I_0} \quad (10 - 34)$$

حيث I_r - شدة الضوء المنعكس، و I_0 - الساقط؛

مثال 5 ضوء طبيعي يسقط بزاوية 30° على شريحة من الزجاج معامل انكسارها 1.5، أوجد درجة استقطاب الضوء المنعكس والمنكسر على التوالي.

الحل: في هذه الحالة، عندما لا تكون زاوية سقوط الضوء مساوية لزاوية الاستقطاب، فإن كل من الضوء المنعكس والمنكسر يكونان مستقطبين استقطاباً جزئياً خطياً: ودرجتي استقطابهما P_{refl} و P_{trans} تحسبان بالعلاقتين (10 - 27) و (10 - 28): ولهذا يجب بدءاً معرفة $I_{\perp}$ و $I_{\parallel}$ وذلك بمساعدة العلاقتين (10 - 32) و (10 - 33):

$$I_{\perp} = \frac{I_0}{2} \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_t)}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)}$$

نطبق قانون سنل لإيجاد t :

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$$

$$\sin \theta_t = \frac{1 \times \sin 30}{1.5} = 0.33$$

$$\theta_t = \sin^{-1} 0.33 = 19^{\circ} 3''$$

وعليه، فإن:

$$I_{\perp} = \frac{I_0}{2} \frac{\sin^2(30 - 19^{\circ} 3')}{\sin^2(30 + 19^{\circ} 3')} \cong 0.028 I_0$$

أما الشدة الواقعة في مستوي السقوط $I_{\parallel}$ فتساوي

$$I_{\parallel} = \frac{I_0}{2} \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_t)}{\tan^2(\theta_i + \theta_t)} \cong 0.013 I_0$$

ومنه فإن درجة استقطاب الضوء المنعكس:

$$I_{\text{refl}} = \frac{I_{\perp} - I_{\parallel}}{I_{\perp} + I_{\parallel}} = \frac{(0.028 - 0.013)I_0}{(0.028 + 0.013)I_0} \cong 37\%$$

الآن لكي نحسب درجة استقطاب الضوء النافذ، علينا معرفة طاقة المركبة الموازية التي نفذت، أي ما تبقى منها بعد الانعكاس والشئ نفسه بالنسبة لطاقة المركبة العمودية، وعليه، فإن:

$$\begin{aligned} (النافذة) \quad I_{\parallel(\text{trans})} &= 0.5 I_0 - I_{\parallel(\text{ref})} \\ &= 0.5 I_0 - 0.013 I_0 \cong 0.49 I_0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (النافذة) \quad I_{\perp(\text{trans})} &= 0.5 I_0 - I_{\perp(\text{ref})} \\ &= 0.5 I_0 - 0.028 I_0 \cong 0.47 I_0 \end{aligned}$$

والآن نطبق العلاقة (10 - 28)

$$P_{(\text{trans})} = \frac{0.49 I_0 - 0.47 I_0}{0.49 I_0 + 0.47 I_0} \cong 2.7\%$$

أي أن الضوء النافذ ضعيف الاستقطاب بدرجة ملحوظة.

الاستقطاب بواسطة عدة شرائح شفافة

مثلما تبين لنا من الفقرة السابقة، أنه عند اختبار الشعاع الضوئي المنكسر في الشكل 16 وجد أنه كان مستقطباً استقطاباً جزئياً خطياً وذلك من أجل جميع زوايا السقوط على سطح الفصل بين الوسطين، إذ لا توجد زاوية سقوط يكون عندها الضوء المنكسر مستقطباً استقطاباً كلياً، ويبدو أن هذا الأمر مرتبط بوظيفة السطح العاكس، التي يمكن وصفها كالتالي: يمكن النظر إلى الضوء العادي الساقط وكأنه يتكون من حزمتين ضوئيتين متعامدتين مستقطبتين استقطاباً خطياً كلياً، تعرفان بحالتَي الاستقطاب، فإذا سقطت حزمة ضوء عادي على شريحة من الزجاج، فسوف ينعكس جزء من الأمواج التي تهتز في مستوي السقوط ($\vec{E}_{02}$) وينكسر جزءها الآخر، وهذا عند جميع زوايا السقوط باستثناء زاوية الاستقطاب فتتحل، التي ينكسر عندها هذا الضوء (أي تنفذ كل المركبة $\vec{E}_{02}$ شكل 15، أما الأمواج التي تهتز باتجاه عمودي على مستوي السقوط (الأمواج $\vec{E}_{01}$ شكل 15) فهي تنعكس بجزء منها وينكسر الآخر عند أية زاوية سقوط، بما فيها زاوية الاستقطاب، ولهذا يكون الشعاع المنكسر خليطاً من حالتَي الاستقطاب المتعامدتين ($\vec{E}_{01}$ و $\vec{E}_{02}$)، أي أنه مستقطب استقطاباً جزئياً خطياً، وقد بينت التجارب، أنه لسطح زجاجي مفرد معامل انكساره $n = 1.5$ ، ينفذ كل الضوء (100%) الذي يهتز باتجاه يوازي مستوي السقوط عند زاوية الاستقطاب، في حين ينفذ فقط 85% من الاهتزازات العمودية، وتنعكس الـ 15% المتبقية، وبالتالي فإن درجة استقطاب الضوء النافذ تكون صغيرة نسبياً وتساوي، وفقاً لـ (28 - 10):

$$P_{(trans)} = \frac{I_{||} - I_{\perp}}{I_{||} + I_{\perp}} = \frac{0.50I_0 - (0.85 \times 0.50I_0)}{0.50I_0 + (0.85 \times 0.50I_0)} = \frac{0.075}{0.925} = 8\%$$

بينما تكون درجة استقطاب الضوء المنعكس 100%، حيث وفقاً للعلاقة (27 - 10)، نجد أن:

$$P_{(ref)} = \frac{I_{\perp} - I_{||}}{I_{\perp} + I_{||}} = \frac{I_{\perp} - 0}{I_{\perp} + 0} = 1 \text{ or } 100\%$$

ولهذا يصار، من أجل الحصول على ضوء منكسر أكثر استقطاباً، إلى استخدام مجموعة من الشرائح الزجاجية المتوازية الوجهين، مرتبة الواحدة

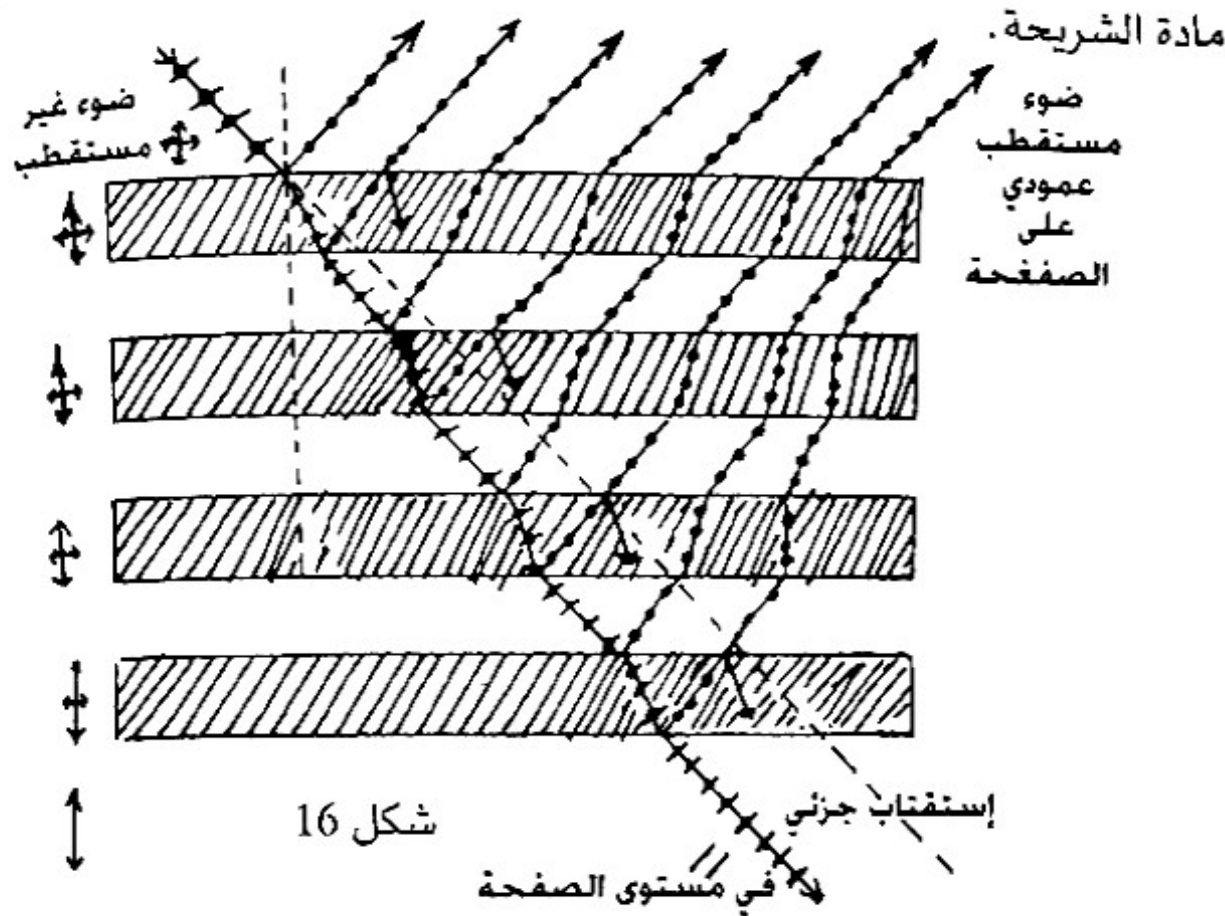
فوق الأخرى، كما توضحه الصورة المرفقة، ويسقط الضوء عليها بزاوية تساوي زاوية بروسستر.

الاستقطاب بواسطة شرائح متعددة

في هذه الحالة يسقط الضوء على كل شريحة بنفس زاوية سقوطه الابتدائية على الشريحة الأولى (شكل 16)، عند كل سطح ينعكس جزء من الاهتزازات العمودية على مستوي السقوط، في حين تنكسر كل الاهتزازات الموازية له. والنتيجة النهائية، أن الحزم المنعكسة تكون كلها مستقطبة استقطاباً خطياً كلياً في نفس مستوي السقوط، بينما تقترب الأشعة المنكسرة من ذلك كلما زاد عدد الشرائح، فاقدة عند كل شريحة جزءاً من ذبذباتها العمودية. يمكن حساب درجة استقطاب الضوء النافذ (P_{trans}) بجمع شدتي المركبتين الموازية والعمودية، وفقاً للعلاقة (28 - 10).

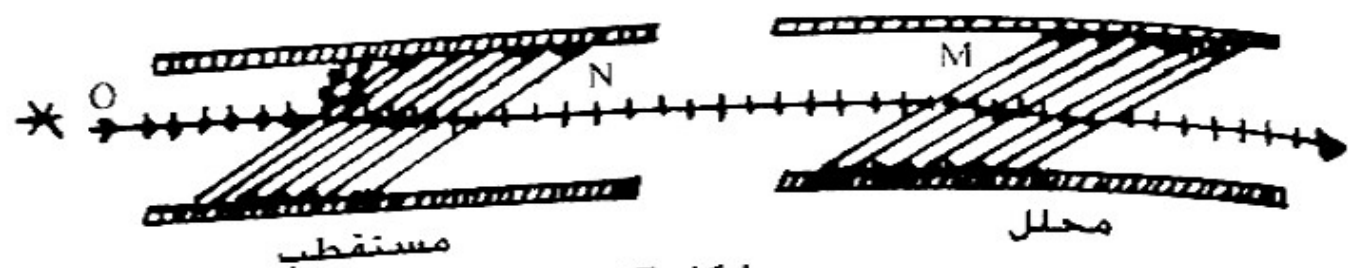
$$P_{trans} = \frac{I_{||} - I_{\perp}}{I_{||} + I_{\perp}} = \frac{m}{m + zn^2 / (1 - n^2)}$$

حيث m - عدد الشرائح، أي أن عدد الأسطح هو $2m$ ، و n - معامل انكسار



شكل 16 الاستقطاب بواسطة الشرائح الشفافة.

تبين المعادلة (35 - 10)، أنه باستخدام عدد كاف من الشرائح يمكن جعل درجة الاستقطاب تقترب من الواحد الصحيح أو $100\% N$ ، العيب المباشر لهذه الطريقة هو أن الحزمة المنكسرة المحصلة تكون ضيقة. هناك طرق أخرى أفضل للحصول على حزمة عريضة من الضوء المستقطب: يوضح الشكل 17 مجموعتين من هذه الشرائح، مستويات السقوط فيهما متوازية، تلعب المجموعة الأولى (أ) دور مستقطب والثانية (ب) دور محلل يكون الضوء النافذ خلال المستقطب مستقطباً استقطاباً مستويًا عند N . وبتدوير المجموعة (ب) أو المحلل بزاوية 90° حول المحور ON ينعدم الضوء النافذ تقريباً، لأن الاهتزازات الآن أصبحت بعد التدوير عمودية على مستوى السقوط بالنسبة للمحلل.



شكل 17

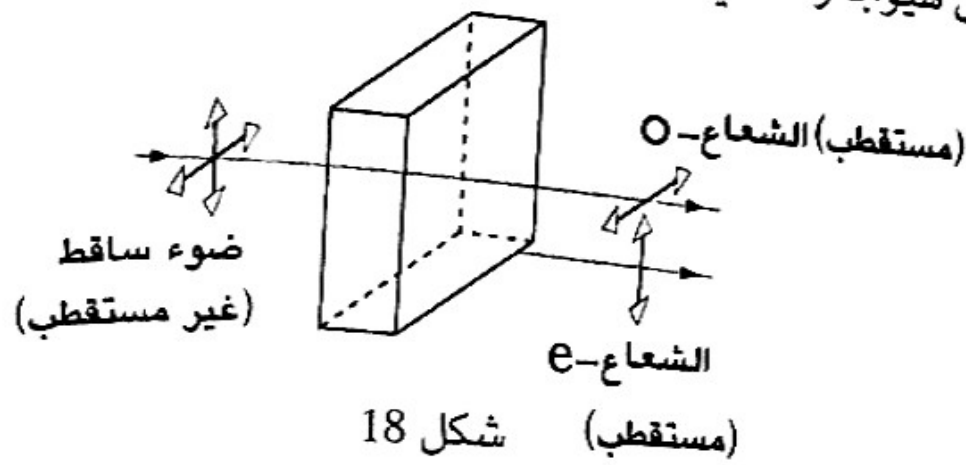
شكل 17 شرائح زجاجية مثبتة عند زاوية الاستقطاب.

وبالاستمرار في تدوير المحلل يظهر الضوء النافذ مرة أخرى عند 180° ، ومن ثم ينعدم عند 270° ويظهر بنهايته العظمى عند 360° ، وهلم جرأً، وخلال دورة كاملة ستوجد نهايتان عظمتان ونهايتان صغيرتان، مثل هذه الاداة، المتكونة من مستقطب ومحلل، الواحد بعد الآخر، تسمى مكشاف الاستقطاب.

(8 - 10) الاستقطاب بواسطة الانكسار المزدوج

في دراستنا لطبيعة الضوء وانتشاره (الفصل الثاني) تبين لنا أن سرعة الضوء، وبالتالي، معامل الانكسار، لا تعتمد على اتجاه الانتشار في الوسط ولا على حالة استقطاب الضوء. فالسوائل والاجسام الصلبة غير المتبلورة كالزجاج، والاجسام الصلبة المتبلورة ذات التماثل التكعيبي تظهر هذا السلوك ويقال بأنها متساوية الخصائص ضوئياً في جميع الجهات (أو إيزوتريك)،

على أن هناك العديد من الأجسام التي لا إيزوتروبية، ومثلها الشائع التماثل الضوئي في جميع الاتجاهات وتدعى "لا إيزوتروبية" (Ca CO₃). بلورة الكاليسيت (أو كربونات الكالسيوم) بلورة كاليسيت بزوايا يبين الشكل 18 حزمة ضوء غير مستقطب تسقط على بلورة كاليسيت بزوايا قائمة بالنسبة لأحد أوجهها. إن عزم - الازدواج (أو عزم الثني) للحزمة النافذة المبين على الشكل 10 يدعى الانكسار المزدوج. هذه الظاهرة درست من قبل هيوجنز، الذي وصفها في رسالته عن الضوء المنشورة في 1678.



شكل 18 (مستقطب)

شكل 18 الضوء غير المستقطب الساقط على مادة مزدوجة الاستقطاب (مثل بلورة الكاليسيت) يتجزأ إلى مركبتين، الشعاع O- (ويخضع لقانون سنل في الانكسار) والشعاع e- (لا يخضع لقانون سنل). وكلا الشعاعتان مستقطبان بصورة عمودية الواحد بالنسبة للآخر، كما يظهر على الشكل.

إذا حللت الحزمتان النافذتان في الشكل 18 بشريحة مستقطبية، لوجد أنهما مستقطبتان خطياً بمستويات اهتزازاتهما عند زوايا قائمة بالنسبة إلى بعضهما بعض.

بعض المواد الكاسرة ثنائياً تكون ماصة قوية لأحدى مركبتي الاستقطاب. بينما تسمح للآخرى بالمرور خلالها مع امتصاص قليل. مثل هذه المواد تدعى ثنائية اللون، والشرائح المستقطبة (10 - 6) مثل على ذلك.

إذا أنجزت التجارب عند زوايا سقوط، فإن حزمة واحدة فقط من الحزمتين في الشكل 18 (المثلة بالحزمة العادية أو الحزمة O-) هي التي تخضع لقانون سنل في الانكسار عند سطح البلورة، تماماً مثل شعاع يمر من وسط متمائل الاتجاهات ضوئياً إلى آخر. أما الحزمة الثانية (المثلة بالشعاع فوق

العادي أو الشعاع (e^-) ، فهو لا يخضع لقانون سنل. ففي الشكل 18 مثلاً. تساوي زاوية السقوط للشعاع الساقط صفر لكن زاوية انكسار الشعاع e^- تخالف توقعات قانون سنل. فهي ليست صفراً، وحتى أنها لا تقع في مستوي السقوط، كما هو الحال بالنسبة للشعاع O^- .

هذا الفرق بين الموجتين الممثلتين بالشعاعين a^- و e^- بالنسبة إلى قانون سنل يمكن تفسيره كالتالي:

1. تنتقل الموجة O^- في البلورة بنفس السرعة v_o في جميع الاتجاهات. بمعنى آخر، إن للبلورة معامل انكسار واحد n_o بالنسبة لهذه الموجة، تماماً مثل صلب متماثل ضوئياً بكل الاتجاهات.

2. تنتقل الموجة e^- في البلورة بسرعة متغيرة مع الاتجاه من v_o إلى v_e . بمعنى آخر، أن معامل الانكسار، المعروف بالعلاقة c/v ، يتغير مع الاتجاه من n_o إلى n_e ، وبالتالي فإن هناك فرقاً في المسار بين الموجتين O^- و e^- هو

$$\Delta = |n_o - n_e| d \quad (10 - 36)$$

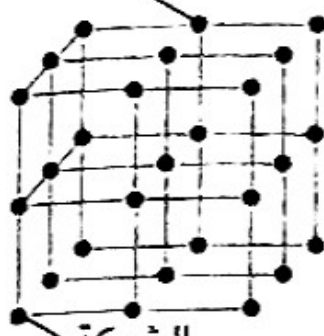
حيث d هو سمك البلورة، و n_o ، n_e يدعيان معامل الانكسار الرئيسيان للبلورة.

يعرض الجدول 2 معاملات الانكسار هذه لستة بلورات ثنائية الانكسار للثلاثة الأولى منها تنكسر الموجة e^- أبطأ من O^- ، بينما البلورات الثانية تكون الموجة O^- هي الأسرع (مقدار الانكسار يتناسب مع معامل الانكسار).
جدول 2 معاملات الانكسار الرئيسية لعدد من البلورات الثنائية الانكسار:

البلورة	الصيغة	n_o	n_e	$n_e - n_o$
الجليد	H_2O	1.309	3.313	+ 0.004
الكوارتز	SiO_2	1.544	1.553	+ 0.009
الورزيت	ZnS	2.356	2.378	+ 0.022
الكالسيت	$CaCO_3$	1.658	1.486	- 0.172
دولامبايت	$CaO.MgO.2CO_2$	1.681	1.500	- 0.181
سدرايت	FeO	1.875	1.635	- 0.240

ثمة بللورات ثنائية الانكسار (مثل المايكا والـ حجار الكريمة) أكثر تعقيداً من الناحية الضوئية من الكالسيت ويستلزم أن تكون لها ثلاثة معاملات انكسار رئيسية لوصف خصائصها الضوئية وصفاً كاملاً، أما البللورات ذوات البنية الأساسية التكعيبية كبلورة ملح الطعام (NaCl) (شكل 19) فهي متماثلة الخواص الضوئية في جميع الاتجاهات ويلزمها معامل انكسار واحد.

الشبكة التكعيبية
المتمركزة الوجه
لايونات الصوديوم

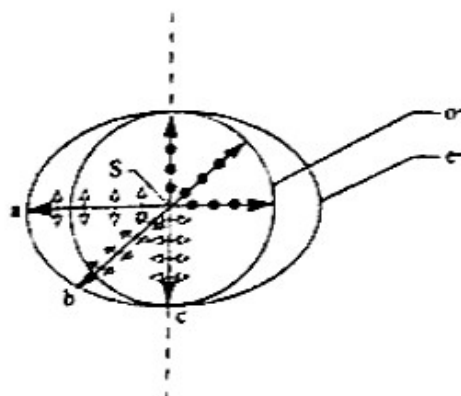


شكل 19

شكل 19 تمثيل رمزي لبلورة كلوريد الصوديوم
بمسافات مكبرة بين الايونات.

الشبكة
التكعيبية المتمركزة
الوجه لايونات الكلور

يبين الشكل 20 سلوك الموجتين o - و e - المنتشرتين في بلورة الكالسيت من حيث سرعتيهما في البلورة، حيث نشاهد سطحين موجيين منتشرين إلى الخارج من مصدر نقطي ضوئي تخيلي S مغمور في البلورة، إن الاتجاه المميز في البلورة الذي تتساوى فيه سرعتي الموجتين ($V_o = V_e$) يدعى بـ المحور الضوئي، وهو صفة مميزة للبلورة نفسها ولا يعتمد على استقطاب أو اتجاه الضوء المنتشر خلالها.



شكل 20

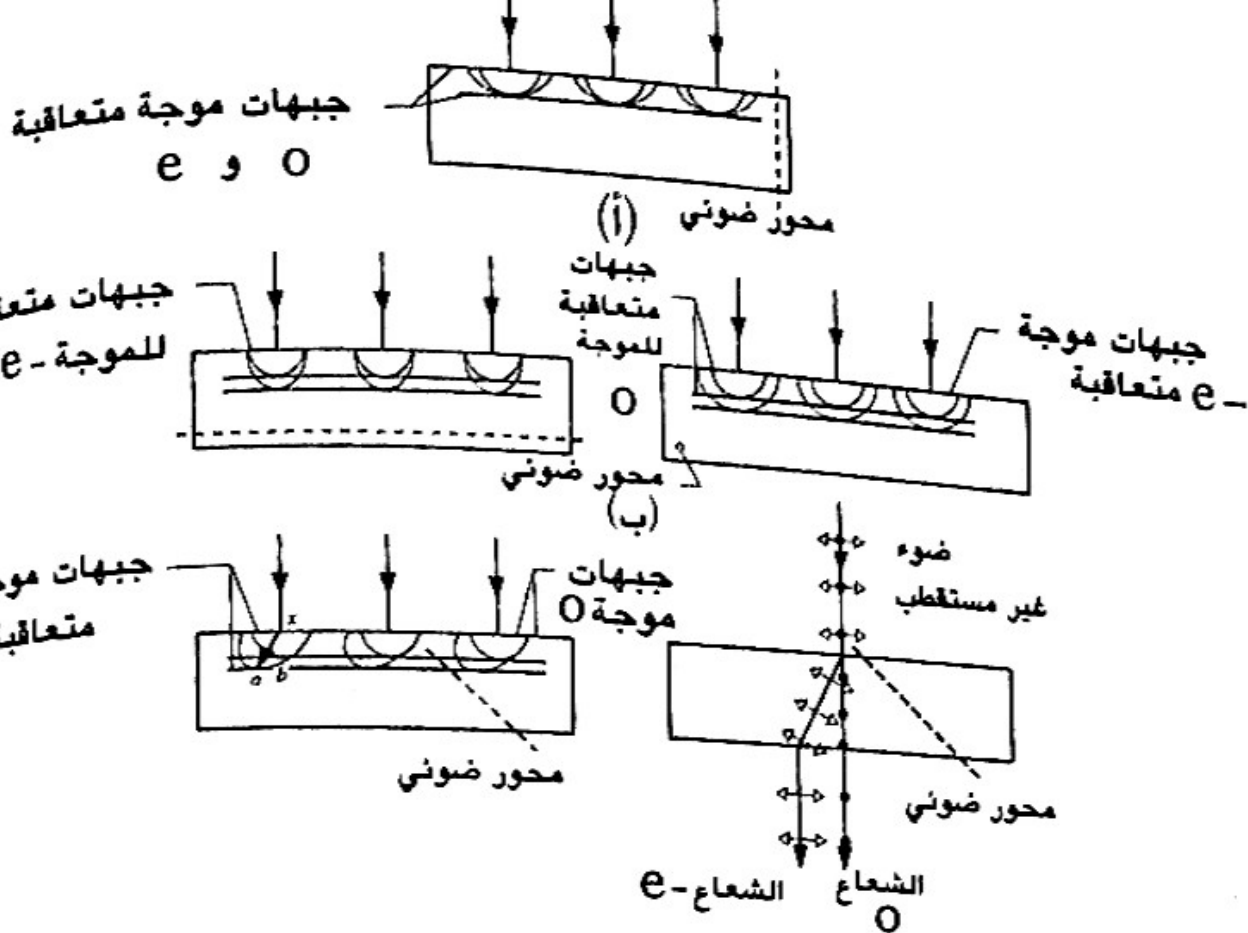
شكل 20 سطوح أمواج هايجنز ناتجة بواسطة مصدر نقطي S مغمور في الكالسيت، وتظهر حالات الاستقطاب لثلاثة أشعة O - ولثلاثة أشعة e - بواسطة النقاط والاسهم على التوالي، في الحالة العامة، لا يكون اتجاه الاستقطاب عمودياً على الشعاع.

إن سطح الموجة o- في الشكل 20 هو سطح كروي لأن الوسط متماثل بالنسبة للأمواج o-. أما سطح الموجة e-، فلا يمكن أن يكون كروياً، لأن سرعة الموجة e- تتغير مع الاتجاه نسبة إلى المحور الضوئي للبلورة، فهو سطح مجسم ناقص لدوران حول المحور الضوئي، إن سطحي الموجتين يمثلان ضوءاً له حالتي استقطاب مختلفتين. فإذا اعتبرنا بالنسبة للحالة المدروسة فقط الأشعة الواقعة في مستوي الرسم 20، فإن (1) مستوي استقطاب الأشعة o- عمودي على الرسم، كما هو مُشار إليه بالنقاط على الأسهم، و(2) يتطابق مستوي استقطاب الأشعة e- مع مستوي الرسم، كما هو مُشار إليه بالأسهم الثنائية.

لدراسة انتشار الأمواج الضوئية في البلورات الثنائية الانكسار يمكن استخدام مبدأ هايجنز. إن الحالة الأكثر عمومية قد تكون معقدة تماماً، مع الموجة e- البازغة في مستوي مختلف عن مستوي الموجة e- البازغة وعلى أية حال، يمكن توجيه البلورة بحيث تكون اتجاهات الانتشار بالنسبة للموجة الساقطة، الموجة o-، والموجة e- جميعها في نفس المستوي. هذا الافتراض هو ما سنعمل به في المناقشة التالية:

يبين الشكل 21 حالة خاصة يسقط فيها ضوء غير مستقطب بزاوية قائمة على شريحة كالكسيت قُطعت من بلورة بطريقة تجعل المحور الضوئي للشريحة عمودياً على سطحها، نعتبر الجبهة الموجية تلك التي تتطابق، عند الزمن $t = 0$ ، مع سطح البلورة، وباتباع هايجنز.

يمكن اعتبار أية نقطة على هذا السطح مركزاً مُشعاً لطاغم مزدوج من موجات هايجنز، كالتى في الشكل 20. والمستوي المماس لهذه الموجات يمثل الموقع الجديد لجبهة الموجة هذه في الزمن اللاحق t . إن الحزمة الساقطة في الشكل 21 أ تنتشر خلال البلورة بدون انحراف عند السرعة v_o ، والحزمة البازغة من الشريحة لها نفس الاستقطاب المميز كالذي للحزمة الساقطة. إن شريحة الكالكسيت، في هذه الظروف الخاصة فقط، نسلك مثل مادة متماثلة الخواص الضوئية في جميع الاتجاهات، وليس ثمة امكانية للتمييز بين الموجتين o- و e- . فكلتاها تسيران بموازية المحور الضوئي للبلورة ولذلك فهما تمتلكان نفس السرعة.



شكل 21

شكل 21 ضوء غير مستقطب يسقط عمودياً على شريحة قطعت من بللورة كالسيت، وتظهر موجات هايجنز، كما في الشكل 20. (i) لا وجود لانكسار مزدوج أو فرق سرعة. (ب) لا وجود لانكسار مزدوج، ولكن يوجد فرق سرعة. (ج) ظهور كل من الانكسار المزدوج وفرق السرعة. (د) نفسه، كما في (ج)، ولكن مع ظهور حالات استقطابية واسعة بازغة.

الشكل 15 ب يبين منظرين لحالة خاصة أخرى، تسمى ضوء غير مستقطب ساقط بزوايا قائمة على شريحة قطعت بحيث أن محورها الضوئي يوازي سطحها. في هذه الحالة أيضاً تنتشر الحزمة الساقطة في البللورة دونما انحراف. من ناحية ثانية، فإن اتجاه الانتشار عمودي على المحور الضوئي، وإن الأمواج المستقطبة عمودياً على المحور لها سرعة مختلفة عن الأمواج المستقطبة بامتداد المحور. الأولى، هي الأمواج o وسرعتها v_o ، والثانية هي الأمواج e وسرعتها v_e . وسيكون هناك فرق طوري بينهما عندما ييزغان من قاعدة الشريحة.

الشكل 21 ج يبين ضوء غير مُستقطب يسقط عمودياً على شريحة كالسيت قُطعت بحيث أن محورها الضوئي يعمل زاوية عشوائية مع سطح البلورة، فتنتج حزمتان مفصولتان فضائياً (شكل 18)، يسيران خلال البلورة بسرعتين مختلفتين، v_o للموجة - o و v_e للموجة - e. ويلاحظ هنا أن الشعاع x_a في الشكل 21 ج يمثل أقصر مسار بصري لانتقال الطاقة الضوئية من النقطة x إلى جبهة الموجة - e. أما الطاقة المنتقلة بامتداد أي شعاع آخر، خصوصاً بامتداد الشعاع x_b ، فسيكون لها انتقالاً أطول، نتيجة لحقيقة أن سرعة الأمواج - e تتغير مع الاتجاه. أما الشكل 21 د، فيمثل نفس الحالة التي في الشكل 21 ج. فهو يبين الأشعة البازغة من الشريحة، كما في الشكل 18، ويجعل من الواضح أن الحزمتين البازغتين مستقطبتين عند زوايا قائمة الواحدة بالنسبة للأخرى، وهذا يعني، أنهما مستقطبتان تصالبياً.

مناظرة ميكانيكية

نحاول الآن أن نفهم، بدلالة البنية الذرية للبلورات المتماثلة الخواص الضوئية، كيف يمكن أن تتوجد الأمواج الضوئية المستقطبية - المتصالية. ينتشر الضوء خلال البلورة بالتأثير على الإلكترونات فيها بواسطة المتجهات المهتزة للموجة. هذه الإلكترونات، التي تخضع لقوى كهروستاتيكية معيدة إذا أزيحت من مواضع اتزانها، تنوضع في اهتزاز دوري قسري طول هذه المواضع وتمر بامتداد الاضطراب الموجي المستعرض الذي يشكل الموجة الضوئية. وقد تقاس شدة القوة المعيدة بواسطة ثابت القوة k ، كما هو الحال بالنسبة للذبذبة التوافقية البسيطة ($F = -kx$).

في المواد المتماثلة الخواص الضوئية في جميع الاتجاهات يكون ثابت القوة k هو نفسه لجميع اتجاهات ازاحة الإلكترونات من مواضع اتزانها، ولكنه يتغير مع الاتجاه في البلورات الثنائية الانكسار، بالنسبة للازاحات الالكترونية الواقعة في مستوي عند زوايا قائمة على المحور البصري، حيث تكون k قيمة ثابتة هي k_o ، لا أهمية لكيفية توجه الازاحة في هذا المستوي. وبالنسبة للاحات الموازية للمحور البصري، فإن k أكبر قيمة وهي k_e (بالنسبة لبلورة الكالسيت)، وهنا يجب الانتباه بعناية أن سرعة الموجة في البلورة

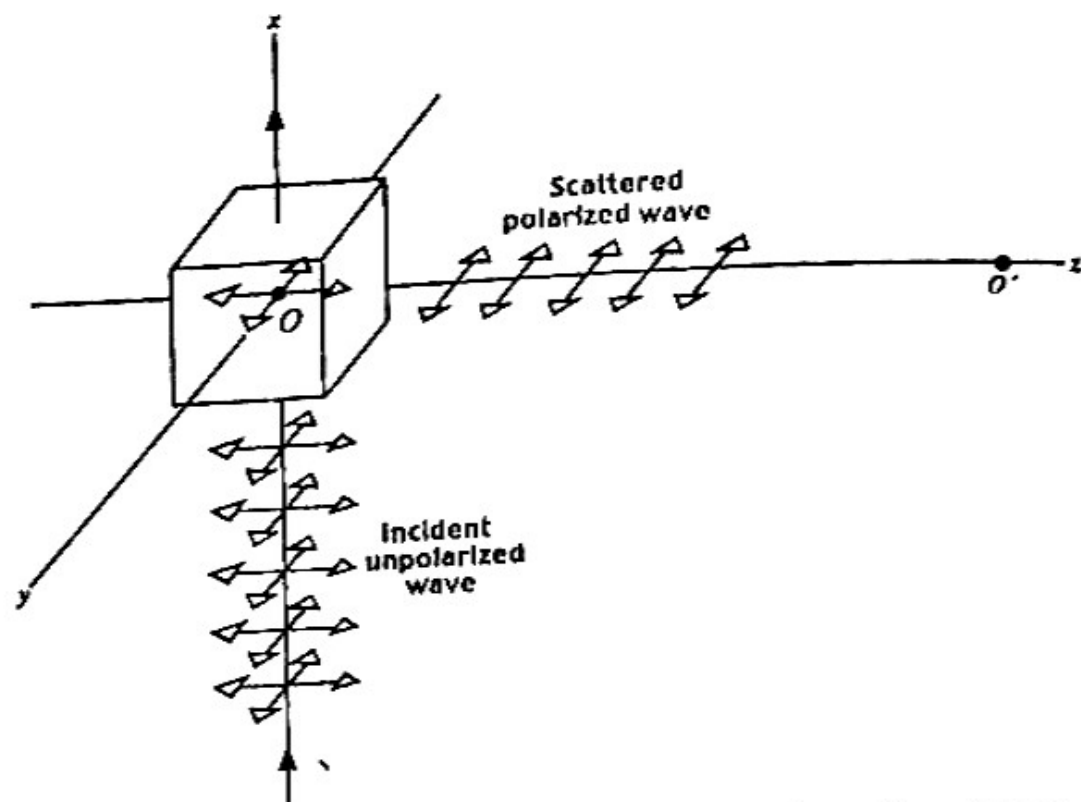
تتحدد بالاتجاه الذي تتذبذب فيه المتجهات $\vec{E}$ وليس باتجاه الانتشار، يلاحظ هنا أيضاً أن القوة المعيدة الأقوى هي ذات الثابت k المنتشرة بامتداد حبل مشدود، مثلاً، تتحدد القوة المعيدة للازاحات المستعرضة بالشد T في الحبل، وفقاً للمعادلة المعروفة $v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$ ، التي يلاحظ منها أن سرعة الموجة v تزداد بزيادة الشد مع بقاء كتلة وحدة الأطوال μ ثابتة.

(10 - 9) استطارة الضوء

الموجة الضوئية الساقطة على جسم صلب شفاف تجعل الإلكترونات الجسم تتذبذب دورياً في تناغم مع المتجه الكهربائي $\vec{E}$ للموجة الساقطة المتغير زمنياً. وعلى هذا، فإن الموجة المنتقلة خلال الوسط هي محصلة الموجة الساقطة والاشعاع الصادر من الإلكترونات المهتزة. والموجة المحصلة هذه تمتلك شدة عظمى في اتجاه الحزمة الساقطة وتهبط بسرعة على أي جانب آخر. إن فقدان الاستطارة الجانبية، الذي يصبح تاماً في البلورة الكبيرة (الكاملة)، يحدث لأن الشحنات المهتزة في الوسط تؤثر تعاونياً أو تشاكهياً. عندما يمر الضوء خلال سائل أو غاز، تصبح الاستطارة الجانبية أكبر، ففي هذه الحالة تكون الإلكترونات المهتزة مفصولة بمسافات كبيرة نسبياً ولم تعد مرتبطة سوية في بنية صلبة، وتعمل بصورة مستقلة بدلاً من العمل التعاوني. وهكذا فإن الالغاء الصارم للاضطرابات الموجية هو ليس أقل احتمالاً في الاتجاه الامامي، وهناك استطارة جانبية أكثر.

الضوء المستطار (الذي حصلت له استطارة) جانبياً من الغاز يمكن أن يكون مستقطب كلياً أو جزئياً، حتى لو كان الضوء الساقط غير مستقطب. يبين الشكل 22 حزمة ضوئية غير مستقطبة تتحرك إلى الأعلى في مستوي الصفحة وتصدم ذرة غاز عند النقطة O . تهتز الإلكترونات الموجودة عند النقطة O في تناغم مع المركبتين الكهربائيتين للموجة الساقطة (مركبتين الحاليتين P)، وتصبح حركتها مكافئة للثنائيتين المهتزتين ذوات المحورين في الاتجاهين x و z عند O . بالنسبة للأمواج الكهرومغناطيسية المستعرضة، لا يشع الثنائي المهتز بامتداد محوره. وبالتالي، فإن المشاهد عند O لا يستلم اشعاعاً من الثنائي عند O المهتز في الاتجاه z . إن الاشعاع الواصل لـ O

يصلها كلية من الثنائي عند O المهتز في الاتجاه y ويكون مستقطباً خطياً في الاتجاه y .



شكل 22

عندما يتحرك المشاهد O' خارج محور z يصبح الاشعاع أقل استقطاباً كلياً، لان الثنائي عند O المهتز بامتداد المحور z يستطيع أن يشع إلى حد ما بهذه الاتجاهات، عند نقاط بامتداد محور x يكون الاشعاع النافذ ($0 < x$) أو المستطار إلى الخلف ($0 > x$) غير مستقطب، لأن كلا الثنائيين يمكن أن يشعا بصورة متساوية جداً في الاتجاه x .

إن المثل الشائع لهذه الظاهرة هو استطارة ضوء الشمس بواسطة جزيئات الغلاف الجوي الأرضي. فلو لم يكن الغلاف الجوي موجوداً، لبدت السماء سوداء باستثناء الجزء في اتجاه الشمس، كما يشاهد بواسطة رواد الفضاء الدائرين فوق الغلاف الجوي الأرضي، يمكن باستخدام مُستقطب التأكد بسهولة فيما إذا كان الضوء الوارد من السماء الصافية مستقطب جزئياً على الأقل. هذه الحقيقة تستخدم في الاستكشاف القطبي في المحيط الشمسي. في هذه الاداة نقيم الاتجاه بملاحظة طبيعة استقطاب ضوء الشمس المستطار.

يبقى مطلوباً أن نفسر لماذا يكون الضوء المستطار من السماء أزرق في الغالب ولماذا يكون الضوء المستلم مباشرة من الشمس - خصوصاً وقت

الغروب عندما يكون طول الغلاف الجوي الذي يجب أن يعيق الضوء هو الأكبر - أحمر. إن المقطع العرضي للذرة أو الجزيئي بالنسبة للاستطارة الضوئية يعتمد على الطول الموجي، لذا فإن الضوء الأزرق يكون مستطاراً بفعالية أكبر من الضوء الأحمر، وبما أن الضوء الأزرق مستطار بقوة أكبر، فسيكون للضوء النافذ لون ضوء الشمس العادي مع زرقاة أكثر إزالة، وبالتالي أكثر احمراراً.

الخلاصة

1. يمكن بواسطة هوائي المرسل أن ننتج أمواجاً كهرومغناطيسية في منطقة الأمواج المايكروية وذلك بتوجيه محور هوائي المرسل الثنائية باتجاه معين.
2. الضوء الصادر من المصادر الطبيعية كضوء الشمس والمصابيح الكهربائية والأجسام المتوهجة هو ضوء طبيعي غير مستقطب. والمصدر الوحيد الذي يعطينا ضوءاً مستقطباً هو الليزر.
3. يمكن تصور الموجة الضوئية كتراكب أو انضمام حالتين استقطاب متعامدتين غير مترابطتين تعرفان بالحالتين P أو مركبتي المتجه الكهربائي للموجة $\vec{E}_x$ و $\vec{E}_y$ العموديتان على اتجاه الانتشار z.
4. إن الضوء لا يكون عادة مستقطباً كلياً ولا غير مستقطب، بل هو خليط من الاستقطاب والاستقطاب ونسبة ما هو مستقطب إلى شدة الخليط تعرف بدرجة الاستقطاب، يعبر عنها بالعلاقة:

$$P = \frac{I_p}{I_p + I_u}$$

حيث I_p شدة الضوء المستقطب و I_u - شدة الضوء الطبيعي.

5. يمكن أن تكون للضوء استقطابات مختلفة اعتماداً على فروقات الطور بين مركبتي المتجه الكهربائي $\vec{E}$ المتعامدتين $\vec{E}_x$ و $\vec{E}_y$ ، فمنها الاستقطاب الخطي، الدائري، والإهليجي.
6. يتحقق استقطاب الضوء الطبيعي بطرق فنية كثيرة، منها: الاستقطاب بواسطة هوائي الثنائي، بللورات الثورمالين، الشرائح الزجاجية المتعددة، والاستقطاب المزدوج.

1- مجال مغنطيسي معادلاته بالنسبة لموجة كهرومغنطيسية في الفضاء هي

$$B_x = B \sin(ky + \omega t), B_y = B_z = 0$$

(أ) ما هو اتجاه الانتشار؟ (ب) اكتب معادلات المجال الكهربائي، (ج) هل أن الموجة مستقطبة؟ إذا كان كذلك، فبأي اتجاه؟

2- برهن أن الموجتين الضوئيتين المستقطبتين خطياً، واللذان مستويا اهتزازاتهما عند زوايا قائمة بعضها إلى بعض لا يمكن أن تتداخلا.

(9-2) الاستقطاب الخطي أو المستوي

3- اكتب تعبيراً لموجة مستقطبة خطياً ترددها الزاوي ω منتشرة في الاتجاه الموجب لمحور z في مستوي اهتزاز عند زاوية 30° مع مستوي zx .

4- اكتب تعبيراً لاضطراب موجي مستقطب استقطاباً مستوياً تردده الزاوي ω ينتشر في الاتجاه الموجب لمحور z بحيث أن المجال $\vec{E}$ يعمل زاوية 120° مع محور x الموجب عند $t = 0$ و $z = 0$.

تأكد أن هذه الموجة متعامدة مع الموجة في المسألة 3.
 5- صف الموجة التالية:

$$\vec{E} = \hat{j}E_0 \sin(\frac{2\pi}{\lambda}x - \omega t) - \hat{k}E_0 \sin(\frac{2\pi}{\lambda}x - \omega t)$$

6- صف الموجة $E(y, t)$ الناتجة من انضمام الاضطرابين:

$$\vec{E}_x(y, t) = \hat{i}E_0 \cos k(y - vt), \vec{E}_z(y, t) = -\hat{k}E_0 \cos k(y - vt)$$

ثم اعمل رسماً لـ $\vec{E}(0, t)$ عند $t = 0, t = \frac{T}{4}, t = \frac{T}{2}, t = \frac{3T}{4}, t = T$

حيث T دور الذبذبة.

7- موجتان مستقطبتان خطياً لهما الصيغتان

$$\vec{E}_1(z, t) = \hat{i}E_0 \cos(\omega t - kz) + \hat{j}E_0 \cos(\omega t - kz)$$

$$\vec{E}_2(z, t) = \hat{i}E_0' \cos(\omega t - kz) + \hat{j}E_0' \cos(\omega t - kz)$$

تراكبتا في الفضاء. بين أن الموجة المحصلة هي أيضاً مستقطبة خطياً.

(9 - 3) الاستقطاب الدائري

8 - نغرض أن الحالتين المتعامدتين P يرتبطان بالطور النسبي:

$$\alpha = -\pi/2 + 2m\pi (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

$$\alpha = -\pi/2, +3\pi/2, -5\pi/2, +7\pi/2, \dots$$

أي أن

فإذا كانت سعتا الموجتين القياسيتين متساويتين ومقدارهما $E_{ox} = E_{oy} = E_0$

فإن الاضطرابين يعبر عنهما كالتالي.

$$\vec{E}_x = (z, t) \hat{i} E_0 \cos(kz - \omega t)$$

$$\vec{E}_y = (z, t) \hat{j} E_0 \sin(kz - \omega t)$$

أوجد الموجة المحصلة لقيم α المعطاة.

9 - صف الفرق بين الحالة الموجية R-

$$\vec{E} = E_0 [\hat{i} \cos(kz - \omega t) + \hat{j} \sin(kz - \omega t)]$$

والموجة التي شكلها

$$\vec{E} = E_0 [\hat{i} \sin(kz - \omega t) + \hat{j} \cos(kz - \omega t)]$$

10 - اكتب تعبيراً للموجة المستقطبة استقطاباً دائرياً يمينياً وتنتشر في

الاتجاه +z بحيث أن مجالها $\vec{E}$ يتجه في الاتجاه -x عند $z = 0$ و $t = 0$.

(لاحظ المسألة 9).

11 - أوجد أكبر عدد من الصفائح ربع - الموجة، لكي تستخدم مع ضوء طوله

الموجي 488 nm، التي يمكن أن تقطع من بللورة الدولوميت التي سمكها

0.250 mm. (لاحظ الجدول 1).

12 - ماذا يكون فعل الصفيحة نصف - الموجة (والتي سمكها ضعف سمك

الصفيحة ربع - الموجة) على أ) ضوء مستقطب خطياً (بفرض أن مستوى

الاستقطاب يصنع 45° مع المحور البصري للصفيحة)، ب) ضوء مستقطب

دائرياً، وج) ضوء غير مستقطب؟

(9 - 4) الاستقطاب الاهليجي

13 - بين إن المعادلة

$$\tan 2\pi = \frac{2E_{ox}E_{oy}\cos\epsilon}{E_{ox}^2 - E_{oy}^2}$$

تتحقق بالنسبة للضوء الخطي.

14 - تأكد أن الضوء الدائري هو حالة خاصة للضوء الاهليجي.

(0 - 5) درجة الاستقطاب

15 - حزمة ضوئية مستقطبة جزئياً يتألف من $2W/m^2$ ضوء مستقطب و $7W/m^2$ ضوء طبيعي، حدد درجة استقطاب الحزمة.

16 - تصور أن لديك كشافاً يسمح للضوء المستقطب حطياً باتجاه معين ويسجل إشعاعيته؛ وان موجة مستقطبة استقطاباً جزئياً خطياً اصطدمت بالكشاف. فإذا دار الكشاف بعد ذلك حول محور الانتشار، فإن الإشعاعية العظمى I_{max} سوف تظهر عند بعض التوجهات والإشعاعية الدنيا I_{min} عمودية عليها. اشتق تعبيراً لدرجة الاستقطاب بدلالة القيمتين I_{max} و I_{min} .

17 - عندما يرتطم ضوء طبيعي بعازل كهربائي شفاف، فإن جزءاً منه ينعكس بينما ينفذ الباقي، ولأن معامل سعة الانعكاس $r_{||}$ و $r_{\perp}$ غير متساوين على العموم، فإن الحزمة المنكسرة تكون عادة مستقطبة جزئياً. أكتب صيغة لدرجة استقطاب الحزمة الضوئية بدلالة مركبتي الإشعاعية النافذة الموازية والعمودية على مستوي السقوط، بمعنى $I_{||}$ و $I_{\perp}$. لأية قيم θ تكون درجة الاستقطاب P مساوية للصفر؟

18 - حزمة ضوء طبيعي تسقط على سطح بيني هواء - زجاج ($n_{ti} = 1.54$) عند زاوية مقدارها 57° ، بحيث أن $R_{||} = 0$ و $R_{\perp} = 0.165$. حدد درجة استقطاب الموجة النافذة.

(9 - 6) الاستقطاب بواسطة البلورات ثنائية اللون

19 - حزمة ضوئية غير مستقطبة شدتها (إشعاعيتها) I_i هيئاً له أن يمر خلال مستقطبين خطيين تامين متعاقبين.

ماذا يجب أن تكون توجهاتهما النسبية إذا كانت الحزمة النافذة أ) $I_{i/2}$ ، ب) $9I_{i/4}$ ؟

20 - ماذا يجب أن يكون التوجه النسبي لمستقطبين خطيين تامين عند فريضهما لضوء طبيعي بحيث تنقص الشدة النافذة إلى نصف قيمتها العظمى؟ (لاحظ أن الشدة العظمى النافذة تظهر عندما تكون الزاوية α بين

المستقطبين تساوي صفر).

21 - تصور مستقطبين خطيين متقاطعين مع محوري انفاذيتهما رأسي وأفقي. الآن أدخل بينهما مستقطب ثالث بحيث يصنع محور إنفاذه زاوية 45° مع الشاقول. حدد الشدة النافذة قبل وبعد ادخال المستقطب الثالث بدلالة كثافة فيض حزمة الضوء الطبيعي الساقط I_i .

22 - ثلاثة مستقطبات خطية تامة وُضعت متعامدة بالنسبة للمحور المركزي الذي بامتداده تسقط حزمة ضوء طبيعي شدته I_i . فإذا كان المستقطبان الأول والأخير متقاطعين وإذا كان المستقطب الثالث يدور بمعدل w حول المحور، فاكتب تعبيراً للشدة الاشعاعية I للحزمة النافذة كدالة لـ w .

23 - مستقطبان خطيان مثليان بمحوري نفوذ أفقيان عُرِضا لضوء طبيعي، فإذا وضع مستقطب ثالث مثل هذين المستقطبين بينهما بحيث يعمل محور إنفاذه زاوية 30° مع الافقي، فأوجد الشدة البازغة بدلالة قيمتها I' قبل ادخال المستقطب الثالث.

(9 - 7) الاستقطاب بواسطة الانعكاس

24 - حدد زاوية الاستقطاب بالنسبة لشعاع خارجي عند السطح البيني هواء - زجاج ($n_{ii} = 1.5$). صف حالة استقطاب الحزمة المنعكسة بالنسبة لضوء غير مستقطب يسقط بزاوية θ_p .

25 - بين أن زاويتي الاستقطاب (θ_p و θ'_p) بالنسبة للانعكاس الخارجي والداخلي عند السطح البيني لنفس الوسيطتين تتم بعضهما البعض. (ملاحظة: عندما تصل إلى العلاقة $\sin\theta_p \sin\theta'_p - \cos\theta_p \cos\theta'_p = 0$ فإن ذلك يكافئ $\cos(\theta_p + \theta'_p) = 0$. وهذا يعني أن $\theta_p + \theta'_p = 90^\circ$).

26 - لوح مستوي من الزجاج مغمور في الماء. بين أن حزمة ضوء طبيعي تصطدم بالسطح الأول عند زاوية الاستقطاب سوف تنفذ جزئياً إلى السطح الثاني، حيث تسقط مرة أخرى عند زاوية الاستقطاب.

27 - أ) بأية زاوية سقوط يكون الضوء المنعكس من الماء مستقطب كلياً؟

ب) هل تعتمد هذه الزاوية على الطول الموجي للضوء؟

28 - ضوء يسير في الماء ($n_w = 1.33$) ويسقط على صفيحة زجاجية ($n_g =$

- 1.53). بآية زاوية سقوط يكون الضوء المنعكس مستقطباً كلياً؟
 29 - حزمة ضوء طبيعي تسقط على سطح بيني هواء - زجاج ($n_{ti} = 1.5$) بزاوية 30° . حدد درجة استقطاب الحزمة المنعكسة.

(9 - 8) الاستقطاب بواسطة الانكسار المزدوج

30 - ضوء مستقطب خطياً طوله الموجي 525 nm يصدم، عند السقوط العمودي، بللورة ورزايت (ZnS)، قُطعت بحيث كان وجهيها موازيين لمحورها البصري، ما هو أصغر سمك ممكن للبللورة إذا كان الشعاعان النافذان o - و e - يتراكبان ليكونا ضوءاً مستقطباً استقطاباً خطياً؟ لاحظ الجدول 1.

31 - بللورة أحادية المحور قُطعت لتشكل صفيحة متوازية محورها البصري بوازي وجهها الأمامي، كما في الشكل 23، مثل هذه الاداة تعرف بـ صفيحة الاعاقة. افرض ان سمك الصفيحة d ، اكتب تعبيراً لفرق الطور النسبي، الناشئ بواسطة الصفيحة، بين الموجتين o - و e ، الحاجزة للموجتين.

32 - حزمة مسددة من ضوء الصوديوم ($\lambda_o = 589.3 \text{ nm}$) تسقط عمودياً على صفيحة كالسيت متوازية محورها البصري عمودي على الحزمة، حدد ترددا الموجتين o - و e وطوليهما الموجيين داخل الكالسيت.

33 - احسب الزاوية بين الشعاعين o - و e البازغين من منشور فولستون الكالسييتي ذو الزاوية الحافية 15° .

34 - يسقط ضوء طوله الموجي 590 nm على حاجز كوارتزي. ما هو اقل سمك للحاجز لكي يقوم بدور صفيحة ربع - الموجة، بمعنى لكي يسبب هذا الحاجز زحزحة لفرق الطور بين الموجتين o - و e بمقدار $\Delta\phi = \pi/2$. (لاحظ الجدول 2).

35 - حزمة من ضوء أحادي اللون تقريباً مستقطب خطياً في الاتجاه y يسقط على صفيحة نصف - الموجة (بمعنى $\Delta\phi = \pi$). تدور الصفيحة بحيث أن محورها الثابت يعمل زاوية 30° مع محور y . ما هي سعتا مركبتي المجال x و y بدلالة السعة E_o للحالة الساقطة E_P ؟

الفصل الحادي عشر

البصريات الكمومية

لقد أسست أعمال ماكسويل، هيرتز، وآخرين بصورة راسخة إن الضوء هو امواج كهرومغناطيسية، واطهر التداخل، الحيود، والاستقطاب الطبيعة الموجية للضوء بشكل مقنع.

ولكن هناك ظواهر عديدة، خصوصاً تلك المتعلقة بانبعثات وامتصاص الاشعاع الكهرومغناطيسي، تطرح مفهوماً مختلفاً تماماً عن الطبيعة الموجية. فطاقة الموجة الكهرومغناطيسية تنبعث وتُمتص بهيئة رُزم بقياس محدد، تدعى الفوتونات أو كمات، تتناسب طاقة الفوتون الواحد منها مع تردد الاشعاع. وفي بعض التجارب يسلك الضوء والاشعاع الآخر مثل تيار من الجسيمات. وهنا يقال ان الطاقة مكمة.

إن مفهومي الموجة والجسيم من الاختلاف بحيث يصعب فهم كيف ان الضوء (والاشعاع الآخر) يمكن أن يكون كلاهما. ففي الموجة، مثلاً، تتوزع الطاقة وكمية الحركة الزاوية (الزخم أو الاندفاع الزاوي) بشكل انسيابي على جبهة الموجة، بينما يتمركزان في رُزم (طرود) في تيار الجسيمات.

إن الطاقة المصاحبة للحركة الداخلية في الذرة مكمة أيضاً. وكل نوع من الذرات يمتلك طاقماً من القيم الطاقية الممكنة تدعى «مستويات طاقية»، ليس ثمة بينها طاقة.

هاتان الفكرتان الأساسيتان، الفوتونات والمستويات الطاقية، تأخذنا بعيداً نحو فهم مجموعة متنوعة واسعة من المشاهدات بطريقة مختلفة، من بينها التأثير الكهروضوئي، السعة الحرارية وفق النظرية الكمومية، قانون بلانك، وغيرها.

(11 - 1) الإشعاع الحراري

نستطيع معظم الأجسام أن تبعث (تصدر) أمواجاً كهرومغناطيسية عند فقدانها لأنواع مختلفة من الطاقة، وأكثر هذه الانبعثات شيوعاً هو الاشعاع الحراري. فالأجسام عند درجات الحرارة العالية بما يكفي تصبح ذاتها مُشعة، ويمكن رؤيتها متوهجة في الظلام. فاذا حدث هذا التوهج على حساب الطاقة الداخلية للجسم وترافق مع نقصانها فيه سمي اشعاعاً

حرارياً. وكل أنواع التوهجات الأخرى التي نحصل على حساب أنواع أخرى من الطاقة، غير الطاقة الداخلية، تتوحد تحت مصطلح التلألؤ، مثل تلألؤ أوكسيد الفسفور في الهواء عند فقدانه الطاقة الناتجة عن التحول الكيميائي، ويدعى بالتلألؤ الكيميائي، والتلألؤ الالكتروني الناتج عن التغذية الذاتية للتفريغ الغازي، وغيره.

يحدث الاشعاع الحراري عند أية درجة حرارية، ولكن عند درجات الحرارة المنخفضة تنبعث عملياً فقط الامواج الكهرومغناطيسية الطويلة (الاشعة تحت الحمراء).

يعتمد الاشعاع المنبعث بواسطة الجسم الساخن ليس فقط على درجة الحرارة، بل وعلى المادة المصنوع منها الجسم، على شكله، وعلى طبيعة سطحه. فمثلاً، التنجستن ذو السطح المنبسط المطلي يصدر بدرجة حرارية 2000 k إشعاعاً بمعدل 23.5 w/cm^2 ، والموليبيديوم يصدر تحت نفس الشروط إشعاعاً بمعدل 19.2 w/cm^2 .

وعند زيادة خشونة السطح يزداد هذا المعدل في كل حالة من هذه الحالات. هناك فروقات أخرى تظهر إذا قيس توزيع الاشعاع المنبعث بالاطوال الموجية، الامد الذي يزيد من صعوبة فهم الاشعاع الحراري موضوع دراستنا. سنلجأ إلى فكرة المشع المثلي، المقتبسة من فكرة الغاز المثلي، الذي هو مدخل فهم إلى الغاز الحقيقي. فالمشع الحراري هو الذي يعتمد طيف اشعاعه الحراري المنبعث منه على درجة حرارته فقط وليس على مادته، أو طبيعة سطحه، أو عوامل أخرى.

وهذا المشع الحراري يمكن أن يكون تجويفاً في جسم، حفظت جدرانه بدرجة حرارة منتظمة، واسمه الشائع «الجسم الاسود». ولفحص اشعاع التجويف يثقب جداره ثقباً صغيراً يكفي لهروب الاشعاع إلى داخل المختبر لغرض فحصه.

وللاشعاع الحراري، المسمى أيضاً بالاشعاع التجويفي، طيفاً بسيطاً جداً تتحدد طبيعته تماماً بدرجة حرارة جدران التجويف فقط ولا علاقة لمادة التجويف أو شكله أو حجمه بذلك. إن الإشعاع التجويفي (اشعاع في

صندوق) يساعد في فهم طبيعة الاشعاع الحراري، تماماً كما يساعد الغاز المثالي (مادة في صندوق) في فهم المادة في شكلها الغازي. يبين الشكل 1 مشع تجويفي صنع من انبوب ذا جدران اسطوانية من مادة التنجستن قطره حوالي 1mm، سخن إلى التوهج الحراري بتمرير تيار خلاله، وعمل ثقباً صغيراً في جداره. وكما يلاحظ من الشكل، فإن الاشعاع المنبعث من الثقب هو أكثر شدة من اشعاع الجدار الخارجي.



شكل 1

شكل 1 انبوب متوهج من التنجستن ذو فتحة صغيرة في جداره إن الإشعاع المنبعث من الفتحة هو اشعاع تجويفي.

هناك ثلاث خواص ذات علاقات تأثرية للاشعاع التجويفي:

1 - قانون ستيفان - بولتزمان

تدعى القدرة الكلية المشعة بوحدة المساحة لثقب التجويف، المجموعة لكل الأطوال الموجبة، تدعى بالشدة الاشعاعية $I(T)$ أو كثافة القدرة، وترتبط بدرجة الحرارة بالعلاقة.

$$I(T) = \sigma T^4 \quad (11 - 1)$$

حيث $\sigma = (5.670 \times 10^{-8} \text{ W/k}^4 \cdot \text{m}^2)$ ثابت عام يدعى ثابت ستيفان - بولتزمان، و T درجة الحرارة المطلقة. إن الأجسام الساخنة العادية تشع دائماً بفعالية أقل من المشعات التجويفية. وهذا يُعبر عنه بتعميم العلاقة (11 - 1).

$$I(T) = \epsilon \sigma T^4 \quad (1 - 2)$$

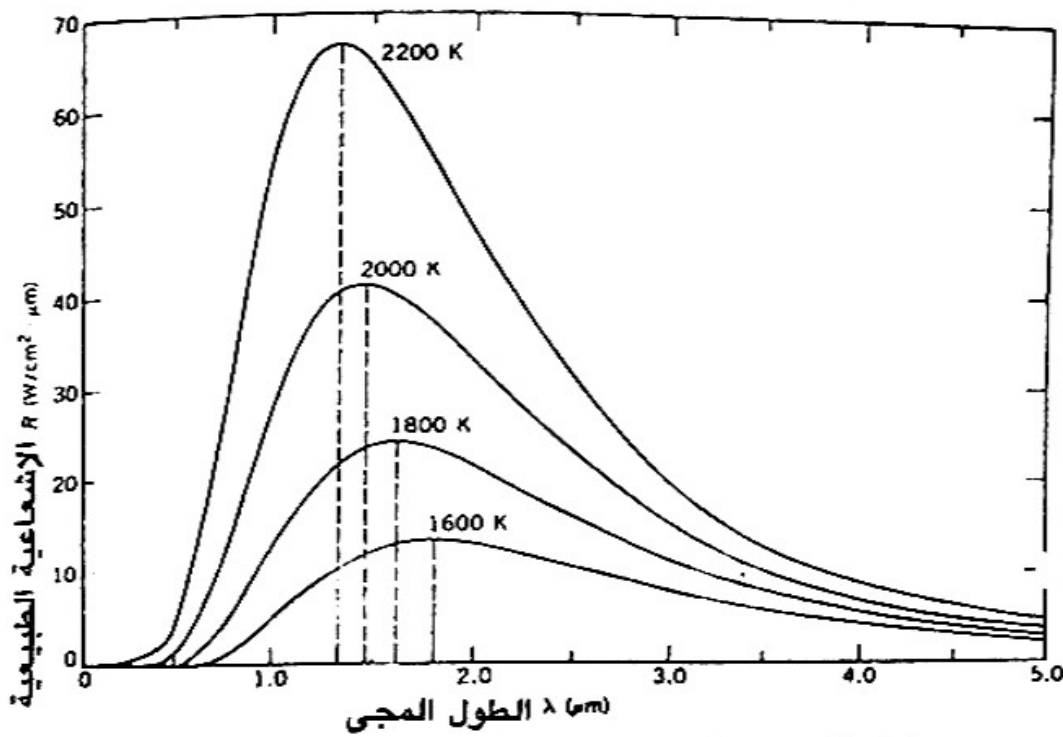
حيث ϵ كمية لا بعدية (بدون أبعاد أو وحدات) وتدعى ابتعانية سطح المادة. وهي للمشح التجويفي تساوي الوحدة ($\epsilon = 1$)، ولكنها لسطوح الأجسام العادية تكون دائماً أقل من الوحدة، وهي دالة لدرجة الحرارة دائماً تقريباً.

2- التألق الطيفي $R(\lambda)$ (أو الاشعاعية الطيفية) يبين لنا التألق الطيفي R

(λ)، كيف تتغير قدرة التجويف (الشدة الاشعاعية) مع الطول الموجي من أجل درجة الحرارة المعينة. نُعرّف التآلق الطيفي بحيث أن حاصل الضرب $R(\lambda) d\lambda$ يُعطينا القدرة المشعة بوحدة المساحة الواقعة بمدى شريط من الأطوال الموجية يمتد من λ إلى $\lambda + d\lambda$. وعلى هذا الأساس يمكن أن نجد الشدة الاشعاعية $I(T)$ ، لأي درجة حرارة، بجمع (بتكامل) التآلق الطيفي على نطاق كامل من الأطوال الموجية، أي أن:

$$I(T) = \int_0^{\infty} R(\lambda) d\lambda \quad (T \text{ ثابتة}) \quad (11 - 3)$$

والشكل 2 يبين التآلق الطيفي لاشعاع تجويفي لاربعة درجات حرارة مختارة. تبين لنا المعادلة (11 = 3) أنه يمكن تفسير الشدة الاشعاعية $I(T)$ كمساحة تحت المنحنى التقريبي للاشعاعية الطيفية. فمن هذا الشكل نشاهد أنه عندما تزداد درجة الحرارة، تزداد المساحة تحت المنحنى، وبالتالي، تزداد الشدة الاشعاعية، كما تتنبأ بذلك المعادلة (11 - 1).



شكل 2

شكل 2 منحنيات الاشعاعية الطيفية لاشعاع تجويفي عند أربع درجات حرارة مختارة. نلاحظ أنه عندما تزداد درجة الحرارة ينزاح الطول الموجي الموافق للقيمة العظمى للاشعاعية الطيفية نحو الأمواج القصيرة.

3- قانون ازاحة فين

نستطيع أن نرى من مُنحني التآلق الطيفي (شكل 2)، أن $\lambda_{\max}$ ، الطول الموجي الذي يبلغ عنده التآلق الطيفي قيمته العظمى، تنقص عندما تزداد درجة الحرارة. لقد استنتج العالم الألماني وليم فين (1864 - 1928) إن $\lambda_{\max}$ تتغير مع $\frac{1}{T}$ ، وبالتالي فإن حاصل الضرب $\lambda_{\max} T$ هو ثابت عام، قيمته المقاسة تساوي

$$\lambda_{\max} T = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (11-4)$$

علاقة الصلة هذه بين الطول الموجي $\lambda_{\max}$ (بوحدة المايكروميتر μm) للإشعاع التجويفي ودرجة حرارة التجويف المطلقة (بالكلفن k) تعرف بازاحة فين، الذي نال جائزة نوبل في الفيزياء عام 1911 تقديراً لأبحاثه في الإشعاع الحراري.

مثل 1 كم تكون النجمة ساخنة؟

إذا علمت أن سطوح النجوم لا تكون محددة تماماً كسطح الأرض، وبعض الإشعاع الذي تصدره النجمة يكون في حالة توازن حراري مع الغازات الساخنة التي تنتجها الطبقات الخارجية لسطح النجمة. حينئذ يمكن، ودونما أخطاء كبيرة، معاملة ضوء النجمة كإشعاع تجويفي. وهنا توجد أطوال موجية تبلغ عندها التآلقات الطيفية لثلاث نجوم قيمها العظمى:

الظهور	$\lambda_{\max}$	النجمة
أزرق - أبيض	240 nm	Sirius
أصفر	500 nm	Sun
أحمر	850 nm	Belelgeuse

(أ) ما هي درجات حرارة سطوح هذه النجوم؟ (ب) ما هي الشدة الإشعاعية للنجوم الثلاثة؟ (ج) إذا كان نصف قطر الشمس هو $R = 7.0 \times 10^8 \text{ m}$

والشمري اليماني $R = 4.0 \times 10^{11} \text{ m}$ (النورانية).
لهذه النجوم

الحل: من المعادلة (4 - 11) نجد، بالنسبة للشمري اليماني،

$$T = \frac{2898 \mu\text{m.K}}{\lambda_{\text{max}}} = \left(\frac{2898 \mu\text{m.K}}{240 \text{ nm}} \right) \left(\frac{1000 \text{ nm}}{1 \mu\text{m}} \right) \\ = 12000 \text{ K}$$

وبنفس الطريقة نجد أن درجة حرارة سطح الشمس هي 5800 k ومنكب الجوزاء 3400 k . عند هذه الدرجة الحرارية لسطح الشمس (5800 k) يقع معظم الاشعاع الوارد من الشمس في المنطقة المرئية للطيف. ب) بالنسبة للشمري اليماني، لدينا من قانون ستيفان - بولتزمان، معادلة (1 - 11):

$$I(T) = \sigma T^4 = (5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4) (12000 \text{ K})^4 \\ = 1.2 \times 10^9 \text{ W/m}^2$$

وبالنسبة للشمس ومنكب الجوزاء، نجد أن الشد الاشعاعية هي $6.4 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ و $7.7 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ على التوالي.

ج) تحسب نورانية الجسم، أو بصورة أدق، نورانية سطحه (14 - 6) بضرب الشدة الاشعاعية في مساحة السطح:

$$L = I(T) (4\pi R^2) \quad \text{فبالنسبة للأرض:}$$

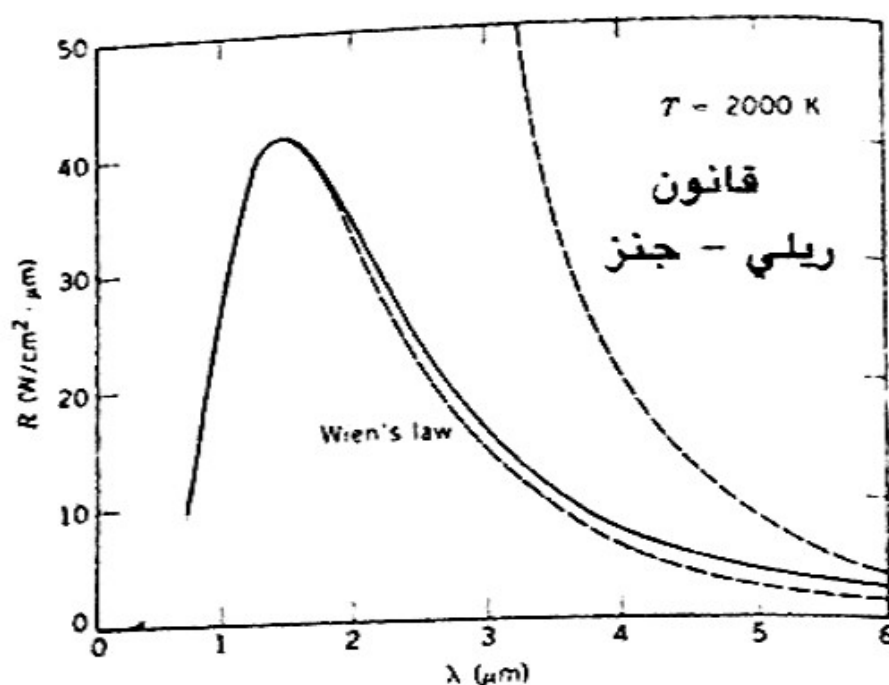
$$= (6.4 \times 10^7 \text{ W/m}^2) (4\pi) (7.0 \times 10^8 \text{ m})^2 = 3.9 \times 10^{26} \text{ watts}$$

ولمنكب الجوزاء نجد أن $L = 1.5 \times 10^{31} \text{ W}$ ، وهي أكبر من نورانية الشمس بـ 38000 مرة.

(11 - 2) قانون بالانك للاشعاع

في شهر سبتمبر من العام 1900 أقترحت صيغتان لتفسير منحنيات التألق التجريبية المبينة على الشكل 2 والتطابق معها، ولكن لم تستطع أي من الصيغتين أن تحقق ذلك. الصيغة الأولى تعود أصلاً إلى اللورد رايلي Rayleigh.

ومن ثم وبصورة مستقلة تم اشتقاقها لاحقاً من قبل أنشتاين Einstein. ثم طُورت من قبل جيمس - جينز James - Jeans على أساس خزينه المعرفي الكلاسيكي. لكن هذه الصيغة عجزت عن تفسير منحنيان التآلق (شكل 2) أو التتطابق معها، باستثناء المناطق ذات الأطوال الموجية الطويلة جداً. فالشكل 3 يبين منحنى الاشعاعية الطيفية لاشعاع تجويفي عند 2000 K على ضوء نبوءة رايلي - جينز. إن أفضل تطابق ظاهر في الرسم هو لتلك الأطوال الموجية الأكبر بكثير من $50\mu\text{m}$. بعيداً خلف مقياس الرسم. إن صيغة رايلي - جينز غير مرضية، رغم أنها قد تكون أفضل ما يمكن أن تظهر به الفيزياء الكلاسيكية.



شكل 3

شكل 3 يبين المنحنى المستمر الاشعاعية الطيفية التجريبية لاشعاع من تجويف عند درجة حرارة 2000 K . وتظهر على المنحنى تنبؤات قانون رايلي - جنز وقانون فين كلاسيكيين كخطين متقطعين. والقضيب الراسي المظلل يمثل نطاق الأطوال الموجية المرئية.

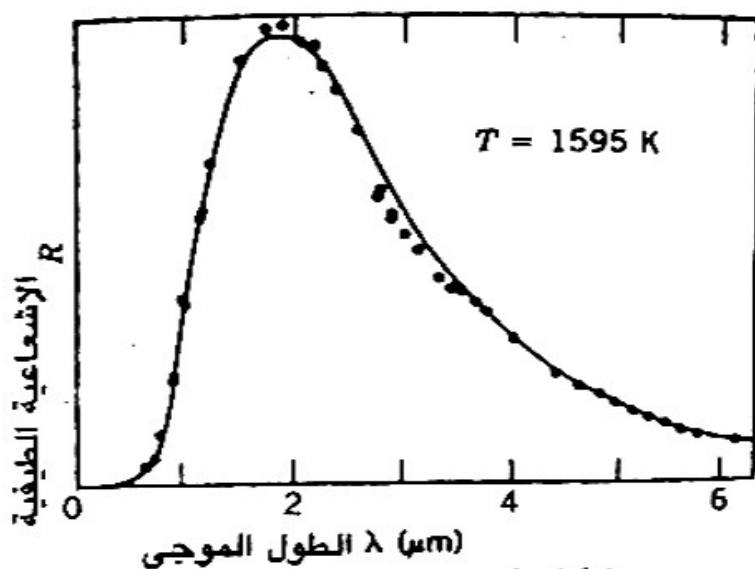
أما وليم فين، فهو أيضاً إشتق تعبيراً نظرياً للاشعاعية الطيفية وصيفته (الاحظ الشكل 3) أفضل بكثير من صيغة رايلي - جنز. وهي تتطابق تماماً مع المنحنيات عند الأطوال الموجية القصيرة، المارة خلال القمة، ولكنها تحيد

عن المنحني بصورة لافتة للنظر عند الأطوال الموجية الطويلة في نهاية مقياس الرسم. ومع ذلك، لم تؤسس صيغة فين على أساس النظرية الكلاسيكية للإشعاع ولكن بدلاً من ذلك قامت على أساس الحدس - ولهذا فهي تدعى بـ «التخمين» - على أساس التشابه بين منحنيات الإشعاعية الطيفية وسرعة توريع المنحنيات لماكسويل لجزيئات غاز مثلي.

وبهذا يكون لدينا صيغتان للتعبير عن الإشعاعية الطيفية لإشعاع التجويف، واحدة تتطابق مع التجربة عند الأمواج الطويلة (صيغة ريلي - جنز) والآخرى عند الأمواج القصيرة وبهدف التسوية بين هاتين الصيغتين أو قانوني الإشعاع هذان، عمل ماكس بلانك، على جعلهم مستوفيتان لشروط التطابق مع معطيات جميع الأطوال الموجية. أعلنت صيغة بلانك على جمعية الفيزيائيين في برلين في 19 أكتوبر 1900 وكانت بالصورة:

$$R(\lambda) = \frac{a}{\lambda^5} \frac{1}{e^{b/\lambda T_1}} \quad (11 - 5)$$

حيث a و b ثابتان حسابيان، أختيرا لكي تعطي المعادلة (11 - 5) أفضل تطابق مع معطيات التجربة. والشكل (4) يبين حسن التطابق هذا. وبرغم صحة هذه الصيغة، لكنها كانت في الأصل حسابية فقط ولم تُسَنَّ أو تُنشَأ نظرية حقيقية.



شكل 4

شكل 4 يتطابق قانون بلانك للإشعاع مع معطيات التجربة لمُشع تجويفي عند درجة حرارة 1595K.

اشتق بلانك صيغته من افتراضات بسيطة، وأعاد صياغتها تديجياً، مُدخلًا فيها تغييرات طفيفة شملت الثابتين a و b (وهما ثابتان عشوائيان) فأصبحت بالصورة:

$$R(\lambda) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda KT}} - 1} \quad (11 - 6)$$

حيث أُسْتُبدل ثابتيه a و b في العلاقة (11.5) بثابت بولتزمان k في العلاقة (11 - 6) ثم أُدخل ثابتاً جديداً هو h والذي يدعى الآن بثابت بلانك، إضافة إلى سرعة الضوء C .

وبتطبيق المعادلة (11 - 6) مع المعطيات التجريبية تمكن بلانك من إيجاد قيم للثابتين k و h هي:

$$k = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J/k}, \quad h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J.S.}$$

مثال 2: يوحى الشكل 4 بأن قانون بلانك للإشعاع (المعادلة (11 - 6)) يقترب من قانون ريلي - جينز الكلاسيكي عند الأمواج الطويلة. لأي شكل تعبيرى يؤول قانون بلانك عندما $\lambda \rightarrow \infty$ ؟

الحل: للملائمة الجبرية، نعيد كتابة المعادلة (1.6) بالصورة:

$$R(\lambda) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{e^x - 1}$$

حيث $x = \frac{hc}{\lambda KT}$ فعندما $\lambda \rightarrow \infty$ ، نجد أن $x \rightarrow 0$. وإذا ما تذكرنا أنه عندما تقترب x من الصفر، فإن:

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$$

وأن الحدود ذات القوة العالية لـ x يمكن إهمالها لصغرهما، لذا فإنه القول ان $e^x - 1 = x$ ، ومنه فإن:

$$R(\lambda) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{x} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \cdot \frac{\lambda KT}{hc} = \frac{2\pi c KT}{\lambda^4}$$

ومنه نلاحظ أن ثابت بلانك h ، المطابق الأكيد للصيغة الكمومية، هو الذي ألغى بصورة ملائمة عن المعادلة عندما اقتربنا من النهاية الكلاسيكية للأمواج الطويلة. هذه النتيجة هي في الحقيقة وعلى وجه التحديد، تعبير ريلي - جينز الكلاسيكي للإشعاعية الطيفية.

(11 - 3) تكميم الطاقة

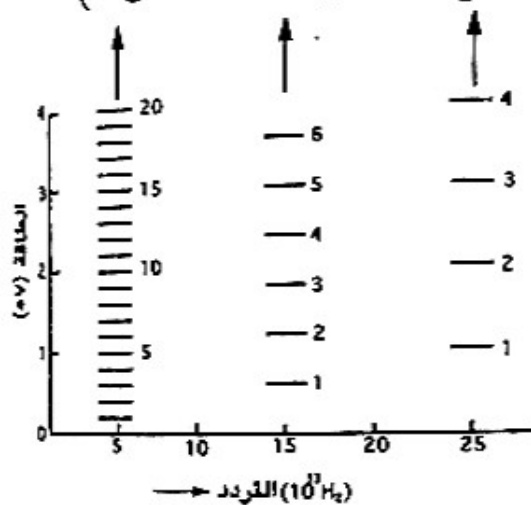
كان بلانك قد إشتق قانونه الاشعاعي (6 - 11) من خلال تحليله للتفاعل بين الاشعاع في الحجم التجويفي والذرات التي تتكون منها جدران هذا التجويف، وافترض ان هذه الذرات تسلك مثل مذبذبات بالغة الصغر، كل منها بتردد مميز (خاص به) للاهتزاز. وهي تشع الطاقة إلى داخل التجويف وتمتص منه الطاقة بجرعات (أو طرود) أحادية لا تقبل التجزئة، تتناسب طاقتها مع التردد الخاص للمذبذب $E = h\nu$ ، حيث h هو ثابت أساسي جديد للطبيعة عُرف فيما بعد بثابت بلانك.

ومن وجهة النظر الكلاسيكية، فإن طاقة هذه المذبذبات الصغيرة جداً تتغير تدريجياً وبصورة مستمرة. نُقر هذا بالتأكيد من أجل مذبذبات كبيرة، مثل النواس (البندول) أو نظام الكتلة النابض. وخلافاً لهذا تماماً كان اشتقاق قانون بلانك للاشعاع يستند على افتراض "أن المذبذبات الذرية المفترضة من قبل بلانك نفسه قد لا تبعث أو تمتص الطاقة E بمقادير عشوائية بل فقط بتلك الطاقات المختارة من طاقم متقطع يتحدد بالعلاقة:

$$E = nh\nu, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (11 - 7)$$

حيث h هو تردد المذبذب. وهنا نقول إن طاقة المذبذب الذري كمائة وإن العدد الصحيح n هو عدد كمومي. بعبارة أخرى، إن هذا التكميم لطاقة المذبذب هو بالمعنى الأصح تكميم لطاقة الاشعاع (اشعاع التجويف أو اشعاع الجسم الاسود) الذي افترضه بلانك انه يتم بواسطة المذبذبات الذرية.

تبين لنا المعادلة (11 - 7) أن مستويات طاقة المذبذب تكون متساوية التباعد الفضائي، وان الفاصلة بين المستويات المتجاورة هي $h\nu$ (لاحظ شكل 5).



شكل 5

شكل 5 مستويات الطاقة لمذبذبات ذرية عند ثلاثة ترددات منتقاة، حيث أشير إلى الاعداد الكمومية لبعض المستويات. على اليمين تشاهد الطاقة kT لمذبذب كلاسيكي عند درجة حرارة $2000K$.

إن هذا الافتراق المطلق بين نظرة الفيزياء الكلاسيكية إلى التكميم الطاقى بوصفه تغير تدريجي مستمر لطاقة مذبذب كبير كالنواس ونظرة الفيزياء الحديثة (الكمومية) إلى التكميم الطاقى بوصفه تغير تدريجي مستمر لطاقة مذبذب كبير كالنواس ونظرة الفيزياء الحديثة (الكمومية) إلى التكميم الطاقى القائمة على فكرة المذبذب الذري الذي يشع الطاقة ويمتصها بمقادير معينة منتقاة (h أو مضاعفاتها nh) لا يجوز تجزئتها، وأن هذا الإشعاع أو الامتصاص يحدث بصورة متقطعة أو قفزية، هو افتراق بين عالين، قديم وحديث، مرئي ومجهري، مستمر ومتقطع. عالين لا جسور بينهما إلا في حدود النهايات لكل منهما. إن النظرية الكلاسيكية، التي تنظر للعالم المرئي القديم) هي غاية (نهاية) النظرية الكمومية، والاشتان ترتبطان بمبدأ التطابق، الذي ينص «إن النظرية الكمومية يجب أن تتوافق مع النظرية الكلاسيكية في النهايات التي تصبح فيها النظرية الكلاسيكية متفقة مع التجربة». أو «إن النظرية الكمومية يجب أن تتوافق مع النظرية الكلاسيكية في نهاية الأعداد الكمومية الكبيرة».

بهذه الطريقة يرتبط البندول الضخم والمذبذب الذري بعضهما ببعض.

مثل 3

جسم كتلته 300 g معلق في نابض، ثابت القوة له $k = 3.0 \text{ N/m}$ يتذبذب بسعة $A = 10 \text{ cm}$. عامل هذا النظام كمذبذب كمومي، أوجد أ) الفاصلة الطاقية بين المستويات المتجاورة، وب) الأعداد الكمومية التي تصف الاهتزاز.

الحل: نجد تردد الذبذبة من العلاقة التقليدية

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3.0 \text{ N/m}}{0.3 \text{ kg}}} = 0.5 \text{ s}^{-1}$$

والطاقة الميكانيكية الكلية لهذا النظام المتذبذب هي:

$$E = \frac{1}{2} k A^2 = \frac{1}{2} (3.0 \text{ N/m})(0.10 \text{ m})^2 = 0.015 \text{ J}$$

وعندما تخمد سعة التذبذب بسبب الاحتكاك، فإن سعة التذبذب الكمومية تتساوى
 ان الطاقة E ستعادل في «قفزات» قياسها:

$$\Delta E = h\nu = (6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s})(0.05 \text{ s}^{-1}) = 3.3 \times 10^{-34} \text{ J}$$

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{3.3 \times 10^{-34} \text{ J}}{0.015 \text{ J}} = 2.2 \times 10^{-32}$$

وهكذا فإن

وقياسات طاقية يمثل هذه الدقة هي ببساطة غير ممكنة. وبالتالي، فإن
 القفزات الكمومية مثل هذا المذبذب هي من الصغر بحيث لا يمكن كشفها.
 بمعنى أن النظام يقع في الحدود الكلاسيكية، ويمكن التعامل معه على هذا
 الأساس. ب) من العلاقة (7 - 11) نجد أن العدد الكمومي:

$$n = \frac{E}{h\nu} = \frac{0.015 \text{ J}}{3.3 \times 10^{-34} \text{ J}} = 4.6 \times 10^{31}$$

وهذا عدد هائل ومعه يستحيل كشف (تسجيل) التكميم الطاقى في عمل
 المذبذب المدروس.

(11 - 4) السعة الحرارية للصلب

إذا نقلنا حرارة مقدارها Q إلى 1 مول صلب، فارتفعت درجة حرارة الصلب
 بمقدار ΔT ، فإن السعة الحرارية المولارية له تساوي

$$C_v = \frac{Q}{\Delta T} \quad (11 - 8) \quad (\text{حجم ثابت})$$

واختيار شرط نقل الحرارة تحت حجم ثابت جاء لكي تظل المسافات بين
 الذرات ثابتة. وأي طاقة مضافة تظهر بصورة كلية كطاقة اهتزاز للذرات
 حول مواقعها الشبكية الثابتة. يؤخذ مقدار 1 مول من المادة بحيث أن المقارنة
 من عنصر إلى عنصر تتم على أساس العدد المتساوي من الذرات.

يبين الجدول 1 السعات الحرارية لبعض الأجسام الصلبة الأساسية عند
 درجة حرارة الغرفة أو بالقرب منها. ومنه يتضح أن جميع العناصر الصلبة،
 مع بعض الاستثناءات، لها نفس السعة الحرارية المولية، التي هي بحدود 25
 جول لكل مول كلفن (25 J / mol.K). وما دونها يدعى شواذاً.

يبين الشكل 6 السعة الحرارية لكل من الرصاص، الألومنيوم، والكربون

كمالة لدرجة الحرارة. ومنه نلاحظ أن C_v لجميع العناصر الثلاثة تقترب من نفس القيمة النهائية عند درجات الحرارة العالية. على أن الكربون يُظهر شذوذاً في الجدول يعكس حقيقة أن درجة حرارة الغرفة ليست درجة حرارة عالية بالنسبة له.

ماذا نتبأ الفيزياء الكلاسيكية بشأن السعة الحرارية المولية للصلب؟ ترتب الذرات في الصلب في شبكة ثلاثية الأبعاد، وكل ذرة مقيدة إلى موقعها الشبكي بثلاثة قوى كهرومغناطيسية وتتذبذب حول هذا الموقع بسعة تزداد عندما تزداد درجة الحرارة. فكل ذرة تسلك مثل مذبذب خفيف بثلاثة درجات للحرية. تطابق ثلاثة محاور إتجاهية مستقلة تتحرك بامتدادها الذرة حرة.

إن البديهة الكلاسيكية بشأن التقسيم المتساوي للطاقة تدفق طاقة قدرها $\frac{1}{2}KT$ مع كل درجة حرية. والمذبذب الثلاثي الأبعاد له ست درجات من حرية. درجتان لكل اتجاه (طبقاً لطاقتي الحركة والموضع لذلك الاتجاه). وبالتالي، فإن الطاقة الداخلية للصلب بالمول الواحد هي:

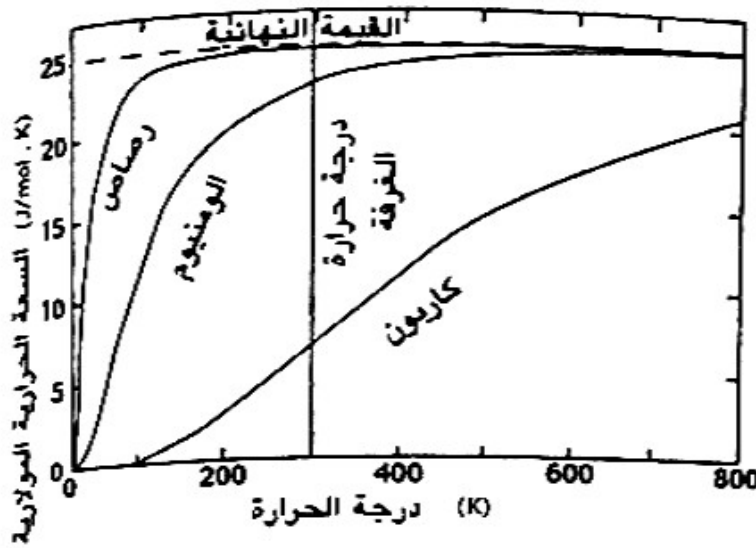
$$E_{int} = 6\left(\frac{1}{2}KT\right)N_A = 3RT \quad (9 - 11)$$

حيث N_A هو عدد أفوغادرو، و R هو الثابت العام للغازات. جنول 1 السعة الحرارية المولية لبعض الأجسام الصلبة

الصلب	C_v (J/mol.K)
الألمنيوم	23
البيريليوم	11
البزموت	25
البورون	13
الكادميوم	25
الكربون	6
النحاس	24

25	Gold	الذهب
25	Lead	الرصاص
25	Platinum	البلاتين
24	Silver	الفضة
24	Tungsten	التنجستن

«جميع القياسات جرت بدرجة حرارة الغرفة».



شكل 6

شكل 6 السعة الحرارية المولية
لثلاثة أجسام صلبة كدالة لدرجة
الحرارة.

إذا ضبط الجسم الصلب في حجم ثابت، فإنه يمكن استبدال Q في العلاقة (11.8) بـ ΔE_{int} ، التي تعني التغير في الطاقة الداخلية بالمول الواحد (من القانون الأول لدينا ميكانيكا الحرارة) فنحصل على: $C_v = \Delta E_{int} / \Delta T$ ، التي تتحول إلى

$$C_v = \frac{dE_{int}}{dT} \quad (11 - 10)$$

في النهاية التفاضلية. وبالتعويض عن E_{int} من العلاقة (9 - 11)، نحصل على:

$$C_v = \frac{d}{dT} (3RT) = 3R \quad (11 - 11)$$

ومن هذه العلاقة نلاحظ كيف أن النظرية الكلاسيكية تتنبأ بثبات الحرارة النوعية المولية للمادة وتكافؤها لجميع المواد، وعدم اعتمادها على درجة الحرارة. وبالتعويض عن $R = (8.31 \text{ J/mol.K})$ نجد أن $(C_v = 24.9 \text{ J/mol.K})$. وهذا يتفق جيداً مع غاية C_v بدرجات الحرارة العالية، كما يوضح ذلك الشكل 6 والجدول 1.

افترض أنشتاين أن طاقات المذبذبات الذرية في الصلب قد تم تكميمها طبقاً للمعادلة (7 - 11) ونسب إلى كل مذبذب معدل طاقة لكل اتجاه، ليس KT كما في الحالة الكلاسيكية، بل مقداره:

$$E = \frac{h\nu}{e^{h\nu/KT} - 1} \quad (11 - 12)$$

وهو نفس التعبير الذي استخدمه بلانك لمعدل طاقة المذبذبات في مسألة اشعاع التجويف (6 - 11)، و ν في المعادلة (12 - 11) هو التردد الاهتزازي الطبيعي للذرة المتذبذبة الذي اعتبره أنشتاين ثابتاً ضابطاً. بضرب المعادلة (12 - 11) بعدد أفوغادرو، وبالعامل 3 لكي تأخذ ثلاثة أبعاد، نحصل على الطاقة الداخلية بالمول:

$$E_{int} = \frac{3N_A h\nu}{e^{h\nu/KT} - 1} \quad (11 - 13)$$

باشتقاق هذه العلاقة في T وملاحظة المعادلتين (10 - 11) و (9 - 11) نجد

$$C_v = \frac{dE_{int}}{dT} = 3N_A h\nu \frac{d}{dT} (e^{h\nu/KT} - 1)^{-1} = -3N_A h\nu \frac{\frac{h\nu}{K} T^{-2} e^{h\nu/KT}}{(e^{h\nu/KT} - 1)^2}$$

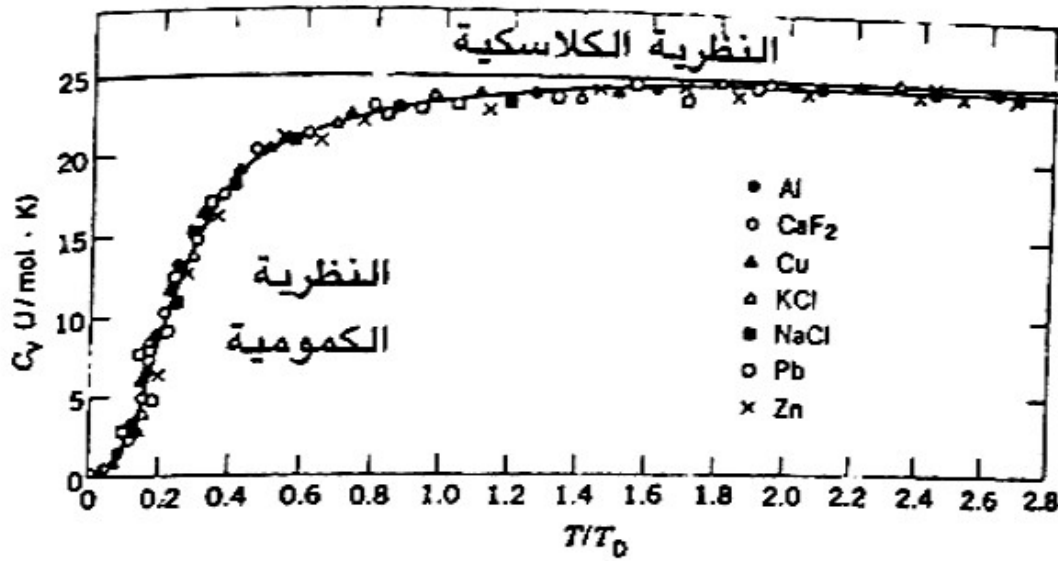
$$= 3N_A K \left(\frac{h\nu}{KT}\right)^2 \frac{1}{(e^{h\nu/KT} - 1)^2} = 3R \left(\frac{h\nu}{KT}\right)^2 \frac{e^{h\nu/KT}}{(e^{h\nu/KT} - 1)^2}$$

في هذه العلاقة يوجد متغير ضابط واحد فقط، هو تردد المذبذب ν . وعموماً، يعبر عن التردد ν بدلالة «درجة حرارة أنشتاين المميزة $T_E = h\nu/K$ »، التي يمكن اختيارها بحيث أن معادلة أنشتاين هذه (14 - 11) تتطابق مع المعطيات بصورة حسنة، رغم وجود بعض الانحرافات الصغيرة عن قانون درجة الحرارة. انحرافات لم تؤسس عملياً بعد عندما شرع أنشتاين نظريته.

يفسر الفيزيائيون الاختلاف في التوافق مع التجربة عند درجات الحرارة المنخفضة بأنه يمكن أن يُرد إلى تلك الحقيقة أن أنشتاين - ربما متعمداً - قدم افتراضاً مُفرط البساطة، مفاده، أن مذبذبات الذرة المفردة هي في

منأى عن تأثير جاراتها. في 1912 كرر الفيزيائي الألماني بيوتر ديباي Peter Debye نظرية أنشتاين. وذلك بأخذه بنظر الاعتبار تفاعل المذبذبات الذرية مع الذرات. المجاورة. والشكل 7 يوضح التوافق الرائع لنظرية ديباي مع التجربة لعدد من الأجسام الصلبة. في هذا الشكل جعل مقياس درجة الحرارة بدون أبعاد، حيث T_D ثابت له قيم مختلفة لكل مادة، وعندما تكون درجات حرارة ديباي المميزة هذه قد حددت على نحو ملائم، يمكننا حينذاك أن نرى كيف تقع جميع النقاط التجريبية بشكل رائع على نفس المنحني النظري. هذا التوافق هو انتصار اساسي للنظرية الكمومية.

الشكلان 6 و 7 يوضحان مباشرة بتفسير القيم الشاذة في الجدول 1. بالنسبة لهذه المواد تكون T_D أكبر بكثير من درجة حرارة الغرفة، بحيث أن السعة الحرارية لا تبلغ قيمتها النهائية.



شكل 7

شكل 7 نتيجة النظرية الكمومية بالنسبة للسعة الحرارية للأجسام الصلبة في توافق تام مع النتائج التجريبية. المقياس الأفقي هو نسبة لا بعدية لدرجة الحرارة T إلى درجة حرارة ديباي T_D ذات القيمة المميزة لكل مادة.

مثل 4 أوجد بدلالة درجة حرارة أنشتاين T_E ، درجة الحرارة التي عندها تصبح السعة الحرارية للمادة مساوية لنصف قيمتها الكلاسيكية.

الحل: القيمة الكلاسيكية للسعة الحرارية للمادة هي 312 وفقاً للعلاقة - (11)
 (11). لذلك نبحث عن درجة الحرارة التي تكون فيها قيمة السعة الحرارية
 C_v في علاقة أنشتاين (14 - 11) مساوية لـ $(3R)/2$:

$$\frac{3}{2} R = 3R \left(\frac{h\nu}{KT} \right)^2 \frac{e^{h\nu/KT}}{e^{h\nu/KT} - 1}$$

وبوضع $x = h\nu/KT = T_E/T$ والتعويض في المعادلة أعلاه، نحصل على:

$$\frac{1}{2} = x^2 \frac{e^x}{e^x - 1}$$

هذه المعادلة يمكن أن تحل حسابياً بواسطة الآلة الحاسبة ومنها نجد أن:
 $x = 2.98$

وبما أن: $x = T_E/T$ ، إذن:

$$T = x^{-1} T_E = (2.98)^{-1} T_E = 0.336 T_E$$

(11 - 5) التأثير الكهروضوئي

إن التأثير الكهروضوئي هو مثل آخر على التفاعل بين الإشعاع والمادة،
 يضاف إلى مثل التفاعل بين المادة والإشعاع عند جدران المشع التجويفي
 (الجسم الأسود) الذي قامت على أساسه فكرة التكميم الطاقوي. إنه يشتمل
 في الأساس على ثابت بلانك ويوسع فكرة الكممة إلى الطبيعة الفعلية
 للإشعاع ذاته.

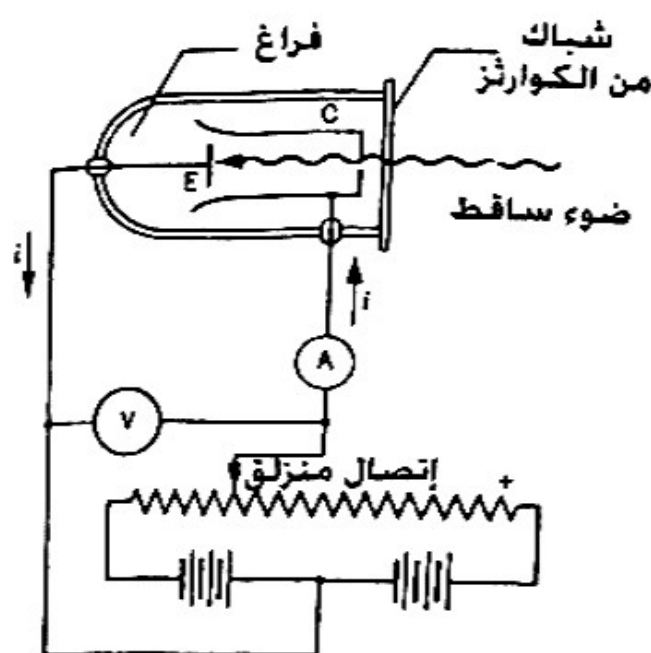
يبين الشكل 8 جهازاً عادياً يستخدم لدراسة التأثير الكهروضوئي. فالضوء
 ذو التردد لا يسقط على سطح معدني (الباعث E). وإذا كان ν عالياً بما
 يكفي، فإن الضوء المرتطم بـ سطح المعدن سوف يُخرج الإلكترونات خارج
 السطح. فإذا وصلنا فرق جهد V مناسب بين E والمجمع C، فإننا نستطيع
 أن نجمع هذه الإلكترونات الضوئية ونقيسها كتيار كهروضوئي i .

إن فرق الجهد V المؤثر بين الباعث E والمجمع C هو ليس نفس فرق الجهد
 V_{ext} للجهاز بواسطة البطارية الخارجية ويُقرأ (V_{CE}) على تدريج الفولتميتر
 في الشكل 8. فهناك أيضاً قوة دافعة كهربائية ثانية (emf) - بطارية خفية،

تنشأ نتيجة لاختلاف المادة التي يصنع منها الباعث عن تلك التي يصنع منها المجمع، تكون ما يعرف بفرق جهد الاتصال (V_{cpd})، الذي يمكن أن يبقى ثابتاً أثناء التجربة. لذلك، فإن فرق الجهد V الذي تبدو فيه الإلكترونات هو المجموع الجبري لجهد الاتصال وجهد البطارية الخارجي:

$$V = V_{ext} + V_{cpd} \quad (11 - 15)$$

على أننا في حساباتنا اللاحقة سنعتبر أن جهد الاتصال مقاساً ومأخوذاً بنظر الاعتبار وأن V هو المحصلة للجهدين في المعادلة (11 - 15).



شكل 8

شكل 8 جهاز لدراسة التأثير الكهروضوئي. تبين الأسهم اتجاه التيار في الدارة الخارجية وهو يعاكس اتجاه حركة الإلكترونات. يقيس الفولتميتر V الجهد الخارجي المطبق V_{ext} .

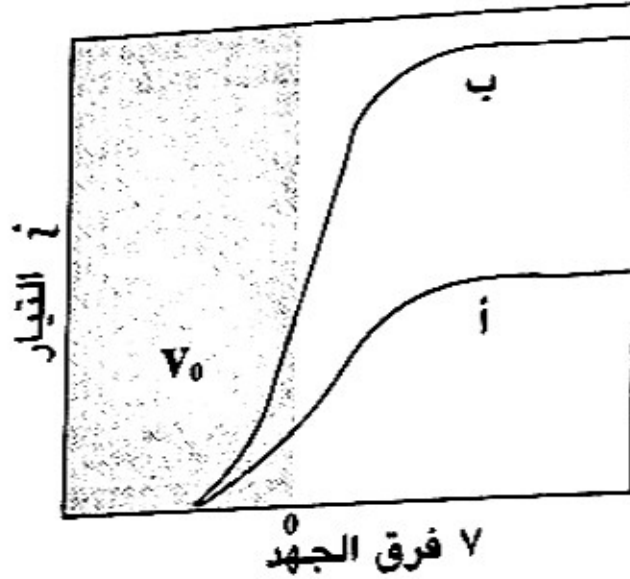
يبين الشكل 9 (المنحني أ) التيار الكهروضوئي كدالة لفرق الجهد V . ومنه نرى أنه إذا كان V موجباً وكبيراً بما يكفي، فإن التيار الكهروضوئي يبلغ قيمة إشباع ثابتة تكون عندها جميع الإلكترونات المنبعثة من E قد تجمعت بواسطة C .

إذا أعدنا V إلى الصفر ومن ثم عكسناه، فإن التيار الكهروضوئي لا يهبط إلى الصفر حالاً وذلك بسبب الإلكترونات المنبعثة من E بسرعة لا تساوي صفر. فبعضها سيصل إلى المجمع حتى لو كان فرق الجهد عكس حركتها. وإذا جعلنا فرق الجهد المعكوس كبيراً بما يكفي، فإننا نصل القيمة V_0 التي تدعى جهد الإيقاف، الذي يهبط عنده التيار فعلاً إلى الصفر. وبضرب جهد الإيقاف بشحنة الإلكترون e ، نحصل على الطاقة الحركية K_{max} لبعض

الالكترونات الضوئية المنبعثة النشطة:

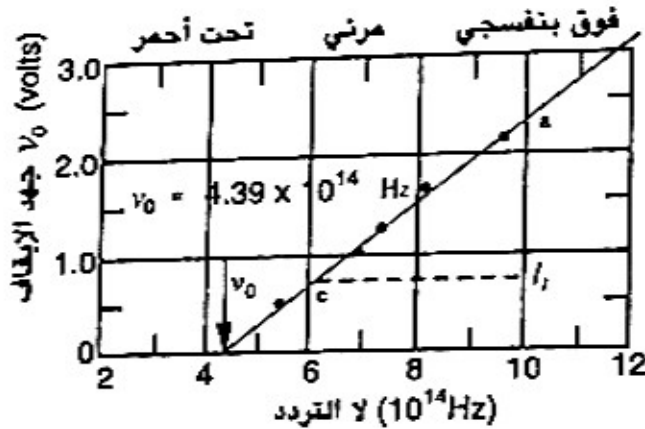
$$K_{\max} = eV_0 \quad (11 - 16)$$

إن جهد الايقاف V_0 والطاقة الحركية $K_{\max}$ لا يعتمدان على شدة الضوء الساقط. والمنحني ب في الشكل 9، الذي يتضاعف فيه شدة الضوء الساقط، يبين ذلك. ورغم أن تيار التشبع تضاعف أيضاً فإن جهد الايقاف بقي ثابتاً.



شكل 9

شكل 9 رسم لمعطيات أخذت بواسطة الاداة في الشكل 8. شدة الضوء الساقط بالنسبة للمنحني ب ضعفها بالنسبة للمنحني ا.



شكل 10

شكل 10 جهد الايقاف كدالة للتردد بالنسبة لسطح الصوديوم.

أما الشكل 10، فيبين جهد الايقاف كدالة لتردد الضوء الساقط. وبالاستنتاج الاستقرائي نلاحظ من الشكل انه يوجد تردد قطع حاد ν_0 مطابقاً لجهد ايقاف قيمته صفراً. فالضوء ذو التردد الاقل من تردد القطع الحاد ν_0 لا يحدث أثراً ضوئياً ولا تصاحبه أية الكترونات ضوئية عند جميع الانبعاثات.

الملامح الرئيسية للأثر الكهروضوئي

توجد ثلاث ملامح (أو هيئات) رئيسية للتأثير الكهروضوئي لا يمكن تفسيرها بواسطة النظرية الموجية الكلاسيكية للضوء. فكما بالنسبة لاشعاع التجويف (اشعاع الجسم الاسود) ومسألة السعة الحرارية، فإن عجز النظرية الموجية الكلاسيكية في هذه الحالات ليس محل خلاف يذكر. فالعجز كلياً ولا يقبل الجدل. وهنا توجد ثلاث مسائل (مشكلات).

1 - مسألة الشدة (أو كثافة القدرة): تتطلب النظرية الموجية أن تزداد سعة المتجه الكهربائي المتذبذب $\vec{E}$ في الموجة الضوئية عندما تزداد شدة الحزمة الضوئية. وبما أن القوة المطبقة على الإلكترون هي $e\vec{E}$ ، فهذا يوحي أن الطاقة الحركية للإلكترونات الضوئية ستزداد أيضاً عندما تصبح الحزمة الضوئية أكثر شدة. في حين أن الشكل 9 يبين أن الطاقة الحركية العظمى $K_{\max} (= eV_0)$ لا تعتمد على الشدة الضوئية، وهذا ما تم فحصه على نطاق من الشد يصل إلى 10^7 .

2 - مسألة التردد: طبقاً للنظرية الموجية، فإن التأثير الكهروضوئي يجب أن يظهر عند أي تردد للضوء بشرط أن يكون الضوء الساقط ذو شدة كافية لاعطاء الطاقة اللازمة لانتزاع الإلكترونات الضوئية. بينما يبين الشكل 10، أنه من أجل كل سطح، يوجد تردد قطع ν_0 خاص، دونه لا يظهر التأثير الكهروضوئي مهما تعرضت المادة لهذا الاشعاع.

3 - مسألة التأخير الزمني

وفقاً للنظرية الموجية الكلاسيكية، فإن التأثير الكهروضوئي يظهر متأخراً بعد سقوط الضوء على سطح المعدن. لكن التجارب المجراة بهذا الخصوص تشير إلى أن التأثير الكهروضوئي يحدث دون رد فعل ذاتي. بمعنى أن التيار الضوئي يظهر لحظياً بنفس الوقت مع اضاءة المعدن. فلو أن مصدراً ضوئياً قدرته P_0 ينشر ضوءه في جميع الاتجاهات، ولنفرض أن هذا الضوء يسقط على مهبط ضوئي مستوي من الزنك أو البوتاسيوم موضوع على مسافة r من المصدر الضوئي (مصباح مثلاً)، فإن شدة الضوء I تعتمد على المساحة

الهدف للمهبط والتي لا تزيد كثيراً عن مساحة دائرة قطرها يساوي تقريباً قطر الذرة.

$$I = \frac{P_0}{4\pi r^2} \quad (11 - 17)$$

ولانتزاع الالكترتون من المعدن يجب أن لا تكون الطاقة المتجمعة لديه نتيجة لاهتزازة القسري مع اهتزازات المجال الكهربائي للموجة الضوئية الساقطة أقل من دالة عمل هذا المعدن A .

إن أكبر طاقة يمكن أن تحصل عليها الذرة من الاشعاع خلال t من الزمن هي:

$$E_{\max} = \frac{P_0}{4\pi r^2} \sigma t \quad (11 - 18)$$

حيث σ هي المقطع العرضي للذرة، و P_0 هي قدرة خرج المصدر الضوئي. أما الطاقة المعطاة للالكترتون خلال نفس الزمن، فهي أقل من $E_{\max}$ ، ولكنها يجب أن لا تكون أقل من دالة العمل ϕ إذا أريد للالكترتون ان يغدر المعدن. إن الطاقة التي تصيب المساحة الهدف A من الشدة الضوئية I تعتمد على الشدة وعلى المساحة:

$$P = IA \quad (11 - 19)$$

ومن مقارنة المعادلتين (11 - 18) و (11 - 19)، حيث المقدار $P_0 / 4\pi r^2$ في المعادلة (11 - 18) هو الشدة I ، و σ هو المساحة، نستطيع أن نجد العلاقة بين الطاقة العظمى التي يشعها المصدر $E_{\max}$ والطاقة P (11 - 19) التي تنتفع بها المساحة الهدف خلال زمن تعرضها للاشعاع t :

$$E_{\max} = Pt \quad (11 - 20)$$

مثل 5

وضعت رقاقة بوتاسيوم على مسافة $r (= 0.5m)$ من مصدر ضوئي قدرة خرجها $P_0 = 1.0W$. كم من الزمن تستغرقه الرقاقة لتنتفع بأكبر قدر ممكن من طاقة الحزمة ($1.8eV$) يكفي لتحرير الالكترونات من المعدن؟ بفرض أن الالكترونات المتحررة تجمع طاقتها من مساحة دائرية للرقاقة نصف

قطرها يساوي تقريباً نصف قطر ذرة البوتاسيوم ($1.3 \times 10^{-10} \text{ m}$).

الحل: إذا كان المصدر يشع بكل الاتجاهات وبصورة منتظمة، فإن شدة اشعاعه الضوئي I ، وفقاً للعلاقة (17 - 11) تساوي:

$$I = \frac{1.0 \text{ W}}{4\pi(0.5 \text{ m})^2} = 0.32 \text{ W/m}^2$$

ومن هذه الشدة هناك قدر من الطاقة تنتفع به المساحة الهدف (المساحة المستهدفة) هو، وفقاً للعلاقة (19 - 11)

$$P = IA = (0.32 \text{ W/m}^2)(1.3 \times 10^{-10} \text{ m})^2 \pi$$

$$= 1.7 \times 10^{-20} \text{ J/s}$$

والآن نطبق المعادلة (20 - 11)، بعد تحويل طاقة المصدر الى الجول، نحصل

$$1.8 \text{ eV} \left(\frac{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ eV}} \right) = (1.7 \times 10^{-20} \text{ J/s}) t \quad \text{على:}$$

ومنه، فإن

$$t = \frac{1.8 \text{ eV} \left(\frac{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ eV}} \right)}{1.7 \times 10^{-20} \text{ J/s}} = 17 \text{ s}$$

(11 - 6) نظرية انشتاين الفوتونية

في 1905 قدم انشتاين افتراضاً استثنائياً غاية في أهميته عن طبيعة الضوء، مفاده «أن الضوء، وتحت بعض الظروف، يسلك كما لو كانت طاقته مركزة في رزم متموضعة، سميت فيما بعد بالفوتونات، طاقة الفوتون الواحد منها تساوي

$$E = h\nu \quad (11-21)$$

حيث ν هو تردد الضوء. هذا المفهوم عن طبيعة الضوء، بأن الحزمة الضوئية تسلك كسيل من الجسيمات، لهو في تناقض حاد مع المفهوم الموجي القائل: «أن الضوء يسلك كموجة». ففي النظرية الموجية للضوء، لا تتركز طاقة الموجة في رزم، بل تنتشر إلى الخارج بصورة منتظمة فوق جبهات الموجة.

عندما اشتق بلانك قانونه الاشعاعي في 1900، مقدماً لأول مرة ثابتة h إلى الفيزيائيين، استخدم العلاقة $E = h\nu$ ، مطبقاً اياها ليس على الاشعاع داخل التجويف، بل على المذبذبات الذرية، التي تتركب منها جدران التجويف. لقد تعامل بلانك مع اشعاع التجويف على أساس النظرية الموجية، ولكن أنشتاين كان قادراً بعد ذلك على اشتقاق قانون بلانك للاشعاع على أساس مفهومه الفوتوني. كانت طريقة أنشتاين تتسم بالوضوح والبساطة وكانت قد أبطلت الكثير من الافتراضات الخاصة التي وجدها بلانك ضرورية فدونها في جهوده التمهيدية.

إذا طبقنا مفهوم أنشتاين الفوتوني على الفعل الكهروضوئي فاننا نستطيع أن نقول:

$$h\nu = K_{\max} + \phi \quad (11 - 22)$$

حيث $h\nu$ هي طاقة الفوتون. وهذا معناه أن الفوتون الواحد يحمل طاقة مقدارها $h\nu$ الى داخل السطح حيث يتم امتصاصه بواسطة الكترون منفرد. وجزء من هذه الطاقة (ϕ)، ويدعى دالة العمل للسطح الباعث) يستخدم لتمكين الالكتران من الهروب من سطح المعدن، أما فائض الطاقة ($h\nu - \phi$) فيصبح طاقة حركية للالكتران، يظل محتفظاً بها حتى بعد بزوغه من السطح إذا لم يخسرها بالتصادم الداخلي اثناء هروبه من المعدن. وهكذا تُعتبر $K_{\max}$ الطاقة العظمى التي يمكن أن يمتلكها الالكتران الضوئي خارج السطح.

الآن نرى كيف واجه افتراض أنشتاين الفوتوني الاعتراضات الثلاثة التي رُفعت ضد تفسير النظرية الموجية للتأثير الكهروضوئي. بالنسبة للاعتراض الاول («مسألة الشدة») فهناك توافق تام بين النظرية الفوتونية والتجربة. فان نحن ضاعفنا شدة الضوء الساقط على المعدن، فسنكون قد ضاعفنا عدد الفوتونات، وبالتالي نكون قد ضاعفنا التيار الكهروضوئي، لكننا بهذا لا نكون قد غيرنا طاقة الفوتونات الأولية أو طبيعة العمليات الكهروضوئية الأولية الموصوفة بالمعادلة (11 - 22).

الاعتراض الثاني («مسألة التردد») قوبل من قبل النظرية الفوتونية بالمعادلة (22 - 11)، فإذا كانت $K_{\max}$ تساوي صفراً، فإن:

$$h \nu_0 = \phi$$

وهذا يؤكد أن الفوتون يمتلك طاقة تكفي تماماً لاستخراج الإلكترونات الضوئية وليس لديه فائضاً منها لتظهر بصورة طاقة حركية. فإذا كان تردد الضوء الساقط أصغر من ν_0 ، فإن $h \nu$ ستكون أصغر من ϕ ومن ثم، فإن الفوتونات الأولية - ليس مهماً كم يوجد منها، أي ليس مهماً كم تكون شدة الاضاءة، لا تمتلك ما يكفي من الطاقة لاستخراج الإلكترونات الضوئية، ومن ثم فليس ثمة فعل ضوئي.

الاعتراض الثالث («مسألة التأخير الزمني»)

هذا التعارض نابع من النظرية الفوتونية لأن الطاقة الضرورية لمجهزة في رزم متمركزة، ولا تنتشر بانتظام فوق المقطع العرضي للحزمة الضوئية كما تقول بذلك النظرية الموجية.

لو أعدنا كتابة معادلة أنشتاين الكهروضوئية (22 - 11) معوضين $K_{\max}$ من المعادلة (16 - 11)، لحصلنا، بعد إعادة ترتيب الحدود، على:

$$V_0 = (h/e) \nu - (\phi/e) \quad (11 - 23)$$

وهكذا تتبأ نظرية أنشتاين بعلاقة خطية بين جهد الايقاف V_0 وتردد الضوء الساقط، وهذا يتفق تماماً مع التجربة (لاحظ الشكل 10). ومن العلاقة (23 - 11) ينتج أيضاً، أن ميل المنحني التجريبي في الشكل 10 هو h/e ، الذي يساوي، وفقاً للنقاط المأخوذة على البياني،

$$\frac{h}{e} = \frac{a b}{b c} = \frac{2.30V - 0.68V}{(10 \times 10^{14} \text{ Hz}) - (6.0 \times 10^{14} \text{ Hz})} = 4.1 \times 10^{15} \text{ V.s}$$

$$h = e(4.1 \times 10^{15} \text{ V.s}) = (1.6 \times 10^{19} \text{ C})(4.1 \times 10^{15} \text{ V.s}) = 6.6 \times 10^{34} \text{ J.s}$$

ومن التحليل الأكثر دقة لهذه المعطيات ولغيرها، وجد ميليكان (Millikan) أن قيمة h تساوي $6.57 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ بدقة تصل إلى حوالي 0.5%. هذا التوافق مع قيمة h المشتقة من صيغة بلانك للإشعاع إثبات مدهش لمفهوم أنشتاين الفوتوني.

فعندما قدم أنشتاين نظريته الفوتونية للضوء، لم تكن الحقائق الكهروضوئية واضحة بالشكل الذي بينته التجارب لاحقاً، والقياسات الكهروضوئية الدقيقة كانت صعبة، ولم تكن ناجحة إلى أن أخضع ميليكان معادلة أنشتاين الكهروضوئية إلى الفحص التجريبي، ورغم أن ميليكان برهن أن هذه المعادلة تتوافق مع التجربة في جميع التفاصيل، إلا أنه ظل غير مقتنع بأن جسيم أنشتاين الضوئي كان حقيقياً.

مثل 6 اوجد دالة العمل بالنسبة للصوديوم من المعطيات المبينة على الشكل 10

الحل: تقاطع الخط المستقيم في الشكل 10 مع محور التردد هو تردد الإيقاف ν_0 . بوضع جهد الإيقاف V_0 مساوياً للصفر $\nu_0 = \nu$ في المعادلة (23-11)، نحصل على:

$$\phi = h\nu_0 = (6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s})(4.39 \times 10^{14} \text{ Hz}) = 1.82 \text{ eV}$$

مثل 7 بأي معدل بوحدة المساحة تصطدم الفوتونات بالشريحة المعدنية في المثل 5؟ بفرض أن الطول الموجي للضوء الساقط هو 589 nm (ضوء الصوديوم الأصفر).

الحل: تُحدّد شدة الضوء على أنها الطاقة بوحدة الزمن بوحدة المساحة (تؤخذ المساحة عمودية على اتجاه انتشار الضوء). وهنا يمكن اعتبار الشدة (من أجل ضوء وحيد اللون) بدلالة الفوتونات كطاقة بالفوتون مضروبة بمعدل الفوتونات (بوحدة المساحة) التي تصطدم بالسطح العمودي على حركة الفوتونات $I = \Gamma E$ وكلا التفسيران متكافئان.

ومن المثل 5 وجدنا أن الشدة I تساوي:

$$I = 0.32 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 0.32 \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} = (0.32 \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}) \left(\frac{1 \text{ eV}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}} \right) = 2.0 \times 10^{18} \text{ eV/m}^2 \cdot \text{s}$$

وأن طاقة الفوتون لضوء الصوديوم الساقط هي:

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} = \frac{(6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s})(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})}{589 \times 10^{-9} \text{ m}}$$

$$= 3.4 \times 10^{-19} \text{ J} = (3.4 \times 10^{-19} \text{ J}) \left(\frac{1 \text{ eV}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}} \right)$$

$$= 2.1 \text{ eV}$$

ومنه، فإن معدل الفوتونات بوحدة المساحة التي تصطدم بسطح الشريحة

$$r = \frac{I}{E} = \frac{2.0 \times 10^{18} \text{ eV/m}^2 \cdot \text{s}}{2.1 \text{ eV/photon}} \quad \text{يساوي:}$$

$$= 9.5 \times 10^{17} \text{ photons/m}^2 \cdot \text{s}$$

ومنه نلاحظ أنه حتى بهذه الشدة المتواضعة للضوء الساقط، فإن معدل الفوتونات بوحدة المساحة كبير جداً وهو يقترب من 10^{12} فوتون يسقط على كل 1 mm^2 كل ثانية واحدة.

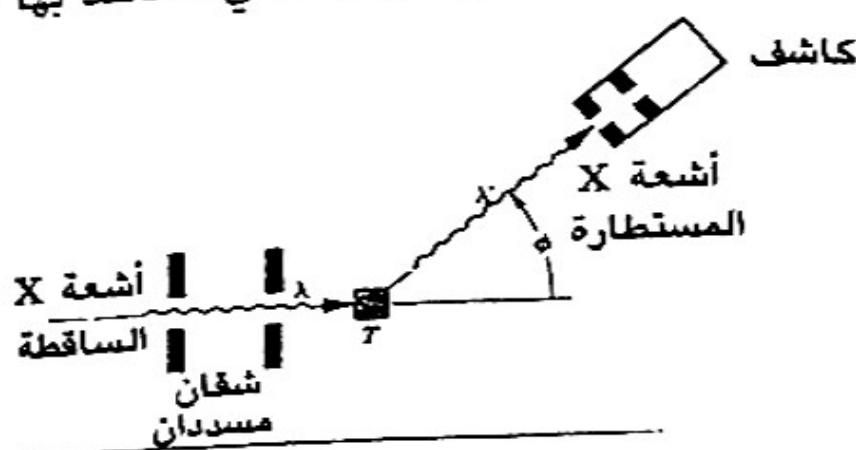
(11 - 7) أثر كومبتون

كان اشعاع التجويف (الجسم الاسود)، الذي يشكل جزءه الأكبر طيف الأشعة تحت الحمراء، مثلنا الأول في دراسة تفاعل الاشعاع مع المادة، وكان الاثر الكهروضوئي مثلنا الثاني، شاملاً الضوء المرئي وفوق البنفسجي. في هذه الفقرة نصف اثر كومبتون الذي اكتشفه ارتور كومبتون Aurthur. H. compton (1892 - 1962) في 1922 كمثال ثالث على تفاعل الاشعاع مع المادة في منطقتي الاشعة السينية (أشعة X) وأشعة غاما في الطيف الكهرومغناطيسي.

يمكن فهم أثر كومبتون، الذي يتضمن استطارة الاشعاع من الذرات، بدلالة التصادمات بين الفوتونات والالكترونات، الشبيهة بتلك التي تحدث بين كرات البليارد، على أن نأخذ في حسابنا عند تفسير هذه التصادمات طاقة الفوتون وكمية حركته الخطية.

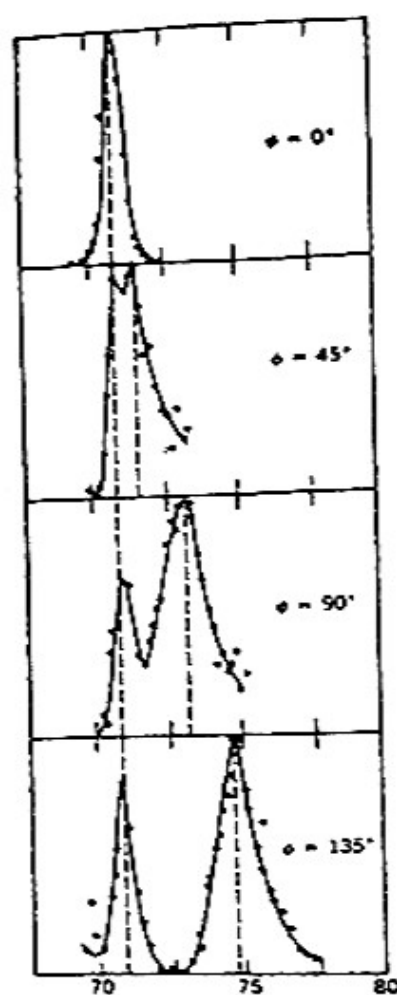
في تجربة كومبتون أسقطت حزمة من الأشعة السينية محددة الطول الموجي

١. تماماً على هدف من الغرافيت T، كما هو موضح على الشكل 11، وجرى قياس شدة الاشعة المستطارة كدالة لطولها الموجي عند زوايا استطارة ϕ مختلفة، فكانت النتائج كما يوضحها الشكل 12. ومن الشكل 12 هذا نلاحظ انه رغم أن الحزمة الساقطة تتكون من طول موجي واحد λ ، فإن الاشعة السينية المستطارة تمتلك قمتين للشدة عند طولين موجيين، الاول هو نفس الطول الموجي للاشعة الساقطة λ والثاني λ أكبر منه بمقدار λ . إن المقدار λ يعرف بـ زحزحة كومتون، وهي تتغير مع الزاوية التي تشاهد بها الاشعة السينية المستطارة.



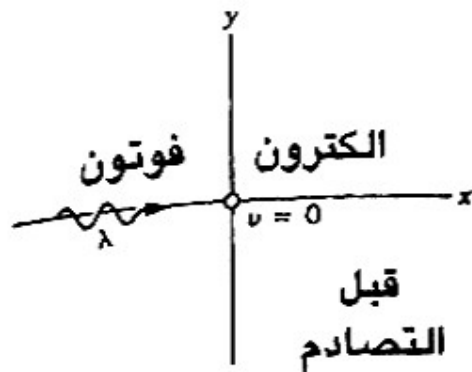
شكل 11

شكل 11 الترتيب التجريبي لمشاهدة أثر كومتون. يمكن أن يتحرك الكاشف إلى زوايا ϕ مختلفة



شكل 12

شكل 12 نتائج كومتون التجريبية لأربع قيم مختلفة لزاوية الاستطارة ϕ .



شكل 13

شكل 13 فوتون يصطدم بالكثرون ساكن.

إن وجود موجة مُستطارة طولها الموجي λ' لا يمكن أن يُفهم إذا أُعتبرت الأشعة السينية الساقطة كموجة كهرومغناطيسية. ففي التصور الموجي، تسبب الموجة الساقطة ذات التردد ν اهتزاز الإلكترونات في الهدف المستطير (الذي سبب الاستطارة) أو اجبارها على التردد بنفس ترددها. وهذه الإلكترونات المهتزة، مثل شحنات مندفة إلى الخلف وإلى الأمام في هوائي راديو ارسال صغير، تشع أمواجاً كهرومغناطيسية جديدة بنفس التردد ν . إذن، تبعاً لهذا التفسير الكلاسيكي الموجي، فإن الموجة المستطارة يجب أن يكون لها نفس التردد ونفس الطول الموجي كما للموجة الساقطة. وهذا يتعارض مع المعطيات التجريبية (شكل 12) التي تبين التغير في الطول الموجي للموجة المستطارة (الساقطة على الهدف).

فسر كومتون نتائج التجريبية مفترضاً أن حزمة الأشعة السينية الواردة تنصرف ليس كموجة، بل كتجمع من الفوتونات ذات طاقة $E = h\nu$ وأن هذه الفوتونات تعاني (تخضع لـ) ما يشبه تصادمات كرات البليارد مع الإلكترونات الحرة في الهدف المستطير. وفق هذه الرؤية، فإن الاشعاع المستطار يتكون من الفوتونات المرتدة البازغة (المنبثقة) من الهدف. وبما أن

الفوتون الساقط ينقل بعض طاقته إلى الإلكترون الذي يتصادم معه، فإن الفوتون المستطار يجب أن يمتلك طاقة ادنى E' . وبالتالي يجب أن يمتلك تردد اقل $\lambda' = (h / E')$ ، الذي يعني ضمناً طولاً موجياً أكبر $\lambda' = (c / \nu')$. وجهة النظر هذه يجب أن تؤخذ في الحسبان بالنسبة للزحزحة في الطول الموجي $\Delta\lambda$. وهكذا يبدو الاختلاف واضحاً بين النموذج الجسيمي للأشعة السينية المستطارة (وهو نموذج كمومي بطبيعة الحال) وبين الكلاسيكي الذي يقوم على الصورة الموجية.

التحليل الكمي (من الكمية) للتصادم المنفرد فوتون - إلكترون
 يبين الشكل 13 تصادماً بين فوتون وإلكترون. يُفترض أن يكون الإلكترون في البداية ساكناً وحرراً تماماً، أي أنه غير مقيد إلى ذرات الجسم المستطير (هذا التقريب يؤخذ به بالنسبة للإلكترونات الخارجية غير المقيدة والتي طاقة ارتباطها أقل من طاقة فوتون الأشعة السينية). نطبق قانون حفظ الطاقة على هذا التصادم. بما أن الإلكترون المرتد قد يمتلك سرعة مقدارها يتقارن مع مقدار سرعة الضوء، لذلك يجب استخدام التعبير النسبي للطاقة الحركية للإلكترون K ، ومن التعبير النسبي لحفظ الطاقة لدينا: الطاقة قبل التصادم = الطاقة بعد التصادم $E_i = E_f$ قبل أو

$$h\nu + mc^2 = h\nu' + mc^2 + K \quad (11 - 24)$$

حيث mc^2 هي طاقة سكون الإلكترون، و K طاقته الحركية النسبية. بالتعويض عن تردد الحزمة الضوئية الساقطة ν بـ c/λ ، وتردد الحزمة المستطارة ν' بـ c/λ' ، وعن الطاقة الحركية النسبية للإلكترون بصيغتها النسبية المعروفة:

$$K = E_T \cdot mc^2 = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - mc^2 = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right)$$

نحصل على:

$$\frac{hc}{\lambda} = h \frac{c}{\lambda'} + mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right) \quad (11 - 25)$$

الآن نطبق قانون حفظ كمية الحركة الخطية على تصادم الإلكترون والفوتون

(شكل 13): وهنا ننطلق من حقيقة أنه إذا امتص جسم امتصاصاً كاملاً طاقة قدرها U من حزمة ضوئية متوازية تسقط عليه، فإن الحزمة الضوئية، وطبقاً للنظرية الموجية للضوء، تنقل للجسم في الوقت ذاته كمية حركة خطية مقدارها U/C . وعلى الضد من الصورة الموجية، يعتبر الضوء في النظرية الكمومية سيل من الفوتونات، كل منها يحمل طاقة $E = pc$ وهو جسيم عديم الكتلة. وبالتالي فإن كمية الحركة p المحمولة بواسطة كل جسيم (فوتون) هي $P = E/c$. ومنه يتضح التكافؤ بين التعبيرين، الكلاسيكي لكمية حركة الإلكترون المذكورة أعلاه، والكمومي لكمية حركة الفوتون. إن امتصاص طاقة قدرها U من موجة ضوئية يتم بامتصاص عدد من الفوتونات المنفردة ذات الطاقة E من قبل ذرات الجسم. وبصورة مماثلة، بالنسبة لكمية الحركة P المتخلية عنها للجسم من قبل الموجة الضوئية، يمكن أن تتحلل بدلالة كمية الحركة P المتخلية عنها إلى ذرات أولية من قبل فوتونات في الحزمة. في هذه الحالة، يكون لدينا:

$$P = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (11 - 26)$$

بالنسبة للإلكترون، يُعطى التعبير النسبي عن كمية حركته الخطية بالعلاقة (كجسيم تقترب سرعته من سرعة الضوء).

$$\vec{p}_e = \frac{m \vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (11 - 27)$$

أي أن نسبية كمية الحركة الزاوية للإلكترون ترتبط بنسبية كتلته

$$m_e = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

الآن نستطيع أن نكتب قانون حفظ كمية الحركة الخطية بالنسبة للمركبة الأفقية x من الشكل 13:

$$\frac{h}{\lambda} = \frac{h}{\lambda'} \cos\phi + \frac{m v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \cos\theta \quad (11 - 28)$$

وبالنسبة للمركبة الرأسية y

$$0 = \frac{h}{\lambda} \sin\phi - \frac{m v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \sin\theta \quad (11 - 29)$$

مدققنا هو أن نجد الزحزحة في الطول الموجي للفوتونات المستطارة $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$. ولتحقيق ذلك علينا أن نحل المعادلات الثلاثة (11 - 25)، (11 - 28)، و(11 - 29). ولأن هناك خمس مجاهيل في هذه المعادلات هي λ' ، λ ، θ ، ϕ ، و v . لذلك، فإن علينا إقصاء مجهولين هما θ و v وإيجاد الباقي. لهذا يمكننا إعادة كتابة المعادلتين (11 - 28) و(11 - 29) كالتالي (بعد ضربهما بـ c والعودة إلى الرمز P_e):

$$c P_e \cos\theta = h\nu - h\nu' \cos\phi$$

$$c P_e \sin\theta = h\nu' \sin\phi$$

نربعها ونجمعهما، نحصل على:

$$c^2 P_e^2 = (h\nu)^2 + (h\nu')^2 - 2(h\nu)(h\nu') \cos\phi \quad (11 - 30)$$

ولدينا من نظرية النسبية من أجل الإلكترون أيضاً أن:

$$E_T = \sqrt{m^2 c^4 + P_e^2 c^2} = mc^2 + K \quad (11 - 31)$$

وأن الطاقة الحركية K التي يكتسبها الإلكترون المرتد بعد التصادم تساوي عملياً الطاقة التي يفقدها الفوتون المستطار،

$$K = h\nu - h\nu' \quad (11 - 32)$$

إذاً بتربيع المعادلة (11 - 31) والتعويض عن K من (11 - 32)، نجد:

$$P_e^2 c^2 = (h\nu)^2 + (h\nu')^2 - 2(h\nu)(h\nu') + 2(h\nu - h\nu') mc^2 \quad (11 - 33)$$

بمساواة المعادلتين (11 - 30) و(11 - 33)، نحصل على:

$$2(h\nu)(h\nu') mc^2 - 2(h\nu)(h\nu') = -2(h\nu)(h\nu') \cos\phi$$

$$mc^2(h\nu - h\nu') = (h\nu)(h\nu') [1 - \cos\phi]$$

$$mc^2 hc \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda'} \right) = h^2 c^2 \frac{1}{\lambda \lambda'} (1 - \cos\phi)$$

$$\frac{\lambda' - \lambda}{\lambda' \lambda} = \frac{h}{mc} \cdot \frac{h}{mc} (1 - \cos\phi)$$

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos\phi)$$

منه فإن:

هذه هي زحزحة كومبتون المنشودة، وهي تعتمد فقط على زاوية الاستطارة ليس على الطول الموجي الابتدائي λ ، وتتغير من 0 (لـ $\phi = 0$) وهو ما يطابق

التصادم الكشطي، حيث يصعب على الفوتون الساقط أن ينحرف) إلى $2h/mc$ $\phi = 180^\circ$ وهو ما يطابق التصادم «رأس لرأس»، حيث يعكس الفوتون الساقط اتجاهه).

في الختام لا بد من التذكير أن أثر كومبتون هو أ كمومي نقي، لا يمكن توقع ظهوره على أسس الفيزياء الكلاسيكية، فكما في إشعاع التجويف لأثر الكهروضوئي، فإن وجود ثابت بلانك في تعبير زحزحة كومبتون (11 - 34) يشير إلى أن أثر كومبتون هو ظاهرة كمومية. كذلك تشير المعادلة (11 - 34) إلى أن $\Delta\lambda \leftarrow 0$ عندما $h \leftarrow 0$.

مثل 8 أشعة سينية طولها الموجي $\lambda = 1000 \text{ pm}$ استطارت من هدف كاربوني. شوهد الإشعاع المستطار عند زاوية 90° بالنسبة للضوء الساقط. (أ) ما هي زحزحة كومبتون؟ (ب) ما هي الطاقة الحركية المنقولة للإلكترون المرتد؟

(الحل: أ) بوضع $\phi = 90^\circ$ في المعادلة (11 - 34) نحصل على:

$$\Delta\lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos\phi) = \frac{6.63 \times 10^{-34} \text{ J.S}}{(9.1 \times 10^{-31} \text{ kg})(3 \times 10^8 \text{ m/s})} (1 - \cos 90^\circ)$$

$$= 2.43 \times 10^{-12} \text{ m} = 2.43 \text{ pm}$$

(ب) من العلاقة (11 - 32) نجد أن:

$$K = h \frac{c}{\lambda} - h \frac{c}{\lambda'}$$

$$= hc \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda'} \right) = hc \left(\frac{\lambda' - \lambda}{\lambda \lambda'} \right) = hc \frac{\Delta\lambda}{\lambda(\lambda + \Delta\lambda)} = 295 \text{ eV}$$

الخلاصة

• تتوهج جميع الأجسام عند درجات الحرارة العالية بما يكفي، وإذا حصل هذا التوهج على حساب الطاقة الداخلية للجسم وتوافق مع نقصانها فيه سمي إشعاعاً حرارياً.

• تشكل القدرة الكلية المُشعة بوحدة المساحة لثقب التجويف (الجسم الأسود) فوق جميع الأطوال الموجية الشدة الإشعاعية $I(T)$ أو كثافة القدرة وتناسب مع القوة الرابعة لدرجة الحرارة المطلقة:

$$I(T) = \sigma T^4$$

حيث σ هو ثابت ستيفان - بولتزمان.

• التآلق الطيفي أو الإشعاعية الطيفية $R(\lambda)$ هو مؤشر لكيفية تغير القدرة المُشعة للجسم الأسود مع درجة الحرارة: $I(T) = \int_0^\infty R(\lambda) d\lambda$

• ينقص الطول الموجي، الذي يبلغ عنده التآلق الطيفي قيمته العظمى، عندما تزداد درجة الحرارة، وهذا يعرف بقانون فين:

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

• يعطي إشعاع بلانك (إشعاع الجسم الأسود) التوزيع الشدي أو الإشعاعية الطيفية $R(\lambda)$ في الجسم الأسود بالعلاقة المعروفة باسم قانون بلانك:

$$R(\lambda) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda KT} - 1}$$

• تحمل الطاقة في الموجة الكهرومغناطيسية في وحدات تدعى الفوتونات أو الكمات، طاقة الواحد منها بالنسبة لموجة ترددها ν هي:

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

ورفقاً لافتراض بلانك، فإن هذه الطاقة تبعث أو تمتص من الجسم بواسطة الذبذبات الذرية بمقادير ليست عشوائية بل مختارة من طاقم متقطع هوضاعفات المقدار اعلاه:

$$E = nh\nu, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

هذا يعني أن طاقة الذرة مكممة. وأن مستوياتها متساوية التباعد الفضائي

بفاصلة قدرها $h\nu$.
 • نرفق النظرية الكلاسيكية طاقة قدرها $\frac{1}{2}KT$ بكل درجة حرية يمتلكها المذبذب الذري. وبالتالي، فإن الطاقة الكلية للصلب الثلاثي الأبعاد (الذي يملك 6 درجات للحرية) هي:

$$E_{int} = 6\left(\frac{1}{2}KT\right)N_A = 3RT$$

حيث N_A هو عدد أفوجادرو و R هو الثابت العام للغازات بينما في النظرية الكمومية يرى أنشتاين أن لكل مذبذب معدل طاقة بكل اتجاه ليس KT ، بل:

$$E = \frac{h\nu}{e^{h\nu/KT_1} - 1}$$

• في التأثير الكهروضوئي يشترط ظهور الفعل بأن يكون تردد الضوء الساقط لا أكبر من تردد العتبة ν_0 للسطح الحساس للضوء ($\nu > \nu_0$) ووفقاً لأنشتاين، فإن الظاهرة الكهروضوئية يُعبر عنها بـ:

$$h\nu = \frac{1}{2} m_e v_{max}^2 + \phi$$

حيث ν دالة عمل سطح المعدن، و $\frac{1}{2} m_e v_{max}^2$ هي الطاقة الحركية العظمى للفوتوالكترون وان جهد الايقاف V_0 للالكترونات المنبعثة بواسطة الضوء ذي التردد ν يتحدد بنفس الصيغة.

$$\frac{1}{2} m_e v_{max}^2 = eV_0 = h\nu - h\nu_0$$

وهذه تعرف بنظرية انشتاين الفوتونية.

• أثر أو استطارة كومتون هي استطارة فوتونات أشعة x بواسطة الكترونات. وأن الطولين الموجيين λ و λ' للفوتونات الساقطة والمستطارة (المتبعثرة) ترتبط بزاوية الاستطارة ϕ بالعلاقة:

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \phi)$$

مسائل في البصريات الكمومية

(11 -) الاشعاع الحراري:

1 - في 1983 إكتشف القمر الصناعي الفلكي للأشعة تحت الحمراء (IRAS)

حشداً من جسيمات صلبة تحيط بالنجم فيفا، تشع باطوال موجية بحدود $32\mu\text{m}$. ما هي درجة حرارة هذه الاجسام؟

2- احسب الطول الموجي للاشعاعية الطيفية العظمى وعين منطقة الطيف الكهرومغناطيسي التي تنتمي اليها لكل من درجات الحرارة التالية: (أ) 2.7 K إشعاع خلفي كوني، (ب) جسمك، مفترضاً إن درجة حرارة الجلد 34°C ، (ج) خويط مصباح التنجستن عند درجة حرارة 1800 K ، (د) الشمس، بفرض ان درجة حرارة سطح الشمس هي 5800 K ، (هـ) اداة الانفجار النووي الحراري، بفرض أن درجة حرارة كرة النار هي 10^7 K ، (ي) الكون مباشرة بعد الانفجار الكبير، بفرض أن درجة حرارته 10^{38} K .

الجواب (أ) 1.06 mm ، أمواج ماكروية، (ب) $9.4\mu\text{m}$ ، اشعة تحت حمراء (ج) 1.6 m ، اشعة تحت حمراء، (د) 500 nm ، مرئية.

(هـ) 0.29 nm ، اشعة سينية، $2.9 \times 10^{-11}\text{ m}$ ، اشعة غاما القياسية.

3- تجويف حفظت جدرانه بدرجة حرارة 1900 K وله ثقب صغير قطره 1.00 mm . بأي معدل تهرب الطاقة خلال هذا الثقب من داخل التجويف؟ (استخدم المعادلة (1 - 11) مقسماً الشدة الاشعاعية على مساحة الثقب المعطاة)

$$\left(\frac{T}{A}\right) (T) = \delta T^4$$

4- مشع تجويفي اشعاعيته الطيفية العظمى تكون عند طول موجي $25.0\mu\text{m}$ ، في منطقة الاشعة تحت الحمراء من الطيف.

بدأت درجة حرارة الجسم تزداد، بحيث أن الشدة الاشعاعية $I(T)$ للجسم نضاعفت. (أ) ما مقدار درجة الحرارة الجديدة؟

(ب) بأي طول موجي تكون للاشعاعية الطيفية قيمتها العظمى؟

5- فرن درجة حرارته الداخلية $T_0 = 215^\circ\text{C}$ يوجد في غرفة درجة حرارتها

$T_r = 26.2^\circ\text{C}$. في الفرن يوجد ثقب صغير مساحته $A = 5.20\text{ cm}^2$ في أحد

جوانبه. ما مقدار صافي القدرة المنتقلة من الفرن إلى الغرفة؟

الجواب 1.44 W - استعن بالعلاقة (1 - 11) مع اخذ مساحة الثقب وفرق درجة الحرارة بين الفرن والغرفة بالحساب.

(11 - 2) قانون بلانك للاشعاع

6 - برهن ان الطول الموجي $\lambda_{\max}$ الذي عنده يمتلك قانون بلانك للاشعاع الطيفي (11 - 6) قيمته العظمى، يعطى بالعلاقة (11 - 4).

الجواب: للوصول إلى الحل اشتق العلاقة (11 - 6) وساويها بصفر $\frac{dR}{d\lambda} = 0$
7 - بين، بواسطة تكامل قانون بلانك للاشعاع (11 - 6) فوق جميع الأطوال الموجية، إن القدرة المشعة بالمتر المربع لسطح التجويف تعطى بالعلاقة.

$$I(T) = \left(\frac{2\pi^5 K^4}{15 h^3 c^2} \right) T^4 = \sigma T^4$$

اجعل $x = hc/\lambda KT$ ، ليصبح التكامل بالصورة $\int_0^\infty \frac{x^3 dx}{e^x - 1}$ الذي قيمته $\pi^4/15$.

(11 - 4) السعة الحرارية للصلب

8 - بين بدلالة درجة حرارة أنشتاين T_E ، بأية درجة حرارة تبلغ الطاقة

الداخلية المولية للصلب نصف قيمتها الكلاسيكية التي هي $3RT$ ؟

9 - بين أن الطاقة الداخلية المولارية E_{int} للصلب يمكن أن تكتب، طبقاً لنظرية أنشتاين للسعة الحرارية، بالصورة.

$$E_{int} = 3 RT_E \left(\frac{1}{e^x - 1} \right)$$

التي فيها $x = T_E/T$ ، T_E درجة حرارة أنشتاين $(T_E = h\nu/K)$

10 - إذا كانت درجات حرارة أنشتاين للرصاص، الألومنيوم، والبيرسليوم هي

68K، 290K، 690K على التوالي. أوجد أ) تردد المذبذبات الذرية لكل

عنصر، ب) الطاقة الفضائية ΔE بين المستويات الاهتزازية المتجاورة، و C)

ثابت النابض الفعال K .

11 - سخّن لوح من الألومنيوم كتلته 12.0g من 80K إلى 180K تحت شروط

ثبات الحجم. كم يجب تسخين اللوح طبقاً لـ أ) النظرية الكلاسيكية للسعة

الحرارية، وب) نظرية أنشتاين الكمومية للسعة الحرارية؟ إذا علمت أن درجة

حرارة أنشتاين للألمنيوم قد تؤخذ لتكون 290K.

(11 - 6) نظرية أنشتاين للفوتونات

(12 - أ) باستخدام أفضل قيم الثوابت الأساسية، الموجودة في الملحق B، برهن أن طاقة الفوتون E ترتبط بطوله الموجي λ بالعلاقة:

$$E = \frac{1240 \text{ eV.nm}}{\lambda}$$

هذه النتيجة يمكن أن تكون مفيدة في حل مسائل كثيرة.

(ب) إذا علمت أن الضوء البرتقالي ذو اللون المعين من مصباح الصوديوم العالي له طول موجي قدره 589 nm، فما مقدار الطاقة المملوكة بواسطة فوتون أولي من مثل هذا المصباح؟ (الجواب أ) 2.11 eV.

13 - ذرة تمتص فوتون طول له الموجي 375 nm وتبعث في الحال فوتوناً آخر بطول موجي 580 nm. ما مقدار صافي الطاقة الممتصة من قبل الذرة في هذه العملية؟

14 - معظم عمليات التأين الغازي تتطلب تغييرات طاقة من 1.0×10^{-18} إلى 1.0×10^{-16} J. فما هي منطقة طيف الشمس الكهرومغناطيسي المسؤولة بصورة رئيسية عن خلق الأيونوسفير في الغلاف الجوي الأرضي؟

15 - لو أردت أن تصنع خلية ضوئية معالجة في الضوء المرئي، فأأي المواد التالية تختار (التي دوال عملها مذكورة معها)؟ فانتاليوم (4.2 eV)، تنجستن (4.5 eV)، الألومنيوم (4.2 eV)، الباريوم (2.5 eV)، الليثيوم (2.3 eV)، السيزيوم (1.9 eV)؟

16 - إذا كانت الطاقة اللازمة لانتزاع الكترون من معدن الصوديوم هي 2.28 eV، فهل يُظهر الصوديوم الفعل الكهروضوئي عند تعرضه للضوء الأحمر ذو الطول الموجي $\lambda = 678 \text{ nm}$ (ب) ما هو الطول الموجي المؤهل للانبعاث الكهروضوئي من الصوديوم وما هو اللون الذي يتطابق مع هذا الطول الموجي؟

(الجواب: أ) لا، ب) 544 nm، اخضر.

17 - يصطدم فوتون ساقط بسطح الصوديوم ذو دالة العمل 2.28 eV مسبباً انبعاثاً كهروضوئياً، وعندما يطبق جهد إيقاف قدره 4.92 V ينعدم الأثر

الجواب: 172 nm.

الكهروضوئي. أوجد طول موجة الفوتون الساقط. الجواب: 172 nm.

18 - (أ) إذا كانت دالة العمل لمعدن ما هي 1.85 eV، فما هو جهد الايقاف لضوء طول موجته 410 nm؟ (ب) ما اقصى سرعة للإلكترونات الضوئية المنبعثة عند سطح المعدن.

الجواب: (أ) 1.17 V، 641 km / S.

19 - إذا كانت معطيات ميليكان للأثر الكهروضوئي بالنسبة لليثيوم هي:

الطول الموجي (nm)	433.9	404.7	365.5	312.5
جهد الايقاف (V)	0.55	0.73	1.09	1.67

فاعمل رسماً كالشكل 10 الخاص بالصوديوم، واوجد (أ) ثابت بلانك وب) دالة العمل لليثيوم.

20 - تابع (ساتيلايت) في المدار الارضي يحمل خلايا شمسية بزاوية قائمة بالنسبة لاتجاه أشعة الشمس. افرض أن الاشعاع الشمسي كان أحادياً بطول موجي 550 nm ويصل بمعدل 1.38 kW/m^2 . ماذا يجب أن تكون مساحة الواح الخلايا لكي يصل مول واحد من الفوتونات كل ثانية؟

21 - مصباح ضوء بنفسجي بطول موجي 400 nm، ومُصباح ضوء تحت احمر بطول موجي 700 nm، كل منهما بمعدل 130W. (أ) أي مصباح يشع فوتونات بمعدل أكبر، (ب) كم فوتون يفوق الواحد منهما الآخر في الثانية الواحدة؟

22 - أشعة X بطول موجي 71.0 pm تنتزع الكترونات ضوئية من ورقة (رقاقة) ذهبية من عمق الذرات. تتحرك الالكترونات المنتزعة بمسارات دائرية بنصف قطر r في منطقة مجال مغناطيسي منتظم $\vec{B}$. والتجربة تبين أن $rB = 188 \mu\text{T.m}$ (اوجد أ) الطاقة الحركية القصوى للإلكترونات الضوئية وب) الشغل المنجز لانتزاع الالكترونات من الذرات الذهبية التي تشكل الورقة.

23 - افرض أن مصباح بخار الصوديوم (W - 100) يشع طاقته بكل

الاتجاهات بصورة منتظمة بهيئة فوتونات بطول موجي مترابط $\lambda = 589 \text{ nm}$ (أ)
 بأي معدل تتبع الفوتونات من المصباح؟ (ب) عند أية مسافة من المصباح
 يصبح معدل فيض الفوتونات $\text{Photon} / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ؟ (ج) عند أية مسافة من
 المصباح يصبح معدل كثافة الفوتونات $1.00 \text{ Photon} / \text{cm}^3$ ؟ (د) احسب
 الفيض الفوتوني والكثافة الفوتونية على بعد 2.0 m من المصباح.
 الجواب: (أ) $2.97 \times 10^{20} \text{ s}^{-1}$ ، (ب) 48.600 km ، (ج) 281 m
 (د) $5.91 \times 10^{18} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$ ، $1.97 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$

(11 - 7) أثر كومبتون

24 - فوتون أشعة X / منفرد طوله الموجي 41.6 pm . احسب (أ) طاقة
 الفوتون، (ب) تردده، و(ج) كمية حركته.
 الجواب: (أ) 29.8 keV ، (ب) $7.19 \times 10^{18} \text{ Hz}$
 (ج) $1.59 \times 10^{-23} \text{ kg} \cdot \text{m/s} = 29.8 \text{ keV} / c$

25 - فوتونات طولها الموجي 2.17 pm تسقط على الكترونات حرة. (أ) اوجد
 طول موجة الفوتون المستطار بزاوية 35.0° من اتجاه السقوط، (ب) هل يكون
 للفوتون المستطار نفس الطول الموجي إذا كانت زاوية الاستطارة 115° بدلاً
 من 35.0° ؟ الجواب: (أ) 2.87 pm ، (ب) 5.89 pm .

26 - برهن أن الخسارة الجزئية في طاقة الفوتون أثناء التصادم الكومبتوني
 $\Delta E / E$ تعطي بالعلاقة.

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{h\nu'}{mc^2} (1 - \cos \phi)$$

27 - أوجد أكبر إزاحة كومبتونية في الطول الموجي بين الفوتون والبروتون
 الحر. الجواب: 2.64 fm .

28 - فوتون أشعة X طوله الموجي $\lambda = 9.77 \text{ pm}$ يستطير إلى الخلف بواسطة
 إلكترون ($\phi = 180^\circ$). أوجد (أ) التغير في طول موجة الفوتون، (ب) التغير في
 طاقة الفوتون، و(ج) الطاقة الحركية النهائية للإلكترون.

الجواب: (أ) 4.86 pm ، (ب) 42.1 keV ، (ج) 42.1 keV .

29 - بأية زاوية يجب أن يستطير فوتون طاقته 215 keV بواسطة إلكترون
 حر بحيث أن الخسارة في طاقته تبلغ 10.0% ؟

الفصل الثاني عشر

الليزر

الليزر هو مصدر ضوئي ينتج حزمة عالية التشاكة (الزامن أو التماسك) وضوءاً أحادي اللون تقريباً كنتيجة لانبعاث تعاوني من ذرات عديدة. إن اسم الليزر مشتق من العبارة الانجليزية.

“Light amplification by stimulated emission of radiation”, أي الضوء المضخم بواسطة الانبعاث القسري (أو التحريضي) للإشعاع. يقوم عمل الليزر على أساس التفاعل بين الضوء والمادة ويستند إلى مبدئين أساسيين: مبدأ الفوتونات، ومبدأ المستويات الطاقية الذرية. إضافة إلى مفهومين جديدين هما الانبعاث القسري (أو التحريضي) والتوزيع المعكوس.

(12 - 1) خصائص أشعة الليزر

أشعة الليزر هي من حيث الطبيعة أشعة كهرومغناطيسية تتواجد في معظم مناطق الطيف الكهرومغناطيسي بدءاً من المنطقة تحت الحمراء مروراً بالمنطقة المرئية وفوق البنفسجية حتى الأشعة السينية، أي أنها تغطي مدى (نطاقاً) من الأطوال الموجية يمتد من أجزاء النانومتر إلى أجزاء المليمتر ($0.1\text{nm} - 1.0\text{mm}$) اعتماداً على المادة الفعالة (الوسط المضخم) المتجه لأشعة الليزر.

نظهر أشعة الليزر خصائص فريدة متنوعة وجذرية تميزها عن مصادر الضوء العادي، أهمها:

1. الاتجاهية المفرطة التي تتبع من عاملين، أولهما أن حزمة ضوء الليزر تكون فقط من الأشعة المنبعثة من المادة الفعالة في منظومة الليزر بموازاة محور التجويف الليزري (بطن الليزر)، ثانيهما أن زاوية تفرق حزمة الليزر صغيرة للغاية قياساً بزاوية تفرق حزمة البروجكترات (أصغر منها بـ 10 آلاف مرة). فبقعة الشعاع الليزري المرسل إلى سطح القمر لا يزيد قطرها عن 10km تقريباً مقابل مئات الكيلومترات لقطر بقعة الضوء العادي. ما بطني لأشعة الليزر امتياز بث طاقتها إلى مسافات كبيرة جداً، بل وفلكية. الأمر الذي ساعد على خلق قاعدة تحقيق انجازات هائلة في مثال الاتصالات كبث المكالمات التليفونية والصور التلفزيونية وغيرها. ما قاد في

النهاية إلى ما يعرف بثورة المعلوماتية.
2 - الأحادية المفرطة، وتعني التركيب الطيفي المفرط الضيق لحزمة الليزر. إن العرض الطيفي لحزمة الليزر أقل بكثير مما لجميع مصادر الضوء الأخرى، وكذلك الأمواج الراديوية. فعرض خط أشعة ليزر العقيق هو 3.0×10^{11} Hz وهو خط ضيق في قياسات علم الأطياف، ويمكن الحصول على أضيق منه من بعض ليزرات الأجيال الجديدة. على أن هناك ليزرات أشباه الموصلات وليزرات الصبغة يكون شريط اشعاعها عريض جداً، ما يمكن من استخدامه في التطبيقات العملية.

3 - التشاكه (أو التزامن) المفرط: إن أهم ما تمتاز به أشعة الليزر هو تزامن أمواجه العالي، أي ترابطها وتماسكها واحتفاظها بعلاقة طورية ثابتة لزمان غير محدود: وهي صفة لا تتمتع بها مصادر الضوء العادية.

4 - شدة وأمد إشعاع الليزر
تظهر الليزرات المختلفة شدة وأماداً مختلفة. فشدة النبضة الليزرية الواحدة (في النظام النبضي المنفصل كما في ليزرات الحالة الصلبة - ليزر العقيق، ليزر النيدميوم، وغيرهما) تتراوح من بضع ملي واطات (30 mW) في ليزر النيدميوم وأقل منها في ليزر العقيق) إلى آلاف ملايين الكيلوواطات كما في ليزر النيدميوم. أما أمدها، فيتراوح، في نظام التوليد الحر (توليد الكمات الضوئية) بين 10^{-3} إلى 10^{-4} s. وفي المولدات التي تسمى أحادية النبض (التي تولد نبضات متساوية الطول الموجي)، فإن أمد إشعاع النبضة يبلغ بحدود 10^{-8} s. وفي السنوات الأخيرة من القرن الماضي (القرن العشرين) ثم صنع ليزرات ذات أماد نبضة (استدامة الإشعاع في تجويفها الضوئي الرنيني) بحدود البيكوثانية (10^{-12} s).

لكي نفهم ماذا نعني بشدة أشعة الليزر أو قدرته المحمولة (التي تحملها أمواجه) بالسنتيمتر المربع الواحد، ويعبر عنها بالواط عادة، وهنا يفهم بالواط / سم²، أي جول / سم². ثانية، فانه لصهر 1 cm^3 من المعدن يلزمنا طاقة قدرها 50 جول. فاذا استخدمنا ليزراً قدرته 500W فإننا نستطيع من حيث المبدأ (حسابياً) أن نصهر 10 cm^3 من المعدن خلال زمن قدره ثانية

واحدة. رغم أن جزءاً كبيراً من الطاقة تتبدد على سطح المعدن. سواء بالانعكاس أو عن طريق حجزها بواسطة الغيمة البخارية المتكونة على سطح المعدن.

ولكي نوضح القدرات الهائلة لليزر نأخذ ليزر العقيق وليزر النيديميوم. فطاقة النبضة غير العملاقة جداً هي 50 جول وأمدتها (زمن تكون اشعاعها) هو 10^{-3} s. وهذا يعطينا قدرة مقدارها $(5.0 \times 10^5 \text{ W})$ في 1 cm^2 بينما تبلغ قممات الليزر (وقد فاقت الآن) العملاقة الـ 10^{15} W/cm^2 . وهذه طاقة هائلة قياساً بقدرة ضوء الشمس المتصل ($7 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$).

(12-2) مبادئ عمل الليزر

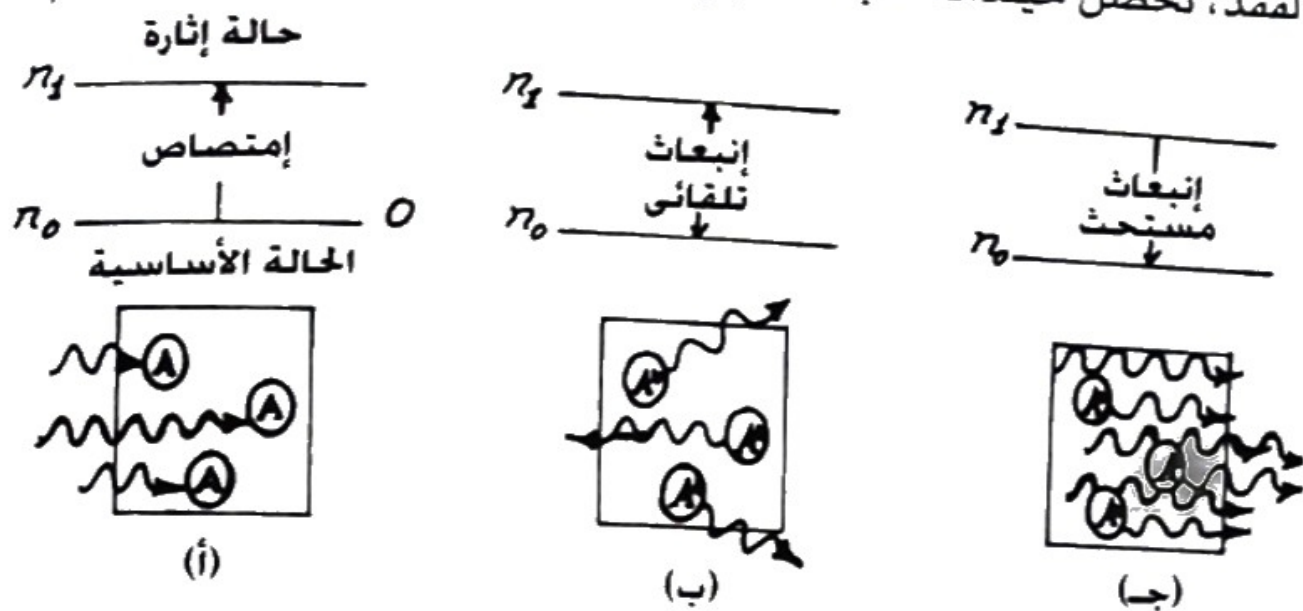
يستند الجانب النظري لعمل الليزر إلى مبدئي الفوتونات والمستويات الطاقة النظرية. إضافة إلى المفهومين الجديدين - الانبعاث القسري والتوزيع العكوس - على أن ذلك يتم في حدود امكانيات تفاعل المادة الفعالة والضوء. وهناك ثلاث عمليات يتضمنها هذا التفاعل. تشكل في النهاية مبادئ عمل الليزر، هي:

1. الامتصاص: إذا سقط طيف مستمر على وسط شفاف (زجاج ملون، بلورة، أي صلب أو سائل شفاف)، وكانت ذرات هذا الوسط (أو المادة الفعالة) تمتلك حالة مثارة أو متهيجة بطاقة E فوق الحالة الأساسية فإن هذه الذرة (أو الجزيئ)، أو الذرات في الحالة الأساسية تستطيع أن تمتص فوتوناً بتردد لا يعطى بالعلاقة:

$$E_2 - E_1 = h \quad (12-1)$$

وإذا امتلكت الذرة N من الحالات المثارة، فإنها تستطيع أن تمتص أكثر من فوتون. هذه العملية تدعى بالامتصاص، وهي موضحة على الشكل 1 أ من أجل غاز في إناء شفاف. فالذرة A في الحالة الأساسية تمتص فوتوناً وترتفع إلى الحالة المثارة الأعلى طاقة E وتدعى حينئذ ذرة مثارة أو متهيجة (ويرمز لها بـ A^*) فتمكث لبعض الوقت (حوالي 10^{-8} s) ومن ثم تعود إلى حالة الأساسية بواسطة اصدارها (بعثها) لفوتون بنفس التردد كما الفوتون

الممتص الأصلي. هذه العملية تدعى الانبعاث التلقائي، وفيه يكون اتجاه وطور الفوتون المنبعث عشوائيين (شكل 1 ب). أما المبدأ الثالث لعمل الليزر، فهو الانبعاث المُستحث (أو القسري أو التحريضي) شكل 1 ج، وفيه يواجه الفوتون الساقط (هو نفسه الذي اثار الذرات في الحالة الاساسية) الذرة المثارة، وينوع من التأثير الرنيني (أو التحريضي التجاوبي)، يُجبر الفوتون الذرة على بعث فوتون آخر بنفس التردد، بنفس الاتجاه، ونفس الاستقطاب كما الضوء الساقط. وسيكون للفوتونين (المحرض والمنبعث) علاقة طورية محدودة فيبزرغان سوية كإشعاع متزامن (متشاكه). دخل فوتون واحد في المنظومة الليزرية (الفوتون المحرض) وخرج فوتونان منها. وإذا أمكن عكس الاثنين ليخرجاً أربعة وعكس الأربعة ليخرجوا ثمانية، وهكذا حتى يصبح الكسب داخل التجويف الضوئي الرنيني الليزري (بطن الليزر) أكبر من الفقد، تحصل حينذاك النبضة الليزرية عالية الطاقة أو الضوء المضخم.



شكل 1

شكل 1 ثلاث عمليات تفاعل بين الذرة والاشعاع.

شكل 1 يونغ 1122 شكل 20 - 40

يصف الفيزيائيون احياناً الانبعاث المستحث بواسطة سمات معينة تعزى إلى الكينونة الخاصة للجسيمات. فالفوتونات ميّالة إلى الجماعية، والفوتون يجب أن يكون مع الفوتونات الأخرى المطابقة له (التي تماثله)؛ على خلاف الالكترونات، المتنافرة في الطبيعة.

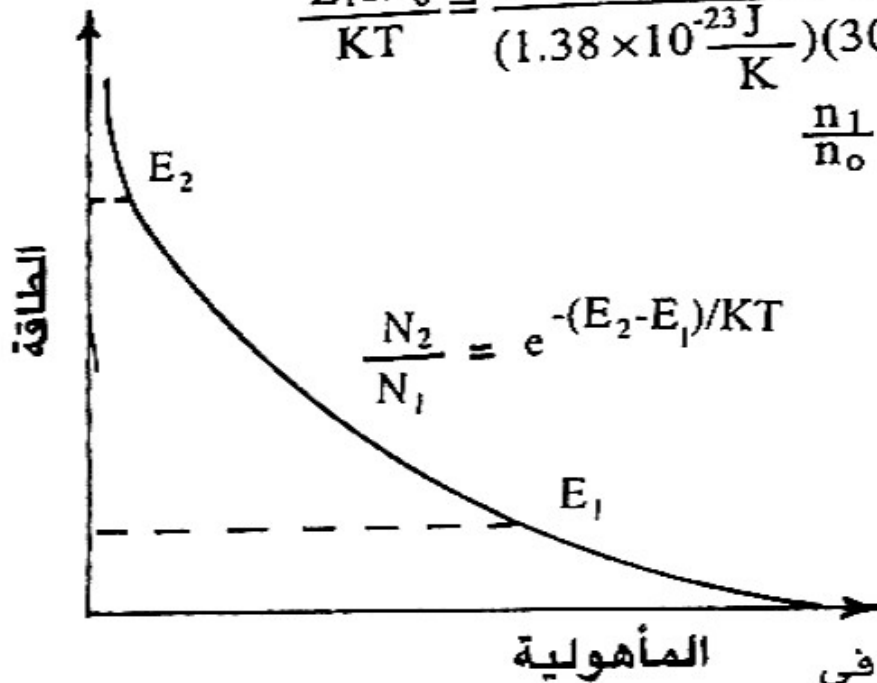
لفهم الانبعاث القسري من الذرات في الحالات المثارة، يلزمنا أن نعرف شيئاً ما حول عدد الذرات في كل حالة طاقة مختلفة. وهذا في الغاز يتحدد بواسطة دالة توزيع ماكسويل - بولتزمان، التي تنص أنه عندما يكون النظام في توازن حراري عند درجة الحرارة المطلقة T ، فإن عدد الذرات n في الحالة الطاقية E يتناسب مع العامل الأسّي $e^{-E/KT}$ (المنحني شكل 2) حيث k هو ثابت بولتزمان، و E هنا هي الطاقة الداخلية للذرة، وبسبب الإشارة السالبة للعامل الأسّي، فإن ذرات قليلة ستكون في الحالات الطاقية العليا، كما يجب أن نتوقع، فإذا كانت E_0 هي الحالة الطاقية - الأساسية (وتدعى أحياناً بالحالة الأرضية أو حالة الهمود) و E_1 هي طاقة الحالة المثارة (شكل 2)، فإن نسبة عددي الذرات في الحالتين هي:

$$\frac{n_1}{n_0} = \frac{e^{-E_1/KT}}{e^{-E_0/KT}} = e^{-(E_1 - E_0)/KT} \quad (12 - 2)$$

وعلى سبيل المثال، لو فرضنا أن الفرق بين طاقتي الحالة المثارة الأولى E_1 والحالة الأساسية E_0 يساوي $E_1 - E_0 = 2.0 \text{ eV} = 3.2 \times 10^{-19} \text{ J}$ وهو المقدار العادي لطاقة فوتونات الضوء المرئي، فعند درجة حرارة مطلقة $T = 3000 \text{ K}$ (وهي درجة حرارة الفتيلة في المصباح الضوئي المتوهج)، فسيكون مقدار الأس:

$$\frac{E_1 - E_0}{KT} = \frac{3.2 \times 10^{-19} \text{ J}}{(1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K})(3000 \text{ K})} = 7.73$$

ومنه، فإن: $\frac{n_1}{n_0} = 0.00044$



شكل 2

شكل 2 مأهولية المستويات الطاقية في التوازن الحراري (توزيع ماكسويل - بولتزمان (12 - 1)).

هذا يعني أن جزء الذرات في الحالة الطاقية 2.0eV فوق الحالة الأساسية صغير للغاية رغم درجة الحرارة العالية. إن النقطة الأساسية هنا هي أنه عند أية درجة حرارة معقولة لا توجد ذرات كافية في الحالات المثارة لظهور أي مقدار ممكن ادراكه للانبعاث القسري من هذه الحالات.

(12 - 3) الضخ

يمكن زيادة عدد الذرات في الحالات المثيجة بارسال حزمة من شعاع بتردد $\nu = E/h$ مطابقاً للفرق الطاقى $E = E_1 - E_0$ خلال الاناء (الحاوي للغاز أو السائل) أو خلال الصلب البللوري. تمتص بعض الذرات الفوتونات ذات الطاقة E وترتفع إلى حالة مثيجة أعلى، فتزداد نسبة المأهولية n_1/n_0 . ولكن لأن n_0 هي أصلاً أكبر بكثير من n_1 ، لذا يلزمنا حزمة ضوئية هائلة الشدة لزيادة n_1 إلى قيمة قابلة للمقارنة مع n_0 . إن المعدل الذي تمتص عنده الطاقة من الحزمة بواسطة ذرات الحالة الأساسية n_0 أكبر بكثير من المعدل الذي تضاف عنده الطاقة إلى الحزمة بواسطة الانبعاث القسري من الذرات المثارة n_1 المخلخلة نسبياً.

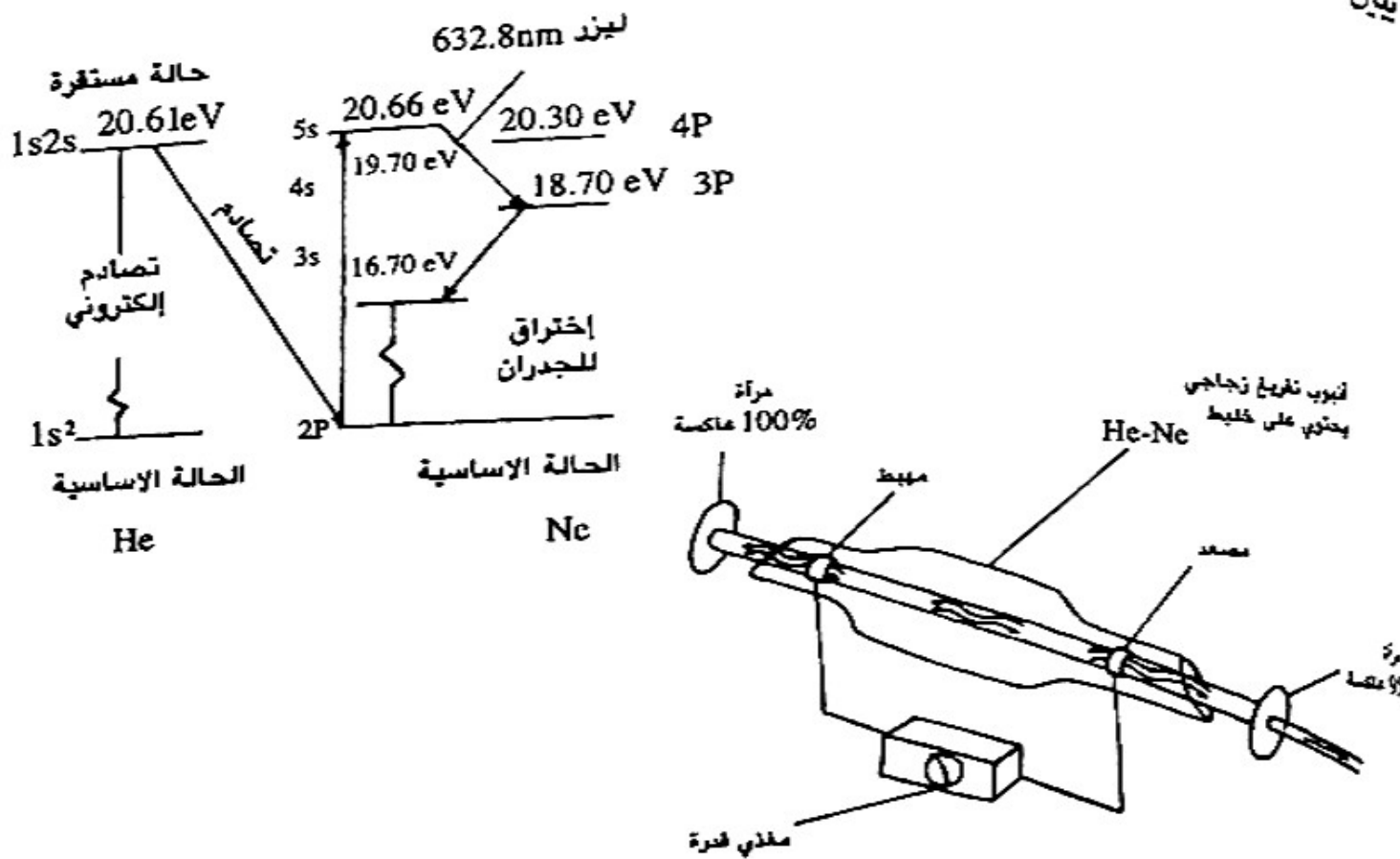
إذن يلزمنا خلق حالة لا توازن تزداد فيها ذرات الحالة المثارة n_1 زيادة ملموسة قياساً بقيمة التوازن العادية المعطاة بتوزيع ماكسويل - بلوتزمان (1 - 12)، ومثل هذه الحالة تدعى بالتوزيع المعكوس. فعندما تصبح n_1 كبيرة بما يكفي، فإن معدل الإشعاع الطاقى بواسطة الانبعاث المستحث يفوق فعلياً معدل الامتصاص. حينذاك يؤثر النظام كمصدر للإشعاع بطاقة فوتونية E . علاوة على ذلك، لأن الفوتونات هي نتاج الانبعاث المستحث، فهي جميعها تملك نفس التردد، الطور، الاستقطاب، والاتجاه. ومن ثم، فإن الإشعاع الناتج أكثر تزامناً من ضوء المصادر العادية الذي لا يكون فيه انبعاث الذرات المفردة متمحوراً. هذا الانبعاث المتزامن هو ما يحدث تماماً في الليزر.

طرق احداث التوزيع المعكوس

١. الضخ الكهربائي بواسطة مصابيح التفريغ الغازي.

يمكن ان يدرك التوزيع المعكوس الضروري بطرق مختلفة: والمثال الشائع هنا هو ليزر الهليوم - نيون، الكثير الاستعمال والرخيص الثمن والمتاح في مختبرات الطلبة غير المتخرجين. إن خليط الهليوم - نيون، وكلا الغازين تحت ضغط من رتبة 10^2 pa (10^{-3} atm)، يُحكم في إنحباس (انبوب) زجاجي مزود بقطبين كهربائيين. وعندما يطبق جهد عالي كفاية. يحدث تفريغاً متوهجاً. فالتصادمات بين الذرات المتأينة والالكترونات الحاملة لتيار التفريغ تثير الذرات إلى حالات طاقية مختلفة.

يبين الشكل 3 مخططاً للمستويات الطاقية للنظام.



شكل 3 (أ)

شكل 3 (ب) تخطيط المستويات الطاقية لليزر الهليوم - نيون. (ب) عمل الليزر، ينعكس الضوء المنبعث بواسطة الالكترونات العائدة إلى الحالات الطاقية الدنيا، ينعكس بين المرآتين، بحيث تستمر محرضة على انبعاث الضوء المتشابه أكثر فأكثر. إحدى المرآتين مثقبة جزئياً وتسمح للحزمة الضوئية العالية الشدة بمغادرة تجويف الليزر.

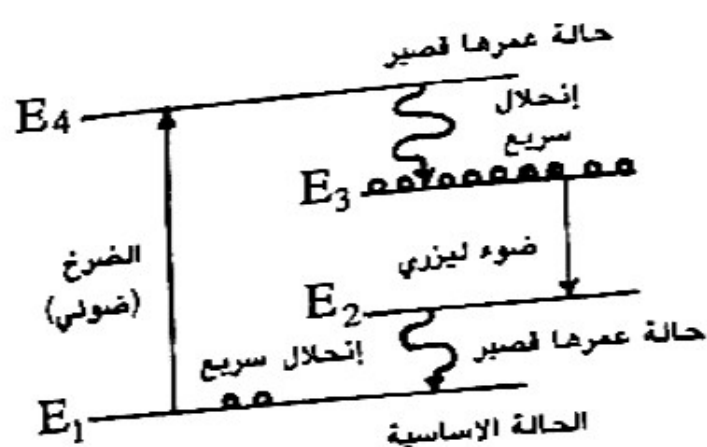
لقد استخدمت في الشكل مجموعة رموز لتدل على مختلف المستويات الطاقة، مثل $1s$ ، $3p$ ، و $5s$ ، تعزو الى حالات الالكترونات في الذرات وبسبب القيود المفروضة بقوة انخفاض كمية الحركة الزاوية، فان ذرة الهليوم بالكترون مثار إلى الحالة 25 لا تستطيع أن تعود إلى الحالة الأساسية ($1s$)، بإصدارها يلفوتون طاقته 20.61 eV ، كما قد نتوقع أن يحدث، ومثل هذه الحالة، التي يستحيل فيها انبعاث فوتون مفرد، تدعى حالة مستقرة. ولهذا، فان ذرات الهليوم تتكدس في الحالة المستقرة $2s$ ، خالقة بذلك توزيعاً معكوساً.

من جهة أخرى، تستطيع ذرات الهليوم أن تفقد طاقتها عن طريق تصادمات التبادل - الطاقى مع ذرات النيون الموجودة بداية في الحالة الأساسية. إن ذرة الهليوم $2s$ ، بطاقتها الداخلية 20.61 eV وقليل من طاقة حركية اضافية، تستطيع ان تتصادم مع ذرة نيون في الحالة الأساسية، مثيرة إياها إلى الحالة المثيعة $5s$ عند طاقة 20.66 eV ، لتهبط من ثم إلى الحالة الأساسية $1s$ ، وهكذا، أصبحت لدينا الآلية الضرورية لتحقيق التوزيع المعكوس في النيون، محدثين اكبر توزيع (مأهولية) في الحالة $5s$ قياساً بمأهولية الحالة $3s$.

ومن ثم، فإن الانبعاث القسري أثناء الانتقالات من الحالة $5s$ الى الحالة $3s$ ينتج في انبعاث الضوء العالي التزامن عند الطول الموجي 632.8 nm ، كما يظهر في التخطيط. عملياً، ترسل الحزمة خلفاً وأماماً خلال الفاز عدة مرات بواسطة مرآتين متوازيتين (شكل 3 ب)، بحيث تحرضان انبعاث الفوتونات من عدة ذرات مثيعة قدر المستطاع. وهنا يجب أن تكون إحدى المرآتين شفافة جزئياً، بحيث تسمح لجزء من الحزمة بالبروغ منها كحزمة داخلية. وصافي نتيجة هذه العمليات هو حزمة من الضوء (1) عالية الشدة جداً، (2) وغالباً تكون متوازية تماماً، (3) مضطرة الاحادية اللونية، و(4) متزامنة خصوصاً عند جميع النقاط داخل المقطع العرضي المعطى.

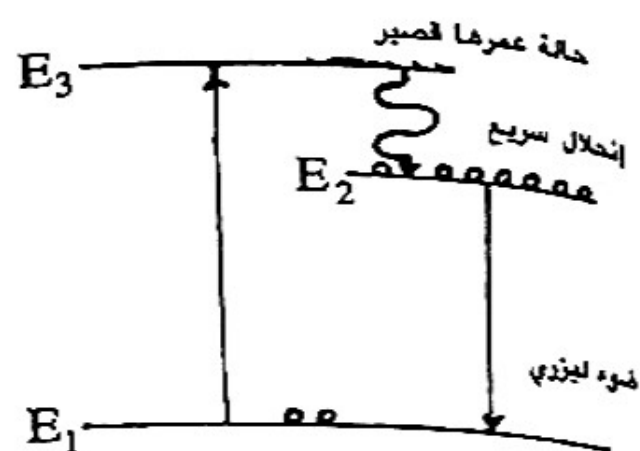
2 - الضخ الضوئي في الضخ الضوئي، وخلافاً للضخ الكهربائي (شكل 2)، حيث أستخدم الهليوم ذو المستويين الطاقيين، يشترط ان تمتلك المادة

الليزرية (المادة الفعالة أو الوسط المضخم في المنظومة الليزرية) عدة مستويات طاقية، أبسطها نظام المستويات الطاقية الثلاثي (شكل 4)، كما في ليزر الياقوت والرباعي (شكل 5) كما في ليزر النيديميوم.



شكل 5

شكل 5 التخطيط الأساسي الرباعي المستويات الطاقية، الحالة شبه المستقرة E_3 هي الحالة الليزرية وهي أكثر مأهولة من الحالة E_2 .



شكل 4

شكل 4 التخطيط الأساسي الثلاثي المستويات الطاقية للعملية الليزرية. الحالة شبه المستقرة E_2 مسكونة أكثر من الحالة الأساسية E_1 .

تُضخ الذرات من الحالة الأساسية E_1 إلى الحالة المثيجة E_3 في نظام المستويات الطاقية الثلاثي (شكل 3) عن طريق إمتصاصها للطاقة الضوئية، يستخدم هنا عادة مصدر طيف مستمر شديد يحيط بالمادة الليزرية (مصباح ومضني). تتحلل الذرات سريعاً من الحالة E_3 إلى الحالة E_2 . ولكي يظهر الفعل الليزري، يجب أن تكون الحالة E_2 شبه مستقرة، وهذا معناه أنه يجب أن يكون متوسط عمرها طويل نسبياً قياساً بزمان الانحلال الحاصل بواسطة الانبعاث التلقائي من E_3 إلى E_2 ، لذلك تتراكم الذرات في E_2 ، ما يكسبها تفوقاً سكانياً متزايداً مقابل نقصان مستمر في مأهولية الحالة الأساسية E_1 ، وهذا هو شرط التوزيع المعكوس، حينذاك يستطيع فوتون تائه مرند أن يقدر ذرات أو إلكترونات مثارة أخرى (وهي ذرات موجودة في حالات طاقية أعلى) لتُصدر فوتونات مماثلة، كما هو الحال في المفرقات النارية التي تنفجر لتفجر مفرقات أخرى في ما يعرف بتيهور حوادث

الانبعاث القسري أو التفاعل السلسلي، ومع تعاضد عدد الفوتونات مع استمرار هذا التفاعل فإنها تصبح جزءاً من موجة مشتركة تزداد شدتها إلى أن تنبثق من إحدى مرآتي تجويف الليزر بهيئة حزمة هائلة التركيز والشدة. والشئ نفسه يحدث في نظام المستويات الطاقية الأربعة (شكل 4) في ليزر النيديميوم، ولكن هنا لا يحدث الفعل الليزري بين حالة مثارة والحالة الأساسية، بل بين حالتين مثارتين، هما الحالة E_3 شبه المستقرة والطويلة العمر نسبياً والحالة E_2 القصيرة العمر والفارغة دائماً من الذرات تقريباً.

3 - الضخ بدفع الإلكترونات والثقوب
في ليزرات أشباه الموصلات يتحقق التوزيع المعكوس بتحريك الإلكترونات والثقوب إلى الوصلة $p-n$ مع مثال كهربائي مستقر، فيحصل تركيز للثقوب (التي تسلك سلوك شحنات موجبة) في الجانب p من الوصلة وتركيز للإلكترونات في الجانب n ، ما يخلق تيهوراً من جهة الإلكترونات نحو الثقوب للاتحاد بها وخلق أزواج من الإلكترون - ثقب، وإثناء ذلك يحصل الفعل الليزري.

4 - الضخ بواسطة التفاعل الكيميائي
في أحد نماذج الليزرات الكيميائية يرتب التفاعل الكيميائي الجزيئات في الحالات شبه المستقرة المثارة، خالقاً بذلك أغلبية لعددها قياساً بعدد الذرات في الحالة الأساسية أو في حالات طاقية أدنى.
في ليزر غاز ثاني أوكسيد الكربون الديناميكي ينتج التوزيع المعكوس من التمدد السريع للغاز.

في ليزرات الإلكترون - الحر وليزرات أشعة X يتحقق التوزيع المعكوس بواسطة الانفجارات النووية الصغيرة.

في الميزر (المشتق من عبارة Microwave amplification by stimulated emission of radiation) الذي يعمل على أساس التوزيع المعكوس في الجزيئات، باستخدام مستويات طاقية أكثر اقتراباً فضائياً، أي تلك التي فواصلها الفضائية ΔE صغيرة جداً، ما يجعل الإشعاع القسري بامواج ذات أطوال موجية كبيرة نسبياً قياساً بالأطوال الموجية للضوء المرئي أو فوق البنفسجي، أي أمواج ميكروية.

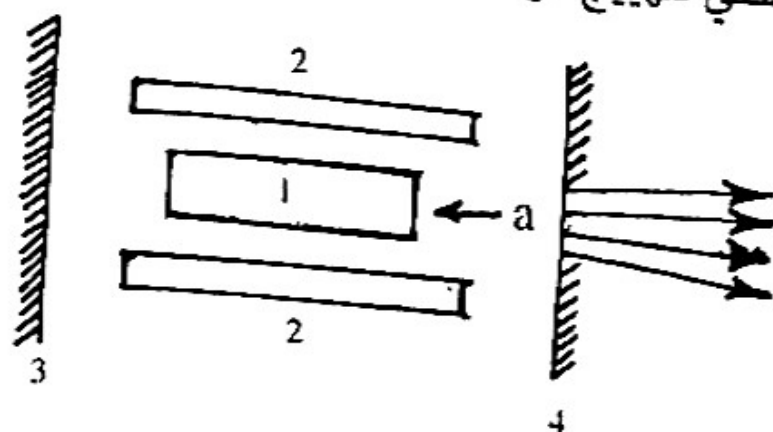
لضمان شدة عالية للتيار الضوئي الخارج من القضيب المضخم (المادة الليزرية) لا بد من منظومة ليزرية تعرف بالتجويف الضوئي الرنيني أو بطن الليزر، ويدعى اختصاراً بالمرنان الليزري، على غرار الانبوب الرنيني الصوتي.

يتكون المرنان من المادة الفعالة أو الوسط المضخم (الذي قد يكون صلباً، كتضيب الياقوت في الليزر الياقوتي أو قضيب من الزجاج المطعم في ليزر النيديميوم، أو سائلاً أو غازاً)، أنظمة الضخ، ومرآتين (شكل 6). جوهر طريقة التضخيم الضوئي بواسطة المرنان يكمن في الزيادة الاصطناعية (أو الفنية) لمسار الضوء داخل المادة الفعالة، ولتوضيح المسألة نفترض أن معامل انعكاس المرآة 3 على الشكل 6 هو 100 %، والمرآة 4 هو 99 %. بينما تضخيم التيار الضوئي لمرور واحد للضوء خلال القضيب 1 يساوي 10، مثلاً. نفترض أن فوتوناً واحداً فقط توجه من النقطة a إلى القضيب 1 ولأن تضخيم التضيب يساوي 10، إذن ستصل إلى المرآة 3 10 فوتونات. وبعد انعكاسها عنها ستمر مرة أخرى خلال القضيب، وكل فوتون يُضخم بواسطة التضيب 10 مرات.

حينئذ ستصل إلى المرآة 4 100 فوتون، ينعكس 99 % منها مرة أخرى، وينفذ فوتون واحد إلى الخارج. بعد انجاز دورة واحدة أخرى يصبح في التيار الضوئي الليزري 9900 فوتون، ينفذ 99 منها إلى الخارج والـ 9801 فوتون الباقية تبدأ دورة جديدة، يزداد عدد الفوتونات مرة أخرى 100 مرة. هذه الاعادة المتكررة لعملية التضخيم بواسطة المرآتين تعادل بتأثيرها الزيادة المعوضة لطول التضيب الفعال. في كل دورة يخرج عند بلوغ المرآة 4 1 % من الفوتونات الضوئية إلى الخارج، وبسبب الكثافة الكبيرة جداً للطاقة الشعاعية الناشئة بين المرآتين، فإن التيار الضوئي المنبثق خارج حدود المرنان يكون كبيراً، هذا التيار يدعى الشعاع الليزري.

فد يكون معامل تضخيم المادة الفعالة كبيراً (أكبر من 10 مثلاً)، ففي هذه الحالة تستخدم مرايا ذات معاملات انعكاس عالية جداً. وفي الحالة

المعاكسة، يتم اختيار مرآيا ذات قدرات انعكاسية قليلة. ينبثق الشعاع الليزري فقط عند تحقيق الشرط الهام: أن تضخم التيار الضوئي خلال دورة واحدة (ذهاب وإياب الضوء داخل القضيب) يجب أن يكون أكبر أو يساوي على الأقل الخسارة في طاقة التيار الضوئي عند خروجه خارج حدود المرنان بمعنى أن شدة التيار الضوئي الليزري خارج حدود المرنان أكبر أو تساوي على الأقل شدة التيار الضوئي داخل بطن الليزر (الذي أعطي لتهييج ذرات المادة الفعالة).



شكل 6

شكل 6 عناصر المنظومة الليزرية بواسطة الضخ الضوئي

مثال 1

ليزر ثلاثي المستويات (شكل 3) يصدر ضوءاً ليزرياً بطول موجي 550 nm، بالقرب من مركز الحزمة المرئية، أ) إذا توقفت آلية الضخ، فكم ستكون نسبة إسكان المستوى E_2 إلى المستوى الأساسي E_1 عند درجة حرارة الغرفة $T = 300\text{ K}$ ؟ ب) عند أية درجة حرارة تصبح هذه النسبة $\frac{1}{2}$ ؟
الحل: من المعادلة (12 - 1)، نجد أن الفرق الطاقي بين المستويين E_2 و E_1 هو:

$$E_2 - E_1 = h\nu = h \frac{c}{\lambda} = \frac{(6.62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})(3 \times 10^8 \text{ m/s})}{(550 \times 10^{-9} \text{ m})}$$

$$= 2.26 \text{ eV}$$

ومتوسط طاقة التهييج الحراري kT هو:

$$kT = (1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}) \left(\frac{1}{1.6} \times 10^{19} \right) \left(\frac{\text{eV}}{1 \text{ J}} \right) (300 \text{ K}) = 0.026 \text{ eV}$$

ومن المعادلة (12 - 2)، نجد:

$$\frac{n_2}{n_1} = e^{-(2.26 \text{ eV}) / (0.026 \text{ eV})} = 1.3 \times 10^{-38}$$

وهذا رقم صغير لحد لا يصدق، ولكنه على العموم ليس غير مقبول. فالذرة التي تملك معدل طاقة تهيج حراري قدرها 0.026 eV فقط لن تمنح الطاقة التي مقدارها 2.26 eV إلى ذرة أخرى عند التصادم.

(ب) نعوض عن $\frac{n_1}{n_2}$ بـ $\frac{1}{2}$ ونأخذ اللوغاريثم الطبيعي لطرفي العلاقة (2 - 12)، ونحلها بالنسبة لدرجة الحرارة T نجد:

$$T = \frac{E_2 - E_1}{K \ln \frac{1}{2}} = \frac{2.26 \text{ eV}}{(8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K})(0.693)} = 37800 \text{ K}$$

وهذه أسخن من سطح الشمس، وبالتالي، فإن آلية التهيج الحراري غير مجدية.

مثال 2

العنصر الفعال في منظومة ليزر الياقوت هو بلورة ياقوت اصطناعية لها شكل اسطواناني طولها 6.0 cm وقطرها 1.0 cm . والياقوت نفسه يتكون من ثاني أكسيد الألومنيوم Al_2O_3 الذي أُستبدل فيه أيون الومنيوم بأيون كروم Cr^{3+} من بين 3500 أيون الومنيوم. يعطي أيون الكروم اللون الوردي للبلورة بوصفه شائبة تظهر صفاءً امتصاصية ضوئية طاغية. فضلاً عن ذلك، تفسر أيونات الكروم أهلية الياقوت ليزرياً بواسطة نظام المستويات الطاقية الثلاثة (شكل 4) عند طول موجي 694.4 nm . بفرض وجود جميع أيونات الكروم في حالة شبه مستقرة تطابق الحالة E_2 في الشكل 4 ولا يوجد منها أية أيونات في الحالة الأساسية E_1 . ما مقدار الطاقة المتاحة للاطلاق في نبضة منفردة لضوء الليزر إذا كانت جميع هذه الأيونات تعود إلى الحالة الأساسية في سلسلة أحداث تفاعلية لانبعاث مستحث منفرد؟ إذا كانت كثافة ثاني أكسيد الألومنيوم $\rho = 3700 \text{ kg / m}^3$ وكتلته المولية M هي 0.102 kg / mol .

الحل: عدد أيونات الألومنيوم Al^{3+} يساوي:

$$N_{\text{AL}} = \frac{2N_{\text{Am}}}{M} = \frac{2N_{\text{A}}\rho V}{M}$$

حيث m كتلة اسطوانة الياقوت والعامل 2 يعبر عن وجود أيونين الومنيوم في كل جزيء من Al_2O_3 . أما V ، فهو حجم اسطوانة الياقوت ويساوي:

$$V = (\pi r^2)(h) = \left(\frac{1}{2} \times 10^{-2} \text{ m}\right)^2 \pi (6 \times 10^{-2} \text{ m})$$

$$= 4.7 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

ومنه، فإن:

$$N_{AL} = \frac{(2)(6.0 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1})(3.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3)(4.7 \times 10^{-6} \text{ m}^3)}{0.102 \text{ kg/mol}}$$

$$= 2.1 \times 10^{23}$$

وبالتالي، فإن عدد أيونات الكروم Cr^{3+} هو:

$$N_{Cr} = \frac{N_{AL}}{3500} = \frac{2.1 \times 10^{23}}{3500} = 6.0 \times 10^{19}$$

أما طاقة فوتون الانبعاث المستحث، فهي:

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} = \frac{(4.1 \times 10^{15} \text{ eV})(3.0 \times 10^8 \text{ m/s})}{694 \times 10^{-9} \text{ m}}$$

$$= 1.8 \text{ eV}$$

والطاقة الكلية المتاحة لكل نبض ليزري هي:

$$U = N_{Cr} E = (6.0 \times 10^{19})(1.8 \text{ eV} \frac{1.6 \times 10^{19} \text{ J}}{1 \text{ eV}})$$

$$= 17 \text{ J}$$

ومثل هذه الطاقة النبضية الكبيرة هي قيمة واقعية يمكن تحقيقها ولكن بواسطة ليزرات أكثر تطوراً.

(12 - 5) تطبيقات الليزرات

في السنوات الأخيرة من القرن العشرين وجدت الليزرات مثالات واسعة ومتنوعة للتطبيقات العملية. فالشدة العالية التي تتميز بها الحزمة الليزرية تجعلها ثاقباً ملائماً. فعلى سبيل المثال، تستطيع الحزمة الليزرية ثقب فتحة صغيرة جداً في الماس لاستخدامها كقالب في صناعة الاسلاك الصغيرة القطر جداً. ولأن الفوتونات في حزمة الليزر شديدة الارتباط في اتجاهاتها، فإن الحزمة الليزرية يمكن أن تكون مضبوطة التسديد، ما يمكنها من قطع مسافات طويلة جداً دون أن تتفرق.

يستخدم مساحو الاراضي الليزرزات غالباً، خصوصاً في الحالات التي تتطلب دقة بالغة، كحفر الانفاق الطويلة من جهتين. تستخدم الليزرزات أيضاً وبصورة واسعة في الطب. فالليزر يستطيع أن ينتج حزمة ضيقة جداً، أي حزمة ذات شدة (كثافة قدرة) عالية بما يكفي لتبخير أي شيء في طريقها، استخدمت هذه الخاصية في معالجة انفصال الشبكية. تستخدم الحزم الليزرية في الجراحة. فالأوعية الدموية المقطوعة بواسطة حزمة ليزرية تسعى أن تلحم نفسها ذاتياً، جاعلة من السهولة التحكم بالنزيف الدموي. تستخدم الليزرزات أيضاً في التدمير الانتقائي للانسجة، كما في حالة ازالة الأورام السرطانية.

الخلاصة

• تقوم نظرية الليزر على مفهومين: مفهوم الفوتونات ومفهوم المستويات الطاقية الذرية؛ اضافة إلى المفهومين الجديدين، الانبعاث القسري (المستحث) والتوزيع المعكوس.

• مبادئ عمل الليزر ثلاثة: الامتصاص، الانبعاث التلقائي، والانبعاث المستحث. ولتحقيق الانبعاث القسري لا بد من خرق التوازن الحراري المعبر عنه بتوزيع ماكسويل - بولتزمان (شكل 2) بطرق غير تقليدية وتحقيق شرط الفعل الليزري المبني على احداث تغيير انقلابي في مأهولية المستويات الطاقية للمادة الفعالة.

مسائل

1- ذرة افتراضية تمتلك مستويين طاقيين مفصولين بـ 3.2 eV . ثمة نجمة يوجد في غلافها الجوي 6.1×10^{13} من هذه الذرات لكل 1 cm^3 في الحالة (العليا) المثارة و 2.5×10^{15} ذرة لكل 1 cm^3 في الحالة (الدنيا) الاساسية. احسب درجة حرارة الغلاف الجوي للنجمة.

2- توصف مأهولية المستويين الطاقيين غالباً بتحديد درجة حرارة كل من السالبة للنظام. بين أن مثل هذه الدرجة السالبة صحيحة وفقاً للتوزيع المعكوس. ما هي درجة الحرارة السالبة التي تصف النظام في المثال 1 إذا كانت مأهولية المستوى الأعلى أكبر من مأهولية المستوى الأدنى بنسبة 100%؟

3 - ثمة ذرة تمتلك مستويين طاقيين بطول موجي انتقالي 582. عند درجة حرارة 300 K كان في الحالة الدنيا 4×10^{20} ذرة. (أ) ما عدد سكان الحالة العليا تحت شروط التوازن الحراري؟ (ب) بفرض أن 7×10^{20} ذرة تم ضخها إلى الحالة العليا، مع بقاء الذرات 4×10^{20} في الحالة الدنيا. ما مقدار الطاقة المتحررة في النبضة الليزرية المفردة؟

4 - ثمة ذرة افتراضية مستوياتها الطاقية متباعدة بمقدار 1.2 eV. احسب نسبة عدد الذرات في الحالة المثارة الثالثة عشرة إلى عددها في الحالة المثارة الحادية عشرة عند درجة حرارة 2000 K.

5 - حزمة ليزرية عالية القدرة بطول موجي 600 nm وقطر حزمي 11.8 cm عند تسديدها نحو القمر من على سطح الأرض 3.82×10^8 km عن القمر. هذا التوسع على سطح القمر كان الموقع الزاوي لحافة قرص الحيود المركزي معطى بالعلاقة:

$$\sin \theta = \frac{1.22 \lambda}{d}$$

حيث d قطر ثقب الحزمة، أوجد قطر قرص الحيود المركزي عند سطح القمر. 6 - حزمة ليزر الارغون ($\lambda_e = 515$ nm) قطرها $d = 3.00$ nm وبقدرة خرج مقدارها 5.21 W. جُمعت الحزمة على سطح ينشر الضوء بواسطة عدسة طولها البؤري 3.5 cm فظهر شكل للحيود. (أ) برهن أن نصف قطر قرص الحيود المركزي يعطى بالعلاقة.

$$R = \frac{1.22 f \lambda}{d}$$

يمكن أن يرى القرص المركزي محتوياً 84% من القدرة الساقطة، احسب (ب) نصف قطر القرص المركزي R ، و(ج) معدل كثافة فيض القدرة في الحزمة الساقطة (شدتها)، (د) معدل كثافة فيض القدرة في القرص المركزي.

7 - عدد كبير من ذرات الهيدروجين في اتزان حراري عند درجة حرارة T . ماذا يجب أن تكون T لكي نجد ذرة واحدة في الحالة المثارة $n=2$ لكل 100 ذرة في الحالة الاساسية $n=1$ ؟

أجوبة المسائل

الفصل الأول

2 - 10^{-9} m , 1 nm , 0.6×10^{-6} , 3.600 nm , $5.0 \times 10^{-21} \text{ H}$, 1.07 pT , $B_x = 0$, $B_z = 0$, $B_y = B_0 \sin k(x - ct)$ حيث $B_0 = 0.78 \text{ pT}$ (ب) $\lambda = 650 \text{ nm}$

8 - $E = (1.20 \times 10^5 \text{ V/m}) K \sin [(3.77 \times 10^{14} \text{ rad/s})t - (1.26 \times 10^6 \text{ rad/m})x]$
 $B = (4.00 \times 10^{-4} \text{ T}) i \sin [(3.77 \times 10^{14} \text{ rad/s})t - (1.26 \times 10^6 \text{ rad/m})x]$

10 - اتجاه الانتشار دائماً هو باتجاه السرعة $\vec{v}$ أو باتجاه المتجه $\vec{E} \times \vec{B}$ لذلك، فإنه في الاتجاه: (أ) $\vec{k}$ (ب) $\vec{k}$ (ج) $-\vec{j}$ (د) $-\vec{i}$

13 - (أ) $2.00 \times 10^{-10} \text{ T}$ (ب) 75.0 kW (ج) 100 km

15 - (أ) $10.27 \times 10^2 \frac{\text{V}}{\text{m}}$, $3.42 \times 10^6 \text{ T}$

16 - 100 kJ , 18.78 cm , 20.883 m لا أستطيع

22 - (أ) $10.2 \times 10^2 \frac{\text{V}}{\text{m}}$ (ب) $3.4 \times 10^{-6} \text{ T}$ (ج) 6.53 nt (د) 5.1 mw/cm^2

24 - (أ) 8.035 mw (ب) 9.14 mw/cm^2 (ج) 1.68 MW (د) 76 mV/m

256 pT (ب)

26 - 12.6 kW , 0.043 kg.m/s , 7.7 Mpa

29 - (أ) 586 MN (ب) 1.55×10^{-14} (ج) 94.3 MHz

30 - (أ) 960 nT , 61.98 m^{-1} , 593 Mrad , 110 w/m^2 , 367.678 nN

32 - $I(2-f)/c$, npa

35 - (أ) 3.60 GW.m^2 (ب) 11.0 m (ج) 15.0 (د) 1.86

الفصل الثاني

- 1 - أ) 515 nm , 610 nm
- ب) 555nm , 541THz , 1.85fs
- 2 - 250×10^6 ذبذبة , 3 - 8.68 سنة ضوئية , 4 - 67ps
- 7 - أصفر - مخضر , 8 - $0.0036 \pm$ nm , 9 -
- أ) 6 دقائق ,
- ب) 12 دقيقة ,
- ج) 6 دقائق , 10 - 4.43 nm , 11 - 78.9°

الفصل الثالث

- 1 - أ) 38.0°
- ب) 52.9° , 2 - 1.56 , 3 - 1.95×10^8 m/s , 4 - 1.25 , 5 - 1.5 , 7 - 4.3mm , 8 -
- أ) ضعف سرعتي ,
- ب) بنفس سرعتي , 10 - 390 cm تحت سطح المرأة , 11 -
- أ) 405 ,
- ب) $2.37 \mu\text{m}$,
- ج) 112° , 12 -
- أ) 7207° ,
- ب) من A إلى B , 13 - n للسائل > n للزجاج , 14 - 187 cm , 15 - 42.8° , 16 -
- أ) 30.0° ,
- ب) 55.3° , 17 -
- أ) 1.58 ,
- ب) 1035 nm , 18 -
- أ) 1.76×10^8 m / s ,
- ب) 294 nm

الفصل الرابع

- 1 - 11.0 cm - 3 - 2.88 cm - 4 - 30 cm يسار قمة المرآة، طولها 0.8 cm تخيليه. 7 -
- (ب) 4.8 cm يمين قمة المرآة، 0.9 cm معتدلة، تخيلية. 10 - 12.0 cm + 11 -
- 12 - 18.0 cm طبق العلاقة (4 - 7) . 13 - 1.38 - 14 - 12 cm يسار العدسة. 15 - 2.5 mm - 18 -
- (i) 19 cm ،
- (ب) 100 cm -
- (ج) 30 cm ،
- (د) 18.23 cm ، -
- (هـ) 20.78 cm -
- (i) 50 cm ،
- (ب) 50 cm - 21 - $f = -30 \text{ cm}$ - 22 - $n_1 = 1.5$ ، $f_L = 50 \text{ cm}$ ، $f_{air} = 10 \text{ cm}$ - 23 -
- 24 - $r = 3/4 f$ - 25 - 1 m ،
- (i) 48 cm ،
- (ب) 265 cm ،
- (ج) 86.4 cm - 26 - $f = 2R$ - 27 - $n_L = 1.67$ - 28 - $O_1 = 18 \text{ cm}$ ، $O_2 = 6 \text{ cm}$ ،

الفصل الخامس

- 1 - 30.0 cm يسار العدسة المفرقة، تخيلية، معتدلة، $m = 0.75$.
- 2 - (ب) لا ،
- (ج) يمر الضوء دون أن ينحرف .
- 3 - 73.6 cm جهة العدسة بعيداً عن المرآة، حقيقية، معتدلة، 0.289 . 5 -
- 6 - 1.21 m ،
- (i) 35 mm ،
- (ب) 200 mm - 7 - 32.1 mm - 8 -
- (i) 10.2 cm ،
- (ب) لا .
- 9 - (أ) 12.2 cm ، (ب) $1.18 \text{ m} \times 1.78 \text{ m}$ ،

- 10 - $i = 1.00 \text{ m}$
 ب) 1.67 m - 11 - 1.04 cm
 12 - 0.692 cm - 13
 ا) 2.75 ديوبتير، ج) 1.1 - ديوبتير، 14 - 2.8 cm ، مستطيلة، 15 - 2.70 cm
 27.0 cm من العدسة، 16 -
 ا) 8.11 cm
 ب) 3.08 mm - 17
 ا) 3 مرات،
 ب) 6.06 cm - 18
 ا) 17.5 mm
 ب) 10.8
 ج) 108 - 19 - 737 X
 ب) 44 X - 20 - 10.65 - 21
 ا) 4.50
 ب) 36 mm
 ج) 0.18° rad - 22 - 26.5 - 23 - 8.0 cm - 24
 ا) 80
 ب) 81.0
 25 - محدبة، 3.7 m - 26 - 22.78 cm و $i_{\text{vio}} = 21.59 \text{ cm}$

الفصل السادس

- 1 - 0.08 cd - 2 - 0.63 Sr ، 0.52
 ا) 3.5 lux - 3
 ب) 2 lux - 4
 ج) 1.3 lux
 5 - 83°
 6 - وفقاً لقاعدة الاشتقاق، تكون الدالة E (الانارة) عظمى تبعاً للتعبير.

$$E = \frac{I_h}{(h^2 + r^2)^{3/2}}$$

 7 - 1 lux

الفصل السابع

أجوبة مسائل التداخل

1. 600 nm, 450 nm
2. 220 m في التداخل الهدام، و 110 m في التداخل البناء.
3. 55 m, 35 m, 15 m, 75 m, 95 m.
4. 1.20 mm
5. 545 nm
6. 0.22 rad, و 12°.
7. 2.3 mm
8. 0.103 mm
9. 600 nm
10. 1.00 mm (i)
11. 0.540 mm (i)
12. في الاتجاه $\frac{m\lambda}{d} \sin^{-1} \frac{\lambda}{2} - 16$, لا تعتمد على m.
13. 124 nm
14. 552 nm (i)
15. 215 nm
16. 643 nm
17. 2.4 m
18. 141 هدباً
19. 34 حلقة،
20. 1.00 m . 26
21. 45 حلقة
22. 0.247 mm (i)
23. 0.5156 mm (ب)
24. 873 هدباً . 27 - 0.00117 rad أو 0.067° . 28 - 0.11 × 10⁻² rad
25. 0.172 mm, 0.516 mm فوق مركز الشكل التداخلي.

الفصل الثامن

1. 0.006° . 2 - ينزاح الشكل بمقدار $\frac{\lambda}{2}$
3. تزداد أنصاف أقطار الحلقات بنسبة $\tan_i / \tan_r$
4. 588 nm . 5 - 0.0049 nm . 6 - 1.003

الفصل التاسع الحيود

- الفصل التاسع الحيود
1. 480 nm . 2. 0.0182 mm . 3. 0.168 mm . 4. هي نفسها عرض الهدب المركزي الأول على جانبي الهدب المركزي . 5. 0.108 mm . 6. 0.168 mm . 7. 691 nm . 8. (i) 0.43° (ب) $118 \mu\text{m}$. 9. $\lambda_a = 2\lambda_b$ (i) يحدث التطابق بين النهايات الدنيا للطولين عندما تتساوى الرتبة m_a مع

- ضعف رتبة الطول $\lambda_h (2mb)$.
 10. 1.47 mm (i) 0.186° (ب) 0.882 rad (ج) 0.93 .12
 11. 1.48o (i) 1.00 cm (ب) 2.00×10^{-6} W/m² (i) 0 (ب) 18.84
 12. 11.48o (i) 1.12 μm (ب) 10.36 km (i) 134.4 rad (ج) 16.134.4 rad
 13. 11.2 m (i) 10.36 km (ب) 21.19 m (ب) 52.1m .20
 14. 1410km .21 .6.76o .22 .2.44 m .23 .λD/d .24 3 أهذاب .25 يحدث
 التداخل الهدام بين أي شقين عندما تصبح ϕ بينهما مساوية لـ π (انظر
 شرط التداخل (12 - 6). ولهذا فإن التداخل الهدام في الحالة المدروسة

- يحدث بين أزواج الشقوق 1 - 5، 2 - 6، 3 - 7، 4 - 8.
26. (i) 1 - 3، 2 - 4، (ب) 1 - 2، 3 - 4، (ج) 1 - 3، 2 - 4
27. (i) 3، (ب) 2، 28.
29. $\theta_1 = 21^\circ.0$ ، $\theta_2 = 46^\circ.0$ ، θ_3 غير مرئية.
30. 6.85° ، 15.59° ، 31. 0.225 nm ، 32. 0.436 nm ، 33. 2.68° ، 34. 26 pm ، 39.
35. 49.8 pm .

الفصل العاشر

الاستقطاب

5. يمكن أن تكتب الموجة في الصيغة:
- $$\vec{E} = (\hat{j}E_0 - \hat{k}E_0) \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \omega t\right)$$
- $$(\hat{j}E_0 - \hat{k}E_0)$$

إنها تسير في الاتجاه $+x$ ، بسعة ثابتة $(\hat{j}E_0 - \hat{k}E_0)$ ، وهي مستقطبة خطياً ومستوي استقطابها يصنع زاوية 135° مع المستوي xy .

$$E(0,0) = \hat{i}E_0 + \hat{k}E_0 \cos \pi$$

$$E(0,T/4) = \hat{i}E_0 \cos(-\pi/2) + \hat{k}E_0 \cos(\pi/2) = 0$$

$$E(0,T/2) = \hat{i}E_0 \cos(-\pi) + \hat{k}E_0 \cos 0$$

$$E(0,3T/4) = \hat{i}E_0 \cos(-2\pi) + \hat{k}E_0 \cos(-\pi)$$

7. المحصلة هي $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ ، ومتجه سعتها هو:

$[\hat{i}(E_0x + E_0'x) + \hat{j}(E_0y + E_0'y)]$ ، وهي مقدار ثابت لأنها لا تعتمد على z و t . إذن، فإن المحصلة، مستقطبة خطياً.

$$\vec{E}(z,t) = E_0 [\hat{i} \cos(kz - \omega t) - \hat{j} \sin(kz - \omega t)]$$

9. الموجة $\vec{E}(z,t)$ لها مقدار ثابت هو E_0 وهي مستقطبة دائرياً. ويمكن مقارنة الموجتين وذلك بفحص سلوكهما عند بعض نقطة ثابتة في الفضاء، مثل $z = 0$ عند $t = 0, T/4, T/2, \dots$

10. كما في المسألة 9، فإن الموجة

$$\vec{E} = E_0 [\hat{i} \cos(kz - \omega t) - \hat{j} \sin(kz - \omega t)]$$

هي الحالة R المتجهة بامتداد $+x$ عند $z = 0, t = 0$ ، وهذا يتفق مع الصيغة.

$$\vec{E}_R = E_0 [-\hat{i} \cos(kz - \omega t) + \hat{j} \sin(kz - \omega t)]$$

ويمكن فحصها عند $z = 0$ و $t = 0, T/4, T/2, 3T/4, \dots$

عند هذه القيم فإن $E_R(0,t) = \hat{i}E_0, \hat{j}E_0, \hat{i}E_0, \hat{j}E_0, \hat{i}E_0, \hat{j}E_0, \dots$ على التوالي. وبالتالي، فإن هذه الموجة مستقطبة استقطاب دائري يميني لأنها تبد بقيمة سالبة ثم موجبة، ثم سالبة، وهكذا.

11. 371 صفيحة. 12 - أ) تدور مستوي الاستقطاب بزاوية 90° ، ب) تعكس

اليمين - يسار للاستقطاب الدائري، ج) يبقى الضوء غير مستقطب. 14.

انطلاقاً من حقيقة الضوء المستقطب دائرياً يظهر عندما يكون فرق الطور

$\epsilon = \pm \pi/2, \pm 3\pi/2, \pm 5\pi/2, \dots$ تحت هذه الشروط، فإن $\cos \epsilon = 0, \sin \epsilon = \pm 1$

وان:

$$\left(\frac{\vec{E}_y}{E_{0y}}\right)^2 + \left(\frac{\vec{E}_x}{E_{0x}}\right)^2 = 1$$

تصف الاهليج الذي محوريه متعامدان ($\alpha = 0$). وعندما $E_{xx} = E_{yy} = E_0$ ، وهذه معادلة دائرة. تصبح معادلة الاهليج اعلاه بالصورة $E_x^2 + E_y^2 = E_0^2$. $E_x^2 + E_y^2 = E_0^2$. وهذه معادلة دائرة. 15. 30. 17. عند $\theta_i = 0^\circ$ و $\theta_i = 90^\circ$ ، ذلك لأن الحزمة الساقطة تتحلل إلى الحالتين P المتعامدتين غير المتشاكهتين. واحدة في مستوى السقوط (باشعاعية $I_{||}$) والأخرى عمودية عليه (باشعاعية $I_{\perp}$). ومن ثم، فإن كثافة الفيض الكلي الساقط هي $I_{||} + I_{\perp}$ ، وكثافة الفيض النافذ الكلي هي: $I_{||} + I_{\perp}$ ، ومن الفقرة (9 - 5) رأينا أنه عند $\theta_i = 0^\circ$ و $\theta_i = 90^\circ$ ، فإن $I_{||} = I_{\perp}$ ، ومن ثم، فإن الانعكاسيتين $R_{||}$ و $R_{\perp}$ متساويتين والضوء النافذ غير مستقطب. $R_{||} = R_{\perp}$ ، عند أية زاوية أخرى، فإن $R_{||} < R_{\perp}$ ، والذي يعني أن $I_{\perp} < I_{||}$. وبما أن هاتين المركبتين غير متشاكهتين، فإن الاشعاعية المستقطبة هي:

$$P = \frac{I_P}{I_P + I_u} = \frac{I_{||} - I_{\perp}}{I_{||} + I_{\perp}}$$

18. بما أن $R_{||} = I_{\perp} / I_{||} = 0$ ، فإن الانفاذية المطابقة

$$T_{||} = n_{ti} \cos \theta_i / \cos \theta_t \cdot I_{||} / I_{||} = 1$$

بقدر ما أن $R_{||} + T_{||} = 1$ ، وينفس الأسلوب، فإن $T_{\perp} = 1 - R_{\perp}$ و

$$T_{\perp} = \frac{n_{ti} \cos \theta_i}{\cos \theta_t} \cdot \frac{I_{\perp}}{I_{\perp}} = 1$$

ولأن الضوء الساقط هو ضوء طبيعي، فإن $I_{\perp} = I_{||}$ ، ومنه يمكننا أن نكتب $I_{||} = I_{\perp}$ ، حيث $I_{\perp} = 0.835$ ، $c = \frac{I_{||} \cos \theta_i}{n_{ti} \cos \theta_t}$ ، لذلك نجد من المسألة 17، أن درجة الاستقطاب

$$P = \frac{c - 0.835c}{c + 0.835c} = 8.9\%$$

19. 45° ، 20. 45° ، 21. 0 قبل الادخال، $I_2 = I_1 / 8$ بعد الادخال. 22. $I =$

$$I = \frac{I_i}{16} (1 - \cos uwt)$$

23. $I = I' / 16$ ، 24. 56.3° ، 27. 1 ، 53.1°

(ب) نعم تعتمد بدرجة خفيفة. 28° - 49°

$$\Delta \Phi = \frac{2\pi}{\lambda_0} (n_o - n_e) d$$

32. تردد المصدر الضوئي لا يتغير عندما تدخل الحزمة الوسط، ولهذا فإن ترددي الحزمتين $f = c / \lambda_0 = 5.1 \times 10^{14}$ Hz. أما الطولين الموجيين للموجة

العادية λ_{ord} وتكون λ_{ext} هي λ_{ord} في الهواء λ_o على معامل انكسار البلورة لتلك الموجة

$$\lambda_{ord} = \frac{\lambda_o}{n_o} = \frac{589.3 \times 10^{-9} \text{ m}}{1.66} = 355 \text{ nm}$$

$$\lambda_{ext} = \frac{\lambda_o}{n_e} = \frac{589.3 \times 10^{-9} \text{ m}}{1.49} = 396 \text{ nm}$$

33. هنا يمكن تطبيق قانون سنل عند السطح البيني القطري (شكل 23). بالنسبة للشعاع e - البازع من المنشور لدينا

$$\begin{aligned} n_o \sin 15^\circ &= n_e \sin \theta_{e1} \\ \sin \theta_{e1} &= \frac{n_o \sin 15^\circ}{n_e} = \frac{1.66}{1.49} (0.26) = 0.232 \quad \text{أو} \end{aligned}$$

حيث θ_{e1} هي الزاوية بين العمود الموضعي والشعاع e - في القطعة الثانية للمنشور. ونفس الشيء بالنسبة للشعاع o -

$$\begin{aligned} n_e \sin 15^\circ &= n_o \sin \theta_{o1} \\ \sin \theta_{o1} &= 1.49 / 1.66 (0.26) = 0.232 \end{aligned}$$

لذلك، فإن $\theta_{e1} = 16.46^\circ$ ، $\theta_{o1} = 13.26^\circ$ ومنه، فإن الزاوية بين الشعاعين داخل المنشور هي $\theta_{e1} - \theta_{o1} = 3.20^\circ$. إن الشعاعين o - و e - يسقطان على الوجه الخلفي للمنشور عند زاويتين مقداريهما 1.46° و 1.34° على التوالي. وهكذا فهما تبرزان عند زاويتين θ_{e2} و θ_{o2} بالنسبة للعمود على الوجه الخلفي، حيث $n_e \sin 1.46^\circ = n_o \sin \theta_{e2}$ ، $n_o \sin 1.34^\circ = \sin \theta_{o2}$ ، ومنه، فإن $\theta_{e2} = 2.34^\circ$ و $\theta_{o2} = 2.39^\circ$. وهكذا، فإن

$$\alpha = (\theta_{e1} - \theta_{o1}) + (2.34^\circ - 1.34^\circ) + (2.39^\circ - 1.46^\circ) = 5.13^\circ$$

34. $d = 0.015 \text{ mm}$. 35 - سعة المركبة x هي $E_o \sin 60 = 0.866 E_o$ وسعة المركبة y هي $E_o \cos 60 = 0.500 E_o$

الفصل الحادي عشر

$$- 3.91 \text{ K} - 4.580 \text{ mW} - 138 \text{ K} \text{ (أ) } - 21 \mu\text{m} \text{ (ب)}$$

$$- 10.0796 \text{ TE} - 1.4 \times 10^{12} , 6.0 \times 10^{12} , 1.4 \times 10^{13} \text{ Hz} \text{ (أ)}$$

- (ب) 5.9, 25, 60 meV
 (ج) 27, 64, 120, 11 N/m
 (i) 110 J
 (ب) 713 J
 12 - (i) 2.11 eV, 14 - فوق البنفسجية.
 15 - السيزيوم، الليثيوم، الباريوم. 16 -
 (i) لا،
 (ب) 544 nm، أخضر، 172 nm، 20 - 2.63 m²
 21 - المصباح تحت أحمر، (ب) 1.97×10^{20}
 22 - (i) 3.10 keV
 (ب) 14.4 keV، 25 -
 (i) 2.87 pm
 (ب) 5.89 pm، 29 - 42.6°

الفصل الثاني عشر

- 1 - 10000 k، 3 -
 (i) لا يوجد،
 (ب) 51.1 J، 5 - 4.74 km

المصطلحات العلمية حسب تسلسل الفصول

Electromagnetic Waves

Amplitude

Frequency

Wavelength

Phase velocity

Partial derivative

Electromagnetic Waves

Sinusoidal waves

Electromagnetic Spectrum

Optical transitions

Heat transfer

Heat radiation

Microwaves

Radiation field

Microwaves ovens

Snapshots

Telephone Conversations

Electric dipole

Microwave background radiations

Oscillating electric dipole

Big Bang

Fireball

Near field

Radio Waves

Atomic dipoles

X - ray

الفصل الأول

الأمواج الكهرومغناطيسية

السعة

التردد

الطول الموجي

السرعة الطورية

تفاضل جزئي

الأمواج الكهرومغناطيسية

الأمواج الجيبية

الطيف الكهرومغناطيسي

انتقالات بصرية

النقل الحراري

الاشعاع الحراري

الأمواج الميكروية

مثال اشعاعي

يفران الميكروويف

سلسلة من اللقطات الفوتوغرافية

معادلات تليفونية

ثنائي كهربائي

اشعاع الخلفية الميكروي

ثنائي كهربائي هزاز

الانفجار الاعظم

أروكة النار

المجال القريب

الأمواج الراديوية

ثنائيات ذرية

الاشعة السينية

X-ray astronomy
 Maxwell's equations
 Faraday's Law
 Magnetic flux
 Counterclockwise
 Ampere's Law
 Right-hand rule
 Displacement Current
 Gauss's Laws
 Poynting vector
 Sinusoidal Wave
 Waves function
 Transverse displacement
 instantaneous value
 momentum and pressure of radiation
 Linear momentum
 radiation pressure
 displacement current density
 dielectrics
 Insulating ferromagnetic materials
 Gamma rays
 Neutral pion
 Quanta
 Steady Conditions
 Oscillating electric dipole
 Electric dipole radiation
 Wavelike behavior
 Standing Waves

الأشعة السينية الفضائية
 معادلات ماكسويل
 قانون فاراداي
 الفيض المغناطيسي
 عكس اتجاه عقرب الساعة
 قانون أمبير
 قاعدة اليد اليمنى
 تيار ازاحي
 قانوني غاوس
 متجه بوينتنگ
 الأمواج الجيبية
 الدالة الموجية
 ازاحة مستعرضة
 قيمة آنية
 زخم وضغط الاشعاع
 زخم خطي
 ضغط اشعاعي
 كثافة تيار الازاحة
 عوازل كهربائية
 مواد عازلة عالية الانفاذية المغناطيسية
 اشعاعات غاما
 بيون متعادل
 كمية (كوانته)
 الشروط المستقرة
 مذبذب كهربائي ثنائي
 اشعاع ثنائي كهربائي
 سلوك شبه موجي
 الأمواج الواقفة

Superpositin principle

Stretched - string

Normal modes

Node pattern

Electron spin resonance

Tunable dye laser

Nodal Plane

(He - Ne) Laser

Full - angle beam divergence

Tunable dye laser

مبدأ التراكب

سلك (حبل)

طرز طبيعية

نمط عقدي

الرنين الالكتروني المغزلي

ليزر الصبغة المتناغم

مستوي عقدي

ليزر الهليوم - نيون، أو (هليوم - نيون) ليزر

زاوية تشتت الحزمة

(وهي زاوية تقابل مقطع مخروط دائري).

ليزر الصبغة المتناغم

الفصل الثاني طبيعة الضوء وانتشاره

The nature and propogation of light

Optics of the eye

Relativ sensitivity of the human eye

Visible light

Range of the audible wave-

lengths or frequencies

Thermal radiation

Incandescent objects

Luminescence

Fluorescent lamps

Lightness

Lightning

Lightning arrester

Lightless

Luminescent

بصريات العين

الحساسية النسبية لعين الانسان

ضوء مرئي

المدى المسموح من الأطوال الموجية أو الترددات

الاشعاع الحراري

أجسام ساطعة

التألق، وهو انبعاث الضوء من أجسام باردة

المصابيح المتفجرة

إضاءة

برق

مانعة الصواعق

مظلم

متألق

Luminescence	تألق
Fluorescent	متفلور
Fluorescence	فلورة
Phosphorescent	متفسفر
Phosphorescence	فسفرة
Chemiluminescence	تألق كيميائي
Bioluminescence	تألق حيوي
Triboluminescence	تألق الاحتكاك
Permittivity (Eo)	السماحية الكهربائية
Permeability	السماحية المغناطيسية
Dielectric Constant of material (ke)	ثابت العزل الكهربائي للمادة
Relative Permeability Constant (km)	ثابت الانفاذية المغناطيسية النسبي
Ferromagnetic materials	مواد عالية الانفاذية المغناطيسية (كالحديد والنيكل)
Nonferromagnetic materials	مواد غير عالية الانفاذية المغناطيسية
Scattering	وهي امتصاص الضوء الساقط (الاستطارة بواسطة ذرات المادة او جزيئاتها تم اعادة اشعاع الضوء المستطار)
Dispersion	عندما يعتمد تداخل الموجة الساقطة / التشتت مع المعاد اشعاعها على فرقهما الطوري ومن ثم فإن سرعة الضوء في المادة تعتمد على التردد أو الطول الموجي للضوء الساقط).
Doppler - shifted frequency	زحزحة دوبلر الترددية
Relativistic Doppler effect	أثر دوبلر النسبي
Satellite	تابع ارضي
Prime meridian	خط الزوال الرئيسي

الفصل الثالث

البصريات الهندسية

الانعكاس والانكسار

سطح بيني صقيل (ناعم)

وجهة النظر الشعاعية

الأقراص المدمجة

كابلات الالياف البصرية

قانون سنل

انعكاس إنتشاري

انعكاس مراوي

انعكاس داخلي كلي

الزاوية الحرجة

المنشور الثلاثي

منشور بورو

المنظار الثنائي العينين

زاوية المنشور وتدعى ايضاً بـ زاوية رأس المنشور

زاوية الانحراف الصغرى

مبدأ هيوغنز

موجات ثانوية

الانارة الهندسية

مبدأ فيرمات أو مبدأ الزمن الأقل

بنية هندسية

العمق الظاهري

العمق الحقيقي

النقطة الصورة أو الصورة النقطية

الجسم الصورة

قلب (عكس) الصورة

Geometrical Optics

Reflection and refraction

Smooth interface

ray view point

CD Layers

Optical fiber cables

Snell's law

diffuse reflection

Specular (mirrorlike)

Total internal reflection

Critical angle

triangular prism

Potto prism

Bioculars

Prism angle

Angle of minimum deviation

Huygens' Principle

Secondary wavelets

Geometrical brightness

Fermat's principle or principle of least time

Geometrical structure

Apparent depth

Actual depth

Image point

Image object

Image reversal

Spherical mirror
 Center of curvature
 Radius of curvature
 Object point
 Optic axis
 Vertex
 Paraxial rays
 Spherical aberration
 Focal Point
 Parabolic mirrors
 Lateral magnification
 Erect image
 Inverted image
 Concave mirror
 Convex mirror
 Thin lens
 Focal point
 Focal Length
 Converging lens
 Diverging lens
 The Lensmaker's equation
 Principal rays

الفصل الرابع
 المرآة الكروية
 مركز الانحناء
 نصف قطر الانحناء
 النقطة الجسمية أو الجسم النقطي
 المحور الضوئي
 قمة المرآة
 أشعة حدودية (أو محورية)
 الزيغ الكروي
 النقطة البؤرية
 مرايا قطع مكافئ
 تكبير جانبي
 صورة معتدلة
 صورة مقلوبة
 مرآة مقعرة
 مرآة محدبة
 عدسة رقيقة
 النقطة البؤرية (البؤرة)
 الطول البؤري
 عدسة مجمعة
 عدسة مفرقة
 معادلة صانع العدسات
 أشعة رئيسية

Optic devices
 Spherical aberration
 Paraxial approximation
 Zoom lens
 Costant f - number
 Fersnel lens
 Traffic Lights
 Overhead projector
 Graded index lens
 Lens aberrations
 Monochromatic aberration
 Chromatic aberrations
 Paraxial approximation
 Spherical aberration
 Circle of least confusion
 Coma
 larger - angle rays
 Primary image
 Curvature of field
 Distortion
 Transverse doppler effect
 twin paradox
 Consequences relativistic doppler effect
 Effect of time dilation
 Compound thin lens
 Effective focal length
 Light - tight enclosure

الفصل الخامس
 أدوات بصرية
 زيج كروي
 تقريب محوري
 عدسة الزوم
 الثابت البؤري العددي
 عدسة فرنل
 اشارات السير الضوئية
 مسلاط علوي
 عدسة مدرجة الدليل
 الزوجانات العدسية
 زوجان احادي بلون
 زوجانات لونية
 التقريب المحوراني
 زوجان كروي
 دائرة أقل فوضى
 ذؤابة المذنب
 أشعة الزاوية الاكبر
 الصورة الاولية
 انحناء المجال
 تشويه
 اثر دوبلر المستعرض
 التناقض التوأمي
 حوادث اثر دوبلر النسبي
 ظاهرة او اثر تحدد الزمن
 العدسة الرقيقة المركبة
 الطول البؤري الفعال
 سباج ضوئي محكم

Paraxial approximation	تقريب محوري
Adjustable aperture	ثقب منظم
Diaphragm	حجاب حاجز أو عشاء
f-number 2.2	الطول المؤري عدد
Telephoto lens	عدسة تليفتوتوغرافية (مقربة)
Wide-angle lens	عدسة الراوية العريضة
Photographic exposures	العروض الفوتوغرافية
Projector	مسلاط، أي أداة تسليط الصور
Projection lens	عدسة الاسقاط
Projection screen	شاشة الاسقاط
Condenser lens	عدسة مكثفة
Slide Projector	مسلاط الشرائح
Human eye	عين الانسان
Cornea	القرنية
Aqueous humor	الرطوبة المائية
Crystalline lens	العدسة البلورية
Ciliary muscle	العضلة الهدبية
Vitreous humor	الرطوبة الزجاجية
Fovea Centralis	نقرة مركزية
Iris	القزحية
Pupil	البؤبؤ
Accommodation	التكيف
Optic nerve	عصب بصري
Presbyopia	بصر الشيخوخة
Defects of vision	عيوب الرؤية
Myopic or myopia (nearsighted)	قصر بصر
Hypertopic (farsighted)	طول بصر
Astigmatism	اللابطباقي أو الاستجماتيزم

Corrective lens
Spherical power
Simple microscope or magnifier
Angular Size
Magnifying glass
Intermediate image
Chromatic aberration

عدسة مصححة
القدرة الكروية
المجهر البسيط أو المكبر
القياس الزاوي
زحاجة مكبرة
صورة وسيطة
زئبق لوني

Practical geometrical optics and photometry

الفصل السادس
بصريات الهندسية التطبيقية
والقياسات الضوئية

Stops and apertures

عواجز وثقوب
مطوع

Brightness

مجال الرؤية

Field of view

الامتداد الفضائي والزاوي

Spatial and angular extent

Solid angle

زاوية صلبة أو مجسمة

Aperture Stop

حاجز ذو ثقب

Exit pupil

نقطة الخروج

Entrance pupil

نقطة الدخول

Chief ray

شعاع رئيسي

Conjugate ray

شعاع مرافق

Marginal ray

شعاع هامشي

Multilens system

نظام المتعدد العدسات

Transmitted Light, Flux

فيض ضوئي مُرسل

Field stop

حاجز ميداني (حقلي)

Radiometry and Photometry

القياسات الراديوية والضوئية

Physical type of energy quantities

النموذج الفيزيائي للكميات الطاقية

physical type	النوع الفيزيائي
psychophysical type	النوع النفساني
Radiometer	مقياس الإشعاعية
radiant power or radiant flux	القدرة الشعاعية أو الفيض الشعاع
radiant flux	فيض الشعاع
radiant exitance	الإخراج الشعاعية
irradiance	ناتق
isotropic Source	مصدر متماثل المناحي
Lambert Source	مصدر لامبرت
Spectral quantities	الكميات الطيفية
photon flux	الفيض الفوتوني
Super - high - pressure mercury lamp	مصباح الزئبق العالي الضغط
Highly directional	اتجاهية مفرطة
Luminous flux	التدفق الضيائي
Lumen	اللومن، وهو وحدة التدفق الضيائي
Luminous intensity	الشدة الضيائية
Candel	الشععة، وهي وحدة الشدة الضيائية
Luminous exitance	الإخراج الضيائية
Illuminance flux density	كثافة الفيض المضائي
Luminous flux density	كثافة الفيض الضيائي
Luminance	النورانية
Photometric system	النظام المضيائي
Spectral radiance	الإشعاعية الطيفية
Photometric terms	عبارات مضيائية
Luminous terms	عبارات ضيائية
Interference	التداخل
Soap bubble	فقاعة صابون
Rainbow	قوس قزح

Hint
 Overlap
 aperture
 Obstacle
 Diffraction gratings
 X-ray X
 Holography
 Interference and Coherent Sources
 Single Frequency
 Single wavelength
 Monochromatic light
 (or Light of a single color)
 Incandescent Light bulb
 Flame
 Gas - discharge lamp
 Mercury - vapor lamp
 Discrete set of colors
 Line width (wavelength range)
 Principle of linear superposition
 Resultant displacement
 Instantaneous displacement
 Actual displacement
 Excess
 Deficiency
 Specific Component
 Monochromatic waves
 In phase
 Unison

تمديد انطباع
 مشابه (تراكب) الامواج
 ثقب
 عائق

محزرات الحيود
 الاشعة السينية او اشعة
 التصوير الجسم
 التداخل والمصادر المتشابهة
 تردد احادي مفرد
 ختل موجي مفرد
 ضوء احادي (أو ضوء مفرد اللون)

مصباح ضوئي متوهج
 لهب

مصابيح التفريغ الغازي
 مصباح بخار الزئبق
 طوائف متقطعة من الألوان
 عرض خطي (أو نطاق الطول الموجي)
 مبدأ التراكب الخطي
 الازاحة المحصلة
 إزاحة لحظية
 إزاحة فعلية
 تجاوز أو إفراط الضغط
 عجز الضغط
 المركبة المميزة
 أمواج أحادية اللون
 التطاور (الارتباط بعلاقة طورية)
 تساوق النغمات

Ripple tank	وعاء الأمواج
Radio antenna	هوائي راديو
Transmitter	مرسلة (جهاز إرسال)
Opaque Screen	شاشة معتمة
Constructive interference	تداخل بناء
Reinforcement	تعزيز أو تقوية
Destructive interference	تداخل هدام
Cancellation	الغاء
Interference fringes	أهداب تداخلية
Bright fringe	هدب مضيء
dark fringe	هدب مظلم
Intensity distribution in	التوزيع الكثافي في
Interference patterns	الانماط التداخلية
Total energy output	الخروج الطاقي الكلي
In interference, the energy is redistributed	في التداخل يعاد توزيع الطاقة
Monochromatic	ضوء وحيد اللون

Diffraction	الفصل الثامن
Diamond Point	الحيود
groove	حافة ماسية
Principal maximum	تلمة أو أخذود
Compact disks	القمة الرئيسية
rulings or lines	الأقراص المدمجة
grating spacing	تسطير أو خطوط
Far field conditions	فاصلة المحرز
Transmitting grating	شروط الحقل البعيد
	محرز منفذ

Reflecting grating
 Phase grating
 Transparent grating
 Grating spectrometer
 Dispersion
 Angular width
 Dispersion
 Resolution
 Chromatic resolving Power
 Peak
 Maximum
 Small differences
 Differentials
 Wavelength interval
 Doublet lines
 Peaks
 Diffraction
 Barrier
 Sharp shadow
 Diffraction pattern
 Fresnel and Fraunhofer diffraction
 Poisson spot
 Near - field diffraction of Fresnel
 diffraction
 Wavelet
 Phase shift
 L'Hôpital's rule
 Circular aperture

حيز عاكس
 حيز طوري
 حيز شفاف
 حيز المطيافي
 تريق أو تشتيت
 عرض الزاوي
 تريق
 تحليل
 قدرة التحليل اللوني
 قمة
 قمة
 اختلافات صغيرة
 تفاضلات
 مدى الطول موجي
 قطبين لتأئين
 رى (أو قمم رئيسية)
 حيود
 حاجز (أو عائق)
 ظل حاد
 شكل حيودي
 حيود فرنل وفراونهوفر
 بقعة بواسون
 حيود الحقل القريب أو حيود فرنل
 موجة
 نزياح طوري
 قاعدة هوبيتال
 فتب دائري

Intensity
 Single - Slit diffraction pattern
 Circular perimeter
 Opaque Screen
 Chromatic
 Spherical aberration
 Rayleigh's criterion
 Combined effect
 Missing maxima
 Two - dimensional scattering
 Scattering centers
 Oscillating electric dipole moment
 Bragg reflection
 Bragg condition
 Atomic spacing
 Double diffraction
 Reference wave
 Full - color image
 Holography
 Hologram
 Object beam
 reference beam
 Reconstruction beam
 Double diffraction
 Photographic record
 Constructive reflection

شدة
 شكل حيود الشق - الواحد
 محيط دائري
 ستار (شاشة) معتم
 ذو علاقة باللون. لوني
 الزيج اللوني
 معيار رايلي
 الاثر الاتحادي
 قمم مفقودة
 حالة الاستطارة ببعدين
 مراكز مستطيرة (تسبب الاستطارة)
 ثنائي قطب كهربائي هزاز
 انعكاس براغ
 شرط براغ
 فضاء ذري
 حيود مزدوج
 موجة مرجعية
 صورة كاملة - اللون
 التصوير المجسم
 الفلم المسجل عليه معلومات الجسم
 حزمة الجسم
 حزمة مرجعية
 حزمة المادة البناء
 حيود مضاعف
 تسجيل فوتوغرافي (ضوئي) d
 انعكاس بناء

Polarization
 Natural Light
 Polarized light
 Coherrence
 Elliptical polarization
 Superposition
 Partially polarized
 Degree of polariztion
 Linear polarization
 Plane of vibrations
 Circular polarization
 Right Circular polarization
 Left circular polarization
 Microwave transmitter
 Plane of polorization
 Degree of polarization
 Polaroid
 Double - bending
 Dhrioc materials
 Ordinary ray or O ray
 Extraordinary or e-ray
 Mica
 Ellipsoid
 Optical path
 Quarter - Wave plate
 Time reversal symmetry in nature
 Left - Circular polarized

الفصل العاشر
 الاستقطاب
 ضوء طبيعي
 ضوء مستقطب
 ترابط أو تماسك أو تشاكة
 استقطاب اهليجي
 تراكب أو إنضمام
 مستقطب جزئياً
 درجة الاستقطاب
 استقطاب خطي
 مستوي الاهتزازات
 استقطاب دائري
 استقطاب دائري يميني
 استقطاب دائري يساري
 مرسله أمواج مايكروية
 مستوي الاستقطاب
 درجة الاستقطاب
 مستقطب (بولا رويد)
 عزم - الازدواج
 مواد ثنائية اللون
 نحزمة العادية أو الحزمة O
 شعاع فوق العادي أو الشعاع e
 المايكا
 جسم ناقص
 مسار بصري
 منفيحة ربع - الموجة
 -
 مستقطب استقطاباً دائرياً - يسارياً

Polaroid film polarization	استقطاب أفلام البوليستر
Scattering of light	تشتت الضوء
Wedge Crystal	بلورة مثلثة
Retardation plate	لوحة
Retardet	ممتددة الضوء
Calcite-Wollaston prism	معدن
Polariscope	مستوي، كونسنترون، تكاثف
Endoscope	تدقيق بصرية
Bronchial tubes	خزف
Bladder	الأمعاء الدقيقة
Colon	معدة
Hypodermic needle	تقنات
	برق تحت جلدية

Quantum Optics	الفصل الحادي عشر
Thermal radiation	تجارب الكمومية
Spectral radiance	الاشعاع الحراري
Cavity radiation	الاشعاعية التطبيقية
(black body radiation)	اشعاع التجويف أو اشعاع الجسم الأسود
Wien displacement law	قانون إزاحة فين
Planck's radiation law	قانون اشعاع بلانك
Boltzman Constant k	ثابت بولتزمان
Quantization of energy	تكميم الطاقة
Atomic oscillators	مذبذبات ذرية
quantum number	عدد كمومي
Photoelectric effect	التأثير الكهروضوئي
contact potential difference V_{cpd}	فرق الجهد التماسي

Externally applied voltage V_{ext}

Potential difference V

Stopping potential V_0

Cutoff frequency ν_0

Einstein's photon theory

Work Function

Threshold frequency ν_0

Compton effect

Compton shift $\Delta\lambda$

Scattered Photon

Scattering Object

Scattering target

Gamma ray

System emitting

System absorbing

Line spectra

Spectral lines

Intensity of the scattered X-ray X

Correspondence principle

"Quantum theory must agree with classical theory in the limit in which classical theory is known to agree with experiment"

الجهد الخارجي المطبق

فرق الجهد

جهد الايقاف

تردد القطع المطابق لجهد الايقاف

نظرية انشتاين الفوتونية

دالة العمل

تردد العتبة (هو نفسه تردد القطع)

اثر كومبتون

زحزحة كومبتون

فوتون مستطار (متبعثر)

جسم مستطير (مبعثر)

أو الهدف المبعثر

والذي يحتوي على الالكترونات اكر التي تسبب الاستطارة

اشعة جاما

نظام باث

نظام ماص

الاطياف خطي

ومركباتها المفردة تدعي بالخطوط الطيفية

شدة اشعة X المستطارة وتقاس كدالة

للطول الموجي لاشعة

مبدأ التطابق وينص:

Laser	الفصل الثاني عشر
Stimulated emission	الليزر
Population inversion	انبعاث قسري
Excited state	التوزيع المعكوس
Ground state	حالة مثارة
Directionality	الحالة الأساسية (الأرضية)
Absorption	الاتجاهية
Spontaneous emission	الامتصاص
Maxwell - Boltzmann distribution function	انبعاث تلقائي
Thermal equilibrium	دالة توزيع ماكسويل - بولتزمان
Boltzman's constant	توازن حراري
Pumping	ثابت بولتزمان
Energy - exchange collisions	الضخ
Dril	تصادمات التبادل الطاقوي
Electrical Pumping	ثاقب (ديرل)
Optical pumping	الضخ الكهربائي
Hole	الضخ الضوئي
Metastable excited state	ثقب
Carbon dioxide gas dynamic laser	حالة شبه مستقرة مثارة
Free - electron laser	ليزر غاز ثاني أوكسيد الكربون الديناميكي
X-ray laser	ليزر الالكتران - الحر
	ليزر أشعة X

The international system of Units (SI)

ملحق 1
النظام العالمي للوحدات
الوحدات الأساسية SI

الكمية	الاسم	الرمز	التعريف
الطول	متر	m	طول المسار المقطوع بواسطة الضوء في الفراغ في 1.3×10^8 من الثانية.
الكتلة	كيلوغرام	Kg	كتلة اسطوانة من البلاتين اعتبرت وحدة كتلة
الزمن	ثانية	S	أمد 9, 192, 631, 770 دورة إشعاع تقابل انتقال بين مستويين فائقي الدقة للحالة الأساسية لذرة السيزيوم 133.
التيار الكهربائي	أمبير	A	هو ذلك التيار الثابت الذي لو وجد في موصلين مستقيمين متوازيين، فهملي المقطع العرضي، يفصل بينهما 1 متر في الفراغ لانتج بينهما قوة قدرها 2×10^{-7} نيوتن / متر.
درجة الحرارة الديناميكية	كلفن	K	جزء قدره $1/273$ من درجة الحرارة الديناميكية للنقطة الديناميكية الثلاثية للماء (triple point).
مقدار المادة	مول	مول	مقدار مادة النظام المتضمن لعدد هائل من الكينونات الأولية amount of elementary entities كالذرات في 0.012 كيلوغرام من substance الكربون 12 (1971).
الشدة الإشعاعية	شمعة	cd	هي الشدة الإشعاعية في الاتجاه العمودي لسطح قدره $1/600000 \text{ m}^2$ لجسم اسود عند درجة حرارة انجماد البلاتين تحت ضغط قدره 101.325pa.

ملحق الخطأ العالم في وحدات

هو المقاومة الكهربائية بين نقطتين في الموصل عندما يتدفق تيار واحد أمبير في الثانية واحدة عبرها في الموصل. وحدة المقاومة هي أوم (ohm) Ω	أوم ohm	Ω	المقاومة
هو تلك القوة التي تكسب كتلة 1 كغم تسارع قدره 1 m/s^2 N	نيوتن N	N	القوة
هو (الواط) القدرة التي تعطي زيادة في الشح الخافعة بمعدل 1 جول في الثانية الواحدة w	واط watt	w	القوة
هو الشغل المنجز عندما تتحرك نقطة مقدارها نيوتن واحد مسافة 1 متر باتجاه القوة J	جول joule	J	الجول
هو الفيض المغناطيسي ذلك الذي يستج لدارة بلعة واحدة قوة دافعة كهربائية مقدارها 1 فولت عندما تتحفظ إلى الصفر بمعدل منتظم في ثانية واحدة wb	ويبر weber	wb	الويبر
هو فرق الجهد الكهربائي بين نقطتين لسلك موصل يحمل تياراً ذاتاً قدره أمبير واحد عندما تكون القدرة المتبددة مساوية لـ 1 واط V	فولت volt	V	فرق الجهد
هو الفيض الإشعاعي المنبعث في زاوية محسمة قد Solid ang مقدارها 1 ستراديان Steradian بواسطة مصدر نقطي منتظم شدته 1 شمعة Lm	Lumen	Lm	اللومن
هو سعة المكثف الذي يظهر بين لوحيه فرقاً في الجهد قدره فولت واحد عندما يشحن بكمية من الكهرباء تساوي 1 كولوم F	فاراد Farad	F	الفاراد
هو حثية دائرة مغلفة تلك التي تُنتج فيها قوة H	هنري henry	H	الهنري

دافعة كهربائية قدرها 1 فولت عندما يتغير التيار في الدارة بانتظام بمعدل 1 أمبير في الثانية.

هي الزاوية الممتوية بين نصف قطري دائرة قُطع على محيطها شوساً يساوي في الطول نصف القطر.

هي الزاوية المحسنة التي يقع رأسها في مركز الكرة، والتي تحتل مساحة من سطح الكرة تساوي ذلك المربع الذي طول ضلعه يساوي نصف قطر الكرة.

هو أسماء لمضاعفات وأشياء مضاعفات النظام العالمي للبيانات للوحدات SI والذي يمكن ان تتشكل بتطبيق مضاعفات من النوع:

atto	10^{-18} , femto	10^{-15} , pico	10^{-12} ,
nano	10^{-9} , micro	10^{-6} , mega	10^6 ,
giga	10^9 , tera	10^{12} , peta	10^{15} ,
exa	10^{18}		

rad radian

Sr Steradian

SI pre-
fixes

راديان

ستراديان

نظام العالمي
للبيانات

Some SI derived units

ملحق 2 - بعض الوحدات المشتقة للنظام العالمي للوحدات SI

الرمز المكافئ	الرمز	اسم الوحدة	الكمية
	m^2	متر مربع	المساحة
	m^3	متر مكعب	الحجم
s^{-1}	Hz	هيرتز	التردد
	kg/m^3	كغم بالمتر تكعيب	الكثافة الكتلية
	m/s	متر بالثانية	الانطلاق، السرعة
	rad/s	راديان بالثانية	السرعة الزاوية
	m/s^2	متر بالثانية تربيع	التعجيل
	rad/m^2	راديان بالثانية تربيع	التعجيل الزاوي
$kg.m/s^2$	N	نيوتن	القوة
N/m^2	Pa	باسكال	الضغط
$N.m$	J	جول	الشغل، الطاقة، كمية الحرارة
J/s	W	واط	القدرة
$A.s$	C	كولومب	كمية الكهربائية
$N.m/C$	V	فولت	فرق الجهد، القوة الدافعة الكهربائية
N/C	V/m	فولت بالمتر	المجال الكهربائي
$A.s^V$	F	فاراد	السعة
$W/m^2, N/A.m$	J/K	جول بالكلفن	الانتروبيا
	$J/(K.kg)$	جول بالكغم كلفن	الحرارة النوعية
	$W/(m.k)$	واط بالمتر كلفن	التوصيل الحراري
	W/Sr	واط بالستراديان	الشدة النصف قطرية

افضل قيمة Best (1986) value		القيمة الحسابية	الرمز	الكمية
الشكل	القيمة (a)			
exact	2.99792458	$3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$	c	سرعة الضوء في الفراغ
0.30	1.60217733	$1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$	e	الشحنة الأولية
0.59	9.1093897	$9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$	m_e	كتلة سكون الالكترون
exact	8.85418781762	$8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$	ϵ_0	ثابت المجاوزية (السماحية) (Permittivity)
exact	1.25663706143	$1.26 \times 10^{-6} \text{ H/m}$	μ_0	ثابت الانفاذية (permeability)
0.023	5.48579902	$5.49 \times 10^{-4} \text{ u}$	m_e	كتلة سكون الالكترون (C)
0.014	1.008664904	1.0078u	m_n	كتلة سكون النيوترون (C)
0.011	1.007825035	1.0078u	$m(^1\text{H})$	كتلة سكون ذرة الهيدروجين (C)
0.012	2.014101779	2.0141u	$m(^2\text{H})$	كتلة سكون ذرة الديتريوم (C)
0.012	4.00260324	4.0026u	$m(^4\text{He})$	كتلة سكون ذرة الهليوم (C)
0.30	1.75881962	$1.76 \times 10^{11} \text{ C/kg}$	E/m_e	نسبة شحنة الالكترون / كتلته
0.59	1.6726231	$1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$	m_p	كتلة سكون البروتون
0.020	1836.152701	1840	m_p/m_e	نسبة كتلة البروتون / كتلة الالكترون
0.59	1.6749286	$1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$	m_n	كتلة سكون النيوترون
0.61	1.8835327	$1.88 \times 10^{-28} \text{ kg}$	m_μ	كتلة سكون الميون
0.60	6.6260755	$6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$	h	ثابت بلانك
0.089	2.42631058	$2.43 \times 10^{-12} \text{ m}$	λ_c	طول موجة الكترون كومبتون
8.4	8.314510	8.31 J/mol.K	R	الثابت العام للغاز
0.59	6.0221367	$6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	N_A	ثابت أفوغادرو
1.8	1.3806513	$1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$	K	ثابت بولتزمان
1.7	2.413992	$2.24 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{mol}$	V_m	الحجم المولارتي للغاز المثالي عند STpd
0.30	9.6485309	$9.65 \times 10^4 \text{ C/mol}$	F	ثابت فارادي
6.8	5.670399	$5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$	a	ثابت ستييفان - بولتزمان

المصادر المستخدمة

- 1 - LANZBERG. Optics, MOSCOW 1976 in RUSSIAN.
- 2 - GODJAREF.H.M. Optics MOSCOW, 1977. IN RUSSIAN.
- 3- MAX BORN, Priciples of optics, MOSCOW, 1973, in RUSSIAN.
- 4 - KALITEVSKY, wave optics, MOSCOW, 1978, in RUSSIAN.
- 5- KRAEFORD. F, Waves, MOSCOW 1984, in RUSSIAN.
- 6 - FEYNMAN, Lectures on physics, MOSCOW, 1978, In RUSSIAN.
- 7 - FRANCIS A.JENKINS & HARVEY E.WHITE, fundamental of optics.
الطبعة الرابعة باللغة العربية
- 8 - MILES V.KLEIN & THOMAS E. FURTAK Optics, 2nd edition, 1986, in
inglish.
- 9 - optoelectronics and Lightwave Technology, J.E. Midwinter. Y.L. GUO,
1992, in English.
- 10 - RESNICK, Halliday, and Krane physics, 4th edition, volume 1 & 2 1992
in English.
- 11 - University phsics, Hugh.D. Young, 8th Edition, 1992, in English.
- 12 - C.M. KOSEL, Problems in physics, 1987, MOSCOW, in RUSSIAN.
- 13 - BERGERAVSKAE, Problems in physics, MOSCOW, 1989, in RUSSIAN.
- 14 - CHERTOF A.G & VAROBAEF, Problem in physics, MOSCOW, 1981.
- 15 - GURSKI. E. P. Fundamentals of physics with examples and solutions,
MOSCOW, 1984, IN RUSSIAN.
- 16 - I. V. SAVELYEV, Physics, A General Course, MOSCOW, 1980, in Eng
lish.
- 17 - B.A. BALASH, Problems in physics and methods of its solutions, MOS-
COW, 1983, in RUSSIAN.
- 18 - G. B. MELEDIN, Physics in problems, MOSCOW, 1985, in RUSSIAN.
- 19 - FEYNMAN, Problems in physics, MOSCOW 1978, in RUSSIAN.
- 20 - O. FERNEL, Selected work in optics, MOSCOW, 1953, in RUSSIAN.

- 21 - BERCLEVSKE, Course of physics, waves, MOSCOW, 1984, in RUSSIAN.
- 22 - SEAFCHENCOW, Solutions of problems in physics, MINSK, 1988, in RUSSIAN.
- 23 - Problems in physics, E. E. VAROBEAF, P. E. ZOGBKOF, MOSCOW, 1988, in RUSSIAN.
- 24 - Problems in physics, P. A. GLADCOF, B. E. Dobronravov, L. C. Idanov, MOSCOW, 1980, in RUSSIAN.
- 25 - Physics Experiments, volum 1, 1st Edition September 1986, in English.

المحتويات

	الفصل الأول: الأمواج الكهرومغناطيسية
11	(1-1) الطيف الكهرومغناطيسي
13	(2-1) توليد الأمواج الكهرومغناطيسية
16	(3-1) الموجات المنتشرة ومعادلات ماكسويل
21	(4-1) الأمواج الجيبية
29	(5-1) نقل الطاقة ومتجه بوينتينغ
32	(6-1) زخم الإشعاع وضغطه
34	(7-1) الأمواج الكهرومغناطيسية
36	(8-1) الأمواج الواقفة
38	الخلاصة
42	مسائل
43	
	الفصل الثاني: طبيعة الضوء وانتشاره
53	(1-2) الضوء المرئي
56	(2-2) سرعة الضوء
58	(3-2) أثر دوبلر النسبي في الضوء
60	(4-2) حوادث أثر دوبلر النسبي
65	مسائل
67	
	الفصل الثالث: الانعكاس والانكسار
71	(1-3) الانعكاس والانكسار عند السطوح المستوية
73	(2-3) اشتقاق قانون الانعكاس
80	(3-3) اشتقاق قانون الانكسار
85	(4-3) تكون الصورة بواسطة المرآة المستوية
88	(5-3) الانعكاس الداخلي الكلي
92	(6-3) الألياف البصرية
96	الخلاصة
99	مسائل
99	

103	الفصل الرابع: المرايا والعدسات
105	(4 - 1) الانعكاس عند السطوح الكروية (المرايا)
106	(4 - 2) اشتقاق معادلة المراة الكروية
113	(4 - 3) الطريقة البيانية لتحديد موضع الصورة بواسطة المراة
115	(4 - 4) الانكسار عند السطوح الكروية
120	(4 - 5) العدسات الرقيقة
126	(4 - 6) الطريقة البيانية لتحديد موضع الصورة في العدسات الرقيقة
129	الخلاصة
130	المسائل

135	الفصل الخامس: الآلات البصرية
137	(5 - 1) العدسة الرقيقة المركبة
143	(5 - 2) الكامرة
146	(5 - 3) المسلاط (البروجيكتور)
148	(5 - 4) العين
154	(5 - 5) المجهر البسيط
156	(5 - 6) الميكروسكوب
159	(5 - 7) التليسكوب
160	(5 - 8) عدسات أخرى
162	(5 - 9) الزوجان العدسي
166	الخلاصة
167	مسائل

173	الفصل السادس: البصريات الهندسية التطبيقية
175	(6 - 1) حاجز ذو ثقب بؤبؤين
180	(6 - 2) الحاجز الحقلي والشبابيك
182	(6 - 3) المشعاعية (الراديو متري)
191	(6 - 4) المضوئية (الفوتومتر)
202	(6 - 5) الفوتومترات
205	مسائل

207	الفصل السابع: التداخل
209	(1-7) التداخل والمصادر المتشابهة
212	(2-7) تداخل الشقين
217	(3-7) توزيع شدة الشكل التداخلي
223	(4-7) جمع الاضطرابات الموجية
228	(5-7) منشور فرنل المزدوج
231	(6-7) مرآة فرنل المزدوجة
233	(7-7) مرآة لوي
236	(8-7) التداخل في الأغشية الرقيقة
245	الخلاصة
246	مسائل

253	الفصل الثامن: أجهزة تداخلية وتطبيقات تداخلية
255	(1-8) أمدا ب هايدنجر التداخلية
256	(2-8) مقياس جامين
259	(3-8) مقياس تداخل مايكلسون
262	(4-8) أجهزة تداخلية باشعة ضوئية متعددة الانقسامات
266	(5-9) التداخل عند فروق المسارات الكبيرة
268	(6-8) بعض استعمالات طرق البحث التداخلية
270	مسائل

273	الفصل التاسع: الحيود
275	(1-9) حيود فرنل وحيود فراونهوفر
278	(2-9) الحيود من شق واحد
280	(3-9) الشدة في حيود الشق الواحد
288	(4-9) الحيود عند الثقب الدائري
292	(5-9) الحيود من شقوق عدة
302	(6-9) محرز الحيود
308	(7-9) التفريق وقدرة التحليل
311	(8-9) حيود الأشعة السينية
317	(9-9) الهولوجرافي (أو التصوير المجسم)
321	الخلاصة
322	مسائل

329	الفصل العاشر: الاستقطاب
331	(1 - 10) الاستقطاب
336	(2 - 10) الاستقطاب الخطي (أو المستوي)
338	(3 - 10) الاستقطاب الدائري
347	(4 - 10) الاستقطاب الاهليجي
349	(5 - 10) درجة الاستقطاب
351	(6 - 10) الاستقطاب بواسطة البلورات ثنائية اللون
352	(7 - 10) الاستقطاب بواسطة الانعكاس
361	(8 - 10) الاستقطاب بواسطة الانكسار المزدوج
368	(9 - 10) استقطار الضوء
370	الخلاصة
371	مسائل

377	الفصل الحادي عشر: البصريات الكمومية
379	(1 - 11) الاشعاع الحراري
384	(2 - 11) قانون بلانك للاشعاع
388	(3 - 11) تكميم (أكمة) الطاقة
390	(4 - 11) السعة الحرارية للحلبي
395	(5 - 11) التأثير الكهروضوئي
400	(6 - 11) نظرية أنشتاين الفوتونية
404	(7 - 11) اثر كومتون
411	الخلاصة
412	مسائل

419	الفصل الثاني عشر: الليزر
421	(1 - 12) خصائص أشعة الليزر
423	(2 - 12) مبادئ عمل الليزر
426	(3 - 12) الضخ
431	(4 - 12) المنظومة الليزرية
434	(5 - 12) تطبيقات الليزر
435	الخلاصة
435	مسائل

چاپخانه