بسم الله الرحمن الرحيم

الفصل الأول

انبعاث الضوء وانتشاره

Emission and Propagation of Light

١/١- الطيف الضوئى : The optical spectrum

يبين الشكل رقم ١/١ خريطة كاملة للموجات الكهرومغناطيسية ، وتوصف هذه الموجات حسب طول موجتها بوحدة الانجستروم Å (١ انجستروم = $١٠^{-١٠}$ متر) أو النانومتر ($١٠^{-٩}$ متر) أو الميكرون ($١٠^{-٦}$ متر) ، أى أن ١ ميكرون = $١٠^{٤}$ انجستروم .

وينقسم الطيف الضوئى إلى ثلاث مناطق :

أ- منطقة فوق البنفسجية (١٠-٣٩٠ نانومتر) .

ب- منطقة الطيف المرئى (٣٩١-٧٧٠ نانومتر) .

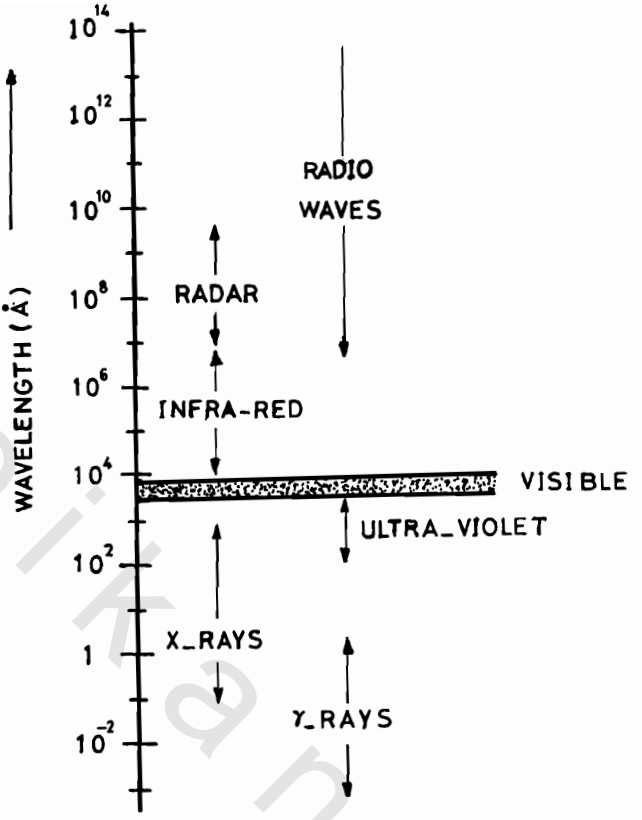
حـ- منطقة الأشعة تحت الحمراء (٧٧١ نانومتر الى ١٠٠٠ ميكرومتر) .

والأطوال الموجية المحددة لهذه المناطق ليست محددة بطريقة قطعية ، فمثلا : يمكن لأحد الأفراد رؤية الطيف المنبعث من ليزر الحقن (Al Ga As) ذات الطول الموجى ٨٠٠ نانومتر ، ويظهر على هيئة حزمة من أشعة الليزر ، لونها أحمر داكن ، إذ ترتبط الرؤية بعمر الرائى ، فكلما قرب من الشيخوخة قصر أطول طول موجى يمكنه رؤيته .

ويرتبط طول موجة الضوء λ بترددها υ بالمعادلة :

$$\upsilon = c/\lambda$$

ويكون طول موجة الضوء λ = ٩٠٤ نانومتر المنبعث من ليزر ارزينات الجاليوم Ga As ذات تردد υ = ٣,٣ × $١٠^{١٤}$ هرتز .



شكل رقم(١/١) : الموجات الكهرومغناطيسية

٢/١- طبيعة الضوء : Nature of light

يرى العالم الألمانى " ماكس بلانك Max Planck" عام (١٨٩٩) أن الضوء يتكون من عدد من الكم الضوئى quanta أو فوتونات Photons لها طول موجى وتردد معين ، وكذلك كمية محددة من الطاقة E تتناسب طرديا مع تردد الفوتون υ . والعلاقة الآتية تعطى كمية الطاقة المصاحبة E بدلالة التردد υ :

$$E = h\upsilon$$

حيث h مقدار ثابت يساوى ٦,٦٣ × ١٠-٢٧ إرج ثانية ، ويعرف بثابت بلانك . ويمثل الفوتون بحزمة موجية Wavepacket لها طاقة وكمية حركة momentum محددتان ، وهى خصائص جسيمية ، ولكن ليس للفوتون كتلة .

وتقترب هذه الحزم الضوئية فى مواصفاتها من الصورة الحديثة لقطار الموجات المترابطة الذى وصلت إلى توصيفه نظرية الترابط بين الموجات ، التى انبثقت بعد اكتشاف الانبعاث المستحث وأكدتها خصائص حزم أشعة الليزر .

وفى عام (١٩١٣) قدم الفيزيائى الدنماركى « نيل بوهر Niels Bohr » نظرية تفسر طيف ذرة الأيدروجين وتعرف باسمه . ويفترض فى نموذج بوهر للذرة أن الألكترونات تدور فى مدارات محددة حول النواة ، ولهذه المدارات مناسيب محددة من الطاقة ، وينتقل ألكترون من مدار إلى مدار آخر مسموح به عن طريق انبعاث أو امتصاص فوتون ذى طاقة ΔE حيث :

$$E_2 - E_1 = \Delta E = h\upsilon$$

حيث E_2, E_1 هما منسوبا الطاقة ، اللذان يتم بينهما الانتقال ، $E_2 > E_1$.

وتعتبر فكرة وجود مناسيب معينة من الطاقة فى الطبيعة أحد الأفكار الأساسية التى أسهمت فى تطوير ميكانيكا الكم .

وبتطبيق نظرية الكم على كمية التحرك الزاوى angular momentum – لا تأخذ قيم متصلة – نجح بوهر فى اشتقاق المعادلة الآتية التى تربط العدد الموجى wavenumber – لأى خط طيفى منبعث من ذرة الأيدروجين المثارة – بالأعداد الكمية الأساسية principal quantum numbers والتى تعرف بالمدارات :

$$\bar{\upsilon} = \frac{2\pi^2 z^2 e^4 \mu}{h^3 c}\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right), \text{ where } \mu = \frac{mM}{m+M}$$

حيث $\upsilon = \frac{1}{\lambda}$ سـم$^{-1}$ ، و n_2, n_1 عددان صحيحان ، وهما العددان الكميان الأساسيان للمنسوبين اللذين يتم بينهما انتقال الألكترون ، و m, e هما شحنة وكتلة الألكترون ، و h ثابت بلانك ، و c سرعة الضوء ، و z العدد الذرى ، وهو يساوى واحد فى حالة ذرة الأيدروجين ، و M هى كتلة النواة .

$$\bar{\upsilon} = R_H\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right), \text{ where } R_H = \frac{2\pi^2 z^2 e^4 \mu}{h^3 c}$$

وتسمى R_H ثابت رايدبرج Rydberg constant .

واقترح بعض الباحثين السابقين لبوهر معادلة وضعية تربط $\bar{\upsilon}$ بالعددين الصحيحين ، ووجدوا عمليا أن قيمة R تساوى ١٠٩٦٧٨ سم$^{-١}$. وعند التعويض بقيم M, c, h, m, e فى المعادلة التى أشتقها بوهر تأكد تطابق قيمة R المحسوبة مع النتائج العملية . وكان ذلك أحد المستندات التى تؤيد نظرية بوهر .

وعند تطبيق فرق جهد بين قطبى أنبوبة تفريغ تحتوى على أيدروجين تحت ضغط منخفض ، فإن ذراته تثار . وتتم عمليات الإثارة بتصادم ألكترون مع ذرة ، أو بتصادم ذرة مع ذرة ، وينبعث الضوء كنتيجة لانتقال الألكترونات فى ملايين الذرات المثارة ، حيث تنبعث فوتونات ذات تردد υ :

$$\upsilon = (E_{n1} - E_{n2}) / h$$

E_{n2}, E_{n1} هما منسوبا الطاقة اللذان يتم بينهما انتقال الألكترون .

وتشترك ملايين من هذه الفوتونات التى لها نفس التردد فى تكوين خط الطيف ذى التردد υ ، ويمكن تسجيل هذا الخط على لوح حساس وذلك باستخدام مطياف spectrograph يحتوى على منشور أو على محزوز حيود ، وبذلك ينتج عن إثارة ذرات العناصر وتحليل الأشعة المنبعثة منها خطوط طيف فى المناطق الطيفية المختلفة ، وتظهر خطوط الطيف عند تسجيلها كخطوط مضيئة ، تفصلها مسافات معتمة ، وتختلف المسافات الفاصلة ، وكذلك الشدة الضوئية للخطوط من خط طيفى إلى آخر ، ولكل عنصر خطوط طيف معينة تميزه عن العناصر الأخرى . ووجود خطوط الطيف ذات الأطوال الموجية المميزة لعنصر ما فى الأطياف المنبعثة من عينة مثارة ، دليل قاطع على وجود ذرات هذا العنصر فى العينة ، أى أن الأطياف المنبعثة من عنصر ما هى بصمته المميزة Finger print ، والشدة الضوئية لخط الطيف هى مقياس لتركيز العنصر فى العينة .

ويمكن أن ننظر إلى خطوط الطيف المنبعثة من الذرات المثارة على أنها لغة تعبر هذه الذرات بها عن نفسها . أى أن الذرات تتكلم بلغة الأطياف ، ويعتبر مكان خط الطيف (طوله الموجى) ، وشدته الضوئية ، ووجوده ضمن سلاسل أو مجموعات series ، ووجود تركيب

دقيق لخط الطيف ، وازدواجية خطوط الطيف doublets أو ثلاثيتها triblets والتركيب الدقيق الأدق hyperfine structure هى المعلومات التى تعتمد عليها نظريات التركيب الذرى وخصائص مكونات الذرات ، ومنها نستنتج وجود مناسيب للطاقة داخل الذرة وحساب طاقة المناسيب ، ودوران الألكترونات فى مدارات ، وشكل وأنصاف أقطار هذه المدارات ، والدوران المغزلى للألكترونات والنواة ، نستنتج ذلك من الأطياف التى يتم الحصول عليها عمليا من الذرات المثارة .

وتم الحصول على سلاسل طيف ذرة الأيدروجين وتسجيلها ، وهى : سلسلة ليمان Lyman والتى تظهر خطوطها الطيفية فى منطقة الأشعة فوق البنفسجية ، وسلسلة بالمر Balmer والتى تظهر خطوطها الطيفية فى منطقة الطيف المرئى ، وثلاث سلاسل تظهر فى منطقة الأشعة تحت الحمراء وهى لباشن Paschen وبراكت Bracket وفوندFund

$$\bar{\upsilon} = R\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right),\ n = 2,3,4,5, \ldots\ldots \text{ ultra-violet}$$

$$\bar{\upsilon} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right),\ n = 3,4,5, \ldots\ldots \text{ visible}$$

$$\bar{\upsilon} = R\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}\right),\ n = 4,5,6, \ldots\ldots \text{ near infra-red}$$

ولتسجيل سلسلة ليمان يستخدم مطياف مكوناته البصرية من الكوارتز ، حيث أن الزجاج يمتص الأطوال الموجية الأقصر من ٣٧٥٠ انجستروم .

ويلاحظ أن بعض الانتقالات بين مناسيب طاقة مفضلة عن الانتقالات بين مناسيب أخرى ، وهذا هو السبب فى اختلاف شدة الخطوط الطيفية الناتجة من إثارة ذرات عنصر معين . وبعض الانتقالات غير مسموح بها forbidden وبعض مناسيب الطاقة غير مستقرة metastable ، وبعضها لايكون مفردا degenerate أى يحتوى على مدارات تحتية sub-levels .

ومن المعلوم أنه عندما تثار ذرة بامتصاص فوتون ذى طاقة $h\upsilon$ فإنها سرعان ماتعود إلى حالتها المستقرة بانبعاثها لفوتون له نفس الطاقة .

ويوجد ثلاث انتقالات أساسية بين مناسيب الطاقة والتى تحدث فى الذرات والجزيئات :

١- الامتصاص Absorption .

٢- الانبعاث التلقائى Spontaneous emission .

٣- الانبعاث المستحث Stimulated emission .

وتتضمن الأطياف المنبعثة من مصادر الطيف انبعاثا تلقائيا وانبعاثا مستحثا ولها نفس طول الموجة ، ولكن يختلفان فى درجة الترابط بين الفوتونات المكونة لحزم الأشعة المنبعثة Coherence ، ويكون الانبعاث التلقائى هو الغالب فى المصادر الضوئية العادية - وسنتناول فى الفصل الثانى النسبة بين شدة الانبعاث التلقائى وشدة الانبعاث المستحث فى المصادر الضوئية .

ويستلزم للحصول على أشعة ليزر أن يكون الانبعاث المستحث هو الغالب ، وتنتج فى هذه الحالة أشعة ذات خصائص متميزة .

٣/١- الانعكاس والانكسار والاستقطاب :

Reflection, refraction and polarization of light

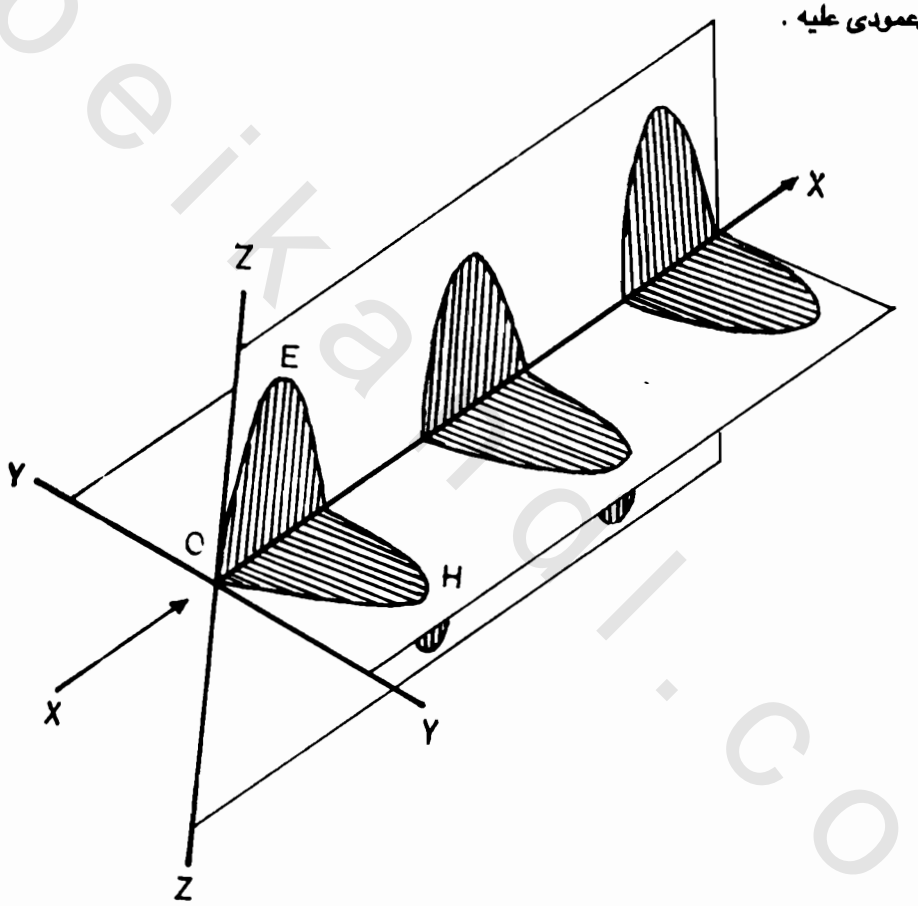
انعكاس وانكسار أشعة الضوء :

تحدد قوانين بسيطة اتجاه الأشعة الضوئية المنعكسة والمنكسرة ، والدراسة الكاملة لهاتين الظاهرتين تتطلب تناول سعة وطور هذه الأشعة ، ولتحقيق هذا الهدف يلزم أن نبدأ بتمثيل الضوء المستقطب فى المستوى الذى تتحدد فيه ذبذباته المتوازية ، والسبب فى ذلك أن الشدة الضوئية المنعكسة والمنكسرة عند السطح الفاصل بين وسطين عازلين تتوقف على مستوى استقطاب ذبذبات قطار الموجات الساقطة . فللاتجاهين الأساسيين أو الرئيسيين لذبذبات الضوء وهما الذبذبات الموازية لمستوى السقوط والمتعامدة على هذا المستوى ، يوجد - لكل منهما - تعبير رياضى ، يربط بين الشدة الضوئية وزاويتى السقوط والانكسار ، وهو تعبير مغاير لاتجاه الذبذبات الآخر .

دعنا نتناول تمثيل أبسط أنواع الموجات الكهرومغناطيسية التى تكون فيها جبهة الموجة مستوية وعند أية نقطة يمر بها قطار الموجات تتذبذب السعة الكهربية والسعة المغناطيسية

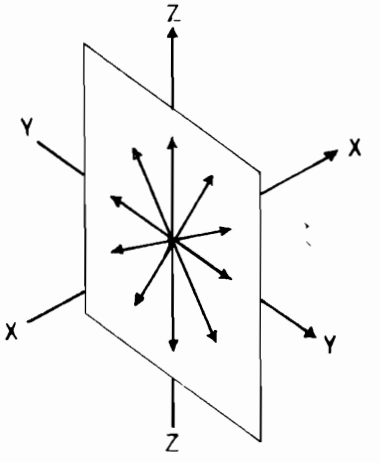
فى اتجاه خطوط مستقيمة متعامدة وعموديا على اتجاه مسار الضوء . يبين شكل (٢/١) قطار من الموجات يسير قدما فى اتجاه محور X ، وتوجد موجات تتبع المنحنى الجيبى فى المستويين (Y,X), (Z,X) ، وتسمى هذه الموجات بالموجات المستقطبة فى مستوى ، ويعنى هذا أن قمة المتجه E أو H تتذبذب فى الاتجاه الموضح فى الشكل .

والشكل رقم (٣/١) يمثل حزمة من الأشعة الضوئية العادية ، أى غير المستقطبة ، حيث يتذبذب المتجه الكهربى E فى جميع الاتجاهات بشكل متماثل حول اتجاه انتشار الضوء وعمودى عليه .



شكل رقم (٢/١) : قطار من الموجات الضوئية المستقطبة فى مستوى وتسير قدما فى اتجاه المحور

Openkandil.com



شكل رقم (١/٣) : حزمة من الأشعة الضوئية غير المستقطبة

دعنا نتناول ظاهرة انعكاس وانكسار قطار من الموجات الكهرومغناطيسية عند السطح الفاصل بين وسطين عازلين معامل انكسارهما n', n ، حيث n' > n وكما هو موضح فى الشكل رقم (٢/١) يمثل الموجة شعاع مفرد ، ويقع السطح الفاصل فى المستوى Y - Z ، ومركز الإحداثيات O هو نقطة السقوط ، والعمودى على هذا السطح عند نقطة السقوط هو محور X ، وتقع الأشعة الساقطة والمنعكسة والمنكسرة جميعها في مستوى واحد هو مستوى السقوط وهو المستوى X - Y .

ولكى نحصل على التعبير الرياضى الذى يعطى الشدة الضوئية المنعكسة والشدة الضوئية المنكسرة كنسبة من الشدة الضوئية الساقطة عند السطح الفاصل ، يكفى أن نتناول ونحلل حالتين فقط : الحالة الأولى : عندما يكون الشعاع الساقط مستقطبا فى مستوى السقوط ، أى يكون متجهه الكهربى يتذبذب موازيا لهذا المستوى ، والحالة الثانية : عندما يكون مستوى الاستقطاب عموديا على مستوى السقوط .

وقد تمكن العالم الفرنسى « فرنل Fresnel » من اشتقاق المعادلات التى تعطى نسبة سعة الموجة المنعكسة إلى سعة الموجة الساقطة للحالتين السابق ذكرهما أى عندما يكون الشعاع الساقط مستقطبا في مستوى السقوط وكذلك فى المستوى العمودى عليه بدلالة زاويتى السقوط والانكسار .

وكذلك النسبة بين سعة الموجة المنكسرة إلى سعة الموجة الساقطة فى الحالتين .

ونظرا لأننا لم نتناول حالة سقوط الأشعة غير العمودية فى أبواب هذا الكتاب ، فقد اكتفينا بتناول الانعكاسية عند السقوط العمودى فقط ، وفيه يكون التعبير الرياضى للشدة الضوئية المنعكسة هو نفسه فى حالتى الأشعة المستقطبة فى مستوى موازٍ لمستوى السقوط وعموديا عليه .

فالانعكاسية R عند السقوط العمودى تعطيها العلاقة الآتية بعد وضع $n = 1$ ، $n' = n$ ، وذلك إذا كان الوسط المحيط بالسطح هو الهواء .

$$R = \frac{E_r^2}{E_\circ^2} = \left(\frac{n - 1}{n + 1}\right)^2$$

حيث $E_\circ$, E_r تمثلات سعة الموجة المنعكسة والساقطة على الترتيب .

هذه العلاقة الهامة أمكن اشتقاقها من معادلات فرنل التى تعبر عن الحالة العامة ، وهى السقوط المائل عندما تكون زاوية السقوط تساوى صفرا ، فانعكاسية سطح مفرد نظيف من عازل مثل الزجاج حيث $n = 1.50$ بالتعويض فى العلاقة السابقة تعطى $R = 4\%$.

الانعكاس عند سطح معدنى :

تظل معادلة Fresnel صحيحة فى حالة السقوط العمودى على سطح معدنى إذا ماأخذ معامل الانكسار المركب $\tilde{n} = n(1 - ik)$ مكان معامل انكسار العازل n فى المعادلة ، فالنسبة بين سعة الشعاع المنعكس إلى الشعاع الساقط تعطيها المعادلة :

النسبة هى $\frac{n-1}{n+1}$.

$$\frac{E_r}{E_\circ} = \frac{E_r e^{i\theta}}{E_\circ} = \frac{n(1-ik) - 1}{n(1-ik) + 1} = \frac{n - 1 - ink}{n + 1 - ink}$$

حيث θ هى زاوية تغير الطور عند الانعكاس (هواء / سطح معدنى) .

وبضرب طرفى المعادلة بالمرافق نحصل على :

$$\frac{\tilde{E}_r}{E_\circ} = \frac{(n-1) - ink}{(n+1) - ink} \times \frac{(n+1) + ink}{(n+1) + ink}$$

$$= \frac{(n^2-1) - ink\,(n+1) + ink\,(n-1) + n^2k^2}{(n+1)^2 + n^2k^2}$$

$$= \frac{(n^2-1) + n^2k^2}{(n+1)^2 + n^2k^2} - \frac{2\,ink}{(n+1)^2 + n^2k^2}$$

$$= \sqrt{A^2 + B^2}\; e^{i\theta} = \sqrt{A^2 + B^2}\; e^{i\tan^{-1} B/A}$$

وتكون الانعكاسية $R = A^2 + B^2$

$$= \frac{(n-1)^2 + n^2k^2}{(n+1)^2 + n^2k^2}$$

$$\tan\theta = \frac{B}{A} = \frac{2\,nk}{1-n^2 - n^2k^2}$$

هذه المعادلة تعطى تغير الطور عند الانعكاس (هواء / سطح معدنى) عند السقوط العمودى . فإذا أخذنا فى الاعتبار طور الأشعة عند الانعكاس ، فإنه يتطلب تعديل شرط الحصول على هدب التداخل المضيئة عند النفاذ وهدب التداخل المعتمة عند الانعكاس .

١/٤- حيود الأشعة الضوئية : Diffraction of Light

عندما يمر شعاع ضوئى خلال فتحة ضيقة ، فإنه دائما ينتشر إلي حد ماخارج حدود المنطقة المعرضة للضوء ، وبعبارة أخرى نجد أن الضوء ينتشر فى منطقة الظل الهندسى ، وتسمى ظاهرة انحناء الضوء عند الحواف الحادة وعدم التزامه بالانتشار فى خطوط مستقيمة عند مروره بهذه الحواف بظاهرة حيود الأشعة الضوئية .

وينقسم حيود الأشعة الضوئية إلى نوعين :

أ- حيود فرانهوفر : Fraunhofer diffraction وفيه يكون المصدر الضوئى والحائل الذى يتكون عليه نموذج الحيود على مسافات بعيدة من الفتحة المسببة

لهذا الحيود ، فتصل حزمة من الأشعة المتوازية منبعثة من المصدر لإضاءة الفتحة وتجمع الأشعة النافذة والحائدة فى المستوى البؤرى لعدسة .

ب- حيود فرنل Fresnel diffraction : وفيه يكون المصدر الضوئى أو الحائل أو كلاهما على مسافة محددة من الفتحة المسببة للحيود .

نموذج حيود فرانهوفر باستخدام فتحة مستطيلة :

Fraunhofer diffraction pattern using a rectangular slit :

يبين الشكل رقم (٤/١) النظام البصرى المستخدم للحصول على حيود فرانهوفر باستخدام فتحة مستطيلة . دعنا نحصل على محصلة الموجات التى تمثلها المتجهات الآتية :

$$a_1 e^{i\phi 1},\ a_2 e^{i\phi 2},\ a_3 e^{i\phi 3},\ a_4 e^{i\phi 4} .....$$

للوصول الى هذا الهدف نرسم متجها طوله a_1 يصنع زاوية ϕ_1 مع ox كما فى الشكل رقم (٥/١) ليمثل الموجة الأولى ، ونستمر فى رسم متجهات تمثل بقية الموجات فيكون طول الخط الذى نستكمل له الشكل المضلع polygon الناتج ممثلا لقيمة سعة المحصلة ، وتمثل الزاوية ϕ المحصورة بين المحصلة واتجاه ox زاوية الطور .

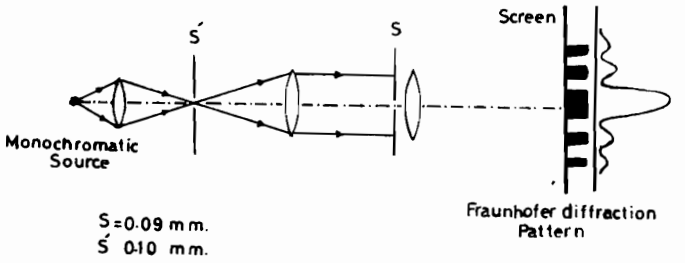
وفى حالة جمع مجموعة من الموجات على هيئة سلسلة فيها فرق الطور بين كل موجتين متتاليتين صغير جدا ولكنه يتغير باستمرار من موجة إلى أخرى ، فإنه ينتج منحنى بدلا من الشكل المضلع . ويمثل عنصر الطول عند أى نقطة على هذا المنحنى سعة الموجة المشاركة ، بينما تمثل الزاوية المحصورة بين المماس لهذا المنحنى عند هذه النقطة مع الخط ox طور هذه الموجة .

وعندما تكون مجموعة الموجات ذات سعات متساوية وعددها كبير جدا وفرق الطور بينها صغير جدا وثابت ، نصل إلى الحالة الخاصة الذى يتحول فيها الشكل المضلع إلى جزء من محيط دائرة (شكل رقم ٦/١) . وإذا كانت سعة الموجة هى a وعدد الموجات يساوى n فإن :

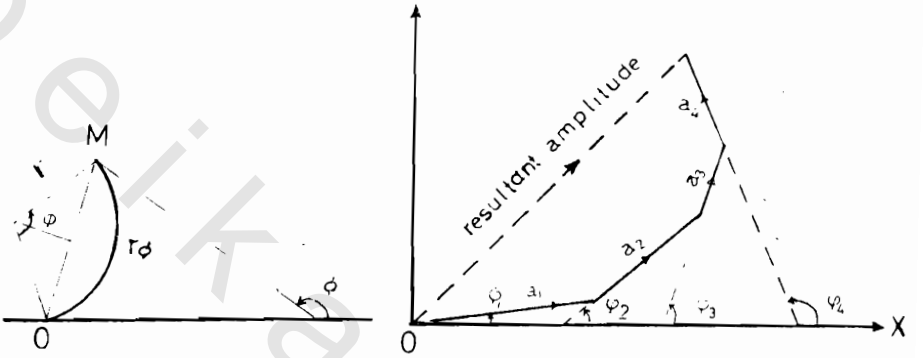
$$\text{Amplitude} = 2\,r \sin \frac{\phi}{2} = OM$$

$$\text{arc } OM = r\phi = na = A$$

$$r = na/\phi$$



شكل رقم (١/٤) النظام البصرى المستخدم للحصول على حيود فرانهوفر باستخدام فتحة مستطيلة



شكل رقم (١/٥) تمثيل الموجات بالشكل المضلع .

شكل رقم (١/٦) الحالة الخاصة عندما تكون مجموعة الموجات لها نفس السعة وعددها كبير جدا وفرق الطور صغير جدا وثابت

وتعطى المعادلة الآتية محصلة السعة :

$$\text{The amplitude of resultant} = OM = 2\,r \sin \phi/2 = \frac{na \sin \frac{\phi}{2}}{\frac{\phi}{2}}$$

ويتضح من الشكل رقم (١/٧) أن فرق المسار يتغير باستمرار من صفر إلى $d \sin \theta$ ، وبذلك يتغير فرق الطور من صفر إلى $\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta$

$$\therefore \text{The amplitude of resultant} = \frac{A \sin \frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta}{\frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta}$$

$$\text{The intensity } I = A^2 \frac{\sin^2 \alpha}{\alpha^2} \text{ , where } \alpha = \frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta$$

1. When $\theta = 0 \therefore \alpha = 0$

$$\lim_{\alpha \to o} \frac{\sin \alpha}{\alpha} = 1$$

$$\therefore {}_{\alpha \to o} I = A^2 = I_c$$

2. When $\alpha = m\,\pi$, where $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, ...$

$\therefore \quad I = \text{zero}$

3. When $\alpha = \frac{3\pi}{2}$

$$I = A^2 \frac{\sin^2 \alpha}{\alpha^2} = \frac{4}{9\pi^2} A^2$$

$$\therefore \quad I = \frac{1}{22.2} A^2$$

4. When $\alpha = 5\,\pi/2$

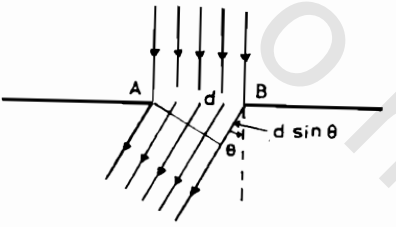
$$I = (4/25\,\pi^2)\,A^2 = \frac{1}{61}\,A2$$

5. When $\alpha = \pi/2$, the intensity $I = I_D$

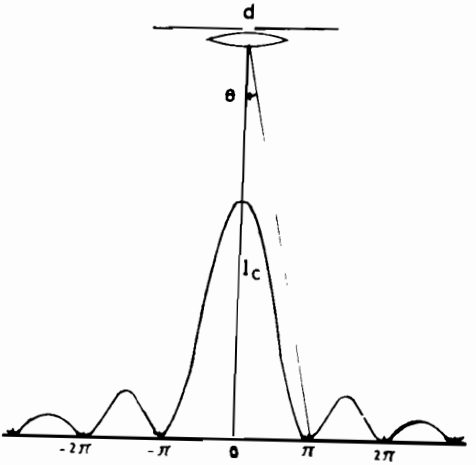
$$I_D = \frac{4}{\pi^2} A^2 = 0.405\,A^2$$

$$I_D = 0.405\,I_c$$

ويبين الشكل رقم (٨/١) نموذج حيود فرانهوفر الناتج من فتحة مستطيلة .

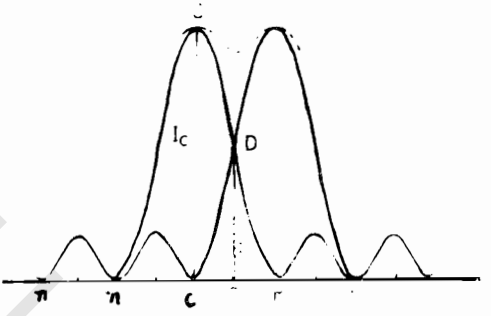


شكل رقم (٧/١) تمثيل فرق المسار فى حالة فتحة مستطيلة مفردة .



شكل رقم (٨/١) نموذج حيود فرانهوفر الناتج من فتحة مستطيلة

وعندما تقع النهاية العظمى لنموذج حيود جسم ما علي أول نهاية صغرى لنموذج حيود جسم آخر كما فى الشكل رقم (٩/١) ، تكون هذه هى الحالة التى تحدد أقل مسافة بين جسمين متجاورين يمكن الحصول على صورتين منفصلتين لهما . هذه هى حدود قدرة التحليل Just resolution وهى أسس معيار رالى للقدرة على التحليل والحصول على صور منفصلة Rayleigh's criterion for resolution



شكل رقم (٩/١) : حالة حدود قدرة التحليل (أسس معيار رالى للقدرة على التحليل والحصول على صور منفصلة) .

١/٥- الامتصاص والتشتت : Absorption and Scattering

عندما تنتقل الموجات الكهرومغناطيسية خلال أى وسط مادى ، فإن شدتها تضمحل بالامتصاص والتشتت ، وتتغير شدة الموجات حسب المعادلة الآتية :

$$I = I_0 e^{-\mu r}$$

حيث I_0 هى شدة الموجات الابتدائية ، r هى المسافة التى قطعتها هذه الموجات خلال هذا الوسط، μ هو معامل الاضمحلال attenuation coefficient بوحدات مقلوب المسافة .

وتوضح هذه المعادلة أن شدة الموجات تقل أسيا مع المسافة r التى قطعها الشعاع داخل الوسط . يتغير معامل الاضمحلال بتغير الطول الموجى λ ، ويمكن أن ينقسم إلى ثلاث مكونات أساسية :

$$\mu = \sigma_{\text{absorption}} + \sigma_{\text{Rayleigh scattering}} + \sigma_{\text{Mie scattering}}$$

ويتناسب تشتت رالى مع λ^{-4} ويحدث نتيجة وجود الجسيمات ذات الأبعاد التى تساوى الطول الموجي للضوء تقريبا . أما الجسيمات ذات الأبعاد الأكبر فإنها تسبب تشتت

مای Mie Scattering ، الذى يتغير بتغير حجم الجسيمات وشكلها ، ومعامل انكسار مادتها وزاوية التشتت ، وطول موجة الضوء .

تشتت الضوء Scattering of Light :

أوضح العالم « فرنل » أن غياب الأشعة العمودية على مسار حزمة أشعة الضوء التى تنتشر فى الفراغ يحدث نتيجة التداخل الضوئى الهدام للموجات ، التى يمكن اعتبار أنها تنبعث من جميع النقط فى الحيز الذى تنتشر فيه أو يقطعه شعاع الضوء . تتحقق نفس الظروف فى وسط تام الشفافية وتام التجانس ، لكن وجود مناطق غير متصلة فى وسط لايتفق مع تلك الظروف المطلوبة لحدوث التداخل الضوئى الهدام ، يحدث تشتت عرضى للضوء وتنبعث أشعة عرضية نتيجته .

وفى سنة (١٩٦٦) وجد "Kao & Hockman " أن إضمحلال الضوء بواسطة الزجاج المستخدم فى تصنيع الألياف البصرية ليس خاصية أساسية للمادة ، ولكنه يحدث من الشوائب الموجودة فى هذه المادة وخصوصا أيونات المعادن . ويتحدد الفقد الذاتى أساسا من تشتت رالى ومقداره صغير جدا ، ويؤدى نقص محتوى الشوائب إلى معدل فقد أقل ، وقد لوحظ أيضا أن اضمحلال قدرة ٢٠ ديسبل / كم dB/Km (decibel per kilometer) للألياف البصرية الزجاجية المستخدمة فى التراسل الضوئى يعتبر الحد المقبول عمليا لاستخدامها فى التراسل لمسافات طويلة .

وفى عام (١٩٧٠) نجحت شركة Corning Glass الأمريكية فى تصنيع ألياف بصرية أحادية المنوال Single mode ذات فقد مقداره أقل من ٢٠ ديسبل / كم.

وفى سنة (١٩٧٢) أعلن عن الوصول إلى فقد اقل ومقداره ٤ ديسبل / كم ، وذلك لألياف بصرية عديدة المنوال ذات لب مصنوع من السيليكون .

وفى عام (١٩٧٦) نجح باحثون يابانيون فى تصنيع ألياف بصرية ذات محتوى هيدروكسيل (OH) قليل للغاية وتوصلوا إلى اقل فقد ممكن ومقداره ٠,٤٧ ± ٠,١ ديسبل / كم ، وهى قيمة قريبة جدا من قيمة الفقد الذاتى للمادة (تشتت رالي) . وباستخدام أطوال موجية أطول أمكن خفض مقدار الفقد إلى ٠,٢ ديسبل / كم سجل لألياف أحادية المنوال عند λ = ١,٥٥ ميكرون .

تشتت الضوء بالجسيمات الصغيرة : Scattering of light by small particles

يتشتت الضوء كنتيجة لوجود جسيمات صغيرة عالقة فى وسط شفاف أو بجزيئات المادة ، وقد بحثت هذه الظاهرة قبل اكتشاف التشتت (بالمواد الصلبة النقية الشفافة وكذلك السوائل والغازات) بوقت طويل .

فإذا سمح لشعاع من الضوء يمر خلال وسط شفاف يحتوى على جسيمات صغيرة عالقة ، معامل انكسار مادتها يختلف عن معامل انكسار الوسط المحيط بها ، فإن الضوء يتشتت فى جميع الاتجاهات ، وإذا كانت هذه الجسيمات صغيرة جدا ، فإن الضوء المتشتت يكون جميعه مستقطبا استوائيا ، بحيث يكون المتجه الكهربى عموديا على اتجاه الضوء الساقط واتجاه الملاحظة ، وإذا كان الشعاع الساقط مستقطبا استوائيا ، فإن الضوء لايتشتت فى الاتجاه الموازى لهذا المتجه الكهربى ، وتزيد شدة الضوء المشتت بسرعة بزيادة قطر الجسيمات ، وتتناسب طرديا مع مربع حجمها .

والمعادلة الآتية تعطى صيغة رالى لشدة الضوء I المشتت فى الاتجاه الذى يصنع زاوية β مع الشعاع الساقط غير المستقطب .

$$I = I_o \frac{(D'-D)^2}{D^2} (1 + \cos^2 \beta) \frac{m\pi v^2}{\lambda^4 r^2}$$

حيث I_o هى شدة الضوء الساقط ، D, D' هما الكثافة الضوئية Optical densities للجسيمات والوسط المغمور فيه ، m هى عدد الجسيمات ، λ هى طول موجة الضوء ، v هى حجم الجسيم المشتت للأشعة الضوئية ، r هى المسافة من هذا الجسيم الى نقطة القياس .

وتوضح هذه المعادلة أن شدة الضوء فى اتجاه السقوط هى ضعف الشدة فى الاتجاه العمودى عليه .

تقلبات أو تغيرات الكثافة وتشتت أشعة الضوء :

يقل التداخل الهدام للأشعة المترابطة المشتتة فى الاتجاهات العرضية بواسطة جزيئات سائل بقدر ملحوظ فى وجود تقلبات فى الكثافة ، وأثبتت الحركة البراونية Brownian للجسيمات الصغيرة فى السائل أن هذه التغيرات فى الضغط موجودة ، وكنتيجة لها توجد تغيرات الكثافة التى تتناسب طرديا مع انضغاطية السائل Compressibility .

منع استقطاب الضوء المتشتت : Depolarization of scatterd light

فى حالة إضاءة الغازات والسوائل بضوء مستقطب ، فإنه عادة مايلاحظ أن الضوء أصبح مستقطبا جزئيا ، أى أنه حدث منع جزئى للاستقطاب depolarization ، يحدث ذلك عندما يكون الجزئ غير متجانس بالنسبة للاتجاهات الكارتيزية anisotropic ويكون ترتيب الجزيئات فى اتجاهات مختلفة ولاتكون العناصر المسببة للتشتت موازية لذبذبات الضوء .

ويحدث تشتت «ماى » عندما تكون الأطوال الموجية للضوء المستخدم أقل من أقطار الجسيمات العالقة والمسببة للتشتت ، فالدخان والغبار وقطيرات الماء هى المسببات الرئيسية لتشتت « ماى » فى الجو . ويمكن التعبير عن تشتت « ماى » كميا بالمعادلة الوضعية الآتية (Pratt, 1969) التى تعطي معامل التشتت :

$$\sigma_{\text{Mie scattering}} = (3.91/v)\,(\lambda_c/0.55)^{-0.585v^{1/3}}$$

where σ_{MS} is per kilometer

v is the visual range in kilometers

λ_c is the wavelength in microns.

٦/١-التفرق الضوئى : Dispersion

كان « كوشى Cauchy » أول من حاول وضع نظرية لتفسير زيادة انكسار شعاع ضوئى عندما يقل طول موجة الضوء المستخدم وذلك عام (١٨٣٦) . فقد استنتج صيغة للتفرق الضوئى والتى تعرف باسمه وفيها يتغير معامل انكسار المادة n_λ مع الطول الموجى للضوء تبعا للعلاقة الآتية :

$$n_\lambda = A + B/\lambda^2 + C/\lambda^4$$

ويتم حساب ثوابت هذه المعادلة C, B, A بتعيين قيم n_λ باستخدام ثلاثة أطوال موجية معروفة وبعيدة عن بعضها ، وقد وجد أن هذه المعادلة تمثل تفرق الضوء فى معظم المواد الشفافة .

وقد قدم اكتشاف التفرق الشاذ أو غير المألوف anomalous dispersion والعلاقة بين الإمتصاص والتفرق معلومات مفيده ، فقد وجد أن معامل انكسار مادة تعانى امتصاص انتقائيا selective absorption يزيد بسرعة عندما تقترب شرائط الامتصاص absorption bands من منطقة الأشعة فوق البنفسجية . ولذلك لايوجد اختلاف أساسى بين التفرق المألوف والتفرق غير المألوف ، حيث يعتبر الأول حالة خاصة من الثانى . وفى حالة التفرق المألوف فإن الدراسة والملاحظة تتم فى مدى ضيق من الأطوال الموجية لايسمح بظهور هذا الشذوذ .

وقد استنتج "Sellmeier" معادلة تمثل التفرق الضوئى ، وذلك فى حالة الأطوال الموجية التى تعتبر المادة بالنسبة لها شفافة تماما أى على جانبى شريط الامتصاص .

$$n_\lambda^2 = 1 + \frac{D\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda^2_m}$$

حيث n_λ هى معامل انكسار المادة للطول الموجى ، λ, λ_m هى الطول الموجى الذى يحدده طيف امتصاص ذرة العنصر ، D هى مقدار ثابت يتغير مع نوعية بخار المادة .

التفرق الضوئى للمادة : Material dispersion

إن معامل انكسار مادة – كما سبق أن ذكرنا – هو دالة فى الطول الموجى ، وتزيد سرعة الضوء فى الوسط كلما نقص معامل انكسار مادة الوسط ، وتكون النتيجة أن الضوء المتكون من عدة أطوال موجية مختلفة ينتقل بسرعات مختلفة خلال نفس الشعيرة البصرية المستخدمة فى التراسل الضوئى . والأطوال الموجية الأطول لها معامل انكسار أقل وسرعة انتقال أعلى ، ويسمى هذا التأثير بالتفرق الضوئى الذى تسببه المواد المستخدمة فى تصنيع الألياف البصرية للضوء ويظهر كتفرق للأطوال الموجية Material or wavelength dispersion.

ويجب أن نفرق بينه وبين التفرق المنوالى model dispersion والذى ينتج من وجود مناويل أى مسارات مختلفة للأشعة داخل الشعيرة .

ويقل التفرق الضوئى الذى تسببه المواد إذا مااستخدمت مصادر ضوئية ينبعث منها شرائط ضيقة من الأطوال الموجية أو خطوط طيفية حادة ضئيلة العرض ، وهذه هى حالة

ليزر الحقن injection laser والتى تصدر شرائط ضيقة جدا ذات عرض حوالى نانومتر واحد عندما تقارن مع الضوء الصادر من ثنائى باعث الضوء light emitting diodes والتى تصدر شرائط عرضها ٣٠-٤٠ نانومتر .

ويكون التفرق الضوئى للمواد ملحوظا جدا عمليا فى حالة الألياف البصرية وحيدة المنوال ، والتى يختفى فيها التفرق المنوالى أى الناتج من وجود أكثر من منوال . هذا ولقد وجد أن التفرق الضوئى الذى تسببه المواد يختفى عند طول موجى محدد ، فمثلا فى حالة الألياف البصرية المصنعة من السيليكا المنصهرة Fused silica يختفى التفرق الضوئى عند λ = ١,٢٧ ميكرون ، وبزياده الطول الموجى عن هذه القيمة يظهر التفرق الضوئى مرة أخرى ولكن بإشارة مختلفة .

ويمكن أن تصنع ألياف من السيليكا المنصهرة ذات تفرق ضوئى يساوى صفرا عند λ = ١,٣٢ ، λ = ١,٥٥ ميكرون ، وذلك يسمح باستخدام مصادر ضوئية ذات شرائط عرضية high band width وتعنى قيمة «التفرق الضوئى = الصفر » أنه يمكن استخدام الضوء غير المترابط الناتج من ثنائى باعث للضوء الذى يصدر عنه ضوء غير مترابط عند استخدام وصلات من الألياف .

١/٧- المصادر الضوئية : Light sources

مصادر الضوء هى أجهزة ينبعث منها خطوط طيفية ، وتستخدم لإضاءة مقاييس التداخل الضوئى بأشعة أحادية الطول الموجى . وينبغى أن تكون هذه الخطوط الطيفية حادة ضئيلة العرض ، ولها شدة مناسبة وخالية من التركيب الطيفى الدقيق ، أى لاتوجد فى مناطق مزدحمة بخطوط الطيف الدقيقة التى تحيط بخط الطيف ، وأن يقع طولها الموجى فى المنطقة الطيفية المرئية أو فى منطقة الأشعة تحت الحمراء القريبة أو فى منطقة الأشعة فوق البنفسجية .

والمصادر الضوئية المستخدمة بكثرة فى التداخل الضوئى هى :

مصابيح الزئبق ذات الضغط العالى وذات الضغط المنخفض عند الطول الموجى ٥٤٦٠,٧٥ انجستروم ، مصباح الثاليوم عند ٥٣٥٠ انجستروم ، مصباح الزئبق - كادميوم

، ونظير الزئبق Cd^{114}, Kr^{86}, Hg^{198} وليزر الهيليوم نيون عند ٦٣٢٨ انجستروم ، وليزر الياقوت عند ٦٩٣٤ انجستروم .

وتصدر مصابيح الزئبق – سواء عند الضغط العالى أو المنخفض – الخطوط الطيفية الآتية فى المنطقة المرئية ٥٧٩٠ ، ٥٧٧٠ أنجستروم (أصفر) ، ٥٤٦٠,٧٥ انجستروم (أخضر) ، ٤٣٥٨,٥ (أزرق) ، ٤٠٧٨ ، ٤٠٤٧ أنجستروم (بنفسجى) . وللحصول على ضوء أحادى طول الموجة يمكن استخدام مرشح ضوئى يقوم على التداخل الضوئى interference filter مع مصباح الزئبق ، وتتميز هذه المرشحات بعرضها النصفى الضيق ، وهو عرض النافذه الطيفية عند منتصف شدتها العظمى عند المركز λ_0 ، ويكون عرض هذه النافذة فى حدود ١٠ نانومتر ، وبالتالى فإن هذا المرشح يسمح بمرور الأطوال الموجية $\lambda_0 \pm 5$ انجستروم . وكلما قل العرض النصفى للخط الطيفى كلما قرب الشعاع النافذ من أن يكون أحادى طول الموجة ولكن يحدث ذلك على حساب شدة الضوء النافذ .

ومرشح التداخل الضوئى الأخضر الذى تتركز نافذته عند λ = ٥٤٦٠,٧٥ أنجستروم وعرضه النصفى ١٠٠ أنجستروم ، يسمح فقط بمرور ضوء الزئبق الأخضر أحادى طول الموجة ، ويحجب بقية الخطوط الطيفية لمصباح الزئبق ، حيث إن الطول الموجى عند ٥٧٧٠ أنجستروم يبعد عن الخط الأخضر بمقدار ٣١٠ أنجستروم .

ولكل مصدر طيفى مرشحه الخاص الذى يسمح بمرور الطول الموجى المناسب ، ولايحتاج مصباح الثاليوم إلى مرشح فى المنطقة الطيفية المرئية ، حيث إنه لاتوجد أية خطوط طيفية ذات شدة كافية فى هذه المنطقة غير خط الطيف عند ٥٣٥٠ أنجستروم ، ويصدر مصباح الزئبق خطين طيفيين فى منطقة الأشعة فوق البنفسجية عند الطول الموجى ٣٦٥٠ ، ٢٦٥٠ أنجستروم ، وهما خطان مناسبان لدراسات التداخل الضوئى فى هذه المنطقة الطيفية . وفى هذه الحالة يستخدم مصباح زئبق نو نافذة من الكوارتز ، حيث إن الزجاج يمتص الأشعة فوق البنفسجية ، ويمرر فقط الأطوال الموجية فى منطقة الطيف المرئى .

وفى أنظمة التداخل الضوئى التى تستخدم الضوء الأبيض – كما فى حالة هدب التداخل الضوئى ، متساوية الرتبة اللونية – فإنه يستخدم مصدرا ضوئيا تكون فتيلته على

شكل كرة صغيرة متمركزة فى مركزه pointolite source ، وكثيرا ماتستخدم فتائل على هيئة خطوط مستقيمة فى التجارب التى تحتوى على فتحات طولية ذات شق مستطيل . وتستخدم مصابيح الأيدروجين ذات نوافذ من الكوارتز كمصادر طيفية فى منطقة الأشعة فوق البنفسجية .

وينبعث من المصادر العادية ضوء مترابط فوتوناته جزئيا ، والفرق بينهما هو فى كمية هذا الترابط ، وتظهر موجات الضوء كمنحنى جيبى نقى فقط فى منطقة محدودة من الفراغ أو فى زمن محدود أيضا .

وتحتوى المصادر الضوئية الليزرية على مميزات غير موجودة فى المصادر العادية ، فمثلا فى حالة أشعة الليزر تصدر كل الذرات أشعة طورها ثابت لمدة $\frac{١}{١٠٠}$ أو $\frac{١}{١٠}$ ثانية ، وفى بعض الحالات لفترات أطول .

وتنقسم المصادر الضوئية التى ينبعث منها ضوء فى مناطق الطيف المنظور والأشعة تحت الحمراء والأشعة فوق البنفسجية إلى ثلاث مجموعات :

أ- القوس الكهربى ، الشرارة ، أنابيب التفريغ الكهربى الخالية من الأقطاب electrodeless .

ب- المصادر الطيفية التى تستخدم لدراسة التركيب الدقيق ، وهى مصباح الكاثود الأجوف hollow cathode lamps ، ومصباح حزم الأشعة الذرية atomic beam ، ومصابيح النظائر isotope lamps .

جـ- الليزر المستمر والنبضى .

وأحد الفروق الرئيسية بين الأشعة المنبعثة من المجموعات الثلاث هو درجة نقائها الطيفى degree of monochromaticiy ، وتقاس هذه الخاصية بالعرض النصفى لغلاف الأشعة المنبعثة ، وتتكون كل الخطوط الطيفية من أغلفة لمدى الترددات التى تتمركز حول منتصف الخط الطيفى ذى طول الموجة الذى يصف هذا الخط . وكلما قل عرض الخط الطيفى كلما قرب من خط طيفى أحادى طول الموجة monochromatic . وسنشرح هذه الخاصية بالتفصيل فى الفصل الثانى ، ولكن من المفيد أن نذكر هنا أن العرض النصفى للخطوط الطيفية الصادرة من الثلاث مجموعات السابق ذكرها مرتبة ترتيبا تنازليا .

والعرض النصفى لخط الطيف هو محصلة مجموعة من العوامل وهى :

١- الاتساع الطبيعى	Natural broadening
٢- الاتساع الناتج من التصادم	Collision broadening
٣- الاتساع الناتج من ظاهرة دوبلر	Doppler broadening
٤- اتساع شتارك	Stark broadening
٥- الاتساع الذاتى	Self broadening

References

Hecht E and Zajac A 1976, Optics (Reading : Addison - Wesley Publishing Company.

Meyer - Arendt J R 1972, Introduction to Classical and Modern Optics (New Jersey : Prentice - Hall)

Pratt W K 1969, Laser Communication Systems (New York : John Wiley & Sons) P. 131.

Smith F G and Thomson J H 1988, Optics (Chichester : John Wiley & Sons).

obeikandl.com