الـفـصـــل الأول

الازدواجية مـوجـة – جسيـم

1 . إشعاع الجسم الأسود

2 . المفعول الكهروضوئي

3 . مفعول كمبتون

4 . أمواج دي بروي

1 . إشعاع الجسم الأسود

1-1 . مقدمة

كانت طبيعة شعاع الضوء مثار جدل بين علماء الفيزياء، فقد اعتقد نيوتن أن الضوء عبارة عن كريات جسيمية ، بينما اعتقد هويكنز Huygens أن الضوء ذو طبيعة موجية و كان لكل من هاتين الفكرتين مؤيدوها. وفي عام 1803 وبعده قدم يونغ Young و فرينل Fresnel و أراغو Arago في تجاربهم براهين توضح أن الأشعة الضوئية تتعرض للحيود وتتداخل بعضها مع البعض الآخر مثل الموجات الصوتية. و كان يعتقد وفق النظرية الجسيمية أن سرعة الضوء في وسط كثيف تكون أكبر، بينما يعتقد وفق النظرية الموجية أنه يسير أبطأ، إلى أن جاء منتصف القرن الثامن عشر حيث أثبت كل من فوكو Foucault وفيزو Fizeau أن سرعة الضوء في وسط كثيف (كالماء) كانت أبطأ مما في الفراغ مما عزز النظرية الموجية التي أصبحت النظرية الوحيدة التي استطاعت بنجاح شرح كل الظواهر البصرية optical phenomena المعروفة آنذاك للضوء.

وبالرغم من أن النظرية الموجية للضوء قد تم تعريفها حينئذ لكن طبيعة الموجات بقيت لغزا. وقد اعتقد أولا أن هذه الموجات كانت مشابهة للموجات المستعرضة في الوسط الصلب المرن، حيث اعتبر أن الأثير يمتلك بعض صفات الوسط الصلب المرن، وكان يعتقد أن الأثير هو الوسط تام المرونة الذي يفترض أن ينتقل الضوء خلاله ويملأ الكون. كما إن ماكسويل قد بين في عمله حول الكهربائية والمغناطيسية عام 1864 أنه يجب أن ينتشر اضطراب يحوي مجالات مستعرضة كهربائية ومغناطيسية خلال الأثير بسرعة الضوء مما زود النظرية الموجية بالأساس الرياضي الدقيق. ثم استطاع هيرتز Hertz عام 1887 توليد موجات كهرومغناطيسية بواسطة تيار متذبذب مما أثبت صحة نظرية ماكسويل.

و قد يظن البعض أنه بحلول عام 1900 أصبحت طبيعة الضوء مفهومة بشكل كبير، ولكن قد برزت صعوبات جدية مع خصائص الأثير الذي افترض أن الموجات تنتشر خلاله. وقد حلت النظرية النسبية الخاصة لآينشتاين عام 1905 هذه الصعوبات بتبيان أن الأثير ليس ضرورة لانتشار الموجات الكهرومغناطيسية.

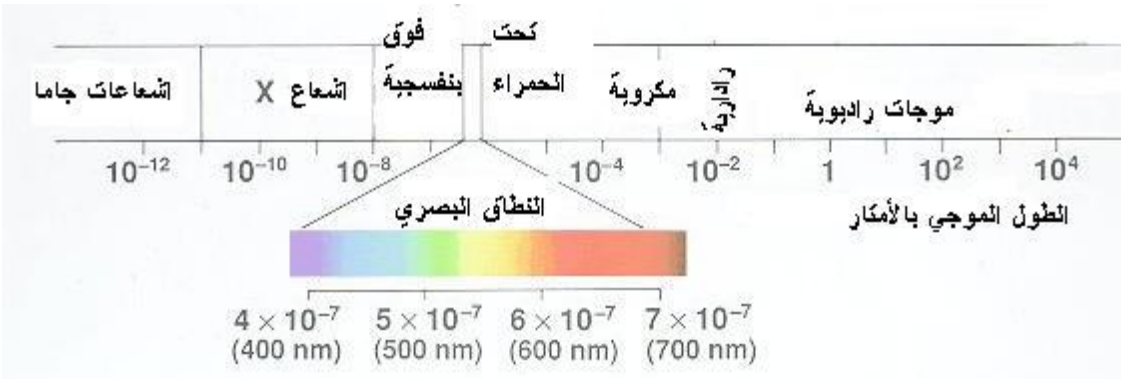
وبالرغم من نجاح النظرية الكهرومغناطيسية بقيت عدة ظواهر لا يمكن تفسيرها بهذه النظرية، ومن بينها الانبعاث والامتصاص في الأطياف الذرية، والإشعاع الحراري أو إشعاع

الجسم الأسود، والظاهرة الكهروضوئية. وقد أدى تفسير هذه الظواهر إلى تطوير النظرية الكمية للإشعاع، والتي تعتبر من أهم إنجازات فيزياء القرن العشرين فيما يتعلق بفهمنا للطبيعة. وأصل هذه النظرية يعود لما قدمه بلانك Planck عام 1900 من تفسير لتوزيع الطاقة في إشعاع الجسم الأسود، فقد افترض أن الإشعاع الكهرومغناطيسي عند تفاعله مع المادة يتصرف كما لو أنه متكون من جسيمات طاقة، ويدعى كل من هذه الجسيمات بكم الطاقة quantum، وقد سميت بالفوتونات photons . ويمتلك الفوتون طاقة تتناسب مع تردد الإشعاع.

سنتعرف في هذا الفصل على بعض الظواهر الأساسية التي تم اكتشافها في نهايات القرن التاسع عشر وبدايات القرن العشرين والتي كشفت عن حقيقة ان للأمواج صفات جسيمية خاصة على المستوى المجهري مثل كونها تمتلك زخما وكونها تتصف بشيء من التحيز الموضعي الذي يجعلها تتصرف كأنها رزم أو زمر من الأمواج، مما يجعل التمييز بين الجسيمات والأمواج على المستوى المجهري يختلف عنه في المستوى الجهري المألوف لدينا.

1-2 الإشعاع الكهرومغناطيسي والضوء:

- **المجال الكهرومغناطيسي**: مجال مكون من تآلف مجالين كهربائي ومغناطيسي معا في حالة حركية دائمة. وهو خاصية للزمان والمكان تظهر عند توفر الطاقة فيه بأنماط معينة. والنمط العام للمجال الكهرومغناطيسي هو النمط الموجي.



ان النتائج الخاصة بالتداخل والحيود لا يمكن تفسيرها إلا بافتراض الطبيعة الموجية للإشعاع الكهرومغناطيسي. ويمكن تلخيص الحالة العامة لطبيعة الإشعاع بأن السلوك الجسيمي يبرز خلال تفاعل الإشعاع مع المادة بينما يسود السلوك الموجي أثناء انتشار الإشعاع. ومن الملاحظ أن الموجة الكهرومغناطيسية تسلك أحد هذين السلوكين فقط في أي تجربة ولا تسلك السلوكين معا في نفس الوقت.

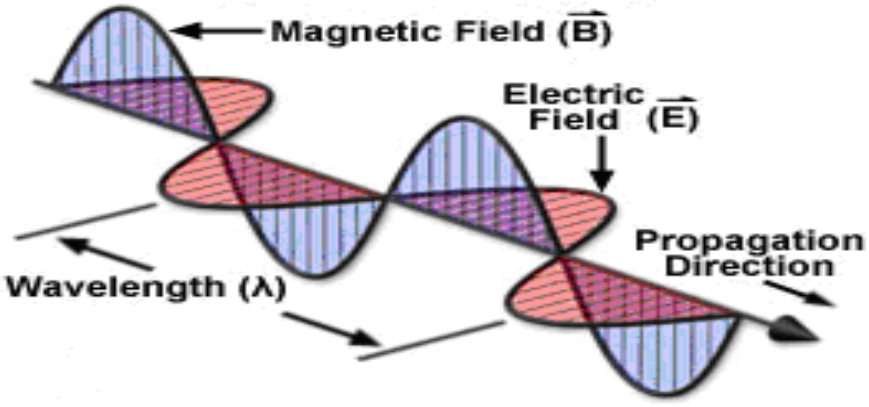
إن موجات الضوء وباقي الإشعاع الكهرومغناطيسي هي ذات مجال كهربائي مهتز يتعامد مع مجال مغناطيسي مهتز ويتفق معه في الطور، وكلا المجالين متعامد مع اتجاه الانتشار

ان الفكرة الازدواجية للضوء لم تتقبل بسهولة لما تتضمنه من تناقض في تفسير هاتين الحالتين, اذ تتميز الموجة بترددها (ν) وطول موجتها (λ) وسرعتها (υ) وشدتها (I), على ان هذه المحددات ليست جميعها مستقلة عن بعضها. فمثلا ترتبط السرعة وطول الموجة والتردد بالعلاقة $\upsilon = \lambda\nu$ ، وفي الحقيقة ان الموجة الجيبية ذات الطول الموجي المعين تتكون من عدد كبير من الموجات لذا فإنها تنتشر وتشغل حيزا واسعا في الفضاء، وعلى العكس فان الجسيمة التي تتميز بكتلتها (m) وزخمها (p) وطاقتها (E) فإنها تشغل حيزا محدودا في الفراغ. لذا فان حجمها لابد ان يكون صغيرا جدا.

في منتصف القرن التاسع عشر كان عدد من علماء الفيزياء قد تأكدوا من ان الإشعاع الحراري والضوء أيضا هي أمواج وذلك من خلال ما شاهدوه من ظواهر الانكسار والتداخل والحيود. ثم نجح ماكسويل في الكشف عن حقيقة ان الإشعاعات الحرارية وكذلك الضوء هو أمواج كهرومغناطيسية تتألف من تداخل مجالين متغيرين تغير أحدهما يسهم في تكوين الآخر، وهما المجال الكهربائي والمجال المغناطيسي كما في الشكل 1. وبعملية التغير المستمرة تنتشر الموجة الكهرومغناطيسية خلال الفراغ بسرعة الضوء ومقدارها $3X10^8$ m/s. وهذه السرعة يمكن كتابتها بالصورة التالية:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 + \mu_0}} \qquad (1)$$

مما يعني أنها صفة للفراغ. هذا مما يجعلها ثابت كوني مستقلة عن الحالة الحركية للمراجع.



الشكل (1-1): نمط الموجة الكهرومغناطيسية

1-3 انبعاث و امتصاص الطاقة الإشعاعية

تشع كل الأجسام – في أي درجة حرارة كانت– طاقة باستمرار على شكل إشعاع حراري من سطوحها متمثلة بموجات كهرومغناطيسية تنتجها الاهتزازات الحرارية للجزيئات. و تعتمد كمية وصفات هذا الإشعاع على عاملين هما: (أ) درجة حرارة الجسم و (ب) طبيعة وخصائص سطح الجسم. وبالإضافة إلى بعث الإشعاع فإن الجسم سيمتص أيضا الإشعاع الساقط عليه، ويكون السطح الصقيل ضعيف الإشعاع والامتصاص، بينما يكون السطح الخشن أو الأسود باعثا وماصا جيدا للإشعاع. كما إن الإشعاع الحراري لا يتطلب وسط كي ينتقل بل يمكنه الانتقال عبر الفراغ كما تفعل أشعة الشمس.

ويتألف الإشعاع المنبعث من توزيع متصل للأطوال الموجية من مختلف أجزاء الطيف الكهرومغناطيسي. وإذا كان الجسم في درجة حرارة الغرفة فإن الأطوال الموجية للإشعاع الحراري تقع بصورة أساسية في منطقة الأشعة تحت الحمراء، وبالتالي لن تراها العين البشرية. وإذا ازدادت درجة حرارة السطح فسوف يتوهج بلون أحمر. وعند درجات حرارة عالية بما فيه الكفاية يظهر الجسم متوهجا باللون الأبيض كما في المصابيح المتوهجة.

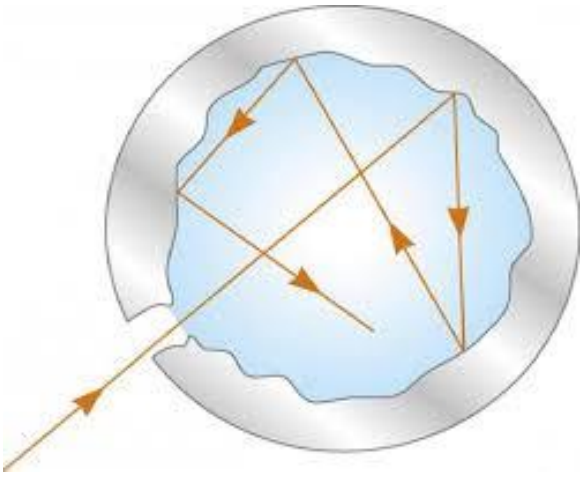
تمتلك كل الأجسام القابلية على بعث وامتصاص الطاقة الإشعاعية. و يكون لدرجة حرارة الجسم والمحيط دور أساسي في تحديد نسب الانبعاث والامتصاص كما يلي :

1- إذا كان الجسم أسخن من المحيط فإن معدل فقدانه للطاقة بالإشعاع يكون أكبر من معدل امتصاصه لها، وبالتالي سيبرد الجسم بسبب فقدان الطاقة.
2- إن كان الجسم أبرد من المحيط فإن معدل امتصاصه للطاقة الإشعاعية سيكون أكبر من معدل إشعاعه لها، وسترتفع درجة حرارته لأنه يمتص الطاقة من المحيط.
3- إذا كان الجسم والمحيط بنفس درجة الحرارة فإن معدل الإشعاع والانبعاث سيساوي معدل الامتصاص، ولا توجد زيادة أو نقصان إضافيين في الطاقة، ولا يحدث تغيير في درجة الحرارة.

1-4 إشعاع الجسم الأسود

يعرف الجسم الأسود بأنه النظام المثالي الذي يمتص كل الإشعاع الكهرومغناطيسي الساقط عليه ولا يعكس شيئا منه، ولهذا يظهر باللون الأسود. ويسمى الإشعاع الكهرومغناطيسي المنبعث من الجسم الأسود إشعاع الجسم الأسود. ويكون معامل الامتصاص حينئذ مساوية ل1 ومعامل الانعكاس يساوي صفر.

و كتقريب جيد للجسم الأسود يستخدم جسم مجوف يوجد في جداره ثقب صغير كما هو مبين في **الشكل (1–2)** . و أي إشعاع يسقط على الثقب من الخارج يدخل إلى الحجرة وينعكس عدة مرات إلى أن يمتص من قبل الجدران الداخلية، ويعتبر الثقب هنا ماصا مثاليا. وتعتمد طبيعة الإشعاع الذي يخرج من الحجرة من خلال الثقب على درجة حرارة جدران الحجرة وليس على المواد التي صنعت منها الجدران بسبب الانعكاسات الكثيرة (اللانهائية) التي تحدث للإشعاع داخله مما يؤدي إلى الامتصاص التام للإشعاع الداخل بغض النظر عن طبيعة جدران الجسم الأسود. وعند إهمال تأثير المادة المكونة للحجرة (أو الجسم الأسود) يبقى المتغير المهم هو درجة الحرارة فقط.



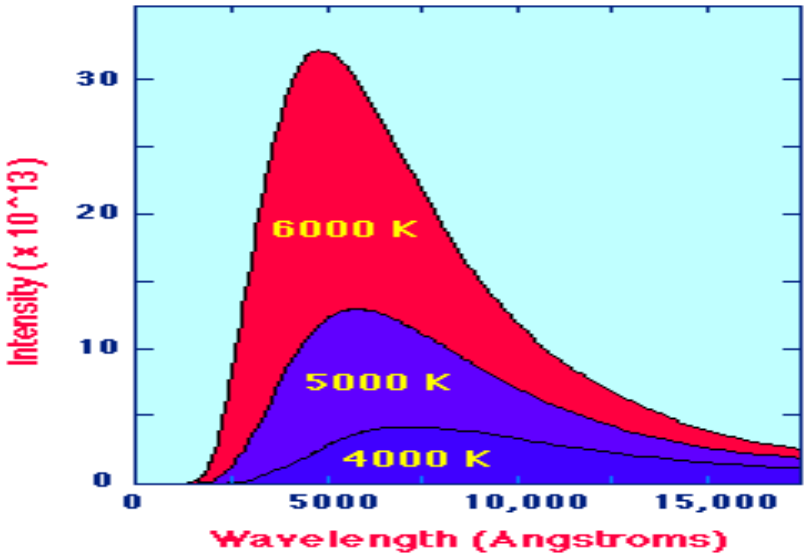
الشكل (1–2): ثقب في جدار جسم مجوف

إن الجسم الأسود عندما يكون ساخنا يشع أكثر مما هو عليه عندما يكون باردا، فعندما تكون الحجرة المجوفة باردة يبدو الثقب أكثر ظلاما من أي جزء ويظهر بلون أسود، ولكن عند تسخين الحجرة تسخينا كافيا فإن الثقب يبدو أكثر إضاءة من باقي الحجرة. وهذا يعني أن الجسم الأسود يكون ماصا مثاليا للإشعاع عندما تكون درجة حرارته أقل من درجة حرارة المحيط، ويكون باعثا مثاليا عندما تكون درجة حرارته أعلى من درجة حرارة المحيط.

1–5 طيف إشعاع الجسم الأسود

ينشأ الإشعاع الحراري – من وجهة نظر الفيزياء التقليدية – من جسيمات مشحونة معجلة في الذرات الواقعة بالقرب من سطح الجسم، وتلك الجسيمات المشحونة تبعث الإشعاع مثل ما تفعل الهوائيات الصغيرة. ويمكن أن يكون للجسيمات المتهيجة حراريا توزيع للطاقات يمثل طيفا مستمرا للإشعاع المنبعث من الجسم. ومع نهاية القرن التاسع عشر أصبح من الواضح

أن النظرية التقليدية للإشعاع الحراري غير كافية. وكانت المشكلة الأساسية في فهم التوزيع الملحوظ للأطوال الموجية في الإشعاع المنبعث من الجسم الأسود. ويبين الشكل (1-2) كيف تتفاوت شدة إشعاع الجسم الأسود مع درجة الحرارة والطول الموجي، ويلاحظ أن ذروة طيف الجسم الأسود الساخن تحدث عند تردد أعلى من ذروة طيف الجسم الأسود البارد.



الشكل (1-3) :التوزيع الطيفي لكثافة الطاقة

وتتناسب الطاقة المشعة في وحدة الزمن لوحدة المساحة من الجسم المشع مع المساحة تحت المنحنى. وقد وجد ستيفان تجريبيا أن هذه المساحة تتناسب طرديا مع القوة الرابعة لدرجة الحرارة المطلقة للجسم الأسود المشع، أي إن القدرة الكلية للإشعاع المنبعث تزداد بزيادة درجة الحرارة، وتمت صياغة ما يعرف بقانون ستيفان أو ستيفان – بولتزمان Stefan–Boltzmann

$$P = \sigma A \varepsilon T^4 \qquad (2)$$

حيث : P القدرة بالواط المشعة عند كل الأطوال الموجية من سطح الجسم.

σ: ثابت ستيفان – بولتزمان و يساوي

A : مساحة سطح الجسم بوحدة المتر المربع

ε: إنبعاثية السطح، وهي نسبة الإشعاع الحراري لسطح الجسم إلى إشعاع السطح الأسود المثالي عند نفس درجة الحرارة، وتتراوح قيمتها بين 0 و 1 حيث تساوي 1 للجسم الأسود.

T: درجة حرارة السطح بوحدة كلفن .K

- وجد فيان Wien أنه عند تغيير درجة حرارة أي جسم أسود فإن المنحني يحتفظ بشكله العام، ولكن نهايته العظمى تزاح نحو أطوال موجية أقصر مع زيادة درجة الحرارة كما في الشكل (1−3)، وهذا يعني أن شدة الإشعاع I تكون بأعلى قيمة عند طول موجي معين λ_{max} لدرجة حرارة محددة للإشعاع، وتزاح λ_{max} نحو قيم أدنى بزيادة درجة حرارة الإشعاع. أي إن λ_{max} تتناسب عكسيا مع درجة الحرارة. وهذا السلوك يوصف بالعلاقة التالية التي تدعى بقانون إزاحة فيان :

$$\lambda_{max} = \frac{290 \,.\, 10^5}{T}\ A° \qquad (3)$$

ويمكن استخدام هذه المعادلة لحساب درجة حرارة الجسم الأسود طيفيا بواسطة قياس الطول الموجي λ_{max} عند أعلى شدة للإشعاع. وهذه الطريقة استخدمت على نطاق واسع لحساب درجات حرارة النجوم.

ومثل ذلك الشمس اذ يمكن اعتبارها من الناحية الفيزيائية كجسم أسود. حيث أن من المعلوم أن $\lambda_{max} \approx 5300\ A°$ لذا فان درجة حرارة سطحها تكون:

$$T = \frac{290.\ 10^5}{5300} = 5471\ °K \qquad (4)$$

إن قانون فيان منسجم مع تصرف الجسم الذي يكون بدرجة حرارة الغرفة، فهو لا يتوهج بسبب أن ذروة المنحنى λ_{max} تكون في منطقة الأشعة تحت الحمراء للطيف الكهرومغناطيسي، وعند درجة حرارة أعلى يتوهج بلون أحمر لأن الذروة تكون في منطقة قرب المنطقة تحت الحمراء مع إشعاع عند منطقة اللون الأحمر نهاية الطيف المرئي، وعند درجات حرارية أعلى يتوهج الجسم بلون أبيض لأن الذروة تكون ضمن الطيف المرئي بحيث تنبعث جميع الألوان.

1−6 فرضية بلانك:

في عام 1900، طور ماكس بلانك نظرية لإشعاع الجسم الأسود تؤدي إلى معادلة للشدة $I(\lambda, T)$ تكون متفقة مع النتائج التجريبية في جميع الأطوال الموجية. وقدم افتراضات كما يلي :

1- إن إشعاع تجويف الحجرة جاء من تذبذبات ذرية في الجدران الداخلية.

2- لا تأخذ طاقة المتذبذب أي قيمة كانت من الصفر إلى ما لا نهاية، بل تأخذ قيمة منفصلة محددة فقط، وهي مضاعفات لقيمة صغيرة جدا مقدارها hv

$$E = nhv \qquad (5)$$

حيث ان: h هو ثابت كوني مقداره $6.626 \times 10^{-34} j.s$

n عدد كمي موجب صحيح.

و بالتالي تكون قيم طاقة المتذبذب غير متصلة أي مكممة quantized بخلاف ما كان شائعة في ذلك الوقت، وكل قيمة طاقة منفصلة تكون متطابقة مع حالة كمية مختلفة ممثلة بالعدد الكمي n.

وهذا يعني انه اذا كان لدينا مصباح اصفر (طول موجته $5890A°$) وقدرته 100 واط فان عدد الكمات (الفوتونات) الصادرة عنه في الثانية الواحدة يمكن حسابه من العلاقة:

$$P = \frac{\mathrm{E}}{t} = \frac{nhv}{t} \qquad (6)$$

وبالتالي فان عدد الكمات الصادرة عن المصباح في الثانية الواحدة هو:

$$\frac{n}{t} = \frac{P}{hv} = \frac{\mathrm{P}\lambda}{hc} = \frac{100 \times 58900 \times 10^{-10}}{6.6 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^{8}} = 8.92 \times 10^{18} quanta\,.s^{-1}$$

3- تبعث المتذبذبات أو تمتص الطاقة عند إجراء انتقال من حالة كمية إلى أخرى. ويبعث أو يمتص فرق الطاقة بكامله ككم واحد من الإشعاع بين الحالتين الابتدائية والنهائية خلال الانتقال.

1-6-1- صيغة بلانك لتوزيع الطاقة:

يبعث المتذبذب أو يمتص الطاقة عندما تتغير حالاته الكمية فقط. وإذا بقي في حالة كمية واحدة فلا يتم امتصاص الطاقة ولا انبعاثها. وقد توصل بلانك لصيغة نظرية لتوزيع الطول الموجي متفقة بشكل جيد مع المنحنيات التجريبية.

الصيغة التي توصل إليها بلانك لتوزيع الطاقة هي:

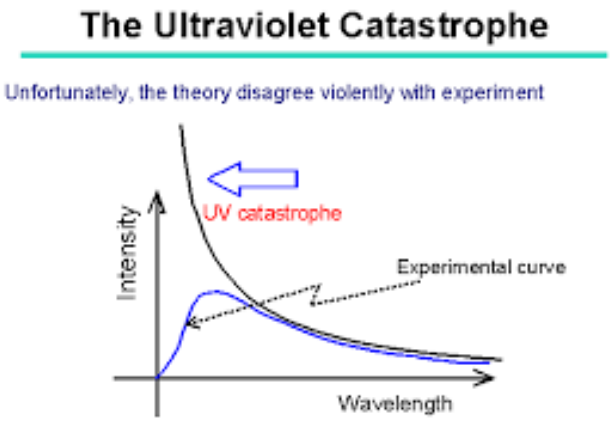
$$\mathrm{u}(\nu)\mathrm{d}\nu = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{v^3 dv}{e^{\frac{hv}{k_B T}} - 1} \qquad (7)$$

ومن الطريف أنه عندما قدم بلانك نظريته، فإن معظم العلماء (بما في ذلك بلانك نفسه) لم يعتبروا مفهوم الكم كمفهوم واقعي، بل كانوا يعتقدون أنه كان خدعة رياضية حدثت للتنبؤ بالنتائج الصحيحة. وبالتالي، واصل بلانك وآخرون البحث عن تفسير أكثر واقعية لإشعاع الجسم الأسود. ومع ذلك فإن التطورات اللاحقة أظهرت أن النظرية المستندة على مفهوم الكم (بدلا من المفاهيم التقليدية) كان لا بد من استخدامها ليس لتفسير إشعاع الجسم الأسود فحسب ولكن أيضا لتفسير عدد من الظواهر الأخرى على المستوى الذري.

1-6-2- اشتقاق قانون رايلي- جينز من قانون بلانك:

إن النظرية الناجحة لإشعاع الجسم الأسود يجب أن تتوقع شكل المنحنيات في الشكل (1-3) وكذلك صيغة درجة الحرارة T^4 المذكورة في قانون ستيفان وأيضا زحزحة الذروة عند تغير درجة الحرارة التي وصفها قانون إزاحة فيان. وقد فشلت المحاولات المبكرة لاستخدام الأفكار التقليدية لشرح أشكال المنحنيات المذكورة.

ان طيف إشعاع الجسم الأسود والتوقع النظري لصيغة رايلي – جينز التي تبدو في اتفاق معقول مع البيانات التجريبية عند الأطوال الموجية الطويلة، ولكن الخلاف يبدو واضحا في الموجات القصيرة، فعندما تقترب λ من الصفر فإن الشدة $I(\lambda,T)$ تقترب من اللانهاية. وبالتالي فإنه وفق النظرية التقليدية التي (قامت على أسسها حسابات رايلي- جينز) يجب أن تصبح الطاقة المنبعثة من أي جسم أسود لا نهائية عند الأطوال الموجية القصيرة، وهذا غير مقبول. وعلى النقيض من هذا التنبؤ، تظهر البيانات التجريبية أنه عند اقتراب λ من الصفر فإن $I(\lambda,T)$ تقترب أيضاً من الصفر. وهذا يمثل فشلا ذريعا لصيغة رايلي – جينز.



الشكل(1-4): الكارثة فوق البنفسجية

يمكن تحصيل قانون لرايلي –جينز من قانون بلانك بسهولة اذا كانت $E = h\nu \ll k_B T$ فعندئذ يكون :

$$e^{h\nu/k_B T} - 1 = 1 + \frac{h\nu}{k_B T} + \cdots - 1 \approx \frac{h\nu}{k_B T}$$

وهذا يعني ان صيغة بلانك تصبح:

$$u(\nu)d\nu = \frac{8\pi h}{c^3}\frac{d\nu}{\frac{h\nu}{k_B T}} = \frac{8\pi h T}{c^3}\nu^2 d\nu \qquad (8)$$

وهذه صيغة رايلي– جينز نفسها.

2. المفعول الكهروضوئي

2-1 مقدمة

تملك الفوتونات طاقة معينة تتناسب مع تردد الضوء. في عملية الانبعاث الضوئي، إذا امتص إلكترون في مادة ما طاقة فوتون واحد وكانت طاقته أكبر من اقتران الشغل (طاقة ربط الإلكترون) للمادة فسينبعث الإلكترون. أما إذا كانت طاقة الفوتون قليلة جداً، لن يصبح الإلكترون قادراً على التحرر من المادة. وعند زيادة شدة الضوء فإن عدد الفوتونات المنبعثة يزداد، ويؤدي هذا إلى زيادة عدد الإلكترونات المنبعثة، ولكنه لا يؤدي إلى زيادة الطاقة الممتصة للإلكترون الواحد. ومن هذا نستنتج أن طاقة الإلكترون المنبعث لا تعتمد على شدة الضوء الساقط عليه، بل تعتمد فقط على تردد (طاقة) هذا الضوء. وهذا يربط طاقة الفوتون الساقط وطاقة الإلكترون المنبعث.

تستطيع الإلكترونات امتصاص طاقة الفوتونات عند تعريضها لإشعاع، ولكنها في العادة تتبع مبدأ "كل شيء أو لا شيء". كل طاقة الفوتون يتم امتصاصها واستخدامها لتحرير إلكترون واحد من الرابطة الذرية، وإلا فإن طاقة الفوتون ستنبعث مرة أخرى. فإذا تم امتصاص طاقة فوتون، جزء من الطاقة سيحرر الإلكترون من الذرة، والباقي سيعمل على زيادة الطاقة الحركية للإلكترون الحر .

2-2 الملاحظات التجريبية من الانبعاثات الكهروضوئية

يجب على نظرية التأثير الكهروضوئي أن تشرح الملاحظات التجريبية لانبعاث الإلكترونات من سطح مادة معرضة للضوء.

يوجد حد أدنى للتردد بالنسبة لمعدن معين حيث عند تعريض سطحه لتردد أقل منه فلن يوجد إلكترونات ضوئية منبعثة. ويسمى هذا التردد بتردد العتبة. وعند زيادة تردد الإشعاع الساقط، وإبقاء عدد الفوتونات الساقطة ثابتاً، سيؤدي هذا إلى زيادة طاقة الفوتون وبالتالي زيادة الطاقة الحركية للإلكترونات الضوئية المنبعثة، وبالتالي زيادة جهد الإيقاف. ويتغير أيضاً عدد الإلكترونات لأن احتمالية أن يتسبب كل فوتون بانبعاث إلكترون مقترنة بطاقة الفوتون فوق تردد العتبة، تعتمد الطاقة الحركية العظمى للإلكترون على تردد الضوء الساقط، ولكنها لا تعتمد نهائياً على شدة الضوء الساقط لمعدن معين وبتردد معين للإشعاع الساقط،

يتناسب عدد الإلكترونات المنبعثة تناسباً طردياً مع شدة الضوء الساقط. وتؤدي زيادة شدة الضوء (مع إبقاء التردد ثابتاً) إلى زيادة قيمة التيار الكهروضوئي، ويبقى جهد الإيقاف ثابتاً.

الفترة الزمنية الفاصلة بين سقوط الإشعاع وانبعاث الإلكترون هي فترة زمنية قليلة جداً، ما يعادل تقريباً أقل من 10^{-9} ثانية.

يصل اتجاه توزيع الإلكترونات المنبعثة قيمته العظمى عند اتجاه الاستقطاب (اتجاه المجال الكهربائي) للضوء الساقط، إذا كان مستقطباً بشكل خطي.

2-2-1 الوصف الرياضي

الطاقة الحركية العظمى لإلكترون منبعث تعطى بالعلاقة التالية:

$$\frac{1}{2}m_e v_{max}^2 = h\upsilon - w \qquad (9)$$

حيث h ثابت بلانك و υ تواتر الفوتون الساقط و w هو عمل الاقتلاع او الاخراج (وهو الذي يعطي الحد الأدنى من الطاقة اللازمة لتحرير إلكترون من سطح معدن ما). ويعبر عنه بالشكل:

$$w = h\upsilon_0 \qquad (10)$$

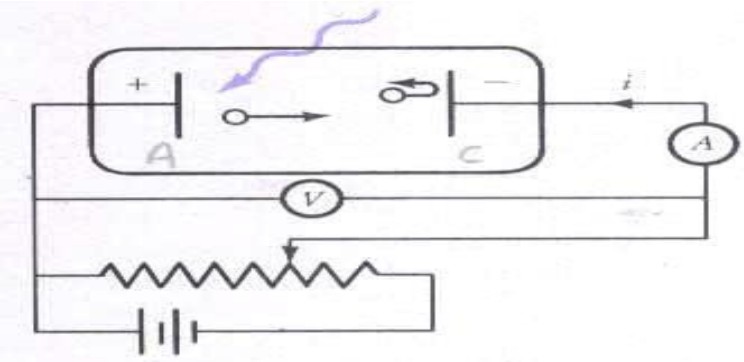
حيث υ_0 هو تواتر العتبة للمعدن. وبالتالي تكون الطاقة الحركية العظمى لإلكترون منبعث هي:

$$\frac{1}{2}m_e v_{max}^2 = h(\upsilon - \upsilon_0) \qquad (11)$$

وبما أن الطاقة الحركية موجبة، إذن يجب أن نحصل على $\upsilon > \upsilon_0$ حتى يظهر التأثير الكهروضوئي .

2-2-2 وصف التجربة

يوضح الشكل الموالي ظاهرة المفعول الكهروضوئي أين يصطدم ضوء وحيد اللون بصفيحة معدنية. يملك هذا الإشعاع الضوئي طاقة كافية حتى يتمكن من اقتلاع الإلكترونات من المعدن.



الشكل(1-5) : الظاهرة الكهروضوئية

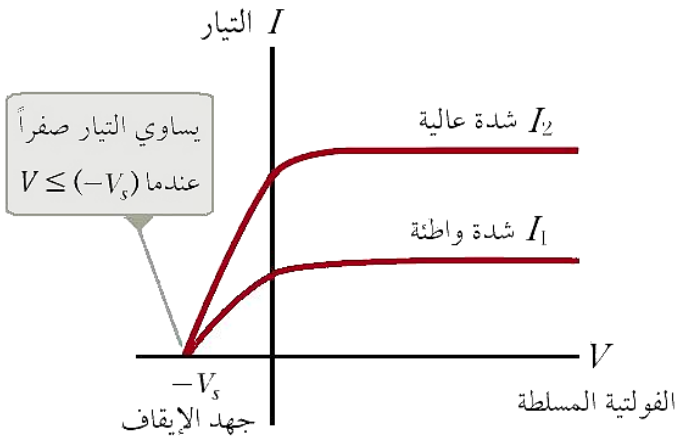
2-3- نتائج المفعول الكهروضوئي

1-ان التيار الذي يسري من الصفيحة إلى المجمع، يدلنا إلى ان الضوء زود الإلكترونات بقدر كاف من الطاقة، مكنها من التحرر من ارتباطها والاحتفاظ بالباقي، كما يدل التناقص في قراءة الامبيرمتر على ان الإلكترونات تتفاوت في طاقتها الحركية.

2-عند تعرض الإلكترونات لمجال كهربائي يعمل على إبطاء سرعتها، فلن تصل إلا الإلكترونات التي تمتلك قدرا كافيا من الطاقة الحركية، يمكنها من التغلب على قوى التنافر، وبزيادة فرق الجهد السالب، يتناقص عدد الإلكترونات الواصلة إلى المجمع، فتقل قراءة الامبيرمتر وعندما يصبح فرق الجهد بين اللوحين كافيا لإيقاف الإلكترونات التي تمتلك طاقة حركية عظمى، تصبح قراءة الامبيرمتر صفرا، ويسمى هذا المقدار لفرق الجهد بين اللوحين بفرق جهد الإيقاف (القطع).

3-بعض الإلكترونات الصادرة من الصفيحة المعدنية تصل إلى المجمع و نلاحظ حينئذ تيارا يمكن قياسه بواسطة جهاز الامبيرمتر. يمكننا تغيير شدة و تواتر الضوء الوارد و كذلك فرق الجهد ما بين الصفيحة و المجمع.

4-إذا كان تواتر وشدة الضوء الساقط ثابتين، سيزداد التيار الكهروضوئي تدريجياً مع زيادة الجهد الموجب عند الصفيحة المجمعة حتى يتم تجميع كل الإلكترونات الضوئية المنبعثة. عند نقطة معينة سيبلغ التيار الكهروضوئي حد الإشباع وبعدها لن يزداد حتى لو ازداد الجهد الموجب. ويعتمد التيار المشبع على شدة الإضاءة، ولا يعتمد على طول الموجة.



الشكل (1-6) :اختلاف التيار الكهروضوئي و الجهد المسلط بين شدتي ضوء مختلفتين

5-إذا طبقنا جهداً سالباً على الصفيحة المعدنية وقمنا برفعه تدريجياً، سيقل التيار الكهروضوئي حتى يصل الصفر، ويسمى هذا الجهد بجهد الإيقاف أو كمون الإعاقة.

6- لتواتر معين من الإشعاع الساقط، يتعلق جهد الإيقاف بالطاقة الحركية العظمى للإلكترون الكهروضوئي الذي توقف من الوصول إلى الصفيحة المعدنية. إذا اعتبرنا mهي الكتلة و v_{max} هي السرعة القصوى للإلكترون الضوئي المنبعث، إذاً :

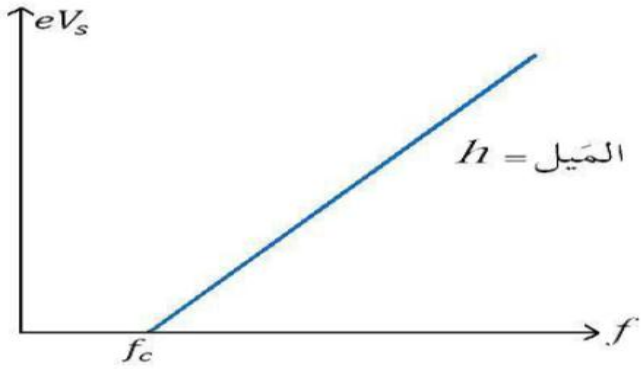
$$\frac{1}{2}mv_{max}^2 = E_c \qquad (12)$$

إذا كانت e هي شحنة الإلكترون و كان V_0 هو جهد الإيقاف، إذاً يكون العمل المنجز من كمون الإعاقة لإيقاف الإلكترون يساوي الى eV_0 ، فنحصل على :

$$\frac{1}{2}mv_{max}^2 = eV_0 \qquad (13)$$

العلاقة أعلاه تعطي أن السرعة القصوى للإلكترون الضوئي المنبعث مستقلة عن شدة الضوء الساقط

7-يتغير جهد الإيقاف خطياً مع تواتر الضوء، ولكنه يعتمد أيضاً على نوع المادة. فلكل مادة معينة، يوجد تواتر عتبة يجب أن يتم تجاوزه، وهو مستقل عن شدة الضوء، ليتم رصد الإلكترون المنبعث.



الشكل(1-7): العلاقة بين جهد الإيقاف و تردد الإشعاع الساقط

2-4 تفسير الفيزياء الكلاسيكية للظاهرة الكهروضوئية

كان النموذج الموجي للضوء هو السائد في ذلك الوقت، ووفقا لهذا النموذج فان الطاقة الضوئية تنتشر على شكل موجات كهرومغناطيسية وعند سقوط الضوء على سطح الفلز، فان الإلكترونات تمتص الطاقة من الضوء على نحو مستمر، لذلك من المتوقع انه عند زيادة شدة الضوء الساقط، يزداد معدل امتصاص الإلكترونات للطاقة، وبالتالي تزداد الطاقة الحركية للإلكترونات.

- توقعت الفيزياء الكلاسيكية ان تنبعث الإلكترونات من سطح المعدن مهما كان تردد الضوء بشرط ان تكون شدة الضوء مناسبة.
- لوحظ ان النتائج التجريبية تناقضت مع ما تنبأت به الفيزياء الكلاسيكية فالتجربة أثبتت ان الطاقة الحركية للإلكترونيات المنبعثة تعتمد فقط على تردد الضوء.

3 . مفعول كمبتون

3-1 تعريف الفوتون

هو جسيم متناهي في الصغر، وهو المسؤول عن الظاهرة الكهرومغناطيسية. حامل للإشعاع الكهرومغناطيسي لكل أطوال الموجات، بما في ذلك الأشعة قاما، الأشعة السينية، الضوء تحت الأحمر و فوق البنفسجي.

يختلف الفوتون عن غيره من الجسيمات الأولية الأخرى مثل الإلكترونات والكوارك في ان كتلة استقراره معدومة، لذلك فهو يتحرك في الفراغ بسرعة الضوء.

. يتميز الفوتون بخواص موجية وأخرى جسيمية (ازدواجية الموجة – جسيم).

. يمكن للفوتون ان يتفاعل مع المادة عبر نقل كم من الطاقة تقدر: $E = h\upsilon$

h: ثابت بلانك و υ تواتر الفوتون وهو اصغر قدر من الطاقة يمكن تبادله بين موجة كهرومغناطيسية وبين المادة. فالطاقة المتبادلة في تجربة ما بين موجة كهرومغناطيسية والمادة تساوي دوما عددا صحيحا من الفوتونات.

$$W = N_p h\upsilon \qquad (14)$$

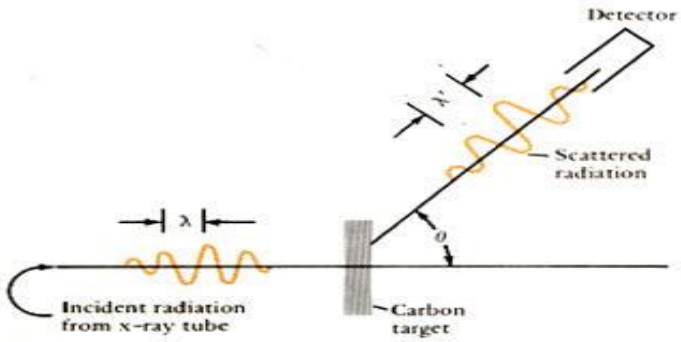
3-2 الدليل التجريبي على وجود الفوتون: تأثير كمبتون

حسب نظرية انشتاين لعام 1905، فان الضوء مكون من جسيمات وهي الفوتونات أين طاقتها معرفة حسب الوينها بعلاقة بلانك:

$$E = h\upsilon \qquad (15)$$

وقد أدى هذا الاكتشاف إلى ثورة في علم فيزياء الكم ومنح انشتاين عام 1921 جائزة نوبل في الفيزياء على تفسيره التأثير الكهروضوئي.

- في الظاهرة الكهروضوئية يعطي الفوتون كامل طاقته للإلكترون المرتبط بسطح المادة. ولكن في بعض الأحيان يمكن ان يعطي الفوتون جزء من طاقته إلى الإلكترون الحر وهذا النوع من التفاعل بين الشعاع الكهرومغناطيسي والإلكترون يسمى بتشتت الفوتونات بواسطة الإلكترون. وتعرف هذه الظاهرة ***بمفعول كمبتون***.
- تم التحقق من هذه الظاهرة عمليا عام 1923 في جامعة سان لويس من قبل العالم آرثر كمبتون وذلك بإسقاط أشعة X على لوح من الكربون.

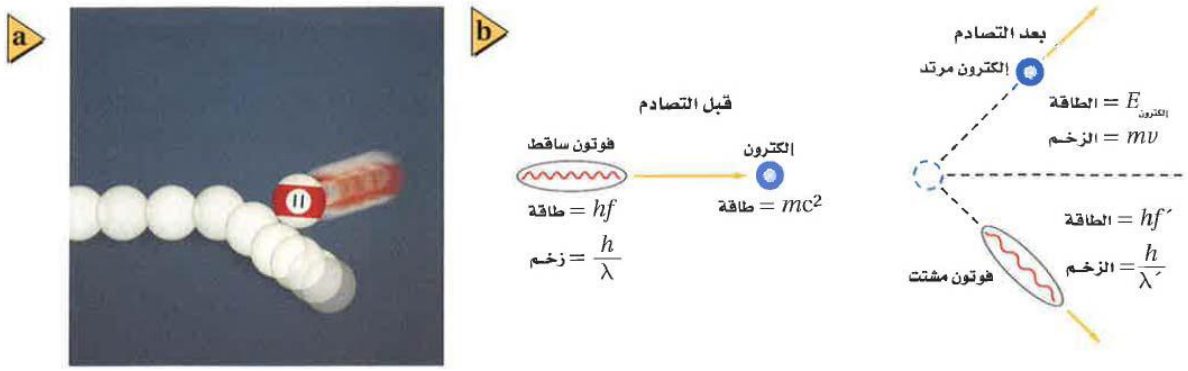


الشكل(1−8) : ظاهرة مفعول كمبتون

- تتألف الأشعة السينية من فوتونات، طاقة الفوتون الساقط (hυ) وعندما يصطدم الفوتون بالإلكترون الحر الساكن، ينتقل جزء من طاقة الفوتون إلى الإلكترون، فيكتسب الإلكترون طاقة حركية ويتحرك باتجاه يصنع زاوية (φ) مع اتجاه حركة الفوتون الساقط أما الفوتون المتشتت فينحرف عن مساره بزاوية (θ)، وتكون طاقة الفوتون المشتت هي (hν').
- استطاع كمبتون إثبات ان هذا التصادم يخضع لقانوني حفظ الطاقة وحفظ الزخم، وبهذا فقد أكدت هذه الظاهرة أيضا ان للضوء طبيعة جسيمية.

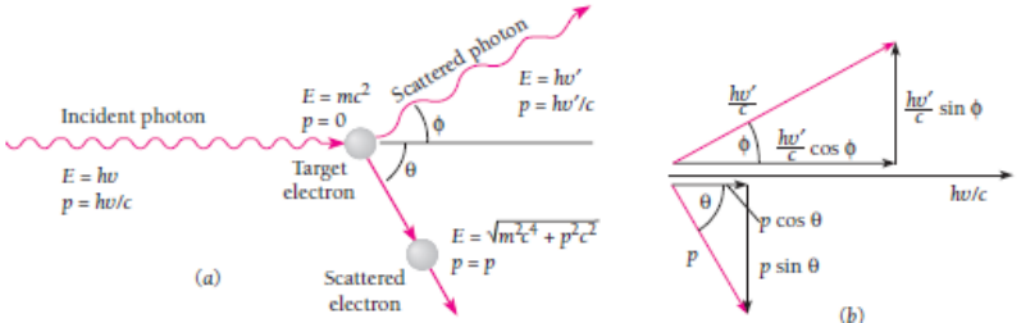
3-3 نتائج التجربة

1. الأشعة المشتتة لها طولين موجبين هما λ و $\acute{\lambda}$ بالرغم من أن الشعاع الساقط يحتوي على طول موجي وحيد.



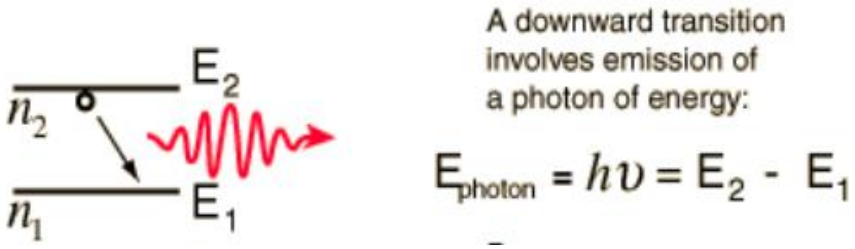
2 . يتم قياس الفرق في الطول الموجي للفوتونات المشتتة ووجد أنها تعتمد على زاوية التشتت للأشعة المشتتة حيث أن هذا الفرق يكون اكبر ما يمكن عندما تكون $\theta = 180^0$

$$\Delta\lambda = \acute{\lambda} - \lambda \qquad (16)$$



3 . تم الاعتماد على النموذج الموجي للأشعة الكهرومغناطيسية إذ أنه لا يمكن إيجاد تفسير للزيادة في الطول الموجي للأشعة المشتتة من لوح الكربون لأنه حسب النظرية الكلاسيكية فان إلكترونات ذرات الكربون سوف تتذبذب بنفس التردد الفوتونات الساقطة. ولا يحدث في هذه الحالة أي زيادة في الطول الموجي للفوتونات المشتتة.

4 . الأشعة الساقطة تتكون من سيل من الفوتونات لها طاقة $E = h\upsilon$ وكمية حركة $p = \frac{h}{\lambda}$



الشكل(1−9) : عملية الانبعاث أو الإصدار

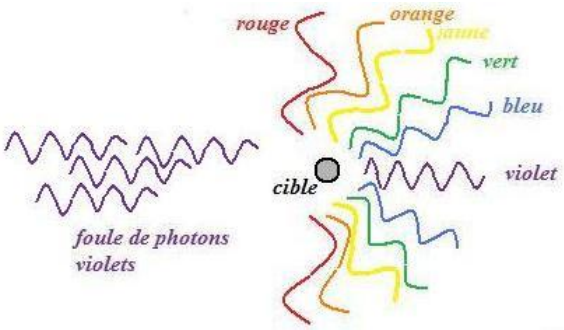
وعندما تتصادم بعض من هذه الفوتونات مع الإلكترونات في لوح الكربون فإنها تفقد جزء من طاقتها كما ان الجزء الأخر من الفوتونات يصطدم بالإلكترونات تصادما مرنا فلا تفقد طاقتها وهذا ما يؤدي إلى الحصول على طولين موجيين.

$$\acute{\lambda} - \lambda = \frac{h}{m_e c}(1 - \cos\theta) \qquad (17)$$

θ : زاوية التشتت

m_e : كتلة السكون للالكترونات.

5. ان الطول الموجي يكون صفرًا إذا كانت الزاوية 0 (هذه الحالة هي حالة بُعد واحد) ، وتزداد عندما ينحرف الفوتون عن اتجاه سقوطه. بإرسال حزمة من الفوتونات بنفس الطول الموجي إلى هدف ضيق ، نحصل على نوع من قوس قزح ، كما هو مبين في الشكل التالي :



الشكل(1-11) : عملية الإصدار على شكل قوس قزح

4- أمواج دي بروي

4-1 علاقة لويس دي بروي:

في عام 1924 كتب الفيزيائي الفرنسي لويس دي بروي رسالة دكتوراه بعنوان "بحث حول نظرية الكم" وافترض فيها أن كل الموادّ تمتلك "موجة دي بروي" مشابهة للضوء، حيث أنه وتحت ظروف مناسبة ستُظهر الإلكترونات والمواد الأخرى خصائص كل من الجسيمات والضوء، ويُستدل على الخصائص الجسيميّة لجسيم ما عندما يُظهر أنه يملك موقع متمركز في المكان يعتمد على انحناء مساره أثناء حركته، أما الطبيعة الشبه الموجية للجسيم فيُمكن أن تلاحظ – على سبيل المثال – عندما يمر شعاع من الضوء عبر شقوق متوازية ويخلق نمط متداخل من الأشعة.

في عام 1927 بُرهن على تأثير التداخل بتجربتين مختلفتين استعين فيهما بشعاع من الإلكترونات، الأولى قام بها الفيزيائي الإنكليزي جورج باغت طومسون باستخدام رقاقة حديدية نحيلة مع الشعاع، والثانية قام بها الفيزيائيان الأمريكيان كلنتون دافيسون ولستر جيرمر باستخدام بلورة من النيكل معه، أدى نجاح فرضية دي بروي بإرفين شرودينغر أن يصدر كتابه سنة 1926 والذي نجح في وصف كيفية انتشار موجات الإلكترونات خلال معادلته المسماة معادلة شرودينغر.

ان للجسيمات المادية خاصية موجية، كما للموجات خاصية جسيمية، فاذا كانت كمية حركة الفوتون p فان الطول الموجي المصاحبة للجسيمات المادية يعطى بالعلاقة:

$$\lambda = \frac{h}{m\vartheta} \qquad (18)$$

λ : طول الموجة المصاحبة للجسيم المادي وتعرف بموجة دي–بروي.

ϑ: سرعة الجسيم المادي.

ان وصف الإشعاع بانه متواصل (التداخل–الحيود) أو اعتباره متقطع (الجسم الأسود– مفعول الكهروضوئي– مفعول كمبتون) هو في الحقيقة وصف كوانتي وعليه نقول أن هناك وصف ثنائي أو ما يسمى بالازدواجية موجة – فوتون. ويمكن ترجمة هذه الثنائية بعلاقة بسيطة ما بين كمية الحركة الفوتون وطول الموجة المرفقة.

$$p = \frac{hv}{c} \qquad (19)$$

وبما أن :

$$\lambda = \frac{c}{v}$$

فان: $\lambda = \frac{h}{p}$

وعليه فإن: $p = \hbar k \qquad (20)$

ومنه فقد اتبع دي بروي لكل جسيم في حالة حركة طول موجي معين.

$$\lambda = \frac{h}{p} \qquad (21)$$

4-2 خصائص الموجة المرافقة للجسيم:

أمكن لعلاقة دي بروي تحديد طول موجة الجسيم λ وتواترها v وسرعة الطور v_φ ولكن لم نعرف بصفة كلية ماهية هذه الموجة:

- هل هي موجة مستوية وحيدة اللون ؟.
- أم هي عبارة عن مجموعة موجات ؟.

. اذا اعتبرنا ان الجسم ممثل بالموجة المستوية وحيدة اللون فان هذه الموجة موجودة في كل الفضاء غير ان بعض الوضعيات الفيزيائية تأكد أن الجسم يمكن ان يتواجد في مكان محدد وعليه فان التمثيل غير مكتمل . أما اذا اعتبرنا ان الجسم ممثل بمجموعة أمواج فهو عبارة عن تراكم في الفضاء لعدة موجات وحيدة اللون لكل موجة سرعة طور، وعليه فليس لديها طول موجة محدد بينما كل الموجات مركزة على طول موجة λ_0 .

4-2-1 سرعة موجة دي-بروي:

لما كان كل جسيم متحرك ترافقه موجة، فمن المعقول ان نتوقع ان سرعة الموجة هذه تتحدد بسرعة الجسم، ولو كانت سرعة موجة دي-بروي w فان:

$$w = \vartheta\lambda \qquad (22)$$

$$\lambda = \frac{h}{m\vartheta} \qquad (23)$$

لدينا من جهة أخرى : $E = m\,c^2 \;;\; E = h\,\nu \Rightarrow \nu = \frac{mc^2}{h}$

حيث :

λ: طول موجة دي-بروي

ν : التردد الذي يحدد بالمعادلة الكمية

و عليه بالرجوع إلى المعادلة (22) نجد :

$$w = \vartheta\lambda = \frac{c^2}{\nu} \qquad (24)$$

و بما ان سرعة الجسيم ϑ هي دائما اقل من سرعة الضوء c ، لذا نلاحظ ان سرعة انتشار موجة دي-بروي w هي دائما اكبر من c !!!

ولفهم هذه النتيجة يجب التعرف على سرعة الموجة وسرعة مجموعة الأمواج، حيث تعطى سرعة الموجة بالمعادلة:

$$w = \frac{\omega}{k} \qquad (25)$$

حيث: ω هو التردد الزاوي ويساوي $2\pi\nu$

k هو العدد الموجي ويساوي $2\pi/\lambda$

أما سرعة مجموعة الأمواج u هي:

$$u = \frac{d\omega}{dk} \qquad (26)$$

وبصورة عامة تعتمد هذه السرعة على تغير سرعة الموجة مع العدد الموجي في الوسط المعين. ان سرعة مجموعة الأمواج ربما تكون اكبر أو اصغر من سرعة موجة منفردة.
. يمكن تمثيل جسيم في حالة حركة بمجموعة أمواج وتصبح سرعته هي سرعة المجموعة:

$$\frac{1}{2}m\vartheta^2 = hv \text{ أي } \quad \vartheta = \vartheta_g$$

ومنه فان طاقة الجسيم هي نفسها طاقة الفوتون $E = hv$.

3-4 تجربة دافيسن وجيرمر:

اكتشفت الخاصية الموجية للإلكترونات في عام 1927 من خلال التجربة التي أجراها العالمان دافيسون وجيرمر Davison and Germer حيث تم في هذه التجربة إثبات حيود الإلكترونات وتم حساب الطول الموجي للإلكترونات ليتوافق مع فرضية دي بروي. ولتفسير سبب تأخر اكتشاف الخاصية الموجية للإلكترون بعد اكتشاف الخاصية الجسيمية له, فإن ذلك يعود إلى صغر الطول الموجي للجسيمات، فإذا قمنا باستخدام فرضية دي بروي لحساب الطول الموجي للجسم كتلته 1 كيلوجرام يتحرك بسرعة مقدارها 1م/ثانية لوجدنا أن الطول الموجي المصاحب لهذا الجسم هو على النحو التالي:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m\vartheta} = 6.6\ 10^{-24}\ \text{Å} \qquad (27)$$

ولهذا فإن لكي نستطيع ملاحظة الخاصية الموجية للجسيمات المادية فإن كلا من كتلة الجسم وسرعته يجب أن تكون صغيرة وهذا يعني أن الخاصية الموجية للجسيمات المادية لا يمكن ملاحظتها إلا في الجسيمات الذرية مثل الإلكترون والبروتون والنيوترون.

يمكننا حساب طاقة حركة الإلكترون الذي يجب ان يمتلكها ليكون له طول موجي يساوي 1 انجستروم من خلال المعادلة التالية:

$$eV = \frac{1}{2m}p^2 = \frac{1}{2m}\left(\frac{h}{\lambda}\right)^2 \qquad (28)$$

$$V = \frac{h^2}{2me\lambda^2} = 150\ volt$$

ومن هذه المعادلة نستنتج أن الإلكترون الذي يتحرك بطاقة 150 إلكترون فولت تكون طول الموجة المصاحبة له 1 انجستروم. وهذا هو الطول الموجي لأشعة اكس. لذا فإن من المتوقع

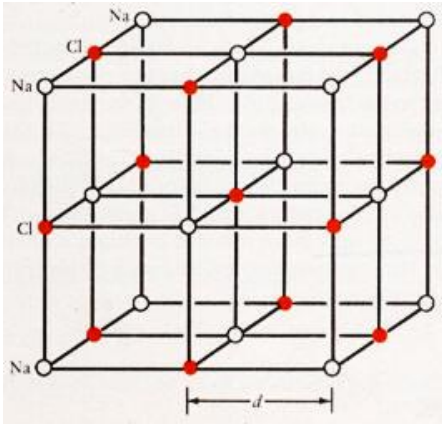
أن تكون النتائج العملية لتجربة حيود أشعة اكس مماثلة لحيود إلكترونات معجلة في فرق جهد قدره 150 فولت.

4-4 إثبات أن حيود الإلكترونات مشابه لحيود أشعة اكس

تستخدم محزوزة الحيود Diffraction Grating في تجربة حيود الأشعة الكهرومغناطيسية في منطقة الطيف المرئي حيث الطول الموجي يتراوح بين 3000 إلى 7000 انجستروم. أما في حالة الأطوال الموجية الصغيرة جدا (منطقة أشعة اكس) فإن سمك الحزوز يعتبر كبيرا جداً لملاحظة حيود الأشعة اكس، ولهذا السبب يتم استخدام البلورات معتمدين على الترتيب الدقيق لذرات الخلية المكونة للبلورة مما تتكون مستويات حيود ذات مسافات فاصلة في حدود 1 −3 انجستروم.

- **قياس المسافة الفاصلة d في بلورة NaCl**

تعتبر بلورة كلوريد الصوديوم ذات تركيب بلوري خاص وبسيط ويمكن استخدامها لقياس حيود الأشعة اكس. يتكون الشكل الخارجي لبلورة كلوريد الصوديوم كما في الشكل الموالي حيث تترتب ذرات الصوديوم والكلور في شكل متعاقب ومتماثل وتكون المسافة الفاصلة بين ذرتين متجاورتين d. ولحساب المسافة الفاصلة عن طريق الكثافة والوزن الجزيئي للصوديوم والكلور وعدد افوغادرو.



يتم ذلك على النحو التالي:

إذا كانت d مقاسة بالسنتمتر من ذرة الصوديوم إلى أقرب ذرة كلور يكون هناك $\frac{1}{d}$ ذرة على طول 1 سنتمتر مكعب, ولهذا في مكعب الصوديوم والكلور يكون العدد الكلي للذرات لكل وحدة حجوم $\frac{1}{3d}$ ذرة, حيث أن الوزن الجزيئي للصوديوم 23 والكلور 35.45 ولذلك يكون الوزن الجزيئي لكلوريد الصوديوم 58.45 لأن عدد أفوغادرو يعطي عدد الذرات في الجرام مول، وهذا يعني أن يكون عدد الذرات في 23 جرام صوديوم يساوي عدد افوغادرو ذرة وكذلك يوجد عدد افوغادرو ذرة في 35.49 جرام كلور, ولهذا فإن عدد الذرات في كلوريد الصوديوم 58.45 جرام يساوي ضعف عدد افوغادرو. ومن كثافة الصوديوم 2.163 جرام لكل سنتمتر مكعب فإن:

$$d = 2.82\ \text{Å}$$

هذه التجربة أثبتت وجود موجة مرفقة للإلكترونات. كذلك وبعد حساب كمية حركة الإلكترونات p وطول موجتها λ من خلال الحلقات أمكننا ايجاد العلاقة:

$$\lambda = \frac{h}{p} \qquad (29)$$

السلسلة-1-

الازدواجية موجة – جسيم

التمرين الأول:

يعطى عدد الهزازات للتجويف في مجال التواترات $(\omega, \omega + d\omega)$ بـ :

$$dN_\omega = V\,\omega^2 d\omega / \pi^2 c^3$$

c سرعة الضوء، V حجم الإشعاع، $\omega = 2\pi\upsilon$

باعتبار أن الطاقة المتوسطة $\overline{E}_\omega$ للهزاز تكتب على الشكل التالي:

$$\overline{E}_\omega = \frac{h\omega}{e^{h\omega/k_B T} - 1}$$

1 . ما هي طاقة الإشعاع للجسم الأسود في هذه التواترات واستنتج الكثافة الطيفية للإشعاع.

2 . ادرس تغيرات هذه الكثافة عند التوترات العالية و كذا التوترات القصيرة. ما هو وجه التطابق مع القوانين الكلاسيكية المعروفة في كل حالة.

3 . أحسب قيمة ω_0 أين يبلغ الإشعاع ذروته. ارسم شكلا تقريبيا لتغيير الكثافة بدلالة ω.

4 . أعطي علاقة للطاقة الكلية بدلالة الحجم V ودرجة الحرارة T.

يعطى:

$$\int_0^\pi \frac{\xi^3 d\xi}{e^\xi - 1} = \frac{\pi^4}{15}$$

5 . باعتبار قدرة الإصدار للجسم الأسود $I = \frac{cE}{4V}$ أعط شكل I بدلالة T و σ (ثابت ستيفان بولتزمان).

التمرين الثاني:

نريد دراسة توزيع للطاقة المشعة للجسم الأسود بدلالة التواتر. يعطي قانون بلانك كثافة الطاقة بدلالة درجة الحرارة :

$$U(T,\upsilon) = \frac{8\pi h\upsilon^3}{c^3}\,\frac{1}{e^{h\upsilon/k_B T} - 1}$$

1.حدد وضعية القيمة العظمى .$(T = cte)$

2. ماهي تغيرات القيمة العظمى بدلالة درجة الحرارة. مثل ذلك بيانيا.

3. استنتج مما سبق قانون الانزياح لفيان.

التمرين الثالث:

أدت الأبحاث التجريبية لفيان إلى كتابة معامل الإضاءة L_λ لمنبع في درجة حرارة T على الشكل التالي:

$$L_\lambda = C\lambda^{-5}e^{-\acute{C}/\lambda T}$$

بحيث أن:

$C = 1.192\ 10^{-16}$ $\quad \acute{C} = 1.44\ 10^{-2}$ (النظام الدولي)

1 . أحسب قدرة الإصدار الكلية I للمنبع باعتبار أن:

$$I = \pi \int_0^\infty L_\lambda\, d\lambda$$

. ماهي القيمة العددية لمعامل قانون ستيفان $I= k_B T^4$ في هذه الحالة.

2 . يعتبر قانون فيان مقبولا بالنسبة للقيم الصغيرة للجداء λT. نعتبر أن هذا الشرط محقق عندما يكون $\frac{\acute{C}}{\lambda T}$ علـــى الأقل يعادل 6.

. أحسب بالنسبة لحالة الشمس ($T\approx 6000$ K) طول الموجة λ_0 حيث أن كل أطوال الموجات الأقل منها ($\lambda<\lambda_0$) يكون عندها قانون فيان مقبولا.

. أحسب قدرة الإصدار I بالنسبة لإشعاعات الأطوال الموجية الأقل من λ_0.

لحساب التكاملات تعطى :

$$J_3 = \int e^{-x}\, x^3 dx = -e^{-x}(x^3 + 3x^2 + 6x + 6)$$

التمرين الرابع:

تسقط حزمة من الفوتونات ذات تواتر υ على مهبط خلية كهروضوئية.

1 . نسمي P الإستطاعة المحمولة من قبل الحزمة.

. أوجد التغير dN_P خلال الزمن dt للفوتونات الساقطة على مهبط الخلية الكهروضوئية.

2 . نفرض أن المردود الكمي المعرف بالعلاقة: $R=\frac{N_e}{N_p}$ يساوي إلى الوحدة.

. أحسب التيار الكهروضوئي I بدلالة طول الموجة الواردة.

3 . في الواقع إن المردود الكمي أقل بكثير من 1 (يلزم عدد كبير من الفوتونات لاقتلاع إلكترون).

. أحسب التيار الكهروضوئي I في هذه الحالة.

4 . إذا أخذنا خصائص الحزمة ثابتة (الاستطاعة، المردود ...).أثبت أن التيار يصل إلى قيمة حدية يطلب تعيينها.

التمرين الخامس:

يعطى عمل الاقتلاع (الخروج) للمعادن المكونة للخلية الكهروضوئية في الجدول التالي :

الخلية	السيزيوم	البوتاسيوم	الألمنيوم	النحاس	التنقستان	النيكل	البلاتين
W(eV)	1.8	2.2	3.0	4.1	4.5	5.0	5.4

. حدد طول موجة العتبة لبداية مشاهدة الفعل الكهروضوئي في كل حالة.

. نضيء الخلية بإشعاع في النهاية الدنيا للطيف المرئي $\lambda = 3500$ Å .

. استنتج الكمون الأدنى V_0 لظهور الفعل الكهروضوئي في كل حالة.

التمرين السادس:

يصطدم فوتون طاقته $h\upsilon$ بإلكترون حر في حالة سكون. فيتشتت الفوتون بزاوية θ عن مساره الابتدائي، والإلكترون بزاوية φ عن هذا المسار.

1 . ارسم بيانا شعاعيا يبين كميات الحركة وكذا الزوايا.

2 . أكتب قانون حفظ كمية الحركة (أو الدفع) بالنسبة لهذه الحالة.

3 . اسقط هذا القانون على محورين متعامدين.

4 . استنتج علاقة لزاوية تراجع الإلكترون φ بدلالة θ و $h\upsilon$ وطاقة السكون للإلكترون.

التمرين السابع:

يمكن تمثيل جسيم في حالة حركة بواسطة مجموعة أمواج بحيث أن سرعته v تعادل سرعة المجموعة v_g.إذا كانت سرعة المجموعة تكتب بالشكل التالي:

$$v_g = \frac{d\upsilon}{d\left(\frac{1}{\lambda}\right)}$$

بحيث أن λ و υ هما على التوالي طول موجة وتواتر مجموعة الأمواج.

بين ان:

$$\frac{1}{2}\, m\, v^2 = h\upsilon$$

m: كتلة الجسيم.

التمرين الثامن :

بين أن الأطوال الموجية المرفقة للإلكترونات والبروتونات المسرعة بواسطة الكمون V تكتب على الشكل التالي:

$$\lambda_e = \frac{1.2264}{\sqrt{V(volt)}}\,nm\,; \qquad \lambda_p = \frac{0.02862}{\sqrt{V(volt)}}\,nm$$

نعطي: $m_e c^2 = 511\ 003\ eV$ $\qquad hc = 1.2399\ 10^{-4} eVcm.$

. أحسب هذه الأطوال بالنسبة $100\ volt \leq V \leq 10000\ volt$.

. قارنها بطول موجة الأشعة السينية