

الفصل الأول: مقدمة عامة

ظهر علم الميكانيك الكلاسيكي الذي عالج حركة الأجسام الكبيرة والقوى المؤثرة في تلك الحركات. حيث أثبت نجاحه للمنظومات ذات الأجسام الكبيرة (أكبر من الذرات والجزيئات) . واستند هذا العلم في بدايته على قانون نيوتن الثاني على أساس إن المادة مكونة من جسيمات وهذه الجسيمات تتحرك تحت تأثير قوى التفاعل كما في قانون نيوتن الثاني:

$$F = m \frac{dv}{dt} \dots\dots\dots (1)$$

حيث أن F هي القوة ، m هي كتلة الجسيم و $\frac{dv}{dt}$ هي تعجيل الجسيم .
أدخلت تطورات كبيرة على الميكانيك الكلاسيكي بعد ذلك من قبل العالمين لاكرانج (Lagrange) وهاملتون (Hamilton) .

وبعد ذلك جاء الميكانيك الكمي الذي يختلف اختلافا كبيرا عن الميكانيك الكلاسيكي، حيث أنه يستخدم لدراسة الجسيمات الصغيرة جدا (الذرات والجزيئات والأيونات،... الجسيمات ذات الطاقات العالية)

النظرية الكهرومغناطيسية الكلاسيكية

المجالات الكهربائية والمغناطيسية $E(r,t)$ و $B(r,t)$ توصف في النظرية الكهرومغناطيسية بوساطة معادلات ماكسويل Maxwell's equations في الفراغ وكما مبين:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \dots\dots\dots (2)$$

$$\nabla \times B = \frac{1}{c^2} \frac{\partial E}{\partial t} \dots\dots\dots (3)$$

حيث أن c هي سرعة الضوء في الفراغ ، أن المعادلات أعلاه تعني أن المجالات الكهربائية والمغناطيسية تنتشر في الفضاء على شكل موجات وبسرعة ثابتة وهي سرعة الضوء.

وباستخدام المتطابقة الاتجاهية $\nabla \cdot (\nabla \times A) = -\nabla^2 A + \nabla \nabla \cdot A$ ، إضافة إلى أن $\nabla \cdot E = 0$ ، نحصل على حل للمعادلة (2) و (3) وكما مبين في أدناه:

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \dots\dots\dots (14)$$

وبالمثل معادلة لـ B . المعادلة أعلاه لها الحل ذو الصيغة الآتية:

$$E = \text{Re}(E_0 e^{-i(\omega - k \cdot r)}) \dots\dots\dots (5)$$

إذ أن ω يمثل التردد الزاوي و k متجه الانتشار وهما من الصفات الأساسية للموجات وترتبطان بالعلاقة $k = \omega / c$.

التفاعل بين الأجسام والموجات يتم من خلال ما يعرف بقانون لورنتز (Lorentz law) والذي ينص على أن القوى المسلطة على جسيم مشحون شحنته e يتحرك في مجال كهرومغناطيسي وبسرعة v يعطى بالعلاقة الآتية:

$$F = e[E + v \times B] \dots\dots\dots (6)$$

كما أن الجسيمات المشحونة التي تتحرك تولد طاقة كهرومغناطيسية نتيجة تلك الحركة .

التأثير الكهروضوئي Photoelectric Effect

الظاهرة الكهروضوئية هي عملية انبعاث الإلكترونات من سطوح المعادن عندما تسقط عليها ضوء ذو تردد عالي نسبيا ($\nu \geq 10^{15} \text{ Hz}$).

في سنة 1905 أقترح أينشتين (Einstein) توسيعا لفرضية بلانك، حيث أعتبر أن الطاقة الإشعاعية نفسها مكممة (quantized) (موجود بشكل مضاعفات للكمية $h\nu$) تدعى كمات الضوء بالفوتونات (photons)، وعندما يمتص المعدن فوتونا، فإن جزء من الطاقة سيستخدم للتغلب على قوة جذب الإلكترون للمعدن، أما باقي طاقة فسوف يظهر على شكل طاقة حركية يحملها الإلكترون الضوئي.

أن سلوك الإلكترونات في المعادن كما أفترضه اينشتين يشبه سلوك إلكترون غاز يستطيع الحركة بحرية طالما هي موجودة ضمن حجم المعدن. وهكذا فإنه لا توجد طاقة بوساطتها يصل الإلكترون إلى سطح المعدن. وعند تطبيق قانون حفظ الطاقة نحصل على:

$$h\nu = T_{\max} + \phi \dots\dots\dots (7)$$

حيث أن ϕ هي دالة الشغل (work function) للمعدن وتعرف بأنها أقل كمية ممكنة من الطاقة لإزالة الإلكترون من المعدن وهذه الكمية تساوي $\phi = h\nu_0$ (حيث أن ν_0 هو تردد العتبة وهو أقل تردد ممكن له القابلية على بعث الإلكترونات الضوئية من المعدن).

أن الكتلة السكونية للفوتون m_0 (rest mass) تساوي صفر ولكن طالما أنها تتحرك بسرعة الضوء لذلك يستلزم متطلبات النسبية، أن تعزى لها كتلة لا تساوي صفرا. وأذن يمكن كتابة الطاقة للفوتون بالصيغة الآتية:

$$E = h\nu \dots\dots\dots (8)$$

$$E = mc^2 \dots\dots\dots (9)$$

وبذلك فإن

$$mc^2 = h \frac{c}{\lambda} \dots\dots\dots (10)$$

ومن هنا نحصل على زخم الفوتون :

$$P = \frac{h}{\lambda} \dots\dots\dots (11)$$

وهذه المعادلة مهمة جدا وهي تفترض أن الضوء يمتلك الطبيعة الموجية والجسيمية (طبيعة مزدوجة) أي أن الضوء ذا طول موجي من الممكن قياسه عمليا يسلك كما لو كان له زخم شبيه بالجسيمات $P = \frac{h}{\lambda}$.

في ظرف معين يظهر الضوء أما صفة موجية أو صفة جسيمية، لكن ليس كلاهما آنيا.

النظرية الموجية للضوء والنظرية الكمية تكمل أحدهما الأخرى ... نظرية الموجات الكهرومغناطيسية تفسر انتشار الضوء في الفضاء، في حين تفسر فكرة الفوتونات تفاعل الضوء مع المادة. ليس هناك أي طريقة نتجنب بها اعتبار الضوء سيل من جسيمات منفصلة في بعض الأحيان. وكموجات في أحيان أخرى.

زخم الفوتون وظاهرة كومبتون

Photon momentum and Compton effect

النظرية الكمية للضوء تفترض أن الفوتونات تسلك سلوك الموجات لكن ليس لها كتلة سكونية. وعلى هذا الأساس يمكننا معالجة تصادم الفوتونات مع الإلكترونات.

عند تصادم فوتون مع إلكترون ساكن، نتيجة للتصادم، يتشتت الفوتون من اتجاهه الأصلي في حين يستلم الإلكترون دفعة تجعله يتحرك باتجاه معين.

نتصور في هذه العملية أن الفوتون يفقد طاقة تساوي الطاقة الحركية T المكتسبة من قبل الإلكترون، إذا كان التردد الابتدائي للفوتون هو ν وتردد فوتون المشتت هو

ν' ، نجد أن أرثر كومبتن (Arther H. Compton) اشتق هذه المعادلة سنة 1920 وحققها عمليا، وهذه الظاهرة هي إحدى الأدلة الساطعة على صحة النظرية الكمية للأشعة.

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \phi). \quad (12)$$

المعادلة (12) تعطي التغير في الطول الموجي لفوتون متشتت بواسطة الكترون كتلته السكونية m_0 كدالة لزاوية التشتت، وهذا التغير لا يعتمد على طول موجة الفوتون الساقط. الكمية $\frac{h}{m_0 c}$ تدعى بطول موجة كومبتن (Compton wavelength) للجسيم المتشتت ولذلك فإن طول موجة كومبتن هي $0.0242 \text{ \AA}$ ، وأن أكبر تغير في الطول الموجي يحدث عند زاوية التشتت عند زاوية التشتت $\phi = 180^\circ$. عند هذه الزاوية التغير في الطول الموجي ضعف طول موجة كومبتن $\frac{h}{m_0 c}$. ولما كان طول موجة كومبتن $0.0242 \text{ \AA}$ ، على حين للجسيمات يكون طول موجة كومبتن أصغر من هذه القيمة بكثير، لكبر كتلتها السكونية نسبيا، نجد أكبر تغير في الطول الموجي في ظاهرة كومبتن يساوي $0.0484 \text{ \AA}$. مثل هذا التغير يمكن فقط ملاحظته باستخدام الأشعة السينية.

مثال

أحسب الطاقة الحركية القصوى للإلكترون ضوئي انبعث بتردد قدره $8 \times 10^{14} \text{ Hz}$ من سطح معدن إذا كان تردد العتبة (التردد الحرج) للمعدن مساوياً $4 \times 10^{14} \text{ Hz}$

الحل

$$h \nu = h \nu_0 + K_{\max}$$

$$K_{\max} = h(\nu - \nu_0)$$

$$= (6.6 \times 10^{-34} \text{ J.s}) [8 \times 10^{14} - 4 \times 10^{14}] \text{ s}^{-1}$$

$$= \frac{6.6 \times 10^{-34} \times 4 \times 10^{14}}{1.6 \times 10^{-19}} = \underline{\underline{1.65 \text{ eV}}}$$

حيث استخدمنا $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$

مثال

سقطت أشعة فوق بنفسجية ذات طول موجي 350 nm على سطح معدن دالة شغله تساوي 2.2 eV أحسب الطاقة الحركية القصوى للإلكترونات الضوئية التي انبعثت من سطح المعدن .

الحل

$$c = \lambda \nu$$

بما أن

حيث c : سرعة الضوء (الإشعاع) في الفراغ ، λ : الطول الموجي ، ν : التردد

$$E = h \nu = \frac{hc}{\lambda}$$

فإن طاقة فوتون الأشعة

$$= \frac{(6.6 \times 10^{-34} \text{ J.s})(3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1})}{350 \times 10^{-9} \text{ m}}$$

$$= 5.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$= \frac{5.6 \times 10^{-19}}{1.6 \times 10^{-19}} = \underline{\underline{3.5 \text{ eV}}}$$

$$K_{\max} = E - h\nu_0$$

$$= 3.5 - 2.2 = 1.3 \text{ eV}$$

مثال/ فوتون طول موجته 1Å اصطدم بإلكترون ساكن ، إذا كانت زاوية استطارة الفوتون 90° . 1. أحسب التغير في طول موجة الفوتون والتغير في طاقته بعد التصادم.

2. أحسب الطاقة الحركية للإلكترون

الحل

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta).$$

لإيجاد التغير في طول موجة الفوتون نستخدم معادلة

حيث (θ) هي زاوية استطارة الفوتون ويتعويض قيم ثابت بلانك والكتلة وسرعة الضوء نحصل على

$$\begin{aligned} \lambda' - \lambda &= 0.0243 (1 - \cos 90^\circ) \\ &= \underline{0.0243 \text{ Å}} \end{aligned}$$

طاقة الفوتون قبل التصادم

$$\begin{aligned} E &= \frac{h c}{\lambda} = \frac{(6.6 \times 10^{-34} \text{ J.s})(3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1})}{1 \times 10^{-10} \text{ m}} \\ &= 1.98 \times 10^{-15} \text{ J} \end{aligned}$$

طول موجة الفوتون بعد التصادم

$$\lambda' = 1.0243 \text{ Å}$$

طاقة الفوتون بعد التصادم

$$\begin{aligned} E' &= \frac{h c}{\lambda'} = \frac{(6.6 \times 10^{-34} \text{ J.s})(3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1})}{1.0243 \times 10^{-10} \text{ m}} \\ &= 1.93 \times 10^{-15} \text{ J} \end{aligned}$$

إذن فإن التغير في طاقة الفوتون يكون

$$E - E' = (1.98 - 1.93) \times 10^{-15} \text{ J}$$

$$= 0.05 \times 10^{-15} \text{ J} \simeq \underline{313 \text{ eV}}$$