مدخل إلى ميكانيك الكم

سادت مفاهيم الفيزياء الكلاسيكية (الميكانيك الكلاسيكي، النظرية الكهرومغناطيسية، الإحصاء الكلاسيكي، ...إلخ) حتى القرن التاسع عشر وكانت كافية لفهم وتفسير الظواهر الفيزيائية المعروفة آنذاك، حتى أُعتقِدَ بأن الإكتشافات العلمية قد تم إنجازها ولم يبقى إلا بعض المسائل البسيطة التي تحتاج إلى مزيد من التوضيح، غير أنه في نهايات القرن التاسع عشر وبدايات القرن العشرون ظهرت ظواهر فيزيائية أخرى لم يتمكن العلماء من فهمها وتفسير نتائجها التجريبية المتحصل عليها بالإستناد إلى مفاهيم الفيزياء الكلاسيكية مما جعلهم يفكرون في مفاهيم وأدوات جديدة تمكنهم من ربط النتائج التجريبية المتحصل عليها بالنتائج النظرية لفهم وتفسير ما يحدث.

من أهم هذه الظواهر هي ظاهرة إستقرار الذرات وظاهرة إشعاع الجسم الأسود وظاهرة الفعل الكهروضوئي وظاهرة مفعول كومبتون وأخيرا ظاهرة تداخل الجسيمات.

1- إستقرار الذرات:

من المعلوم بأن الذرات مستقرة في الطبيعة ومعلوم أيضا أنها تملك إلكترونات تتحرك مسارعة حول النواة، وبناء على فرضيات الفيزياء الكلاسيكية (الإلكترودينامية الكلاسيكية) فإن الشحنات الكهربائية المتسارعة تفقد طاقة على شكل إشعاع، أي أن الإلكترونات ستفقد كل طاقتها مع مرور الزمن وبالتالي ستسقط على النواة أي تنهار الذرات وهذا الأمر لا يحدث، فهو دليل على عجز المفاهيم الكلاسيكية على تفسير وفهم ما يحدث.

2- إشعاع الجسم الأسود:

نلاحظ أنه عند تسخين قضيب معدني فإنه يتغير لونه يتغير بتغير درجة الحرارة، أي أن الطول الموجي أو التواتر للإشعاع الصادر يتعلق بدرجة الحرارة وهذا ما نشاهده من خلال تغير اللون فنقول بأن الإشعاع الصادر من هذا الجسم يبدأ بتواترات منخفضة ويزداد التواتر بازدياد درجة الحرارة، أي أن الطاقة المشعة يتعلق بالتواتر أو الطول الموجي ودرجة

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

الحرارة.

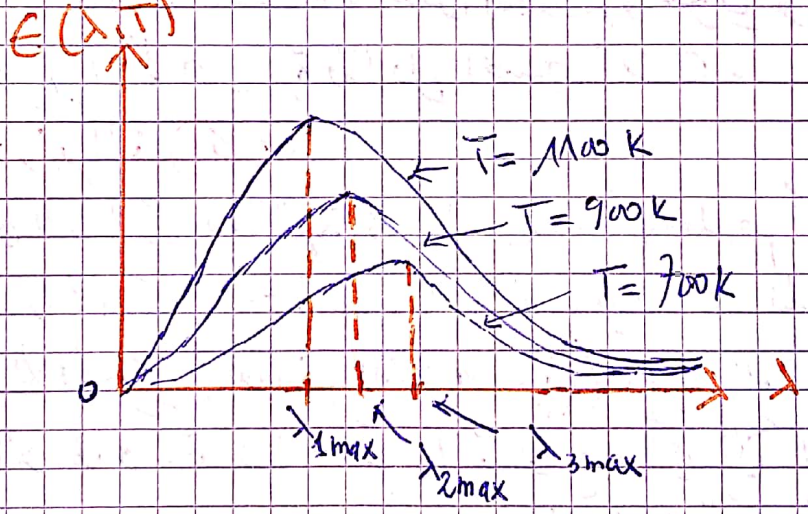
إن طيف توازن الإشعاع الصادر من جسم ما يعتمد على طبيعة الجسم نفسه، لذا سنهتم هنا فقط بالجسم الأسود.

إن الجسم الأسود هو الجسم الذي يمتص كل الأشعة التي تسقط عليه ثم يصدرها كلها فهو بالتالي جسم مثالي.

من الأمثلة الطبيعية على الأجسام السوداء هي الأرض فالأرض تمتص كل الأشعة التي تسقط عليها ثم تصدرها كلها بعد فترة وهذا ما نلاحظه محققة بذلك التوازن الحراري بينها وبين الوسط الذي يحيط بها.

ومن الأمثلة المصنعة في المختبر هو التجويف (Cavity) والذي هو عبارة عن كرة معدنية مجوفة بها ثقب صغير.

يبين الشكل التالي منحنيات كثافة طاقة إشعاع الجسم الأسود المتحصل عليها تجريبيا عند درجات حرارة مختلفة بدلالة الطول الموجي.



من المنحنيات التجريبية نلاحظ ما يلي:

1- هناك تناسب بين الطاقة المشعة ودرجة الحرارة.

2- لانزياح ذروة المنحنيات (القيمة القصوى لكثافة الطاقة) نحو الأطوال الموجية الصغيرة أو التواترات العالية.

لقد تنبه فيان (Wien) إلى هذه الأخيرة وأستنتج ما يعرف بقانون الإنزياح لفيان والذي يكتب:

$$\lambda_{1max} T_1 = \lambda_{2max} T_2 = \dots = b \quad / \; b = \text{ثابت}$$

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

ووجد كذلك جوزيف ستيفن سنة 1879 تجريبيا بأن الطاقة الكلية التي يصدرها جسم أسود متناسبة مع T^4 وكتب:

$$E(T) = aT^4 \quad / \quad a = 7{,}5643 \times 10^{-16}\ J\,m^{-3}\,K^{-4}$$

والتي أثبتها لاحقا بالاعتماد على الحسابات النظرية بولتزمان وأصبحت تعرف بقانون ستيفن-بولتزمان.

كل هذه النتائج التجريبية لم تفهم ولم تفسر بالاعتماد على المفاهيم الكلاسيكية (الكهرومغناطيسية والإحصاء الكلاسيكي)، حتى قام العالم الألماني ماكس بلانك (1858 - 1947) باقتراح سنة 1900 م فائدة أن ذرات الجسم الأسود هي عبارة عن هزازات توافقية لا تمتص ولا تصدر الأطاقة متوافقة مع توترها أي أنه لا يمتص ولا يصدر الأطاقة على شكل كمات قدرها $h\nu$ حيث h هو ثابت أساسي جديد للطبيعة ويسمى ثابت بلانك.

إذن كتب بلانك كثافة طاقة إشعاع الجسم الأسود بدلالة التواترات كالآتي:

$$\epsilon(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$$

وبدلالة الأطوال الموجية كالتالي:

$$\epsilon(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \times \frac{1}{Exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}$$

3- الفعل الكهروضوئي:

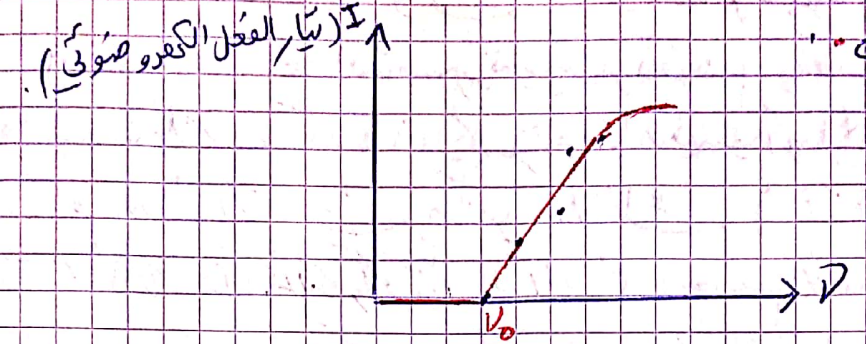
الفعل الكهروضوئي هو عبارة عن انبعاث إلكترونات من معدن ما أثناء سقوط أشعة ضوئية عليه.

إن الأشعة الضوئية هي أمواج كهرومغناطيسية، حيث أن حقلها الكهربائي يعرض ذرات المعدن إلى قوة بإمكانها قذف بعض الإلكترونات ما لحة بأنها لها طاقة حركية تتعلق بالطاقة التي تكتسبها من الموجة الكهرومغناطيسية أي:

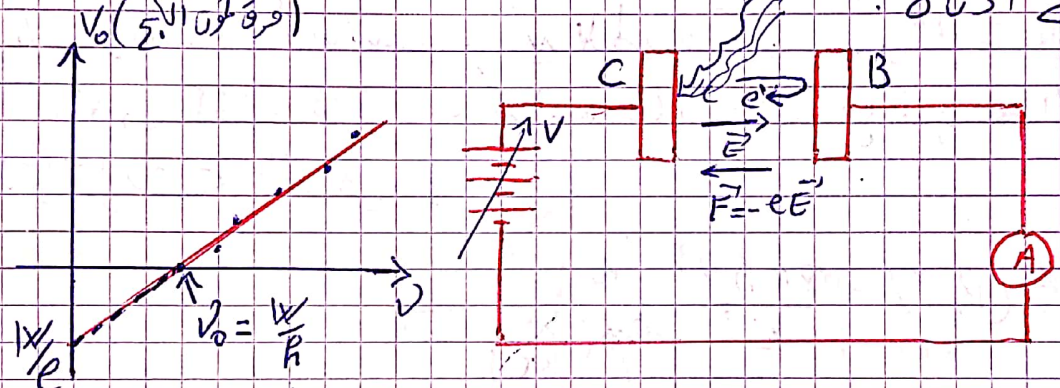
الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

$$E_c = E - W$$

كلاسيكيا نتوقع بأن تزداد الطاقة الحركية بازدياد شدة الضوء، لكن تجريبيا لوحظ إستقلال الطاقة الحركية للإلكترونات عن شدة الضوء الساقط عليها، في حين أنها تزداد خطيا مع تواتر ν والذي يزداد بازدياد شدة الضوء هو عدد الإلكترونات المنبعثة في وحدة الزمن.



الطاقة الحركية القصوى يمكن قياسها من خلال الطريقة الموضحة في الشكل أدناه.



عند تطبيق فرق كمون V بين اللبوسين B و C يمكن التقليل من سرعة الإلكترونات، وبالتالي التقليل من طاقتها الحركية.

عند فرق كمون مميز V_0 التيار الكهروضوئي الذي نقيسه من خلال الأمبيرمتر يصبح معدوما، مما يعني أنه لا يوجد إلكترونات تصل إلى الأنود B، عندئذ نكتب:

$$E_{c_{max}} = eV_0$$

يسمى الكمون V_0 بكمون الكبح.

كلاسيكيا نتوقع بأن كمون الكبح يتعلق بشدة الضوء لكن تجريبيا لوحظ أن هذا الكمون يتناسب خطيا مع التواتر ν.

لحل هذه المشكلة إعتمد على إفتراض بلانك وأعتبر بأن طاقة الحزمة الضوئية وحيدة اللون تصل على شكل كمات قدرها $h\nu$

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

تسمى الفوتونات، بأن طاقة الفوتون :

$$E = h\nu = \hbar\omega$$

وبذلك يكون تفسير الفعل الكهروضوئي كما يلي :

عندما يسقط الضوء على المعدن يكون الفوتون هو المسؤول عن إنبعاث الإلكترون نتيجة تفاعله معه، أي أن الطاقة التي يحملها الفوتون تتحول إلى الإلكترون.

إن هذه الطاقة تصرف جزء منها لتحرير الإلكترون من المعدن والجزء الآخر يمنح الإلكترون المتحرر طاقة حركية، أي :

$$E_c = E - W = h\nu - W$$

بما أن الإلكترونات لا تحتاج كلها إلى نفس الطاقة للتحرر من المعدن (مثلا إلكترونات السطح تحتاج طاقة أقل من الإلكترونات الداخلية للتحرر)، إذن الطاقة الدنيا التي يحملها الفوتون لتحرير إلكترون تحقق :

$$0 = h\nu_0 - W \Rightarrow W = h\nu_0 = W_0$$

حيث أن W_0 تسمى دالة العمل للمعدن وهي موافقة لأقل طاقة لازمة لتحرير إلكترون، مع العلم بأنها طاقة (مقدار) مميزة لكل معدن.

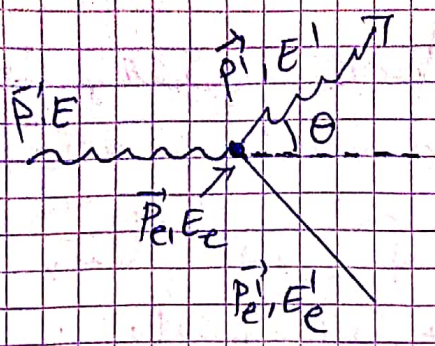
ν_0 هو تواتر العتبة وهو أقل تواتر لازم لتحرير إلكترون.

4- مفعول كومتون :

لقد لوحظ بأنه عند إرسال أشعة X (أمواج كهرومغناطيسية) نحو سطح المعدن تظهر الموجة المرسلة مع موجة أخرى حول المعدن طول موجتها أكبر من طول الموجة المرسلة ويتحقق الفرق بين الطولين الموجيين بزاوية تشتت الفوتون θ، الأمر الذي لم يكن متوقعا حسب مفاهيم الفيزياء الكلاسيكية، وتسمى هذه الظاهرة بمفعول كومتون.

لقد فسر كومتون هذه الظاهرة بإفتراضه أن أشعة X تتصرف وكأنها جسيمات، حيث تمثل هذه الجسيمات الفوتونات. إن هذه الفوتونات (الجسيمات) تتصادم مع إلكترونات ذرات المعدن. وهذا ما اعتمده كومتون أثناء دراسته لهذه الظاهرة مستعملا قوانين التصادم (إنحفاظ الدفع الخطي والطاقة الكلية)، أي :

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner



$$\vec{p} + \vec{p}_e = \vec{p}' + \vec{p}'_e$$
$$E + E_e = E' + E'_e$$

بما أن الفوتونات تتحرك بسرعة الضوء فإن الدفع الخطي والطاقة الكلية تكتب في إطار النسبية الخاصة كالآتي :

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} = \sqrt{c^2 p^2 + m_0^2 c^4}$$

$$\vec{p} = m\vec{v} = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}\vec{v} \qquad / \; m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

حيث $\beta = \frac{v}{c}$ و m_0 هي الكتلة السكونية.

ووجدنا أن :

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c}(1 - \cos\theta)$$
$$= \lambda_c (1 - \cos\theta) = 2\lambda_c \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

حيث λ_c هو طول موجة كومبتون للإلكترون.

نتيجة: الفوتون إضافة إلى كونه موجة كهرومغناطيسية فهو أيضا جسيم ذو كتلة معدومة، إذن :

$$E = \sqrt{c^2 p^2 + 0} = cp = h\nu = \hbar\omega$$

$$\Rightarrow p = \frac{h}{2\pi} \times \frac{\omega}{c} = \frac{h}{2\pi} \times \frac{2\pi c}{c\lambda} \Rightarrow \boxed{\frac{h}{\lambda} = p}$$

$$p = \hbar\frac{\omega}{c} = \hbar k \quad \Rightarrow \quad \boxed{\vec{p} = \hbar\vec{k}}$$

حيث $k = \frac{\omega}{c}$ وهو العدد الموجي.

* الملاحظ من خلال العلاقتين الأخيرتين هما رمز الطبيعة الموجية بالطبيعة الجسيمية الأمر الذي يقربنا بالنسبة للفيزياء الكلاسيكية.

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

5- تداخل الجسيمات :

لقد توصلنا للفوتونات الطبيعة الموجية، والطبيعة الجسيمية في آن واحد. فالسؤال الذي يطرح الآن هو:
هل يمكن أن تكون للجسيمات الطبيعة الموجية؟.
إن الإجابة عن هذا السؤال ستكون من خلال التجربتين الموالبتين.

أ- تجربة دافيسون - جرمر (Davisson - Germer):

لقد أثبتت الطبيعة الموجية للإلكترونات عام 1927 من خلال التجربة التي أجراها العالمان دافيسون وجرمر حيث تم في هذه التجربة إثبات وجود الإلكترونات وحساب الطول الموجي لها الذي كان متوافقا مع فرضية دبروي.

ب- تجربة شقي يونغ :

تجربة شقي يونغ هي أحد أهم التجارب الفيزيائية التي ساهمت في الكشف عن الطبيعة الموجية للضوء، ثم استخدمت في إثبات وجود الطبيعة الموجية لجسيمات المادية مثل الإلكترونات وغيرها.
نعلم أن عند إرسال أشعة ضوئية على شقي يونغ يمكننا ملاحظة الأهداب المضيئة والأهداب المظلمة على اللوح خلف الشقين، كما أنه يمكننا ملاحظة هذه الظاهرة إذا استبدلت الأشعة الضوئية بحزمة من الإلكترونات مثلا.

ج- أمواج لوي دبروي (L. De Broglie):

إن إثبات الطبيعة المزدوجة للفوتونات جعلت لوي دبروي يفترض أنه لكل جسيم مادي طاقته E ودفعه الخطي $\vec{P}$ مرفقة بموجة توافقها ν وشعاع عددها الموجي $\vec{K}$ كما يلي:

$$\vec{P} = \hbar \vec{K} \quad , \quad E = \hbar\omega = h\nu$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{K} = \frac{2\pi}{P} \cdot \hbar = \frac{h}{P} .$$

وهذا ما أثبتته التجارب التي قمنا بذكرها.

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

ملاحظة هامة:

لنفترض أننا لدينا موجة موصوفة بالدالة الموجية التالية:

$$\psi(x,t) = C\, e^{i(k_x \cdot x - \omega t)}$$

1- إذا قمنا بالتأثير على الدالة ψ بـ $\frac{\hbar}{i}\frac{\partial}{\partial x}$ فإننا نحصل على:

$$\frac{\hbar}{i}\frac{\partial}{\partial x}\psi(x,t) = \frac{\hbar}{i}\frac{\partial}{\partial x}\left(C e^{i(k_x x - \omega t)}\right) = \frac{\hbar}{i}(i k_x)\,\psi(x,t)$$

$$\Rightarrow \frac{\hbar}{i}\frac{\partial}{\partial x}\psi(x,t) = \hbar k_x \psi(x,t) = P_x \psi(x,t)$$

2- إذا قمنا بالتأثير على الدالة ψ بـ $\frac{\hbar^2}{i^2}\frac{\partial^2}{\partial x^2}$ فإننا نحصل على:

$$-\hbar^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2}\psi(x,t) = \frac{\hbar}{i}\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\hbar}{i}\frac{\partial}{\partial x}\psi\right) = \frac{\hbar}{i}\frac{\partial}{\partial x}(P_x \psi)$$

$$= P_x^2 \psi(x,t)$$

$$\Rightarrow -\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2}{\partial x^2}\psi(x,t) = \frac{P_x^2}{2m}\psi(x,t) = E\,\psi(x,t)$$

حيث E هي طاقة حركية فقط ($E_p = 0$).

3- إذا قمنا بالتأثير على الدالة ψ بـ $i\hbar\frac{\partial}{\partial t}$ نجد أن:

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi = i\hbar(-i\omega)\psi = \hbar\omega\psi = E\psi$$

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi(x,t) = E\,\psi(x,t)$$

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner