

الفصل الاول

الطبيعة الحبيبية للأشعاع : أصل النظرية الكمية .

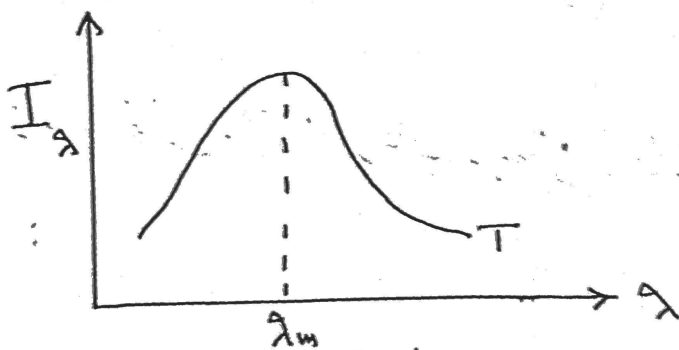
* أشعاع الجسم الاسود : فرضية بلانك الكمية

* يعود أصل نظرية الكم إلى البحث عن تفسير للتوزيع الطيفي للطاقة الإشعاعية المنبعثة من الجسم الاسود .

* يتم تعريف الجسم الاسود المثالي على أنه الجسم الذي يمتص جميع الإشعاعات الكهرومغناطيسية التي تسقط عليه وبعكاثون كيرشوف فان مثل هذا الجسم صواباً وضع أفضل للطاقة بجميع الرددات من أي جسم آخر عند نفس درجة الحرارة .

* أن الجسم الاسود المثالي غير موجود وأن أقرب مثال له هو عبارة عن حامية مغمورة (جسم مجوف) له جدران داخلية سوداء اللون وتحت صخر وعالية فان أي أشعاع يدخل إلى هذا الجسم المجهوف من خلال الفتحة سوف يتكسر بكل متكرر ويتم امتصاصه في الداخل . لكن هناك مشكلة فسيائية للغاية لخروج الإشعاع أقل جزء منه أذا تم تسخين الجسم هذا إلى درجة حرارة معينة T وسوف يمر جزء صخر جداً من الإشعاع عبر الفتحة . وبما أن الفتحة تحول كجسم اسود فان هذا الإشعاع يسمى أشعاع الجسم الاسود عند درجة الحرارة T .

* الشكل المجاور يوضح توزيع طاقة الإشعاع للجسم الاسود I_{λ} مع الطول الموجي λ حيث وجد أن الطاقة المتجهة إلى الكواكب عند طول موجي محدد λ_m وتكون صخر لفترة مقرر جداً لظلال موجية طولية جداً .



توزيع طيف الإشعاع الجسم الاسود

27
* أن عماديات مختلفة هرت لتوضيح وسطح شكل هذا المنحنى حيث حصل العالم وين على صيغة شبه تجريبية والمعروفة بقانون وين "Wien's law" :

$$I(\lambda, T) = \frac{a e^{-b/\lambda T}}{\lambda^5} \quad \text{--- (1)}$$

حيث أن a و b ثابتان (بارامترات التعديل). أن هذا القانون يتناسب المنحنى التجريبي بشكل جيد إلى حد ما باستثناء الأطوال الموجية الطويلة ومع ذلك فهو ليس مرضياً بمعنى أنه غير مستقر مع نموذج يربط الإشعاع المنبعث بالعمليات الفيزيائية التي تحدث داخل التجويف.

* تم تقديم نظرية أكثر اكتمالاً من قبل راليين وجينز بناءً على (بالاستناد على) النظرية الديناميكية الكهربائية الكلاسيكية والنظرية الديناميكية الحرارية حيث اعتبروا الجسم المصحح عبارة عن مجموعة متكونة من عدد كبير من الجسيمات المسكونة التي تؤدي الحركات توافقية خطية بسيطة حيث أن هذه الجسيمات المتذبذبة تبعث وتقبل الإشعاع الكهرومغناطيسي. وعند التوازن الحراري ستكون كثافة الطاقة الإشعاعية داخل التجويف متساوية لكثافة الطاقة المتذبذبة الذرية الموجودة في جدران التجويف. وعلمنا أن لججان عدد المتذبذبات لوحدة الحجم ذات تردد ν يسمى بعدد "Jeans" وهي :

$$N(\nu) = \frac{8\pi \nu^2}{c^3} \quad \text{--- (2)}$$

وطبقاً للنظرية الكلاسيكية للتقسيم المتساوي للطاقة فإن متوسط طاقة المتذبذب عند درجة الحرارة T هي KT حيث K هو ثابت بولتزمان لهذا فإن كثافة الطاقة الإشعاعية ذات التردد ν في التجويف / وعند درجة حرارة T هو :

$$U(\nu, T) = \frac{8\pi \nu^2}{c^3} KT \quad \text{--- (3)}$$

السلامة (3) تمثل قانون راليين - جينز ويمكن كتابته بدلالة الطول الموجي إذا اردنا أن :

$$\nu d\nu = \lambda d\lambda$$

$$(3) \quad n(\lambda) = n(\nu) \left| \frac{d\nu}{d\lambda} \right| = n(\nu) \left| \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{c}{\lambda} \right) \right|$$

$$\begin{aligned} n(\lambda) &= n(\nu) \frac{c}{\lambda^2} \\ &= \frac{8\pi}{c^3} \left(\frac{c^2}{\lambda^2} \right) \left(\frac{c}{\lambda^2} \right) \\ &= \frac{8\pi}{\lambda^4} \end{aligned}$$

$$\therefore \left\{ U(\lambda, T) = \frac{8\pi}{\lambda^4} kT \right\} \quad \text{--- (4)}$$

وتناسب شدة الإشعاع المنبعث من فتحة التجويف $I(\lambda, T)$ مع $U(\lambda, T)$ كالتالي :

$$I(\lambda, T) = \frac{c}{4} U(\lambda, T)$$

$$\therefore \left\{ I(\lambda, T) = \frac{8\pi c}{4\lambda^4} kT \right\} \quad \text{--- (5)}$$

لقد وجد أن قانون ريلي - هونز يتفق مع النتائج التجريبية في منطقة الطول الموجي الطويل ولكنه يتباعد عندما يميل الطول الموجي إلى الصفر. وبما رأينا هذا الفشل في قانون ريلي - هونز باسم « الكارثة فوق البنفسجية » علاوة على فشل سترالز (3) إلى أن إجمالي الطاقة المنبعثة عند جميع درجات الحرارة ما عدا الصفر المطلق لا نهائية.

$$U(T) = \int_0^{\infty} U(\nu, T) d\nu = \frac{8\pi kT}{c^3} \int_0^{\infty} \nu^2 d\nu = \infty \quad (\text{وهو غير ممكن})$$

وهنا أتى القانون ثم استلزامه من خلال تطبيق مبادئ الفيزياء الكلاسيكية فالنتيجة بينت أن هناك خطأ جوهري في ذلك.

* أدرك بلانك أنه هناك حاجة إلى بعض التغيير الكهربي لتفسير طيف الاستعاع الجسم الأسود المرصود تجريبياً وبعد الكثير من التجارب توصل في عام ١٩٠٠ إلى الفرضية التالية والتي نعرفها باسم فرضية بلانك الكمية وهي :

* يمكن أن تحتوي المذبذبات المادية (الموجودة في هدران الجوفيت) على مستويات طاقة منفصلة فقط بدلاً من نطاق مستمر من الطاقات كما هو مفترض في الفيزياء الكلاسيكية. إذا كان الجسم يذبذب يتردد ν فإنه طاقته E هذا القيم :

$$E_n = nh\nu \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

حيث h ثابتة أطلق عليها لاحقاً ثابت بلانك وأنه $h\nu$ أطلق عليه كم الطاقة. وهذا يعني أن الجسم يمكن أن يبعث أو يمتص الطاقة الكهربائية ليس بكل متر وبكميات فيه أو اعتبارية وإنما بمضاعفات كم $h\nu$.

ولأن المذبذبات طاقاتها مقيدة بمضاعفات $h\nu$ فإنه متوسط (معدل) قيمة طاقاتها يكون مختلفاً عن KT وهي القيمة التي تم الحصول عليها باستخدام نظرية التقسيم المتساوي الكلاسيكية. ويمكن ملاحظتها كما يلي :-

فترض كل الجسيمات تذبذب يتردد ν وعند درجة الصفر المطلقة ستكون في المستوى الطاقة السفلي. أما عند درجات الحرارة العالية بعض الجسيمات المذبذبة ستأخذ مستويات أعلى. وفي درجة حرارة T عند نقطة التوازن فإنه عدد من المذبذبات ذات الطاقة E_n يعطى حسب دالة ماكسويل-بولتزمان

$$N(n) = N_0 e^{-E_n/KT}$$

وهذا يدل على أنه كلما ارتفعت حالة الطاقة (مستوى الطاقة) على احتمال أن تكون هذه الحالة (المستوى) مغلول بالجسيمات.

$$\text{where } n \rightarrow \infty, N(n) = 0$$

لاحظ أنه المذبذبات في النظرية الكلاسيكية تتأثر من جميع الطاقات باحتمالات متساوية

(5)

اِنَّ معدل (متوسط) الطاقة لكل مستندب هو

$$\bar{\epsilon} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} N(n) \epsilon_n}{\sum_{n=0}^{\infty} N(n)}$$

$$= \frac{\sum_{n=0}^{\infty} N_0 e^{-nh\nu/kT} nh\nu}{\sum_{n=0}^{\infty} N_0 e^{-nh\nu/kT}}$$

$$\therefore \bar{\epsilon} = \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

$$n(\nu) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3}$$

وبفرض هذه العلاقة بعدد جيتز (العلاقة ②)

فان كثافة طاقة الأشعاع بداخل الجوف تكبر :-

$$U(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

⑦ قانون بلانك للأشعاع

وبدلالة الطول الموجي λ للأشعاع فان قانون بلانك للأشعاع :-

$$U(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

⑧

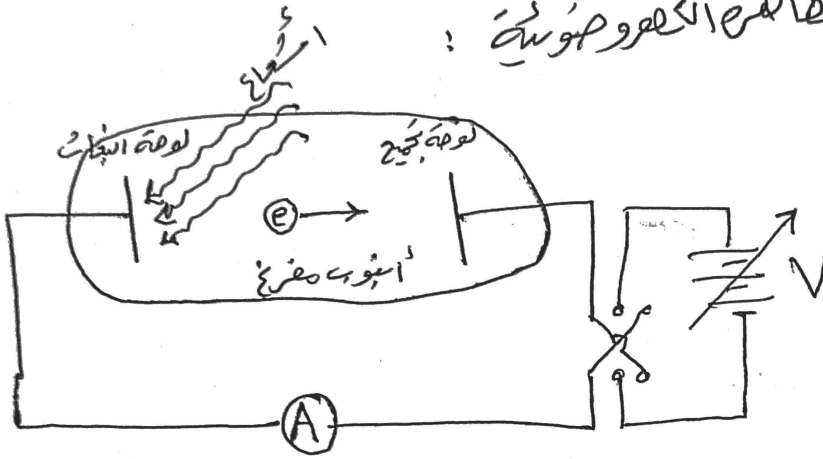
* يتوافق وينجم قانون بلانك مع مخطبات التوزيع الطيفي الملاحظة لجميع قيم λ و T ، وهو يختلف الى قانون وين (Wien's law) عندما $\lambda \rightarrow 0$ ويختلف الى قانون ريلي - جيتز عندما $\lambda \rightarrow \infty$.

* إضافة الى ذلك فان قانون بلانك يتوافق مع قانون ازاره وين $\lambda_m T = \text{ثابت}$ ويتوافق أيضاً مع قانون ستيفان $U \propto T^4$

⑦ وهكذا فإن قانون بلانك للاستحاج يستعمل على كل ما هو صحيح من النظرية الكلاسيكية . وهذا القانون أحدث أخطافاً أساسية في أسس النظرية الكلاسيكية والميكانيك الكلاسيكي .

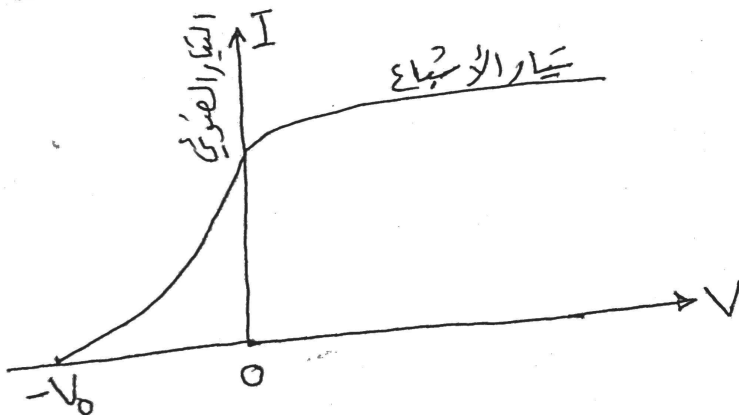
* الظاهر الكهروضوئية

* عندما يسقط استحاج كهروضوئي ذو تردد عالٍ بدرجة كافية على سطح معدن فإنه تنبعث الإلكترونات من هذا السطح . وتسمى هذه الظاهر بالتأثير الكهروضوئي .
 * تسمى الإلكترونات المنبعثة بالإلكترونات الضوئية .
 * الشكل التالي يخطط لتجربة الظاهر الكهروضوئية :



* عندما نحقق لوحة (معدنية) الجسيم مصداً موجياً عالياً بدرجة كافية V فإنه يقل جميع الإلكترونات المنبعثة إلى هذه المعدنية والتيار الكهروضوئي الناتج يكون متبعاً .

* إننا نتابع العلاقة بين التيار الكهروضوئي الناتج وحولسية الجسيم موصية بالمعادلة التالي :-



(7)

* تتم الحصول على النتائج التالية من هذه التجربة

- ① لا يتغير أي الكهرومغناطيسية إذا كانت تردد الإشعاع الساقط أقل من تردد العتبة ν_0 حيث قيمة ν_0 تتغير من معدن إلى آخر.
- ② تتغير الطاقة الحركية للإلكترونات المنبعثة من صفر إلى قيمة قصوى تعتمد على التردد وليس على سعة الإشعاع وتتغير خطياً مع التردد.
- ③ يتناسب عدد الإلكترونات المنبعثة في الثانية أو التيار الكهربائي مع سعة الإشعاع ولكنه مستقل عن التردد.
- ④ الانبعاث الكهربائي عملية لحظية أي أنه هناك قارعة زمنية لا يذكر بيت ووتون (مستوط) الانبعاث والانبعاث الإلكترونات بنفس النظر عن مدى انخفاض سعة الإشعاع.

* قبل الفيزياء الكلاسيكية

* هذه النتائج لا يمكن تفسيرها باستناد ③ إذا اعتبرنا الإشعاع موجياً وفق النظرية الكهربائية الكلاسيكية.

* كلاسيكياً يجب أن تزيد الطاقة القصوى للإلكترونات المنبعثة مع سعة الإشعاع الساقط أما تردد الإشعاع فلا علاقة له بذلك والسبب أن القوة المؤثرة على الإلكترونات المعهودة في المعدن يجب أن تكون متناسبة مع حجم المجال الكهربائي E للموجة الساقطة. ويزداد حجم المجال E عند زيادة سعة الإشعاع.

* طاقة الإلكترونات لا تعتمد على سعة الضوء بل تعتمد على التردد.

* كلاسيكياً يمكن الإلكترونات الطاقة الكهربائية مستمرة تدريجياً ولا ينبعث الإلكترون من المعدن إلا عندما تصبح هذه الطاقة أكبر من دالة الشغل للمعدن ولذلك قد يكون هناك قارعة زمنية بين بداية الإشعاع وانبعاث الإلكترون وسيكون التأخر أطول عندما شغل المعدن سعة الإشعاع. لكن لم يتم ملاحظة هذه الفترة الزمنية على الإطلاق حتى مع الإشعاعات ذات السعة المنخفضة جداً حيث كانت جميع الفترات المرصودة أقل من أوكاوي (10-9) ثانية.

(8)

نظرية آينشتاين

* أوضح آينشتاين التأثير الكهروضوئي باستخدام فرضية بلانك الجديدة .

* لتفسير التوزيع الطيفي لاشعاع الجسم الأسود افترض بلانك أن تبادل الطاقة بين هذه ذرات الجوف والاشعاع ذو التردد ν يحدث في الكميات ذات المقدار $h\nu$ حيث h يسمى ثابت بلانك .

* افترض آينشتاين أن الاشعاع الساقط نفسه يعمل مثل سيار من حزم صغيرة أو حبات من الطاقة $h\nu$ هذه الكميات عرفت فيما بعد بالفوتونات . عندما يهضم الفوتون بالكثرون على سطح معدن يتم امتصاصه ونقل كل طاقته إلى الإلكترون على الفور فإذا كانت دالة الشغل للمعدن هي W فإن هذا القدر من الطاقة سينتج إلكترونات من سطح المعدن ولذلك فإن الطاقة الحركية القصوى E_{max} والسرعة القصوى v_{max} لها ν للإلكترون المنبعث تعطى بالعلاقة :

$$E_{max} = \frac{1}{2} m v_{max}^2 = h\nu - W \quad (9)$$

العلاقة (9) تسمى المعادلة الكهروضوئية لآينشتاين حيث تبين هذه المعادلة أن E_{max} تتغير خطياً مع التردد ν للاشعاع الساقط .

* لأن تردد العتبة ν_0 يتوافق مع الطاقة التي يتم فيها استخدام كل طاقة الفوتون لإزالة الإلكترون من المعدن وبالتالي لا يبقى أي طاقة لتوفير الطاقة الحركية لهذا فإن :

$$h\nu_0 = W$$

$$\nu_0 = \frac{W}{h} \quad (10)$$

ملاحظة :- دالة الشغل للمعدن هي أقل طاقة مطلوبة لإزالة الإلكترون من سطح المعدن نفسه .

* بتعويض (10) في (9) ننتج :-

$$E_{max} = h(\nu - \nu_0) \quad (11)$$

وهي صيغة أخرى للمعادلة الكهروضوئية لآينشتاين .

(لا يوجد انبعاث الكثرن) $\nu < \nu_0$ ν_0 ١٤

* أن الزيادة في سعة الاستعاج تؤدي إلى زيادة في عدد الفوتونات التي تضرب المعدن في الثانية ولكن ليس إلى زيادة في طاقة الفوتونات الفردية ولذلك فإن عدد الفوتونات الخارجة من المعدن لا يتغير مع زيادة سعة الاستعاج. في الثانية الواحدة ومن ثم السيار الكهروضوئي يزداد ولا تزداد طاقة الاكترناح الضوئية ونظراً لأن انبعاث الاكترناح هو نتيجة تصادم مباشر بين الكثرن وفوتون فلا يوجد تأخير زمني قبل بدء الانبعاث.

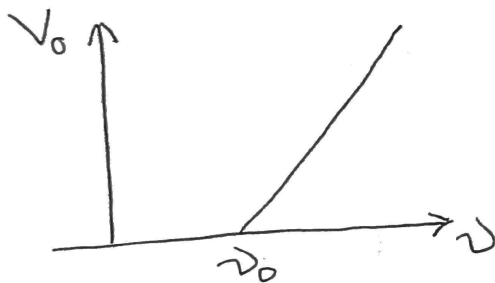
جهد الوقف Stopping Potential

* إذا كانت لوحة (صفحة) التجميع في جهاز الكهروضوئي الذي (2) تحمل شحنة سالبة فيتم صد الاكترناح مرة أخرى عند قيمة معينة V_0 للجهد السالب وعندها فإن أغلب الاكترناح المنقطة ذات الطاقة العالية ستعود راجعة للخلف وبالتالي يصبح السيار الكهروضوئي صفرًا. أن هذا الجهد يسمى بجهد القفل أو جهد الوقف

$$eV_0 = E_{\max}$$

$$eV_0 = h(\nu - \nu_0)$$

$$\therefore V_0 = \frac{h}{e}(\nu - \nu_0) \quad (12)$$



الشكل (4)

أي أن $V_0 \propto \nu$

* الشكل المجاور يوضح تغير جهد القفل (الوقف) مع تردد الاستعاج الساقط

* الرسم البياني عبارة عن خط مستقيم يقطع المحور ν

عند تردد الحصة ν_0 وأن ميل هذا الخط المستقيم هو $\frac{h}{e}$

* يمكن تحديد قيمة ثابت بلانك h عن طريق قياس ميل هذا الرسم البياني

* قام ماركس بياك h بهذه الطريقة ووجد أن قيمة h التي تم الحصول عليها من هذه الرسم البياني هي نفسها التي حصل عليها بلانك من تجارب الاستعاج الكس الأسود وكان هذا مياح قيمة مفهوم الكم ونظرية أينشتاين.

١٥) مثال: أوجد عدد الفوتونات المنبعثة بالثانية بواسطة مصدر قدرته 40W من ضوء أحادي اللون ذي طول موجي $6000 \text{ \AA}$

الحل: أن عدد الفوتونات هو n لذلك

$$nh\nu = E$$

$$n = \frac{E}{h\nu} = \frac{E\lambda}{hc} = \frac{40 \times 6000 \times 10^{-10}}{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8} = 12.06 \times 10^{19}$$

واجب: دالة النقل لسطح حاسن للضوء هو 3.2 eV هل يحدث الانبعاث الضوئي إذا سقط فوتون بطاقة 3.8 eV على هذا السطح؟ إذا كان الجواب نعم فأوجد بومراته الجول أقصى طاقة حركية للإلكترونات الضوئية؟
الجواب نعم / $9.6 \times 10^{-20} \text{ J}$

واجب: دالة النقل لمعدن 3.45 eV ما أقصى طول موجي لفوتون يستطيع أن يخلق (يقذف) الإلكترونات منه؟ الجواب $3603 \text{ \AA}$

واجب: ما قيمة تردد الإشعاع ساقط لبطرد (يقذف) الإلكترونات ذو سرعة قصوى قيمتها 10^6 m/s من معدن البوتاسيوم علماً بأن دالة النقل لهذا المعدن 2.26 eV ؟
الجواب: $1.23 \times 10^{15} \text{ Hz}$

واجب/ معدن ذو دالة نقل 3 eV أضواء ضوء طول موجي $3000 \text{ \AA}$ أوجد
١) تردد العتبة ($0.72 \times 10^{15} \text{ Hz}$)

٢) الحد الأقصى لطاقة الإلكترونات المنبعثة (1.16 eV)

٣) جهد القطر (1.16 eV)

مثال: ما قيمة تردد الإشعاع ساقط ليعطي انبعاث إلكترونات بسرعة قصوى 10^6 m/sec من معدن البوتاسيوم علماً بأن دالة النقل لهذا المعدن 2.26 eV ؟

Sol: $W = 2.26 \text{ eV} = 2.26 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J} = 3.61 \times 10^{-19} \text{ J}$

$$\frac{1}{2} m v_{\text{max}}^2 = h\nu - W$$

$$\therefore h\nu = \frac{1}{2} m v_{\text{max}}^2 + W = \frac{1}{2} \times 9 \times 10^{-31} \times (10^6)^2 + 3.61 \times 10^{-19}$$

$$h\nu = 8.16 \times 10^{-19}$$

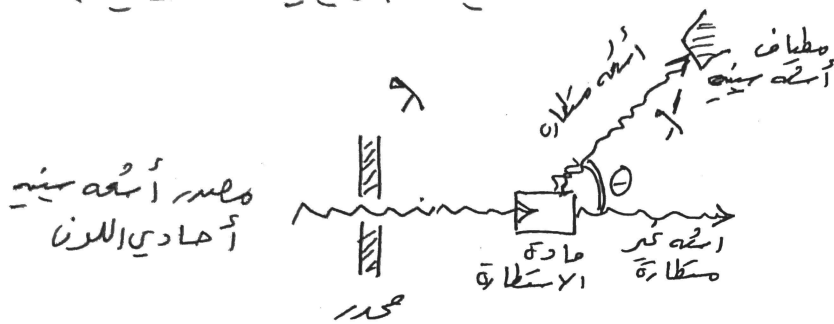
$$\therefore \nu = 8.16 \times 10^{-19} / 6.6 \times 10^{-34} = 1.23 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

* عندما تنطاز هزمة أمواجية اللون (التردد) من الأسطح السنية بواسطة عنصر وزنه الذري منخفض على سبيل المثال عنصر الكربون لوحظ أن السطح السني المسطوح في جميع الزوايا لها سمة مألوفة عند طولين موجيين أحدهما عند الطول الموجي الأصلي والآخر عند طول موجي أطول قليلاً.

* أن السراحة الطول الموجي تكون مستقلة عن الطول الموجي للحرمة الساحة وأيضاً عند لعدت الاستطارة. وتنفذ مثلاً على زاوية الاستطارة.

* هذه الظاهر مسكن تأثير كومبتون حيث أن كومبتون تحيلاته بدولة النظرية الكمية.

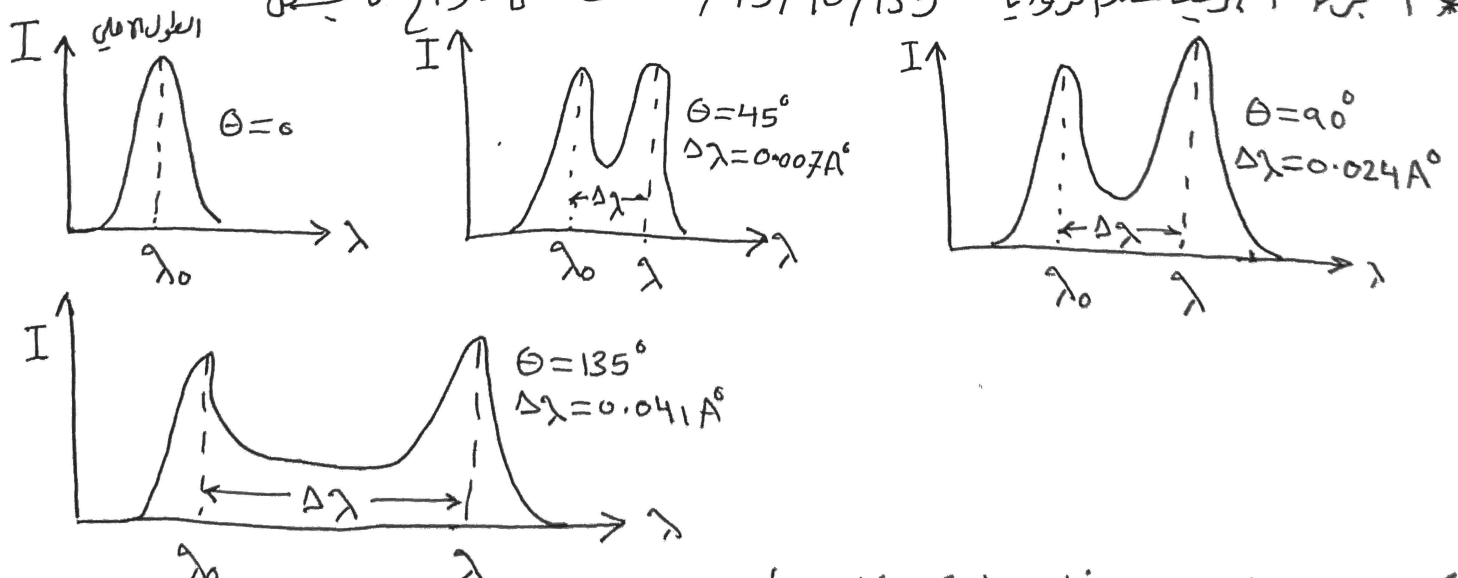
* بعض تأثير كومبتون الدليل الأكثر مباشرة على الطبيعة الجزيئية (الجسيمية) للاستطاع



الشكل (٥): ترتيب تجربة استطارة كومبتون

* النتائج المستخلصة بواسطة كومبتون أن الحزمة المسطارة مكونة من قمتين الأولى تعود إلى الطول الموجي الأصلي λ_0 والآخر إلى الطول الموجي المعدل λ حيث أن السراحة بالطول الموجي $\Delta\lambda$ تزداد بزيادة الزاوية θ

* التجربة أجريت عند الزوايا $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ كما موضح بالشكل



الشكل (٦): الغير بزاوية الخط مع زاوية الاستطارة. أن السراحة عند λ_0 تعود للحرمة الساحة.

* حسب النظرية الكهرومغناطية الكلاسيكية فعند دخول شعاع الإشعاع السيني إلى المادة فإنها تتفاعل مع الإلكترونات الذرية، يمكن اعتبار الإلكترونات آثار حبيّة موزعة بشكل أساسي لأنها مرتبطة بالذرات بطاقة أقل بكثير من طاقة شعاع الإشعاع السيني. ويؤثر المجال الكهربائي المرتبط بالإشعاع السيني بقوة على هذه الإلكترونات ويجعلها تتذبذب بحركة توافقية بسيطة مع تردد الإشعاع السيني وتنبعث هذه الإلكترونات كشعاع كهرومغناطيسي.

* إن التردد الابتدائي لهذا الإشعاع الكهرومغناطيسي سيكون مساوياً لتردد الإشعاع السيني الساقط. ويعطي شعاع الإشعاع السيني أيضاً بعض الزخم للإلكترونات الذي يترتب بعد ذلك في اتجاه موجبات الحركة المضطربة.

* عندما يتحرك الإلكترون بعيداً عن مصدر الإشعاع السيني فإنه "يرى" تردداً أقل بسبب تأثير دوبلر. ثم يصير الإلكترون أشعاعاً بهذا التردد المنخفض وسوف يتناقص التردد بشكل مستمر حتى يصل الإلكترون إلى سرعة النهاية بعد اصطدام الحركة بأحدها وبالتالي فإن الناحية الكلاسيكية يجب أن تكون للأطوال الموجية للإشعاع السيني المضطربة نطاق مستمر من القيم وهو ما يتعارض مع الملاحظات التجريبية.

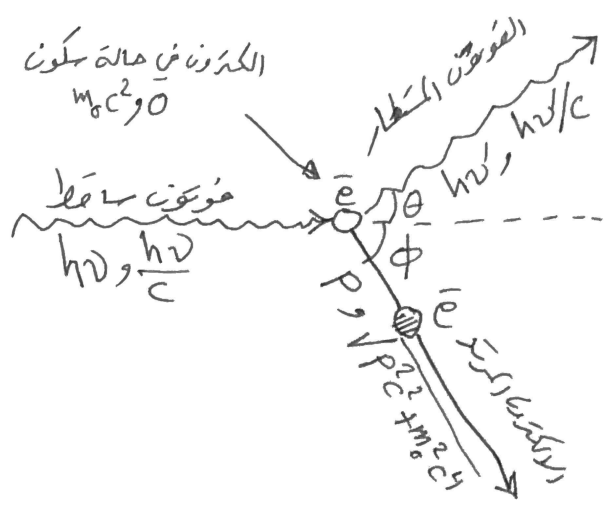
توفيق كوسيتون

* استطاع كوسيتون تفسير هذه الظواهر باستخدام النظرية الكمية للشعاع والتي طورها بلانك وآينشتاين، حيث اعتبر الإشعاع السيني الساقط بمثابة سيار من الفوتونات لكل منها طاقة $h\nu$ وزخم $\frac{h\nu}{c}$ حيث ν هو تردد الإشعاع و h ثابت بلانك و c سرعة الضوء.

* إن عملية الاصطدام تم التعامل معها كاصطدام بين الفوتون والإلكترون الحر والذي يكون في البداية في حالة سكون كما موضح في الشكل (7).

* في حالة الاصطدام هنري من طاقة الفوتون تتحول إلى الإلكترون والذي يربط نتيجة ذلك لذلك فإن الفوتون المضطرب يمتلك طاقة أقل وتردد منخفض وطول موجي أعلى.

(13)



الشكل (7) يوضح تصادم الفوتون مع الإلكترون والذي يصير في الحالة الابتدائية في حالة سكون

* ليكن ν تردد الفوتون الساطع و m_0 كتلة الإلكترون و p زخم الارتداد للإلكترون فطبقاً للنظرية النسبية فإن طاقة الإلكترون في حالة السكون هي m_0c^2 وبعد أن يرتد فإن طاقته تصبح $(p^2c^2 + m_0^2c^4)^{1/2}$ فمن قانون حفظ الطاقة فإن

$$h\nu + (p^2c^2 + m_0^2c^4)^{1/2} = h\nu' + m_0c^2$$

بتربيع العلاقة أعلاه وتبسيط :

$$p^2c^2 + m_0^2c^4 = [h(\nu - \nu') + m_0c^2]^2$$

$$p^2c^2 + m_0^2c^4 = h^2(\nu - \nu')^2 + 2h(\nu - \nu')m_0c^2 + m_0^2c^4$$

$$\therefore \frac{p^2c^2}{h^2} = (\nu - \nu')^2 + \frac{2m_0c^2}{h}(\nu - \nu') \quad (13)$$

الآن نطبق قانون حفظ الزخم باتجاه مواز X وعمودي Y على السقوط المركزي.

$$p \cos \phi + \frac{h\nu}{c} \cos \theta = \frac{h\nu'}{c} \quad (\text{باتجاه المحور } X)$$

$$p \sin \phi = \frac{h\nu}{c} \sin \theta \quad (\text{باتجاه عمود على المحور } X)$$

وبتربيع المعادلات أعلاه :

$$\frac{p^2c^2}{h^2} \cos^2 \phi = (\nu - \nu' \cos \theta)^2 \quad (14)$$

$$\frac{p^2c^2}{h^2} \sin^2 \phi = \nu'^2 \sin^2 \theta \quad (15)$$

وبتربيع وإضافة (14) و (15) :

$$\frac{p^2c^2}{h^2} = ((\nu - \nu' \cos \theta)^2 + \nu'^2 \sin^2 \theta)$$

$$(14) \quad \frac{p^2 c^2}{h^2} = v^2 - 2vv' \cos \theta + v'^2$$

$$= (v - v')^2 + 2vv' - 2vv' \cos \theta$$

$$\therefore \frac{p^2 c^2}{h^2} = (v - v')^2 + 2vv'(1 - \cos \theta) \quad (16)$$

بمقارنة (13) و (16) :

$$\frac{2m_0 c^2}{h^2} (v - v') = 2vv'(1 - \cos \theta)$$

$$\frac{v - v'}{vv'} = \frac{h}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)$$

$$\therefore \frac{1}{v'} - \frac{1}{v} = \frac{h}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta) \quad (17)$$

$$\therefore v' = \frac{c}{\lambda'} \text{ and } v = \frac{c}{\lambda}$$

حيث λ و λ' تمثل الأطوال الموجية للفوتونات الساقطة والمطارة على التوالي
فإن العلامة (17) تصبح :

$$\lambda' - \lambda = \Delta \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta) \quad (18)$$

$$\text{or} \quad \Delta \lambda = \frac{2h}{m_0 c} \sin^2 \frac{\theta}{2} \quad (19)$$

* المعادلة أعلاه توضح أن استطارة كومبتون (ازاحة كومبتون) في طول الموجي هي
متعلقة عند الطول الموجي أو الطاقة للفوتون الساقط وتعتمد فقط على زاوية
الاستطارة وتزداد مع زيادة الزاوية.

* $\frac{h}{m_0 c}$ يسمى هذا المقدار بطول موجة كومبتون للإلكترون وهي بالحقبة التي زاوية
البعث في طول موجة الفوتون المسطارة من الإلكترون عند زاوية 90° نسبة للإتجاه
الأصلي (الأبديائي).

* فسر كومبتون وجود القمة (الذروة) غير المعدلة في كل زاوية على أنه ناتج عن
تشتت الفوتون بواسطة الذرة ككل.

عند استبدال كتلة الذرة بـ m_0 فإن التعبير يصبح معبراً لأن الذرة أثقل
بالألف المرات من الإلكترون.

(10)

تقسيم العلامة (14) على (15) ننتج

$$\cot \phi = \frac{\nu - \nu' \cos \theta}{\nu' \sin \theta}$$

$$\cot \phi = \frac{1}{\sin \theta} (\frac{\nu}{\nu'} - \cos \theta) \quad (20)$$

$$\frac{\nu}{\nu'} = 1 + \alpha(1 - \cos \theta) \quad (21) \quad \alpha = \frac{h\nu}{m_0 c^2} \quad \text{من (17) نجد أن}$$

$$\cot \phi = \frac{1}{\sin \theta} [1 + \alpha(1 - \cos \theta) - \cos \theta] \quad \text{نعوض بالعبارة (20):}$$

$$\cot \phi = \frac{(1 + \alpha)(1 - \cos \theta)}{\sin \theta} = \frac{(1 + \alpha)(2 \sin^2 \frac{\theta}{2})}{2 \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2}}$$

$$\therefore \cot \phi = (1 + \alpha) \tan \frac{\theta}{2} \quad (22) \quad \text{نحل العلاقة بين } \theta \text{ و } \phi$$

* الطاقة الحركية للألكترون الحر

: وتعطى بالعبارة :

$$E = h\nu - h\nu'$$

$$\nu' = \frac{\nu}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)}$$

من العلاقة (24):

$$\therefore E = h\nu \left[1 - \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)} \right]$$

$$\text{أو} \quad \boxed{E = h\nu \frac{\alpha(1 - \cos \theta)}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)}} \quad (23)$$

والطاقة الحركية كذلك يمكن أن يكتب بدلالة الزاوية ϕ حيث نجد أن :

$$\boxed{E = h\nu \frac{2\alpha \cos^2 \phi}{(1 + \alpha)^2 - \alpha^2 \cos^2 \phi}} \quad (25)$$

* تم التحقق من صحة العلاقات أعلاه بخضائفة فائقة عدة مرات عند طريق التجربة.

١٦) وبسبب أيضاً أن تردد الإلكترون محدث آلياً بنفس الوقت مع تسبب الفوتون
وهكذا تم اختيار نظرية كومبتون بدقة. هذه النظرية أثبتت وجود الفوتونات كجسيمات
حقيقية لها زخم وطاقة.

مثال: أشعة سينية بطول موجي 2 أنكرتوم استطارت (تسببت) من كتلة كاربون
عندما لوحظت الفوتونات المستطارة بزاوية قائمة نسبة لاتجاه الحزمة الساقطة
احسب ① طول موجة الفوتون المستطار ② طاقة الإلكترون المرتد ③ زاوية
ارتداد الإلكترون. علماً أن كتلة الكون للإلكترون $9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$
و $c = 3 \times 10^8 \text{ m/sec}$ و $h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ J.s}$

الحل: ① إذا كانت λ و λ' طول موجة الفوتونات الساقطة والمستطارة على
التوالي و θ زاوية الاستطارة

$$\Delta \lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta)$$

$$= \frac{6.6 \times 10^{-34}}{9.1 \times 10^{-31} \times 3 \times 10^8} (1 - \cos 90^\circ)$$

$$= 2.4 \times 10^{-12} \text{ m}$$

$$\Delta \lambda = 0.024 \text{ \AA}$$

$$\therefore \lambda' = \lambda + \Delta \lambda = 2 + 0.024 = 2.024 \text{ \AA}$$

② بإصالح طاقة ربط الإلكترون فانه طاقة التردد تعطينا الطاقة:

$$E = h(\nu - \nu') = hc \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda'} \right) = \frac{hc(\lambda' - \lambda)}{\lambda \lambda'}$$

$$E = \frac{6.6 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 \times 0.024 \times 10^{-10}}{2.0 \times 10^{-10} \times 2.024 \times 10^{-10}} = 1.17 \times 10^{-17} \text{ J}$$

③ إذا كانت ϕ زاوية الإلكترون المرتد فهي تعطينا الطاقة:

$$\cot \phi = \frac{1}{\sin \theta} \left(\frac{\nu}{\nu'} - \cos \theta \right) = \frac{1}{\sin \theta} \left(\frac{\lambda'}{\lambda} - \cos \theta \right)$$

$$= \frac{1}{\sin 90^\circ} \left(\frac{2.024}{2} - \cos 90^\circ \right) = 1.012$$

$$\therefore \phi = \cot^{-1}(1.012) = 44^\circ 40'$$

* عند أجل تفسير العديد من الظواهر مثل التداخل والحيود والاستقطاب لابد من افتراض ان الاشعاع الكهرومغناطيسي له طبيعة موجبة.

* تم ترسيخ النظرية الموجبة للأشعاع بحلول نهاية القرن التاسع عشر حيث قدم ماكسويل الأطار النظري لذلك.

ومن ناحية أخرى، كما تم مناقشتها سابقاً، لتوضيح النتائج الملاحظة والمربطة بتفاعل الأشعاع مع المادة مثل أشعاع الجسم الاسود والتأثير الكهروضوئي وتأثير كومبتون يصبح من الضروري افتراض ان الأشعاع له طبيعة جسيمية فهو ينبعث أو يتم امتصاصه على شكل كمات منفصلة تسمى الفوتونات وبالتالي علينا أن نقبل ان الأشعاع له طبيعة مزدوجة.

* الأشعاع لا يحمل كلانا هين (أشعاع جسيم) بتجربة واحدة خصوصاً تجربة معينة يعرف اما الجسيم او كموجة. حيث ان مفهوم الموجة والجسيم للأشعاع يكمل أحدهما الآخر ففكرة انما هي المزدوجة لا تقتصر على الأشعاع وهذه بل تظهر في هزئات المادة ايضاً.

* ان تفسير هذه الظواهر حسب الفيزياء الكلاسيكية أدت الى حدوث تناقضات بالمفاهيم الفيزيائية نتيجة المواقف المتضاربة والمحيرة مما أدت الى تطوير ميكانيك الكم والتي هي واحدة عادية على وصف هذه الظواهر بشكل جيد مثل تجربة الشق المزدوج ليونتك تم تفسيرها بالاعتماد على مبادئ ميكانيك الكم.

واجب/ ناقش كيف فشلت الطرق الكلاسيكية في حساب التوزيع الطيفي لكثافة طاقة الأشعاع للجسم الاسود وكيف تغلب بلانك على هذه الصعوبة؟ استق قانون بلانك للأشعاع.

واجب/ وضع جهد إيقاف وتردد العتبة في الانبعاث الكهروضوئي. ارسم بيانياً لتوضيح النتائج بين جهد إيقاف وتردد الأشعاع الساقط واسرّح كيف يمكن تحديد عمية ثابت بلانك باستخدام هذا الرسم البياني؟

واجب/ افترض تردد لا تحت من الكدرف هر ساكن بترابوية ه حيث ان النسبة بين الطاقة الحركية للإلكترون المرتد الى طاقة الفوتون الساقط هي

$$\alpha = \frac{h\nu}{m_0 c^2} \quad \text{حيث } m_0 \text{ كتلة } e^- \text{ السكونية}$$
$$\alpha = \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)}$$