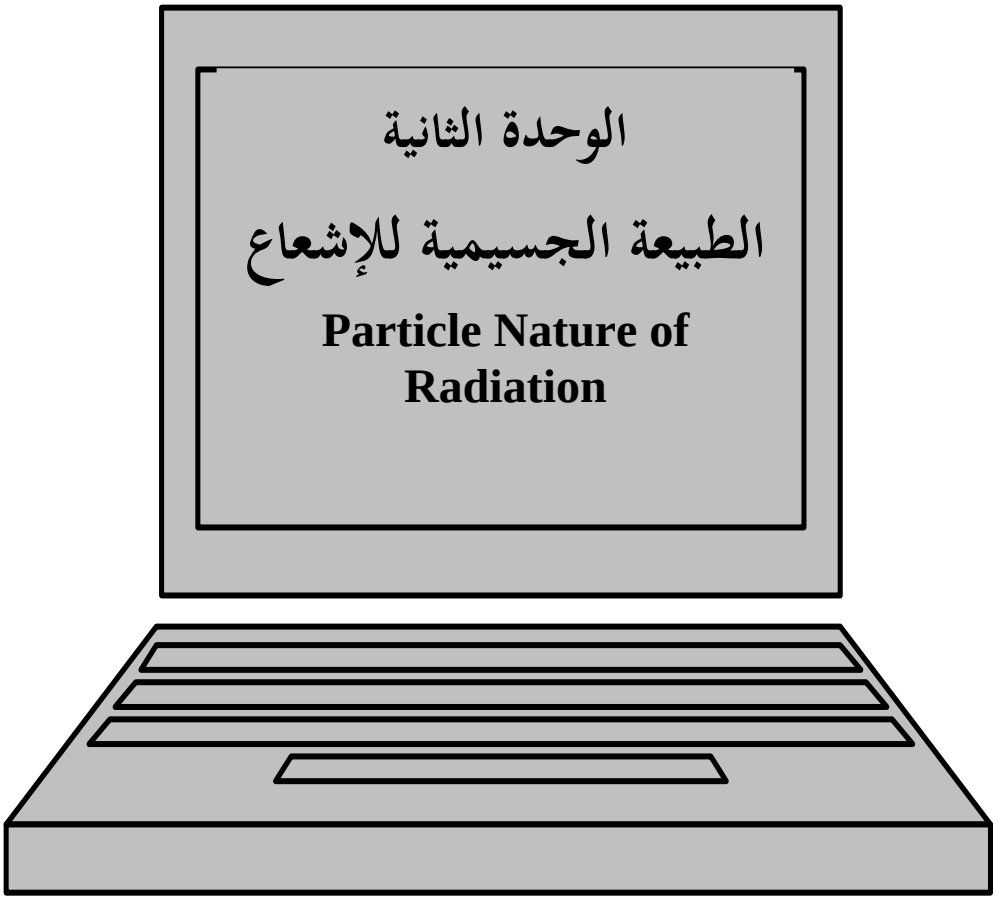

الوحدة الثانية
الطبيعة الجسيمية للإشعاع
Particle Nature of Radiation

محتويات الوحدة الثانية

الموضوع	الصفحة
مقدمة	49
تمهيد	49
أهداف الوحدة	50
2.الطبيعة الجسيمية للإشعاع	51
1.2. شعاع الجسم الأسود .	51
2.2. نظرية رايلي – جينز .	53
3.2. نظرية ماكس بلانك الكمية للإشعاع	56
4.2. تفاعل الاشعاع مع المادة	61
1.4.2.التأثير الكهروضوئي	61
2.4.2. نظرية اينشتاين الكمية حول التأثير الكهروضوئي	66
3.4.2. أثر (ظاهرة) كومبتون	69
4.4.2. إنتاج الزوج	75
الخلاصة	79
لمحة مسبقة عن الوحدة الدراسية التالية	79
إجابات التدريبات	80
مسرد المصطلحات	81

مقدمة

تمهيد

عزيزي الدارس,

مرحباً بك إلى الوحدة الثانية من مقرر الفيزياء الحديثة وهي بعنوان الطبيعة الجسيمية للإشعاع و تتألف من اربعة أقسام رئيسية. حيث نتعرف في القسم الأول على إشعاع الجسم الأسود، أما القسمان الثاني والثالث فيتضمنان دراسة نظرية رايلي – جينز وايضا نظرية ماكس بلانك الكمية للإشعاع .

و في القسم الأخير سنتناول تفاعل الاشعاع مع المادة وهذا ينقسم الي اربعة اجزاء اولا التأثير الكهروضوئي ثم نظرية اينشتاين الكمية حول التأثير الكهروضوئي ثم أثر (ظاهرة) كومبتون واخيراً إنتاج الزوج .

وقد ذيلنا هذه الوحدة بسرد شامل للمصطلحات العلمية التي وردت في النص الرئيسي، كما حرصنا في هذه الوحدة على وضع أسئلة تقويم ذاتي، وتدريبات كفيلة بتلبية احتياجاتك التعليمية والتي تقدمها لمرشدك الميداني.

عزيزي الدارس،،

أهلاً بك مرة أخري إلي هذه الوحدة ونرجو أن تستمتع بدراستها وأن تستفيد منها وأن تشاركنا في نقدها وتقييمها.

أهداف الوحدة

عزيزي الدارس،،

بعد فراغك من دراسة هذه الوحدة يتوقع منك أن تكون قادراً علي أن:

1. تفهم أهمية دراسة إشعاع الجسم الأسود .
2. تعرف نظرية رايلي – جينز .
3. تستطيع ان توضح نظرية ماكس بلانك الكمية للإشعاع .
4. تتقن تفاعل الاشعاع مع المادة .
5. تقارن بين التأثير الكهروضوئي و أثر (ظاهرة) كومبتون ثم إنتاج الزوج .
6. تحل مسائل الطبيعة الجسيمية للإشعاع .

2. الطبيعة الجسيمية للإشعاع

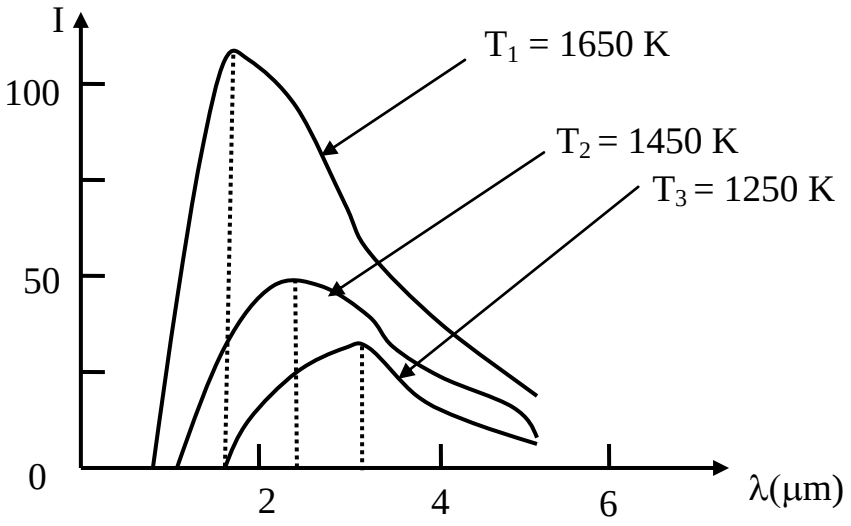
عزيزي الدارس ،،

لكي نفهم الطبيعة الجسيمية للإشعاع سنقوم باستعراض بعض الأفكار والتجارب الفيزيائية التي ساهمت في توضيح حقيقية هامة للغاية وهي إن الإشعاعات الكهرومغناطيسية (مُكَمَّاه quantized) أي في كميات صغيرة كل واحدة تسمى كمه بالإضافة إلى ذلك فإن هذه الكمات من الطاقة – تسمي الفوتونات– تمتلك خاصيتي الجسيمات والموجات . هذا التناقض الظاهري في الطبيعة المزدوجة للفوتونات يمكن ادراكه باسترجاع فكرة أن الفوتون عبارة عن باقة (رزمة) موجية Wave packet وهذه الخاصية تمكن الفوتون من التفاعل كموجة أو كجسيم مادي.

1.2.إشعاع الجسم الأسود Blackbody Radiation

عزيزي الدارس ،،

تصدر من جميع الأجسام الساخنة عند اى درجة حرارة إشعاعات تسمي الإشعاعات الكهرومغناطيسية الحرارية (Electromagnetic Radiation) . تعتمد كمية الإشعاعات ونوعيتها على درجة حرارة الجسم المشع. عند درجات الحرارة المنخفضة (أقل من 500K) تكون الموجات المنبعثة ذات أطوال موجية تقع في منطقة الأشعة تحت الحمراء Infrared (IR) (أكبر من 700nm). عند ارتفاع درجة الحرارة تنبعث من الجسم طاقة حرارية (Thermal Energy) أكبر، تبعاً لذلك تبدأ الأطوال الموجية في الانحراف نحو منطقة الموجات القصيرة فيلاحظ ظهور الأشعة فوق البنفسجية Ultraviolet (UV) كما مبين بالشكل (2.1)



الشكل (2.1) التوزيع الطيفي للإشعاعات الكهرومغناطيسية الصادرة من الجسم الأسود عند درجات حرارة مختلفة (T_1, T_2, T_3)

فيما يلي سوف ندرس العلاقة بين قدرة الجسم على امتصاص او اصدارالاشعاع وبين درجة حرارة الجسم. و يُعرف الجسم الأسود (Blackbody)

> بأنه الجسم الذي يمتص جميع الإشعاعات الساقطة عليه ولا يعكس منها اى شئ دون مراعاة لأطوالها الموجية.

عزيزي الدارس . توصل العَالِم فين (Wien) إلى علاقة تجريبية تربط ما بين طول الموجة المناظرة لأكبر شدة للإشعاع λ_{max} ودرجة حرارة الجسم على الصورة

$$\lambda_{max} = \frac{0.2898 \times 10^{-2}}{T} \qquad (1.2)$$

حيث λ_{max} ، مقاسة بالأمتار، تمثل طول الموجة التي تكون عندها شدة الإشعاع قيمة عظمي، T هي درجة الحرارة المطلقة (كلفن)، والعلاقــة (2.1) تسمي

بقانون فين للإزاحــة Wien's displacement law . القدرة الكلية الصادرة من وحدة المساحة E من الجسم الأسود تعطي بالعلاقة

$$\boxed{E(T) = \sigma T^4} \qquad (2.2)$$

حيث σ تمثل ثابت استيفان – بولتزمان $(\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \ W.m^{-2}.k^{-4})$، T هي درجة الحرارة المطلقة. تعُرف العلاقة (2.2) بقانون استيفان (Stefan Law). القدرة الكلية الصادرة من الجسم الأسود عند طول موجي محدد $E(\lambda.T)$ ترتبط بالقدرة الكلية المنبعثة في وحدة المساحة E(T) كالآتي

$$\boxed{E(T) = \int_0^\infty E(\lambda, T)\, d\lambda} \qquad (3.2)$$

ولقد أقترح فين علاقة تجريبية للقدرة الصادرة عند طول موجي محدد كالاتى

$$\boxed{E(\lambda,T) = a\lambda^{-5}\ e^{-b/\lambda T}} \qquad (4.2)$$

حيث b,a ثابتان .

وعند مقارنة علاقة فين (4.2) مع النتائج التجريبية للطيف الصادر من الجسم الأسود وجد أنها تتفق مع النتائج التجريبية لأطوال الموجات القصيرة فقط ولكنها لا تتوافق مع الأطوال الموجية الطويلة.

2.2 نظرية رايلي –جينز

The Rayleigh – Jeans Theory

عزيزي الدارس ،،

قام العالمان رايلي وجينز بدراسة طيف الجسم الأسود، واستخدما صيغة كلاسيكية لتفسير الطيف ولقد كان النموذج الذي اختاراه نموذجاً بسيطاً وفيه يُعامل الجسم المشع كأنه مجموعة كبيرة جداً من متذبذبات خطية (Linear Oscillators) تحت تأثير حركة توافقية بسيطة (Simple harmonic motion).

من المعلوم في الفيزياء الكلاسيكية ان الأجسام المشحونة المعجلة (المتسارعة) تبث إشعاعاً كهرومغنطيسياً، في حالة الجسم ألأسود الذي يمكن اعتباره تجويفاً (Cavity) ذي فتحة صغيرة جداً مقارنة مع مساحة سطحه الداخلية ، فان التجويف يعمل على امتصاص الشعاع الكهرومغناطيسي الذي يحتجز داخله من خلال الفتحة الصغيرة ولقد افترض رايلي أن أشعاع التجويف ناتج من الحركة الاهتزازية للإلكترونات الموجودة في جدار التجويف الداخلي.

في حالة الإتزان الحراري (thermal equilibrium) تساوي كثافة الطاقة داخل التجويف كثافة طاقة المهتزات الذرية في جدار التجويف.

وتبعاً للنظرية الكلاسيكية لتوزيع الطاقة فإن متوسط طاقة الحركة لجزئ غاز وُجد في حالة اتزان حراري عند درجة حرارة T تساوي $\frac{1}{2} k_B T$ لكل درجة حرية حيث K_B ثابت بولتزمان $K_B = 1.3\times10^{-23} J.K^{-1}$.

في حالة نموذج رايلي فإن متوسط طاقة الحركة للموجات الموقوفه (Stationary waves) تساوي $\frac{1}{2} k_B T$ لاحظ أنه بسبب الحركة الاهتزازية (أى أضافة درجة حرية اخرى) فإن متوسط الطاقة الكلية للموجة الكهرومغناطيسية تكون

$$\boxed{E = k_B T} \qquad (5.2)$$

قام رايلي بحساب عدد الموجات لوحدة الحجم بدلالة الطول الموجي (λ) [او بدلالة التردد (ν)] ووجد أنه يساوي

$$\boxed{n(\lambda) = \frac{8\pi}{\lambda^4}} \qquad (6.2)$$

$$\boxed{n(\nu) = \frac{8\pi\nu^2}{C^3}} \qquad (7.2)$$

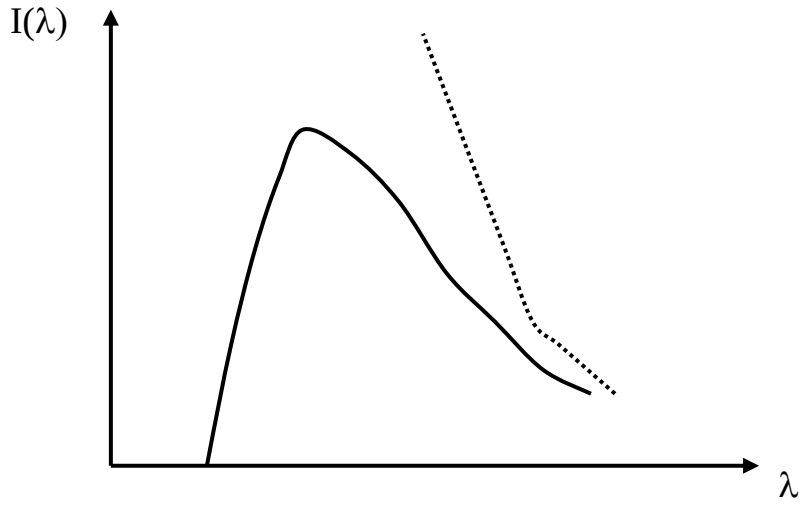
إذا استخدمنا في (7.2) المعادلة

$$n(\nu) = n(\lambda).\left|\frac{d\lambda}{d\nu}\right| = n(\lambda).\frac{c}{\nu^2}$$

فإن كثافة الطاقة تساوي

$$\boxed{I(\lambda,T) = k_B T.\, n(\lambda) = \frac{8\pi}{\lambda^4} k_B T} \quad (8.2)$$

والمعادلة (8.2) تعرف بمعادلة رايلي وجينز ، حيث $I(\lambda,T)$ تمثل كثافة الطاقة (وهي الطاقة في وحدة الحجم) عند الطول الموجي (λ) في حالة اتزان حراري عند درجة حرارة (T) والمقارنة بين قانون رايلي – جينز وتوزيع كثافة الطاقة لإشعاعات الجسم الأسود حسب النتائج التجريبية موضحة بالشكل (2.2)



الشكل (2.2) يوضح المقارنة بين كثافة الطاقة الصادرة من الجسم الأسود (الخط المتصل) وقانون رايلي – جينز (الخط المتقطع) بدلالة الطول الموجي (λ) .

بمقارنة العلاقة النظرية مع التجربة نلاحظ ان هنالك تطابقاً فقط في حالة الموجات الطويلة ، شكل (1.2)، ولكن في حالة الموجات القصيرة فنلاحظ الاختلاف الكبير بين النظرية والتجربة. ويُلاحظ أيضاً ان قانون رايلي وجينز لا يعطي قيمة عظمي لكثافة طاقة الجسم الأسود وعلى النقيض فإن كثافة الطاقة تزداد بصورة مستمرة لانهائية .

ويتضح لنا من نموذج رايلي –جينز عجز النظرية الكلاسيكية في تفسير إشعاعات الجسم الأسود (النموذج اعتمد على مبدأ تساوي تجزء الطاقة المستخدم في حالة التوزيع المستمر للطاقة).

ولقد ظلت هذه المعضلة الفيزيائية بدون حل حتي افترض العالم ماكس بلانك في العام 1900 ان طاقة المهتزات في الجسم الأسود تُبعث على هيئة كمات منفصلة. كما سنرى في الفقرة التالية.

أسئلة تقويم ذاتي

1. عرف الإشعاعات الكهرومغناطيسية الحرارية
2. ناقش ماذا نعني بإشعاع الجسم الأسود
3. بالرسم فقط وضح التوزيع الطيفي للإشعاعات الكهرومغناطيسية الصادرة من الجسم الاسود عند درجات حرارة مختلفة
4. عرف قانون فين للإزاحـة
5. ناقش نظرية رايلي – جينز ، ثم قارن بين قانون رايلي – جينز وتوزيع كثافة الطاقة لإشعاعات الجسم الأسود

3.2 نظرية ماكس بلانك الكمية للإشعاع

Planck's Quantum Theory of Radiation

عزيزي الدارس ،

ان الفيزياء الكلاسيكية عجزت عن إعطاء تفسير مقبول لطيف الجسم الأسود. لذا درس العالم ماكس بلانك نظرية رايلي – جينز محاولاً استنباط الخطأ فيها وقد تنبه إلى أن الخطأ لابد أن يكون في استخدامها لمتوسط الطاقة الكلية كما يعبر عنه في النظرية الكلاسيكية.

أيضاً فطن بلانك إلى صحة نظرية رايلي – جينز مع التجربة العملية عند نطاق الترددات المنخفضة. من هذا قام باستنتاج أن

> متوسط الطاقة الكلية للمتذبذب التوافقي لابد أن تساوي متوسط الطاقة الكلاسيكية الكلية في حالة الترددات المنخفضة

وهذا يعني أن

$$\overline{E}_{\nu\to 0} \to kT$$

الملاحظة الثانية التي إبداها بلانك في طيف الجسم الأسود أن

> كثافة الطاقة تزداد بزيادة التردد حتى تصل إلى قيمة عظمي عند تردد محدد ثم تبدأ في النقصان مرة أخرى.

لهذا استنتج أنه عندما يزداد التردد زيادة كبيرة فإن

$$\overline{E}_{\nu\to \infty} \to 0$$

في محاولته لتفسير طيف الجسم الأسود وتفسير السكوك الكهرومغناطيسي للمتذبذب فقد قام العالم بلانك بوضع الفرضيين التاليين آخذاً في الاعتبار الملاحظات التي ورد ذكرها

1. كمية الطاقة الصادرة أو الممتصة بواسطة المتذبذب تتناسب مع تردده (ν)، فإذا كان ثابت التناسب (h) فإن التغير في طاقة المتذبذب (ΔE) يعطي بالعلاقة

$$\boxed{\Delta E = h\nu} \qquad (9.2)$$

2. الفرض الثاني يوضح ان طاقة المتذبذب يجب ان تكون واحدة من مجموعة طاقات تعطي
بالعلاقة التالية

$$\boxed{E_n = nh\nu} \qquad (10.2)$$

حيث (n) عدد صحيح و (h) هو الثابت الموجود فى معادلة (2.9) ويسمى ثابت بلانك ويأخذ القيمة $h = 6.62\times10^{-34}$ J.s

يتضح الآن ان الصورة السابقة المتمثلة في الحالات المتصلة لتوزيع الطاقة للمتذبذب استبدلت بالحالات المنفصلة (المكمأة) للطاقة، وتبعاً لذلك فإن كمية الطاقة الصادرة أو الممتصة تكون (مكمأة) ؛ تمثل ΔE الفرق في الطاقة بين القيم المتتالية الممكنة.

بناءً علي ما تقدم يمكن حساب متوسط الطاقة الكلية للمهتز التوافقي باستخدام توزيع بولتزمان $N_n = N_o e^{-E_n/k_BT}$ الذى يعطى عدد الجزيئات (N_n) التى تكون طاقتها E_n

$$\overline{E} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} n h\nu\, e^{-nh\nu/k_BT}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-nh\nu/k_BT}}$$

$$\overline{E} = \frac{0 + h\nu\, e^{-h\nu/k_BT} + 2h\nu e^{-2h\nu/k_BT} + \ldots}{1 + e^{-h\nu/k_BT} n h\nu + e^{-2h\nu/k_BT} + \ldots} \qquad (11.2)$$

لنفرض ان $e^{-h\nu/k_BT} \equiv x$

عليه نحصل على

$$\overline{E} = h\nu x \left(\frac{1 + 2x + 3x^3 + \ldots}{1 + x + x^2 + \ldots}\right)$$

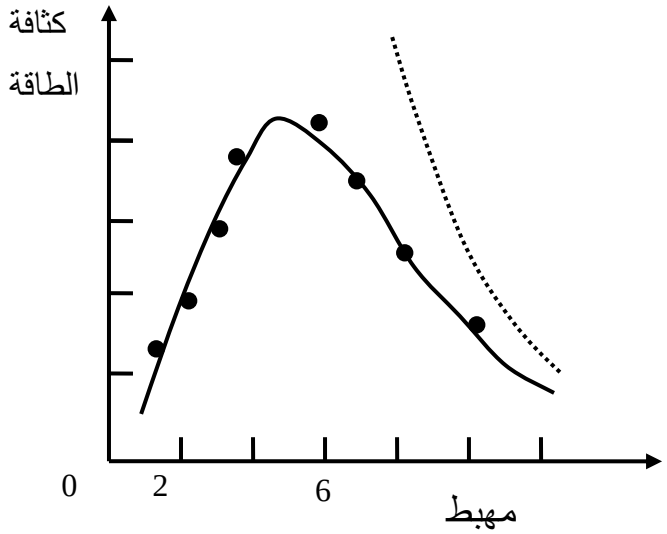
$$= h\nu x \frac{(1-x)^{-2}}{(1-x)^{-1}}$$

$$\overline{E} = \frac{h\nu}{e^{h\nu/k_BT} - 1} \qquad (2.12)$$

باستخدام معادلة رايلي لحساب عدد الموجات ، معادلة (2.6) ، فإن متوسط كثافة الطاقة للمهتز بدلالة الطول الموجي تكون

$$I(\lambda,T) = n(\lambda).\bar{E} = \frac{8\pi hc}{\lambda^5}\ \frac{1}{(e^{hc/k_B T\lambda}-1)} \qquad (2.13)$$

المعادلة الأخيرة تعرف بقانون توزيع بلانك وهي تعطي كثافة الطاقة للجسم الأسود بدلالة طول الموجة الصادرة منه كإشعاع كهرومغناطيسي .هذه النتيجة تتفق تماماً مع نتائج القياسات التي اعطتها التجارب، أنظر شكل (3.2) .



الشكل: (3.2) مقارنة لعلاقات رايلي – جينز (الخط المتقطع وبلانك (الخط المتصل) مع القيم التجريبية (نقاط) لكثافة الطاقة المنبعثة من الجسم الأسود مع الطول الموجي عند درجة حرارة معينة.

مما سبق نري بأن فرضيات الخاصة بتكميم الطاقة قد حالفها النجاح في تفسير طيف الجسم الأسود وهي التي أدت إلى ميلاد الفيزياء الحديثة .

◄◄ مثال (1)

1. استنتج الصورة التي يكون عليها قانون توزيع بلانك بدلالة التردد.
2. في حالة الموجات الطويلة تحقق من ان قانون بلانك يؤول لقانون رايلي وجينز .
3. ماذا يعطي قانون بلانك في حالة الطاقة العالية؟

الحل

1. من $I(\nu) = I(\lambda)\left|\frac{d\lambda}{d\nu}\right|$

$$\left|\frac{d\lambda}{d\nu}\right| = \frac{c}{\nu^2}$$

$\Rightarrow$

بما ان $\lambda = c/\nu$ فإن

$$I(\nu,T) = \frac{c}{\nu^2} \cdot \frac{8\pi hc}{c^5/\nu^5} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/k_BT}-1}$$

$$= \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/k_BT}-1}$$

2.في حالة الموجات الطويلة

$$\lambda \to \infty \quad , \quad \nu \to 0$$

فإن التقريب من مفكوك e^x يعطي

$$e^x \simeq 1+x$$

$$\therefore \; e^{h\nu/k_BT} \simeq 1 + \frac{h\nu}{k_BT}$$

عليه فإن

$$I(\nu,T) \simeq \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \left(\frac{k_BT}{h\nu}\right)$$

$$I(\nu,T) = \frac{8\pi h\nu^2}{c^3} \; k_BT$$

أي أننا تحصلنا ، في حالة الموجات الطويلة ، على معادلة رايلي وجينز .

3. إما في حالة الطاقة العالية فإن:

$$\nu \to \infty \quad , \ \lambda \to 0$$

$$e^{h\nu/k_BT} - 1 \simeq e^{h\nu/k_BT}$$

$$\therefore \quad I(\nu, T) = \frac{8\pi h\ \nu^3}{c^3} \ . \ e^{-h\nu/k_BT}$$

أسئلة تقويم ذاتي

1. ناقش نظرية ماكس بلانك الكمية للإشعاع .
2. عرف قانون توزيع بلانك .

4.2 تفاعل الإشعاع مع المادة

Interaction of Radiation with matter

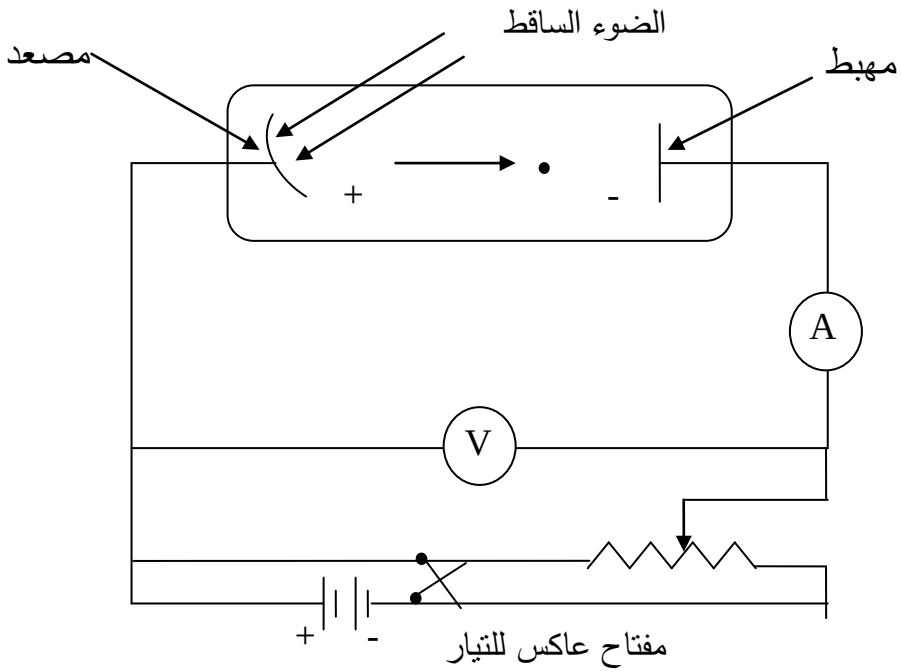
عزيزي الدارس ،

نجد ان نوع التفاعل بين الإشعاع (كمات الطاقة التى تسمى الفوتونات) والمادة يعتمد علي طاقة الفوتونات وطبيعة المادة. هنالك ثلاث طرق لهذا النوع من التفاعل والتي يسلك فيها الفوتون سلوكاً جسيمياً وهي التاثير الكهروضوئي ، ظاهرة كومبتون وإنتاج الزوج .

1.4.2 التأثير الكهروضوئي The Photoelectric Effect

عزيزي الدارس ،

نجد عندما يسلط ضوء (شعاع) علي سطح معدن ، عند بعض الظروف ، تنطلق (تنبعث) إلكترونات من سطح المعدن . تسمي هذه الإلكترونات بالإلكترونات الضوئية (Photoelectron) وسميت هذه الظاهرة بالتأثير الكهروضوئي. لدراسة التأثير الكهروضوئي يستخدم الجهاز الموضح بالشكل (4.2)



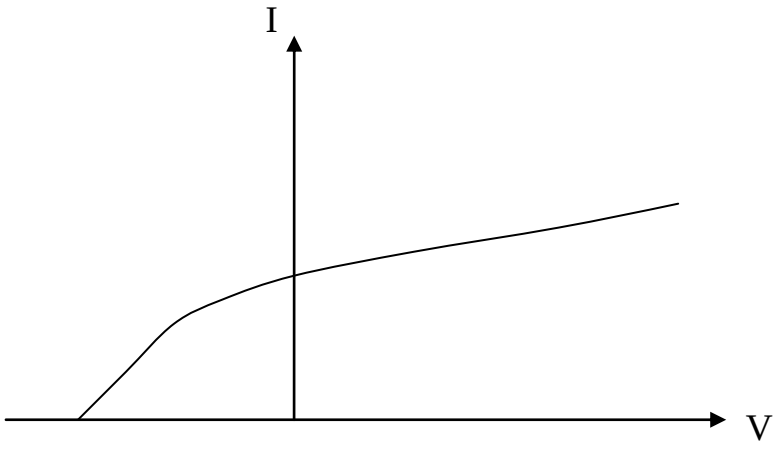
الشكل (4.2) : رسم تخطيطي لدراسة التأثير الكهروضوئي .

يتكون الجهاز من أنبوبة زجاجية مفرغة من الهواء. تحتوي الأنبوبة على مصعد ومبهط موصلان بأميتر (A) وفولتميتر (V) خارج الأنبوبة و مفتاح عاكس للتيار لكى نحصل على جهد الاعاقة.

عند سقوط الأشعة علي المصعد فإن الإلكترونات لأنها سالبة الشحنة تنطلق من سطحه متجه نحو المهبط الموجب وعندها يسري تيار يمكن قياسه بواسطة الأميتر . عندما اجريت التجربة لوحظ الآتى

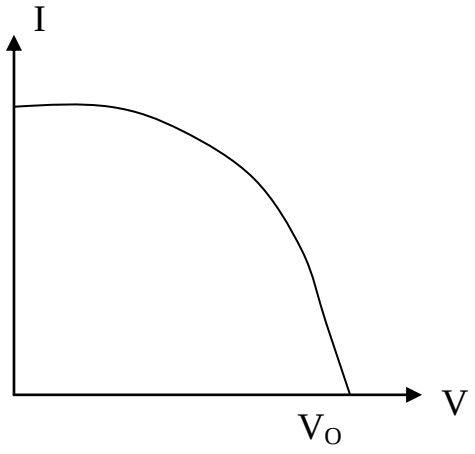
1. تزداد قراءة الأميتر عند زيادة الضوء الساقط وذلك لمرور عدد أكبر من الإلكترونات. الشكل (2.4) يوضح العلاقة بين التيار المار في الدائرة (I) وفرق الجهد (V) . ويلاحظ من العلاقة البيانية بين التيار والجهد إن التيار الكهربي يزداد بزيادة فرق الجهد حتى يصل إلى قيمة عليا تسمي حالة التشبع (Saturation) .

2. بما أن المهبط سالباً فهذا يعني أن لإلكترونات الضوئية التي تحمل طاقة حركية كافية هي فقط التي يمكنها الوصول إليه .



الشكل (2.4): يبين العلاقة بين التيار (I) والجهد الكهربي (V).

عند زيادة جهد الإرجاع (الإعاقة) (Retarding Potential) ، V ، فإن عدد الإلكترونات الضوئية التي يمكنها الوصول إلى المهبط سوف يقل تدريجياً حتى ينعدم ؛ أي انه عند قيمة معينة لجهد الإرجاع فإن الإلكترونات الضوئية سوف لن تتمكن من الوصول إلى المهبط ويمكن ملاحظة ذلك بمراقبة قراءة التيار في الدائرة والذي سوف يتناقص حتى يصل إلـى الصفر . يسمي هـذا الجهد بجهد الإيقاف (Stopping Potential) . الشكل (5.2) يبين العلاقة بين التيار وجهد الإرجاع.



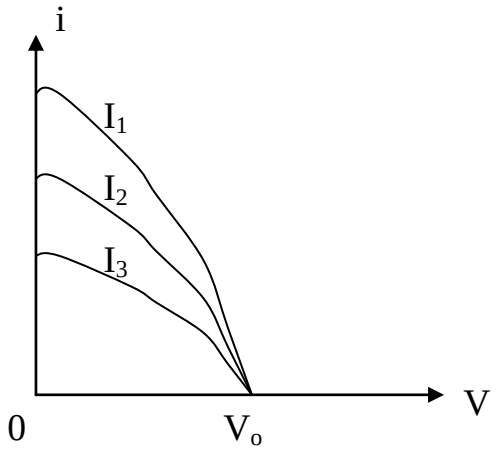
الشكل(2.5) : يتناقص التيار (I) مع زيادة جهد الإرجاع (V) حتى ينعدم تماماً عند قيمة الجهد (V_o) جهد الإيقاف.

يُعبر عن القيمة العظمي للطاقة الحركية ، K_{max} ، للإلكترونات الضوئية في هذه الحالة بالمعادلة

$$\boxed{K_{max} = e V_o} \qquad (14.2)$$

حيث V_o هو جهد الإيقاف ، e شحنة الإلكترون

3. عند ثبات تردد (frequency) الإشعاع فإن القيمة العظمي للطاقة الحركية للإلكترونات الضوئية تظل ثابتة ، ولا تتغير بتغير شدة (intensity) الإشعاع العلاقة بين شدة التيار (I) المار في الأنبوبة وجهد الإرجاع (V) موضحة في الشكل (4.2) لثلاث إشعاعات ذات ترددات متساوية ولكنها مختلفة في الشدة .



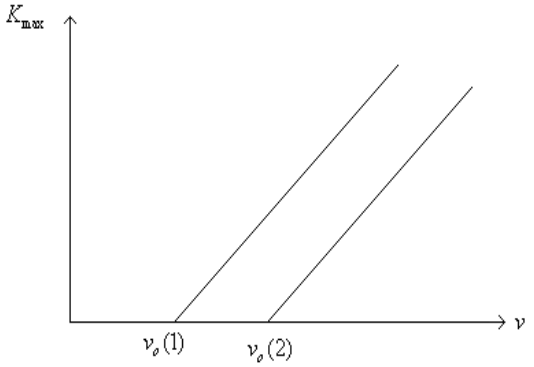
الشكل (6.2)العلاقة بين شدة التيار (I) وجهد الإرجاع (V) لثلاث قيم مختلفة لشدة الإشعاع $(I_1 > I_2 > I_3)$ **عند ثبات تردد الإشعاع** (ν).

لاحظ من الشكل (6.2) ان جهد الإيقاف يعطي نفس القيمة في الثلاث حالات وهذا يعني ان الطاقة الحركية العظمي للإلكترونات الضوئية متساوية في هذه الحالات.
من هذه النتيجة يمكن استنتاج ان

> الطاقة الحركية العظمي للإلكترونات الضوئية تعتمد على تردد الإشعاع وليس على شدة الإشعاع.

4. توجد قيمة محددة للتردد تسمي بالتردد الحرج ، ν_o ، **(Threshold frequency)** أو تردد العتبة خاص بكل معدن. عندما تكون قيمة تردد الإشعاع الساقط اصغر من تردد العتبة فلا يمكن للإلكترونات الضوئية ان تتحرر من سطح المعدن وتنطلق حتى وان كانت شدة الإشعاع كبيرة. أما إذا كان تردد الإشعاع الساقط أكبر من تردد العتبة فإن الإلكترونات الضوئية تتحرر من سطح المعدن مكتسبة طاقة حركية عظمي متناسبة مع تردد الإشعاع الساقط .

الشكل (7.2) يبين العلاقة الخطية بين الطاقة الحركية العظمي للإلكترونات الضوئية (K_{max}) وتردد الإشعاع (ν).



الشكل (2.7): العلاقة بين الطاقة القصوى (K_{max}) للالترونات الضوئية المنبعثة من سطح المعدن وتردد الاشعاع (ر) الساقط على سطح المعدن. مبين فى الشكل العلاقة لمعدنيين مختلفين (1) و(2).

الملاحظات والحقائق التى ذكرناها والخاصة بالتاثير الكهروضوئى لا يمكن تفسيرها من خلال مفاهيم الفيزياء الكلاسيكية والتى تنادى بان طاقة الموجة الكهرومغناطيسية تعتمد على شدة الاشعاع ولا تعتمد على تردد الاشعاع وعلية فاننا نجد ان الفيزياء الكلاسيكية قد عجزت عن تفسير اعتماد طاقة حركة الالكترونات على تردد الاشعاع.

2.4.2. نظرية اينشتاين الكمية حول التأثير الكهروضوئي

Einstein's Quantum Theory for Photoelectric Effect

عزيزي الدارس ،

لتفسير التأثير الكهروضوئي استخدم اينشتاين أفكار ماكس بلانك حول انبعاث الإشعاع الكهرومغناطيسي علي صورة كمات ، معادلة (9.2) ، وافترض اينشتاين ان الطاقة الإشعاعية تنتشر في الفضاء ويتم امتصاصها من قبل الأجسام على صورة كمات (quanta) صغيرة . سميت هذه الكمات بالفوتونات (Photons)، طاقة الفوتون (E) تتناسب مع تردده (ν).

$$\mathbf{E = h\ \nu} \qquad (15.2)$$

حيث h هو ثابت بلانك.

اقترح اينشتاين المعادلة التالية لتفسير التأثير الكهروضوئي.

$$h\ \nu = h\ \nu_o + K_{max} \qquad (16.2)$$

عندما يمتص إلكترون على سطح المعدن فوتون طاقتة hν فإن جزء من طاقة الفوتون تستنفذ لتحرير الالكترون من سطح المعدن والجزء الباقى يظهر كطاقة حركة للإلكترون . حيث $h\nu$ تمثل طاقة الفوتون الساقط على سطح المعدن، $h\nu_o$ أقل طاقة مطلوبة لتحرير الإلكترون من سطح المعدن،

تسمي ايضاً هذه الطاقة بدالة الشغل (Work function) ، ويرمز لها بالرمز (ϕ_o) . K_{max} هي الطاقة الحركية القصوي للإلكترون الضوئي.

دالة الشغل تختلف من معدن لآخر. الجدول التالى يوضح دالة الشغل لبعض المعادن على الترتيب

المعدن	دالة الشغل (eV)
للسيزيوم	1.9
الصوديوم	2.3
الكالسيوم	3.2
النحاس	4.5

لاحظ إن المعادلة (16.2) يمكن كتابتها علي الصورة التالية

$$K_{max} = h(\nu - \nu) \qquad (17.2)$$

أي أن العلاقة بين تردد الإشعاع الساقط (ν) والطاقة الحركية القصوى K_{max} للإلكترونات الضوئية هي علاقة خطية متفقة تماماً مع التجارب .

◄◄ مثال (2)

أحسب الطاقة الحركية القصوى لإلكترون ضوئي انبعث بتردد قدره $8\times10^{14}\,Hz$ من سطح معدن إذا كان تردد العتبة (التردد الحرج) للمعدن مساوياً $4\times10^{14}\,Hz$

الحل

$$h\,\nu = h\,\nu_o + K_{max}$$

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

$$= (6.6\times10^{-34}\,J.s)\,[8\times10^{14} - 4\times10^{14}]^{S^{-1}}$$

$$= \frac{6.6\times10^{-34}\times4\times10^{14}}{1.6\times10^{-19}} \qquad = \underline{\underline{1.65 \quad eV}}$$

حيث استخدمنا $1\ eV = 1.6\times10^{-19}\,J$

◄◄ مثال (3)

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

بما أن $c = \lambda\ \nu$

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

فإن طاقة فوتون الاشعة $E = h\ \nu = \frac{hc}{\lambda}$

$$= \frac{(6.6\times10^{-34}\,J.s)(3\times10^{8}\,m.s^{-1})}{350\times10^{-9}\,m}$$

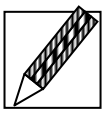
$$= 5.6\times10^{-19}\ \ J$$

$$= \frac{5.6\times10^{-19}}{1.6\times10^{-19}} \qquad = \underline{\underline{3.5 \quad eV}}$$

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

$$= 3.5 - 2.2 = 1.3eV$$

تدريب(1)



سقطت أشعة ذات طول موجي $660\ nm$ على سطح معدن دالة شغله تساوي $1.4\ eV$ أحسب الطاقة الحركية القصوى للإلكترونات الضوئية التي انبعثت من سطح المعدن .

أسئلة تقويم ذاتي

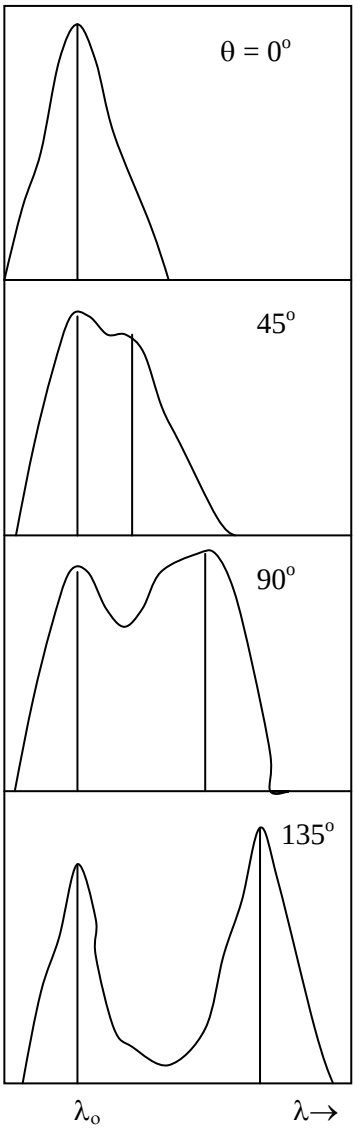
1. تحدث عن التأثير الكهروضوئي .
2. ما هو اقتراح اينشتاين عن التأثير الكهروضوئي .
3. أحسب الطاقة الحركية القصوى لإلكترون ضوئي انبعث بتردد قدره $5\times10^{14}Hz$ من سطح معدن إذا كان تردد العتبة (التردد الحرج) للمعدن مساوياً $2.5\times10^{14}Hz$.

3.4.2 أثر (ظاهرة) كومبتون The Compton Effect

عزيزي الدارس ،،

كان من المعلوم بين علماء الفيزياء الذين كانوا يدرسون الأشعة السينية (وحيدة الطاقة) أن الإشعاع المتطاير يحتوي دائماً على موجات ذات طول موجي أطول من طول الموجة الساقطة. قام العالم كومبتون بدراسة استطارة الأشعة السينية بعد سقوطها على الكربون وتحصل على الطيف الموضح في شكل (2.8) .

النتيجة غير المتوقعة من التجربة هي أن الإزاحة في الطول الموجي لا تعتمد على طول موجة المصدر ولا تعتمد كذلك على نوع المادة التي تسقط عليها الأشعة .

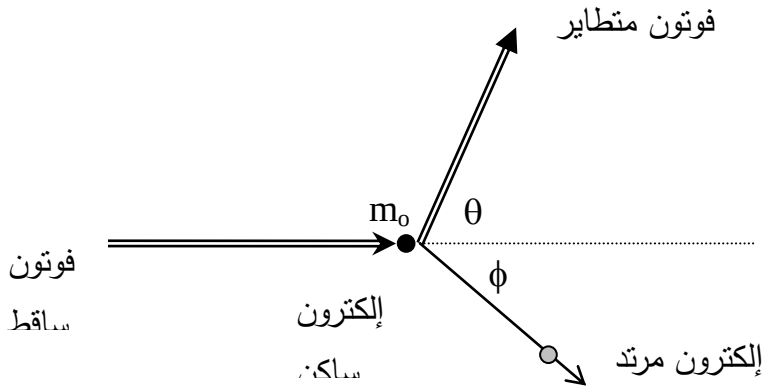


الشكل (2.8): تغيرات الخط المزاح مع زاوية الاستطارة (θ) . القمة المقابلة للطول الموجي λ_o ناتجة من الأشعة السينية الساقطة .

عزيزي الدارس ، ومن ذلك نجد ان كومبتون إستخلص تجريباً إن الإزاحة في طول الموجة يتناسب مع المقدار $\left(\sin^2\frac{\theta}{2}\right)$.

وتمكن من تفسير هذه النتائج بافتراض إن الفوتون جسيماً، بمعني أن الشعاع يتفاعل مع المادة علي صورة كمات منفصلة من الطاقة وبالتالي أعتبر الفوتونات كأنها جسيمات وقام بدراسة تصادم الفوتون والإلكترون مستخدماً في ذلك نتائج النظرية النسبية .

الشكل (2.9): يبين تصادم الفوتون الساقط مع الكترون في حالة سكون .



الشكل(2.9) : يوضح التصادم بين الفوتون والإلكترون

من قانون حفظ الاندفاع (momentum) نستخلص

$$P_o = P' \cos\theta + P \cos\phi \qquad (18.2)$$

$$0 = P' \sin\theta - P \sin\phi \qquad (19.2)$$

حيث : P_o: اندفاع الفوتون قبل التصادم .

P' : اندفاع الفوتون بعد التصادم .

P : اندفاع الإلكترون بعد التصادم.

لاحظ أنه بما أن الإلكترون كان في حالة سكون قبل التصادم فإن اندفاعه يساوي صفراً. للتخلص من ϕ نعيد كتابة المعادلتين على الصورة :

$$P \cos\varphi = P_o - P' \cos\theta$$

$$P \sin\varphi = P' \sin\theta$$

بتربيع المعادلتين وجمعهما

$$\boxed{P^2 = P_o^{\,2} + P'^2 - 2P_o^{\,2} P' \cos\phi} \qquad (20.2)$$

أما قانون حفظ الطاقة فإنه يعطي

$$\boxed{E_o - E' = T} \qquad (21.2)$$

حيث : E_o: طاقة الفوتون قبل التصادم .

E' : طاقة الفوتون بعد التصادم .

T : طاقة الإلكترون بعد التصادم.

باستخدام العلاقة بين طاقة الفوتون واندفاعه معادلة (36.1)في الوحدة الاولى نحصل على

$$\boxed{E = cP} \qquad (22.2)$$

وباستخدام المعادلة (22.2) يمكن كتابة المعادلة (21.2) كالآتي

$$\boxed{P_o - P' = \frac{T}{c}} \qquad (23.2)$$

بتربيع المعادلة الأخيرة نحصل على

$$\boxed{P_{/}^{\,2} + P'^{\,2} - 2P_o P' = \frac{T^2}{c^2}} \qquad (24.2)$$

بطرح معادلة (24.2))من معادلة (20.1)نحصل علي

$$\boxed{P^2 - \frac{T^2}{c^2} = 2PP' (1-\cos\theta)} \qquad (25.2)$$

وبافتراض أن سرعة الإلكترون بعد التصادم قد تكون كبيرة فلا بد من استخدام الميكانيكا النسبية. الطاقة الكلية E لجسيم كتلته السكونيه m_o واندفاعه P وطاقة حركته T هي

$$\boxed{E = \sqrt{c^2p^2 + m_o^2 c^4}} \qquad (26.2)$$

$$\boxed{E = m_o c^2 + T} \qquad (27.2)$$

بتربيع طرفى المعادلتين أعلاه وبالطرح نحصل على

$$\boxed{c^2p^2 = T^2 + 2m_o c^2 + T} \qquad (28.2)$$

أي أن

$$\boxed{P^2 - \frac{T^2}{c^2} = 2m_o T = 2m_o c(P_o - P')} \qquad (29.2)$$

حيث تم استخدام المعادلة(23.2).

الآن بمقارنة المعادلتين (25.2) و(29.2) نحصل علي

$$m_o c(P_o - P') = P_/ P(1-\cos\theta)$$

$$\frac{1}{P'} - \frac{1}{P_o} = \frac{1}{m_o c}(1-\cos\theta)$$

أي أن

$$\boxed{\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_o c}(1-\cos\theta)} \qquad (30.2)$$

المقدار $\left(\frac{h}{m_o c} = 0.0243 \ \mathring{A}\right)$ الذى له وحدات طول يسمي طول موجة كومبتون

لاحظ انه في حالة $\theta = 90^{o}$ فإن المعادلة (30.1) تعطي خط أشعة سينية جديد اطول من الخط الأساسي بمقدار $0.0243\ \mathring{A}$.

تعتبر ظاهرة كومبتون مثالاً جيداً لتعزيز فكرة الطبيعة الجسيمية للأشعة السينية ولقد تم برهانها عمليا، أيضاً اكدت صحة فرضيات اينشتاين التي استخدمها في دراسة وتفسير التأثير الكهروضوئي.

◄◄ مثال (4)

فوتون طول موجته $1\ \mathring{A}$ اصطدم بإلكترون ساكن ، إذا كانت زاوية استطارة الفوتون 90^{o} .

1. أحسب التغير في طول موجة الفوتون والتغير في طاقته بعد التصادم .
2. أحسب الطاقة الحركية للإلكترون .

الحل

لإيجاد التغير في طول موجة الفوتون نستخدم معادلة (30.1).

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

حيث θ هي زاوية استطارة الفوتون وبتويض قيم ثابت بلانك والكتلة وسرعة الضوء نتحصل علي

$$\lambda' - \lambda = 0.0243\ (1 - \cos 90^{o})$$
$$= \underline{\underline{0.0243\ A^{o}}}$$

طاقة الفوتون قبل التصادم

$$E = \frac{h\ c}{\lambda} = \frac{(6.6\times10^{-34}\,J.s)(3\times10^{8}\,m.s^{-1})}{1\times10^{-10}\,m}$$
$$= 1.98\times10^{-15}\,J$$

طول موجة الفوتون بعد التصادم

$\lambda' = 1.0243\ \mathring{A}$

طاقة الفوتون بعد التصادم

$$E' = \frac{h\,c}{\lambda'} = \frac{(6.6\times10^{-34}\,\text{J.s})(3\times10^{8}\,\text{m.s}^{-1})}{1.0243\times10^{-10}\,\text{m}}$$
$$= 1.93\times10^{-15}\,\text{J}$$

إذن فإن التغير في طاقة الفوتون يكون

$$E - E' = (1.98-1.93)\times10^{-15}\,\text{J}$$
$$= 0.05\times10^{-15}\,\text{J} \simeq \underline{\underline{313\ \ \text{eV}}}$$

4.4.2 إنتاج الزوج Pair Production

عزيزي الدارس ،،

ان قانون الكتلة والطاقة الذي تمت دراسته سابقاً (الوحدة الأولى) يُفضي إلى نتائج هامة منها أن الجسيمات المادية ، عند بعض الظروف ، تخضع لعملية الفناء أو الخلق .

بالرجوع لتجربة التأثير الكهروضوئي نجد أن الفوتون يفقد كل طاقته عند تصادمه مع الإلكترون. أما في ظاهرة كومبتون فإن الفوتون في عملية التصادم يفقد فقط جزءً من طاقته ، أما عملية إنتاج الزوج فتبين انه يمكن للفوتون التحول إلى مادة (إلكترون وبوزيترون) ، Positron ، البوزيترون عبارة عن إلكترون موجب الشحنة فهو يشبه الإلكترون في كل خواصه إلا إن شحنته موجبة. ايضاً قد يطلق عليه اسم الإلكترون المضاد . في عملية إنتاج الزوج تتحول الطاقة الكهرومغناطيسية إلى مادة .

الشكل (10.2) يبين عملية إنتاج الزوج . نلاحظ أيضاً أن قانون بقاء الشحنة قد تحقق حيث مجموع شحنتا الإلكترون (e^-) والبوزيترون (e^+) يساوي صفراً متفقاً مع الفوتون الذي لا يحمل أي شحنة كهربية .

إذا كانت طاقة الفوتون أكبر من أقل طاقة مطلوبة لإنتاج الزوج فإن الإلكترون والبوزيترون سوف يكتسبان طاقة حركية ، في هذه الحالة فإن معادلة حفظ الطاقة تأخذ الصورة

$$\begin{aligned} h\nu + M_o c^2 &= E_- + E_+ + M_o c^2 \\ &= (m_o c^2 + T_-) + (m_o c^2 + T_+) + (M_o c^2 + T_M) \end{aligned} \qquad (31.2)$$

حيث: M_o هي الكتلة السكونية للنواة والتي تحدث عملية إنتاج الزوج بالقرب منها.

T_- ، T_+و T_M الطاقة الحركية لكل من الإلكترون ، البوزيترون والنواة على التوالي .

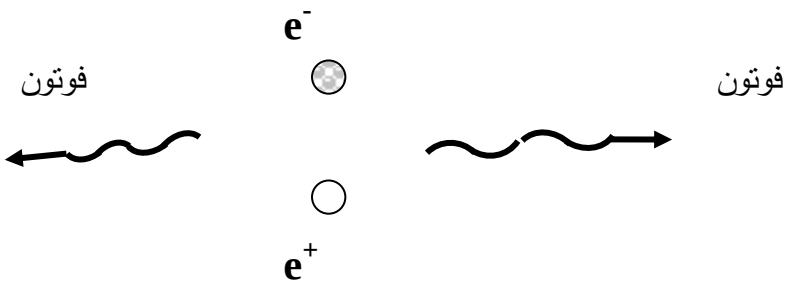
بما أن $T_- \simeq T_+$

وأيضاً يمكن اعتبار أن ، $T_M \simeq 0_+$ لأن كتلة النواة أكبر بكثير من كتلة الإلكترون $(M_o >> m_o)$.

عليه يمكن اختزال المعادلة (31.2) إلى الصورة

$$h\nu = 2\, m_o c^2 + 2T \qquad (32.1)$$

العملية العكسية لإنتاج الزوج والتي تسمي بفناء الزوج Pair annihilation يمكن حدوثها عندما يلتقي إلكترون وبوزيترون حيث أنهما يتلاشيان وينتج في هذه العملية زوج من الفوتونات ، شكل (10.2) يوضح هذا التفاعل .



الشكل (10.2) عملية تلاشي (فناء) المادة وتحولها لطاقة.

مبدأ حفظ الطاقة يعطي

$$\boxed{2\ m_o c^2 = h\nu_1 + h\nu_2} \qquad (33.2)$$

حيث $\nu_{1,2}$ تردد الفوتون الناتجين . أما قانون حفظ الاندفاع فيعطي

$$\boxed{0 = P_1 + P_2} \qquad (34.2)$$

باعتبار أن الإلكترون والبوزيترون كانا في وضع سكون (تقريبي) قبل الالتقاء .

باستخدام العلاقة التي تربط ما بين طاقة الفوتون واندفاعه (معادلة (25.2) يمكن كتابة

$$\boxed{\frac{h\nu_1}{c} = \frac{h\nu_2}{c}} \qquad (35.2)$$

ومنها $\nu_1 = \nu_2$ وهذا يعني أن كل فوتون يحمل نفس المقدار من الطاقة . وهذه الطاقة تكون مساوية لطاقة السكون للإلكترون أي أن

$$h\nu = m_o c^2 = 0.511 \ \ MeV$$

◄◄ مثال (5)

طاقة فوتون أشعة جاما تساوي 4.022 MeV ، إذا تلاشي هذا الفوتون في مجال نواة احدي الذرات

1. هل يتم إنتاج زوج من الإلكترونات ؟ علل .
2. أحسب الطاقة الحركية للجسيمات الناتجة .
3. أحسب الطاقة الكلية للجسيمات الناتجة .

الحل

1. لا يمكن إنتاج نوع واحد من الشحنات حيث أن هذا يتعارض مع قانون حفظ الشحنة .
2. نستخدم المعادلة (2.24)

$$E = 2\ m_o c^2 + 2T$$

$$T = \frac{E - 2\ m_o c^2}{2}$$

$$T = \frac{(4.022MeV) - (1.022MeV)}{2}$$

$$T = \underline{\underline{1.5MeV}}$$

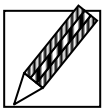
3. الايجاد الطاقة الكلية نستخدم المعادلة (31.1) في الوحدة الاولى

$$E = m_o c^2 + T$$

$$E = (0.511MeV) + (1.5MeV)$$

$$E = \underline{\underline{2.011 \quad MeV}}$$

تدريب(2)



فوتون طول موجته $1.4\overset{o}{A}$ اصطدم بإلكترون ساكن ، إذا كانت زاوية استطارة الفوتون 45^o :

1. أحسب التغير في طول موجة الفوتون والتغير في طاقته بعد التصادم .
2. أحسب الطاقة الحركية للإلكترون .

أسئلة تقويم ذاتي

1. وضح كيف تم تعزيز فكرة الطبيعة الجسيمية للأشعة السينية باستخدام ظاهرة كومبتون ؟
2. كيف تم تاكد صحة فرضيات اينشتاين ؟
3. عرف البوزيترون .
4. ناقش قانون بقاء الشحنة علي ضوء عملية إنتاج الزوج .

الخلاصة

عزيزي الدارس,

في النهاية، نؤكد على ما أكدناه في البداية عن ضرورة تقويم هذه الوحدة، وإبداء ملاحظاتك للاستفادة منها. ولكن ما الذي ناقشناه ؟

لقد عرفنا ماهو إشعاع الجسم الأسود وماهي ظرية رايلي – جينز وايضا نظرية ماكس بلانك الكمية للإشعاع

ثم تعرفنا علي طرق تفاعل الاشعاع مع المادة من التأثير الكهروضوئي و نظرية اينشتاين الكمية حول هذه الظاهرة.. كما تعرفنا على ظاهرة كومبتون و إنتاج الزوج

ومع نهاية هذا القسم نكون قد انهينا هذه الوحدة الثانية ، ونأمل أن تكون قد أضافت الكثير إلى معلوماتك الثرة وان تسعد بالقسم الثاني من نفس الوحدة إنشاء الله.

لمحة مسبقة عن الوحدة الدراسية التالية

عزيزي الدارس، بعد أن فرغت من دراسة هذه الوحدة الآن، أصبح لديك حصيلة كبيرة من المعلومات المفيدة

الآن معاً الي الوحدة الثالثة وهي بعنوان الطبيعة الموجية للجسيمات وسوف نقوم بدارسة كل من موجة دى برولى و مبدأ عدم التيقن لهاينبرج ثم ننتقل الي الدالة الموجية واخير نقوم بدارسة معادلة شرودينجر و مسألة الجسيم داخل الصندوق نرجو أن تكون ايضا وحدة مفيدة لك وان تساهم معنا في نقدها وتقييمها.

إجابات التدريبات

تدريب(1)

فإن طاقة فوتون الاشعة

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$
$$= \frac{(6.6\times10^{-34}J.s)(3\times10^{8}m.s^{-1})}{660\times10^{-9}m}$$
$$= 3\times10^{-19}\ J$$
$$= \frac{3\times10^{-19}}{1.6\times10^{-19}} \qquad \approx 1.9eV$$
$$K_{\max} = E - h\nu_o$$
$$= 1.9 - 1.4 = 0.5eV$$

التدريب(2)

التغير في طول موجة الفوتون

$$\lambda' - \lambda = 0.0243\ (1-\cos 45^o)$$
$$= 0.0032A$$

طاقة الفوتون قبل التصادم

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.6\times10^{-34}J.s)(3\times10^{8}m.s^{-1})}{1.5\times10^{-10}m}$$
$$= 1.32\times10^{-15}J$$

طول موجة الفوتون بعد التصادم $\lambda' - \lambda = 0.0032 \therefore \lambda' = 1.5 + 0.0032 = 1.5032^0 A$

طاقة الفوتون بعد التصادم $E' = \frac{hc}{\lambda'} = \frac{(6.6\times10^{-34}J.s)(3\times10^{8}m.s^{-1})}{1.5032\times10^{-10}m} = ...J$

إذن فإن التغير في طاقة الفوتون بعد تعويض قيم $E\ \&\ E'$ يكون

$$E - E' = ...J$$

مسرد المصطلحات

Electromagnetic Radiation	الإشعاعات الكهرومغناطيسية الحرارية
Infrared (IR)	الأشعة تحت الحمراء
Thermal Energy	طاقة حرارية
Ultraviolet (UV)	الأشعة فوق البنفسجية
Wien’s displacement law	قانون فين للإزاحــة
The Rayleigh – Jeans Theory	نظرية رايلي –جينز
Linear Oscillators	متذبذبات خطية
Simple harmonic motion	حركة توافقية بسيطة
Cavity	تجويف
thermal equilibrium	التوازن الحراري
Stationary waves	الموجات الموقوفه
Planck’s Quantum Theory of Radiation	نظرية ماكس بلانك الكمية للإشعاع
Interaction of Radiation with matter	تفاعل الإشعاع مع المادة
The Photoelectric Effect	التأثير الكهروضوئي
Photoelectron	الإلكترونات الضوئية
Retarding Potential	جهد الإرجاع (الإعاقة)
Stopping Potential	جهد الإيقاف
intensity	الشدة
Threshold frequency	التردد الحرج
quanta	كمه (جمعها كمات)
Photons	الفوتونات
Work function	دالة الشغل