

الفصل السادس/2 الخاصة المزدوجة للجسيمات والموجات The Duel Nature for Particles and Waves

الخاصة المزدوجة للجسيمات والموجات The Duel Nature for Particles and Waves

المقدمة:- لقد أثبتت التجارب المخبرية الحديثة وكذلك الحقائق الفيزيائية العملية أن الضوء يمتلك خاصيتين مختلفتين تماماً، حيث تمتلك الصفات الموجية والتي تتطابق مع فرضية ماكسويل والتي تبين أن الضوء يتكون من مجال مغناطيسي وآخر كهربائي مع توزيع منتظم للطاقة، وصفة الجسيمات أو حزمة جسيمات ذات طاقة مختلفة وتسمى الفوتونات. وقد تبين بعدئذ أن الصفة الموجية أو الصفة الجسيمية تظهر حسب ظروف معينة، حيث لا يمكن أن تظهر هاتين الصفتين في آن واحد. ومن الممكن أن تنطبق الصفة الموجية في مرحلة معينة والصفة الأخرى وهي الجسيمة في مرحلة مكملة، ومثال على ذلك انبعاث حزمة من الإلكترونات من سطح المعدن نتيجة تصادم حزمة من الضوء الساقطة على ذلك المعدن، أو انبعاث الأشعة السينية وهي أشعة كهرومغناطيسية عند ارتطام سيل من الإلكترونات السريعة مع مادة صلبة. أن الفكر القائلة بأن الضوء ينشر على شكل دفعات متقطعة من الطاقة والتي سميت بالفوتونات تختلف عن النظرية الموجية للضوء والتي تتمثل بالحيود والانتشار (الاستطارة).

ففي عام (1905) تم وضع النظرية الجسيمية للموجات وكان رائد النظرية هو العالم (ألبرت أينشتاين)، بينما تم وضع الافتراض القائل بأن للجسيمات صفات موجية عام (1924) من قبل العالم (لويس ديبرولي) بطريقة تختلف تماماً عن ما احتوته الأفكار والفرضيات التي تقدم بها العالم (ماكس بلانك) (M. Planck) عام (1903) و العالم أنشتاين (1905)، بينما كون العالم (شرودنكر) النظرية الكمية للجسيمات استناداً إلى الازدواجية الموجية – الجسيمية للضوء. واستناداً إلى الحقائق المهمة التي توضح امتلاك الضوء خاصية الموجات في حين وخاصية الجسيمات في حين آخر أصبح من الواضح أن أي من هاتين الخاصيتين لوحدها لا تعطي تفسيراً كاملاً عن الخواص العامة والشاملة للضوء لذلك أصبح من الضروري بعدئذ التفكير بفرضية الازدواجية – الجسيمية والتي تسمى في بعض الأحيان (Wavicle).

الصفات الجسيمية للموجات

أولاً :- النظرية الكمية للضوء (The Quantum Theory of Light)

لقد افترض العالم أينشتاين أن شعاع الضوء يتكون من حزم أو دفعات من الطاقة التي سميت بعدئذ تسميات مختلفة منها الكمات (Quanta) أو الفوتونات (Photons) وأن أهم ميزة لهذه النظرية هو أن الفوتونات تمتلك طاقة تتناسب مع مقدار التردد (γ) وتساوي حاصل ضرب التردد بمقدار ثابت أي أن

$$E = h \times \gamma \dots\dots(1)$$

حيث أن (h) مقدار ثابتاً سمي بثابت بلانك وقيمه تساوي ($6.626 \times 10^{-34} J \cdot sec$).

فعندما يرتطم مثلاً فوتون ذو تردد (γ) بالإلكترون يقع في الطبقات العليا من مستويات الطاقة لمعدن ما، فإن هذه الطاقة سوف تنتقل مباشرة إلى ذلك الإلكترون ولكن بشرط واحد وهو أن الإلكترون سوف يكتسب الطاقة ($h\gamma$) بكاملها ولا يمكن أن يكتسب جزءاً منها. أن هذه الطاقة سوف تساعد الإلكترونات للانطلاق من السطح المعدن شريطة أن تكون هذه الطاقة أيضاً كافية لفصل الإلكترون من السطح وتسمى هذه الطاقة بدالة الشغل (Work Function) والتي يرمز لها (W) ومن البديهي أن تكون هناك طاقة دنيا معينة يحتاجها الإلكترون لكي تنطلق من سطح المعدن وإلا فإن جميع الإلكترونات سوف تنطلق من السطح حتى مع عدم وجود أي جزء ساقط. أن هذه الطاقة والتي تمثل ب ($h\gamma$) تدعى كما ذكرنا بدالة الشغل (W). وعليه يمكن أن تعرف دالة الشغل (W): أقل طاقة لازمة لفك ارتباط الإلكترون بالسطح وجعله على وشك الانطلاق وتعتمد دالة الشغل على نوع الفلز.

أن هذه الطاقة الدنيا (W) تميز السطوح بعضها عن الآخر كما أن هذه الطاقة تختلف من إلكترون إلى آخر حسب موقعه وبعده عن السطح حيث يحتاج إلكترون إلى طاقة أكبر من (W) عندما يكون في مستوى طاقي أعمق. أن طاقة الضوء الساقط على السطح المعدن ستتحول إلى طاقة للإلكترونات الضوئية المنبعثة.
* لذلك يمكن كتابة المعادلة (1) كمايلي:-

طاقة الضوء الساقط = الطاقة الدنيا اللازمة لفصل الإلكترونات من السطح + الطاقة العظمى للإلكترونات المنبعثة.

$$h\gamma = T_{\max} + W \dots (2)$$

$$h\gamma = T_{\max} + h\gamma_o \dots (3)$$

حيث أن h = ثابت بلانك.

γ_o = تردد العينة ويعرف (بأنه أقل تردد للضوء الساقط يجعل الإلكترون على السطح يفك ارتباطه بالسطح وجعله على وشك الانطلاق والذي دونه يتوقف الانبعاث الكهروضوئي وأحياناً يطلق عليه تردد القطع).

* وكما هو مذكور أعلاه فإن لكل معدن دالة شغل ($h\gamma_o$) معينة وتعطى بالإلكترون فولت ($1\text{ev} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$). لذلك فإن طاقة الشعاع الساقط ($h\gamma$) الذي يحسب بالجول (J) يجب أن تحول إلى نفس وحدات دالة الشغل أي إلى إلكترون فولت (ev).
ومن المعادلة (3) يمكننا أن نكتب العلاقة كما يلي:-

$$T_{\max} = (h\gamma - h\gamma_o) \dots (4)$$

$$T_{\max} = h(\gamma - \gamma_o) \dots (5)$$

$$\text{حيث أن: } T_{\max} = \frac{1}{2} m v_{\max}^2$$

v_{\max} : سرعة الإلكترون القصوى المنطلق من سطح المعدن ويقاس (m/sec).

m : كتلة الإلكترون.

$\therefore C = \lambda\gamma$ سرعة الضوء.

$$\gamma = \frac{C}{\lambda} \dots (6)$$

نعوض المعادلة (6) في المعادلة (5) لتصبح بالشكل التالي:-

$$T_{\max} = h.C \left[\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_o} \right] \dots (7)$$

حيث أن C : سرعة الضوء وتقدر بـ ($3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$).

λ_o : الطول الموجي للعتبة وتقاس بـ (m).

λ : الطول الموجي أو الشعاع الساقط وتقاس بـ (m).

ملاحظة مهمة جداً

إضافة إلى ذلك وحسب النظرية النسبية لأينشتاين فإن أي جسيم يمتلك طاقة ما فإنه سيمتلك زحماً معيناً ويرمز له (P) والعلاقة بين هذه الطاقة والزخم تكتب كمايلي:-

$$E = P.C \dots (8)$$

لذلك فإن العلاقة التي تربط الطول الموجي للفوتون (λ) وزخمه (P) هي ببساطة كمايلي:-

$$P = h / \lambda \dots (9)$$

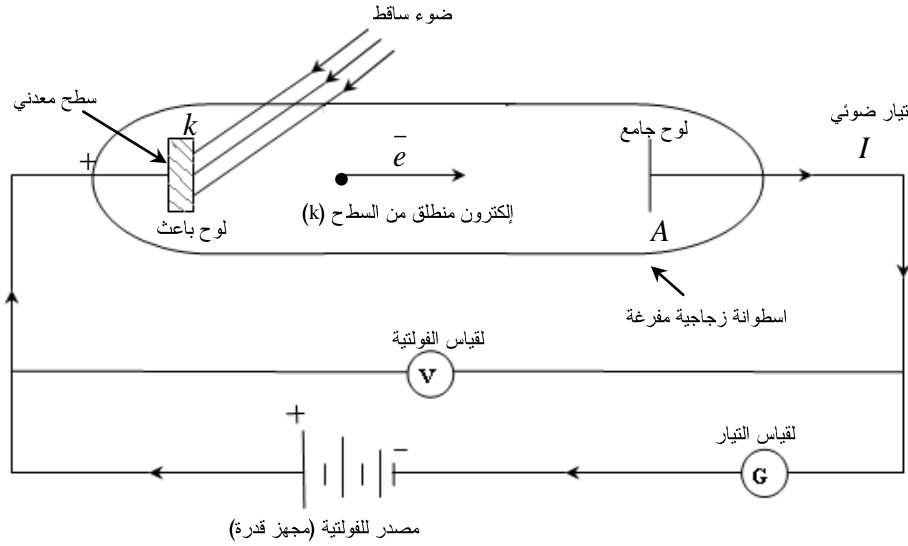
ومن نتائج النظرية الكمية للضوء يمكن أن نلاحظ أيضاً بأن الطاقة العظمى للإلكترون المنبعث تعتمد على تردد الضوء الساقط وليس على شدته ومثال على ذلك فإن الضوء الأزرق الخافت يولد إلكترونات بطاقة أعلى مما يولده ضوء أحمر ساطع ولذلك يمكن أن نتوصل إلى

التفسير الذي يوضح لماذا أن حتى الضوء الضعيف جداً بإمكانه أن يحرر الإلكترونات من معدن ما إذا كان تردد مناسباً لتحرير مثل هذه الإلكترونات علماً بأن اعتماد النظرية الموجية الكلاسيكية للضوء لا يمكن أن يقود إلى هذه النتيجة.

التأثير الكهروضوئي (The Photo – Electric Effect)

- تتلخص التجربة بإسقاط ضوء بتردد معين على سطح معدني وملاحظة انبعاث الإلكترونات تسمى الإلكترونات الضوئية.
- أن توزيع طاقة الإلكترونات المنبعثة لا يعتمد على شدة الضوء (إذا كان ساطعاً أو خفيفاً).
- أنه ليس هناك فاصل زمني بين سقوط الضوء على سطح المعدن وانبعاث الإلكترونات الضوئية.

تركيب الخلية المستخدمة لإثبات الظاهرة الكهروضوئية:- (الشكل 1) يوضح الأنبوب الضوئي (Photo – Tube) الذي يعتمد على هذه الخاصة السابقة الذكر، أن أهم جزء من الأنبوب الضوئي هو السطح (k) الحساس إلى الأشعة الضوئية والذي يسمى الكاثود. يربط هذا السطح بنصيدة كهربائية أو أي مصدر للجهد لغرض تكوين مجالاً كهربائياً متجهاً من (A) والذي يدعى الانود أو المجمع (collector) أو القطب الموجب إلى الكاثود (k) القطب السالب. ولدفع الإلكترونات من السطح (k) باتجاه الانود (A) بمسار مستقيم خالي من التصادم مع جسيمات أخرى خارجية يتم وضع الكاثود والانود في اسطوانة مفرغة من الهواء. ويتم استخدام مقياس كلفاني (Galvanometer) لقياس الكهربائي الناتج من هذه العملية.



الشكل (1) تخطيط توضيحي للخلية الضوئية المستخدمة لإثبات الظاهرة الكهروضوئية.

من الأمور المهمة في عملية التأثير الكهروضوئي أنه لا يمكن أن تتحرر أية إلكترونات ضوئية ما لم يكن تردد الضوء الساقط أعلى من قيمة معينة لكل معدن ويسمى ذلك الطول الموجي بتردد العتبة (Threshold Frequency) وكما أسلفنا سابقاً، وتختلف قيمة هذه العتبة باختلاف نوعية وطبيعة المعدن أو السطح. أن تردد العتبة لمعظم المعادن تقع في المنطقة فوق البنفسجية من الطيف الشمسي (200 – 300 نانومتر nm). ولكن تختلف هذه القيمة بالنسبة لمادة أكسيد البوتاسيوم وأكسيد السيزيوم حيث تقع في منطقة الضوء المرئي (400 – 700 نانومتر nm). من الممكن قياس الطاقة الحركية للإلكترونات الضوئية لمنطقة من السطح المعدني بتسليط فرق جهد بين الانود والكاثود بمقدار مناسب مع إجراء عملية عكس للأقطاب أي ربط الكاثود بالقطب الموجب وربط الانود بالقطب السالب وجعل الانود والمجمع للإلكترونات يعمل على دفع الإلكترونات باتجاه معاكس. وإذا وصل مقدار الطاقة الكامنة الكهربائية إلى قيمة مساوية أو أكثر بقليل من قيمة الطاقة الحركية للإلكترونات فأننا سنلاحظ توقف التيار الكهربائي المسجل في الكالفونومتر. وهذه القيمة للطاقة تسمى بالتوقف (Stopping Potential). وأن هذه القيمة تعطينا قيمة الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات ويلاحظ ذلك من العلاقة الآتية:-

$$T_{\max} = \frac{1}{2} m v_{\max}^2 = e V_{\text{stop}} = e V_o \dots (10)$$

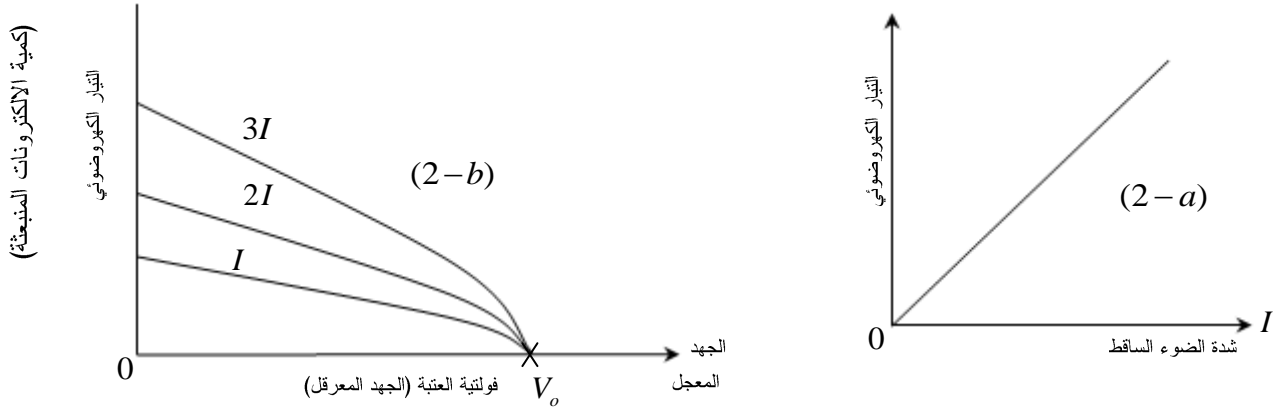
$$T_{\max} = e V_o \dots (11) \therefore \text{للالكترونات المنبعثة من ظاهرة الكهروضوئية}$$

حيث e : شحنة الإلكترون ($1.6 \times 10^{-19} \text{ev}$).

V_o : جهد القطع أو فولتية القطع (الإيقاف) وهو أقل جهد سالب للوح الجامع الذي يمنع وصول أي إلكترون إليه ويجعل التيار الضوئي صفراً. وبذلك فإن جهد القطع يتناسب طردياً مع الطاقة الحركية العظمى لإسراع إلكترون.

ومن الملاحظات المهمة:- (تجارب عملية)

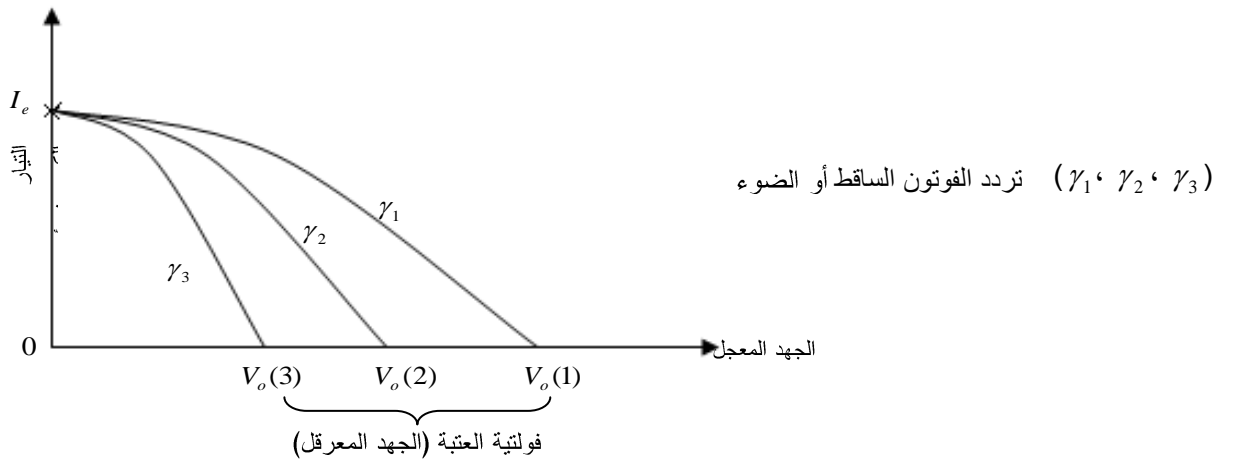
1- التجربة الكهروضوئية الأولى/ عندما تكون قيمة كل من فرق الجهد المعجل وتردد الضوء (γ) ثابتين فإن التيار الكهربائي يتناسب مع الشدة وكما هو مبين في الشكل (2-a) و (2-b).



الشكل (2) يمثل التيار الكهروضوئي كدالة لشدة الضوء عندما تكون قيمة كل من فرق الجهد المعجل وتردد الضوء ثابتة.

يستنتج من ذلك أنه إذا تسبب القليل من الضوء في تمرير عدد قليل من الإلكترونات فإن ضوءاً أكثر يحرق عدداً كبيراً منها. وحسب المعادلة (11) يتبين لنا أن الإلكترونات تنبعث بنفس الطاقة الحركية (T_{\max}) للضوء الناصع (ذو الشدة العالية) والخافت (ذو الشدة الواطئة) لا نهما يحملان نفس التردد (γ).

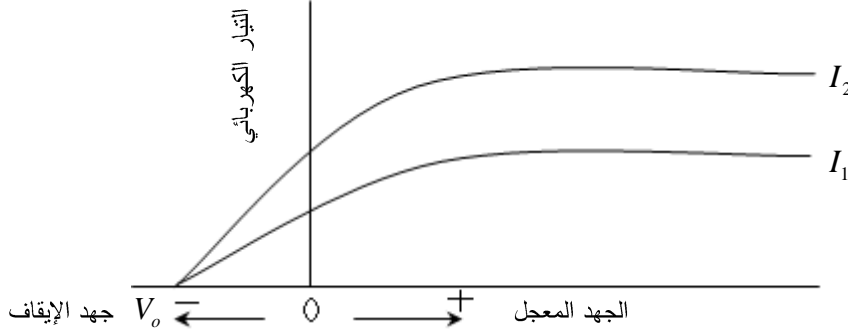
2- التجربة الكهروضوئية الثانية/ عندما تكون شدة الضوء الساقط (I) ثابتة مع تغير تردد الضوء (γ) فإن قيمة الفولتية المعرقلة (فولتية العتبة) تزداد بزيادة قيمة تردد الضوء الساقطة وكما هو موضح بالشكل (3).



الشكل (3) يمثل تغير المعرقل مع تغير تردد الفوتون أو الضوء الساقط عندما يكون شدة الضوء مقدار ثابت.

يستنتج من الشكل (3) أن طاقة الإلكترونات (T_{max}) تعتمد على تردد الضوء وبما أن ($T_{max} = V_o \times e$) لذلك فإنه كلما ازدادت (T_{max}) ازداد جهد الإيقاف.

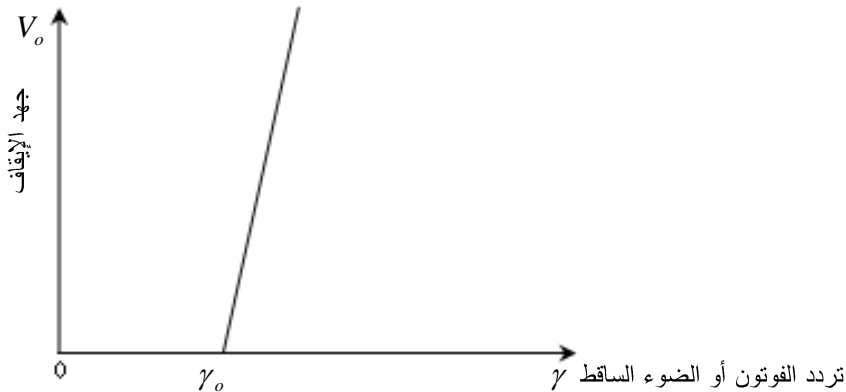
3- التجربة الكهروضوئية الثالثة/ عندما نجعل كل من التردد وشدة الضوء ثابتين مع تغيير فرق الجهد عبر الخلية الكهروضوئية. فإذا بدأنا بجامع حوالي عشرة فولت موجب ثم خفضنا هذا الجهد حتى القيمة صفر ثم جعلنا سالباً حتى يتوقف التيار الضوئي كلياً لنشأ لدينا المنحنى الموضح بالشكل (4).



الشكل (4) يوضح علاقة التيار الكهروضوئي مع الجهد المعجل لضوء ذو شدة ضوئية مختلفة بنسبة 2 إلى 1 مع ثبوت تردد الضوء الساقط.

يستنتج من الشكل (4) عندما يصبح فرق الجهد الأنبوب حوالي عشرة فولت أو أكثر، فإن جميع الإلكترونات المشعة تعبر خلال الأنبوب. وهذا التيار من الشحنات يسمى بتيار التشبع ((ويعرف على أنه هو الحالة التي عندها تصل جميع الإلكترونات المنطلقة من اللوح الباعث إلى اللوح الجامع ويصل التيار حداً لا يتعداه مهما زدنا جهد الجامع والتيار الإشباع مقياس للمعدل الزمني لعدد الإلكترونات الضوئية المنبعثة من اللوح الباعث والتيار الإشباع يتناسب طردياً مع الشدة الضوء الساقط)) ومن الطبيعي أن أي زيادة في الجهد الخاص بالجامع لا يمكنها أن تسبب زيادة في التيار ويصبح الشغل الصافي المبذول على الإلكترونات المتجمعة معتمداً على فراق الجهد الصافي فقط. وعندما ينخفض الجهد المعجل من قيم موجبة إلى قيم سالبة ماراً بالقيمة صفر ينخفض تيار الأنبوب بسبب الجهد المسلط المعوق يتسبب في النهاية في توقف التيار تماماً.

وإذا كررت التجربة الثالثة/ باستخدام سلسلة من الترددات الضوئية المختلفة لوجدنا أن جهد الإيقاف يتزايد بشكل خطي مع الترددات وتنضح هذه العلاقة إذا رسمنا جهد الإيقاف في مقابل التردد كما في الشكل (5).



الشكل (5) يوضح العلاقة بين التردد الفوتون الساقط وجهد الإيقاف.

يستنتج من ذلك عند الترددات أقل من تردد العتبة لا ينبعث أي إلكترون وفوق تردد العتبة فإن الإلكترونات الضوئية تمتلك طاقة تمدد من الصفر إلى قيمة قصوى معينة. أما بالنسبة للضوء ذو تردد أعلى من تردد العتبة فإن الفوتونات تنبعث. وقد تختلف كثيراً طاقة هذه الإلكترونات المنبعثة نظراً لأن بعضها يكون منبعثاً من داخل المعدن وبالتالي يتطلب طاقة أكبر من طاقة دالة الشغل (W) المطلوب تحريرها. وتبعاً لتصوير أينشتاين. فإنه لا بد من وجود جداً أعلى لطاقة الإلكترونات الفوتونية المنبعثة. وليس هناك فوتونات إلكترونات يمكنها أن تحصل على الطاقة زائدة عند طاقة الفوتون القادم بأقل من الحد الأدنى من الطاقة الأزمية لتحرير إلكترون وهي دالة الشغل. ونظراً لأن طاقة الحركية للفوتونات المنبعثة، فإن الخط البياني لجهد الإيقاف مع التردد لا بد أن يكون خطاً مستقيماً.

الخلاصة

عملية انبعاث الإلكترونات من سطوح المعادن عندما يسقط عليها ضوء بتردد عال نسبياً تعرف بالظاهرة الكهروضوئية وتتميز هذه الظاهرة بمايلي:-

- 1- عند تردد اقل من تردد العتبة (Threshold frequency) الذي يميز المعادن المختلفة بعضها عن بعض لا ينبعث أي إلكترون.
 - 2- عند الترددات اكبر من تردد العتبة تنبعث الإلكترونات بطاقة تمتد من الصفر إلى قيمة قصوى معينة.
 - 3- الطاقة القصوى تزداد خطياً بزيادة تردد الضوء الساقط ولا تعتمد على شدته.
- $$T_{\max} = h \gamma - h \gamma_o$$
- الكمية $h \gamma_o$: تدعى أيضاً بدالة الشغل وهي الطاقة اللازمة لفصل إلكترون من سطح المعدن.
- 4- بعض الإلكترونات الضوئية تغادر المعدن بعد فترة زمنية مقدارها (10^{-8}sec) عن طريقة التصادم وإذا لم يحدث تصادم يحدث أشعاع.

مثال/ كيف تحسب قيمة تردد العتبة لتحرير الإلكترونات الضوئية لمادة البلوتونيوم إذا كانت دالة الشغل له تساوي ($9.9 \times 10^{-9} \text{ J}$).

الحل أن طاقة الضوئية جعلت الإلكترون يفل ارتباطه بالسطح وجعله على وشك الانطلاق أي أن T_{\max} تساوي (zero).

$$T_{\max} = h\gamma - W$$

$$0 = h\gamma - W$$

$$\gamma = \frac{W}{h}$$

$$= \frac{9.9 \times 10^{-19} \text{ J}}{6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{sec}}$$

$$\gamma = 1.5 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

$$\therefore \gamma_o = 1.5 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

حل آخر:- لأنه يريد تردد العتبة

$$W = h\gamma_o \text{ مباشر من القانون}$$

مباشرة من لقانون

$$\gamma_o = W/h = \frac{9.9 \times 10^{-19} \text{ J}}{6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{sec}} = 1.5 \times 10^{15} \text{ Hz} \quad \text{هرتز}$$

مثال/ في تجارب الانبعاث الكهروضوئي وجد أن الطول الموجي في منطقة العتبة أو طول موجة القطع لمادة التنكستن هو انكسترم، ما هو الطول الموجي للضوء الساقط الواجب استخدامه للحصول على إلكترونات بطاقة عظمى تعادل (1.5ev).
الحل

$$T_{\max} = h(\gamma - \gamma_o) \dots (1)$$

$$\therefore C = \lambda_o \gamma_o \Rightarrow \gamma_o = \frac{C}{\lambda_o}$$

$$\gamma_o = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/sec}}{2300 \times 10^{-10} \text{ m}} = 1.3 \times 10^5 \text{ Hz} \dots (2)$$

$$\therefore T_{\max} = 1.5 \text{ eV} \times 1.6 \times 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{eV}}$$

$$T_{\max} = 2.4 \times 10^{-19} \text{ J} \dots (3)$$

نعوض (2) و (3) في (1)

$$2.4 \times 10^{-19} \text{ J} = 6.65 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{sec} (\gamma - 1.3 \times 10^5)$$

$$\gamma = 1.667 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

$$\lambda = C/\gamma \Rightarrow \lambda = \frac{3 \times 10^8}{1.667 \times 10^{15}}$$

$$\lambda = 1.8 \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$\lambda = 1800 \text{ Å} \text{ هو الطول الموجي للضوء الساقط}$$

واجب:-

س1/ دالة شغل البوتاسيوم هي (2.0 volt) إذا سقط ضوء بطول موجي (3699 Å) على البوتاسيوم أوجد:- 1- جهد الإيقاف. 2- الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المطرودة. 3- سرعة الإلكترونات.

س2/ عندما يتعرض لوح فوتوغرافي إلى ضوء ذو طول موجي مختلف لوحظ أن جهد الإيقاف معطى حسب الجدول التالي. ارسم جهد الإيقاف على المحور العمودي وتردد الضوء على المحور الأفقي. عين 1- تردد العتبة. 2- عتبة الطول الموجي. 3- دالة الشغل للمادة.

$\lambda \text{ Å}$	3660	4050	4360	4920	5460	5790
$V_o (\text{eV})$	1.48	1.15	0.93	0.62	0.360	0.24

س3/ جد طاقة فوتون بطول موجة قدرها (4500) انكستروم.

س4/ أشعة فوق البنفسجية بطول (3000) انكستروم يسقط على جسم دالة الشغل فيه تساوي (2.85 eV) وتحرر إلكترونات في هذا الجسم. أحسب سرعة الإلكترونات المنطلقة من الجسم.

س5/ إذا كانت شدة الإشعاع الساقط على سطح حساس للضوء تقدر بـ $(2 \times 10^{-3} \frac{\text{Wat}}{\text{cm}^2})$ وبذبذبة $(5 \times 10^3 \text{ Å})$ وإذا فرضنا أن جميع

الفوتونات الساقطة على السطح ستسبب انبعاث إلكترونات (Photo – Electron). فما هي عدد الإلكترونات المنبعثة من السطح للسنتيمتر المربع الواحد وفي الثانية الواحدة.

س6/ هل تنطلق الإلكترونات في ظاهرة الانبعاث الكهروضوئي من فلز باعثة بسرعات متساوية؟ ولماذا؟

س7/ برهن عملياً أن الإلكترونات تنطلق بسرعات مختلفة.

س8/ اكتب نص قانون القانون الأول والثاني للانبعاث الكهروضوئي، وبرهن علمياً.

ثانياً:- الأشعة السينية والصفات الجسيمية لها (The X-Ray and its Particle Nature)

أن الأشعة السينية هي نوع من أنواع الأشعة الكهرومغناطيسية والتي تم ملاحظتها أول مرة عام (1895) مختبرياً من قبل العالم الألماني رونتنجن (W. Roentgen) وذلك عند ارتطام سيل من الإلكترونات السريعة بمادة صلبة. وهي تشبه بقية الأشعة الكهرومغناطيسية حيث تمتلك نفس سرعتها في الفراغ أي (3×10^{10} cm/sec) إضافة إلى الصفات المتعلقة بالأشعة الكهرومغناطيسية بطولها الموجي الذي يتراوح ما بين (10^{-8} و 10^{-11} متر) أو ($0.1 - 100 \text{ \AA}$).

* أن من الجدير بالذكر إن ظاهرة الأشعة السينية هي في الحقيقة عكس الظاهرة الكهروضوئية التي وضعناها سابقاً حيث يتم تحويل جزء من الطاقة الحركية للإلكترونات إلى فوتونات متحررة.

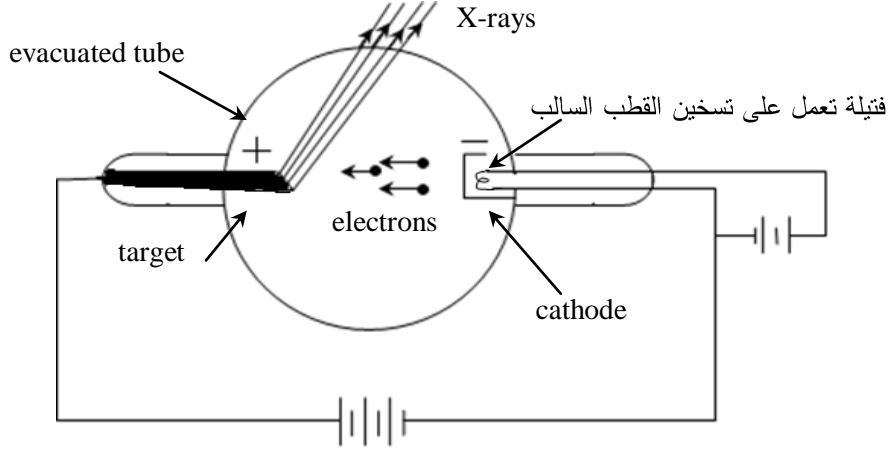
* علاوة على ذلك هناك نوعين من الأشعة السينية: الأول هو (الأشعة السينية المميزة) والتي تنتج عند ترك الإلكترون المداري لموقعه إلى خارج الذرة أو إلى مدار آخر يترك الذرة في حالة عدم استقرار، والرجوع إلى حالة الاستقرار للذرة يستبدل الإلكترون الذي ترك المدار الداخلي بأخر من مدار أعلى لملاً الفجوة و يصاحب هذا الانتقال انبعاث أشعة سينية يطلق عليها الأشعة السينية المتميزة. والنوع الثاني من الأشعة السينية يتولد نتيجة تباطؤ حزمة الإلكترونات وتسمى هذه أشعة الكبح (Bremsstrahlung) السينية والتي سنشرحها لأهميتها في موضوع الخاصية الجسيمية للموجات.

صفات أو خواص الأشعة السينية:-

- 1- تخترق الأشعة السينية جميع المواد الحاجبة للضوء وبنسب متفاوتة، حيث استخدمت في تشخيص العظام.
 - 2- أنها تتحرك بخط مستقيم.
 - 3- لا تتأثر بالمجالات الكهربائية أو المغناطيسية أي بمعنى أنها لا تنحرف هذه الأشعة بالمجال الكهربائي أو المغناطيسي وإنما تسير بخطوط مستقيمة.
 - 4- تسبب هذه الأشعة توهج المواد الفسفورية.
 - 5- تؤثر على الأفلام الفوتوغرافية.
 - 6- أن طاقة الأشعة السينية حوالي (10^4) أكبر من طاقة كمات الضوء المرئي.
 - 7- أطوالها الموجية تقع في (0.13 \AA و 0.48 \AA).
- أن اكتشاف رونتنجن لهذه الأشعة يعتبر قفزه في تاريخ العلم ويعتبر عطاء أنساني كبير أنقذ البشرية من أمراض كثيرة. وخلال ثلاثة أشهر من هذا الاكتشاف كانت أجهزة الأشعة تستخدم في العمليات الجراحية في إحدى مستشفيات فيينا كما أن التجارب والبحوث في هذا المجال لا تزال مستمرة في المختبرات العلمية وفي مختلف أنحاء العالم.

إنتاج الأشعة السينية:-

تنتج الأشعة السينية بواسطة أنبوبة التفريغ الغازي تحت ظروف الضغط الواطئة جداً كما هو موضح بالشكل (1) وهو رسم تخطيطي لأنبوبة الأشعة السينية، وفيه يسخن القطب السالب بواسطة فتيلة مجاورة، يمر خلالها تيار كهربائي، فيعطي سيلاً وافر من الإلكترونات عن طريق الانبعاث الحراري. هناك فرق جهد عالٍ (V) مسلط بين القطب السالب والهدف المعدني (metallic target) يعمل على تعجيل الإلكترونات نحو الأخير. سطح الهدف المعدني يشكل زاوية مع حزمة الإلكترونات، وعليه فإن الأشعة السينية المنبعثة من الهدف تخرج من الجهاز عن طريق الجدران الجانبية للأنبوب. أن الجهاز مفرغ من الهواء لكي يسمح للإلكترونات أن تصل إلى الهدف من دون عرقلة.

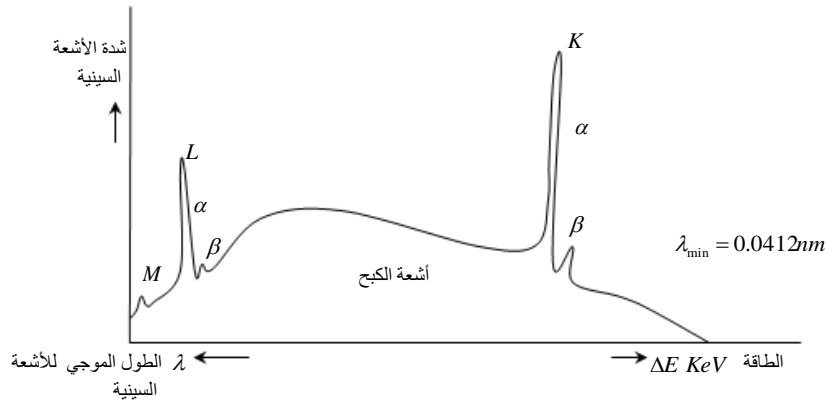


الشكل (1) أنبوبة الأشعة تحت السينية.

وعلى يمكن تفسير انبعاث الأشعة السينية الناتجة عن التوقف المفاجئ للإلكترونات السريعة عند الاصطدام.

الطيف المتصل للأشعة السينية:-

أن العدد الأكبر من الإلكترونات التي تصطدم مع الهدف المعدني لأنبوبة الأشعة السينية لا تعاني اصطدامات رأسية مع ذرات الهدف المعدني وإنما اصطدامات جزئية أو زائفة تكون نتيجتها فقدان جزء من الطاقة الحركية لهذه الإلكترونات وتسبب زيادة كبيرة في درجة حرارة الهدف وقد وجد إن معظم الطاقة الحركية لهذه الإلكترونات يتحول إلى حرارة عالية تسبب تسخين الهدف. وهناك عدد من الإلكترونات التي تعمل اصطدامات رأسية مع الذرات الهدف وتكون النتيجة فقدان الجزء الأعظم للطاقة الحركية أو فقدانها كلياً يحدث لهذه الإلكترونات تباطؤ سريع في حركتها، وكما هو معروف (أن الجسم المشحون الذي يتحرك بتعجيل تنبعث منه أشعة كهرومغناطيسية) ولهذا السبب فإن الإلكترون الذي يفقد طاقته تنبعث منه نبضة طاقية من الإشعاع الكهرومغناطيسي. أن هذه الظاهرة معاكسة للتأثير الكهروضوئي كما هو مذكور سابقاً لأن الإلكترون في هذه الحالة ينتج فوتون. وهكذا نجد أن الإلكترونات ذات طاقة حركية معينة تولد فوتونات من أشعة سينية ذات طاقة عظمى معينة. أن كلا ظاهرتين، الظاهرة الكهروضوئية وظاهرة الأشعة السينية يؤيدان المفهوم الكمي للإشعاع. استناداً إلى المفهوم التقليدي للنظرية الكهرومغناطيسية فإن الطول الموجي للإشعاع الكهرومغناطيسي الناتج من التوقف الفجائي للإلكترون المتحرك غير مقيد بحد أدنى ولكن مفهوم الكمي للإشعاع يقيد هذا الطول الموجي بحد أدنى. يستنتج مما تقدم أن أشعة الكبح السينية تنتج من تباطؤ حزمة الإلكترونات الساقطة على النموذج. أن طيف هذا النوع من الأشعة السينية المنبعثة يكون مستمر. أي لا يتحدد بطول موجي معين. لا يمكن للإلكترون أن يفقد طاقة أكثر مما يمتلك فتعتمد بذلك طاقة الأشعة السينية المنبعثة على طاقة الإلكترونات الساقطة المعجلة، أي أن الطاقة العظمى للفوتونات الناتجة يجب أن لا تتجاوز طاقة الساقطة. وهذا يعني وجود طول موجي بقيمة دنيا.



الشكل (2) يوضح طيف الأشعة السينية لذرة المولبدنيوم المقذوفة بحزمة الكترونات تعجيلها 30 كيلوفولت.

* عند تحويل جميع الطاقة الحركية للإلكترون الساقطة إلى فوتون واحد ستكون:-

$$T_{\max} = h \gamma_{\max}$$

T_{\max} : الطاقة الحركية للإلكترون الساقطة على الهدف الفلزية ويعطي أيضا $(\frac{1}{2} m v^2)$ حيث (v) سرعة الإلكترون الساقط كما هو مذكور سابقاً.

كما أن الطاقة العظمى تعتمد على فولتية التعجيل V وبذلك يمكن حساب القيمة الصغرى للطول الموجي لأشعة الكبح السينية (λ_{\min}) من العلاقة الآتية:-

$$T_{\max} = e \times V = h \gamma_{\max}$$

$$= h \frac{C}{\lambda_{\min}}$$

$$\therefore \lambda_{\min} = h C / e \times V$$

حيث أن C : سرعة الضوء، e : شحنة الإلكترون، V : فولتية التعجيل وبالتعويض عن الثوابت نحصل على

$$\lambda_{\min}(A^\circ) = \frac{12400}{V(volt)} \dots (1)$$

أن حدوث انبعاث أشعة الكبح تبدأ من الطول الموجي الأدنى وتستمر في باقي قيم الطول الموجي الأخرى. ولا يعتمد هذا على نوع المادة التي يتكون منها النموذج ولكنه يعتمد على الجهد المعجل للإلكترونات.

حيث أن الثابت 12400 وحدته $(volt \cdot A^\circ)$.

وأن V : الجهد المعجل لأنبوبة الأشعة السينية $(volt)$.

λ_{\min} : الحد الأدنى للطول الموجي للأشعة السينية.

* من المهم أن نلاحظ أن دالة الشغل لمعظم المواد هي فقط بضعة إلكترونات - فولت، بينما الجهد المسلط (المعجل) قد يصل إلى عشرات أو مئات الكيلوفولت $(k.volt)$

وأن العلاقة (1) تعطي القيمة الصغرى لطول الموجة لأن الإلكترون لا يمكن أن يفقد طاقة أكثر مما يملك. كما أن هناك توزيع طاقي متصل للإشعاع باتجاه الطول الموجي المتسبب في الاصطدامات المختلفة مبتدأ من الاصطدام الرأسي إلى الاصطدام الزائف كما في شكل(2).

وهكذا فإن الاصطدام الجزيئية والزائفة هي التي تعطي الطيف المتصل للأشعة السينية. وبعبارة أخرى أن مميزات الطول الموجي لطيف المتصل للأشعة السينية لا تعتمد على نوع المادة التي يتكون منها ولكنه يعتمد على الجهد المعجل لأنبوبة ويطلق على هذا النوع من الإشعاع المتصل (Bremsstrahlung) ومعناه أشعة التوقف.

* من الممكن تفسير تحرير الأشعة السينية على أساس النظرية الكمية للإشعاعات وكما يلي:-

أن معظم الإلكترونات الساقطة على الهدف تفقد طاقتها الحركية تدريجياً بواسطة اصطدامات متعددة (والتي تتحول إلى حرارة كما هو مذكور سابقاً) ونسبة أخرى من الإلكترونات تفقد كل أو معظم طاقتها في عملية اصطدام مع ذرات الهدف حيث تتحرر الأشعة السينية.

* لذلك فبدلاً من تحويل الفوتونات إلى طاقة حركية للإلكترونات في الظاهرة الكهروضوئية نجد أن الطاقة الحركية للإلكترونات تتحول إلى فوتونات (X-ray).

* أن فرق الجهد المسلط في أجهزة الأشعة السينية الاعتيادية يقدر حوالي $(50 kvolt)$ لذلك فعند استخدام المعادلة التي تحدد (λ_{\min}) نجد أن

$$\lambda_{\min} = \frac{12400 A^\circ volt}{50 \times 10^3 volt} = 0.248 A^\circ$$

أن هذا الطول الموجي λ_{\min} يقابل γ_{\min} كمايلي:

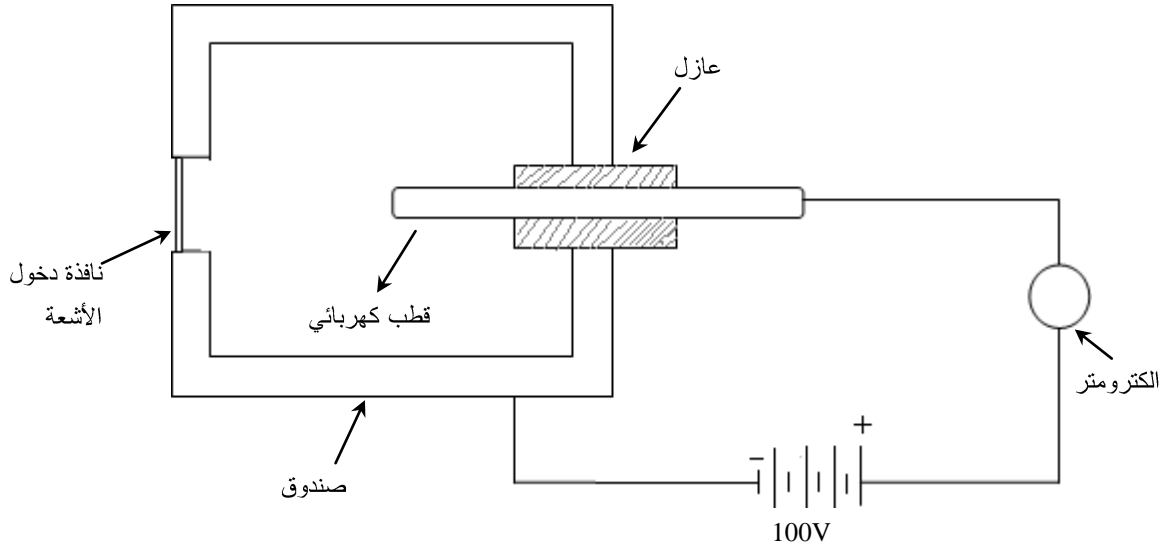
$$\gamma_{\max} = \frac{C}{\lambda_{\min}}$$

$$= \frac{3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}}{2.5 \times 10^{-11} \text{ m}}$$

$$= 1.2 \times 10^{19} \text{ Hz}$$

قياس شدة الأشعة السينية:-

استعان رونتجن أولاً للكشف عن الأشعة السينية بظاهرة الفلورة التي تولدها الأشعة على بعض المواد حيث يمكن اعتبار الشدة الضوئية للفلورة كمقياس لشدة الأشعة المولدة لها كما لاحظ رونتجن أن الأشعة السينية تترك ظل أسود على الألواح الفوتوغرافية أثناء تعرضها لهذه الأشعة ويمكن قياس شدة اسوداد اللوح بواسطة جهاز قياس الكثافة ويمكن استخدام هذه الطريقة كمقياس لشدة الأشعة. وهناك طريقة أخرى أفترضها رونتجن أيضاً تتعلق بالتوصل الكهربائي للهواء أثناء تعرضه للأشعة السينية. ومن خواص الأشعة السينية أنها تأين الهواء. ويمكن استخدام هذه الظاهرة لقياس كمية الأشعة والجهاز المستخدم لهذا الغرض يسمى حجرة التأين. وهناك أنواع عديدة من حجرات التأين و أحداها المبين بالشكل (3). وتتكون الحجرة من صندوق يمتد بداخله قطب كهربائي خلال عازل وعادة يسלט على هذا القطب جهد كهربائي موجب ولذلك فإن أي إلكترون طليق في داخل الحجرة سرعان ما ينجذب إليه ويمكن اختيار فرق الجهد بين القطب وجدار الحجرة بمقدار أقل من الجهد اللازم لكسر شدة العازل للهواء وعالي بمقدار يكفي لجميع الالكترونات قبل إعادة اتحادها مع الايونات الموجبة عندما تدخل الأشعة السينية من خلال النافذة فإنها تولد ايونات وتتجمع شحنات على القطب تولد تيار كهربائي صغيراً جداً يتناسب إلى حد ما مع شدة الأشعة السينية ويمكن تضخيم هذا التيار بواسطة مضخم إلكتروني إلى درجة بحيث يمكن قياس بواسطة الالكترومتر. أن هذا الجهاز حساس جداً للأشعة وملئم لهذا الغرض وله استخدامات عديدة في مجالات أخرى منها قياس النشاط الإشعاعي.

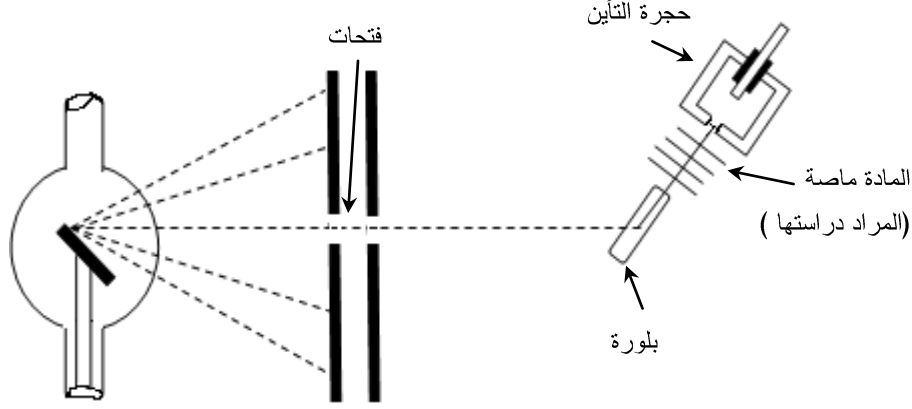


الشكل (3) حجرة التأين.

معامل الامتصاص:-

يمكن استخدام حجرة التأين المنوه عنها سابقاً في دراسة قابلية الاختراق للأشعة السينية وكذلك يمكن تحديد حزمة من الأشعة المنبعثة من أنبوبة الأشعة السينية بعد سقوطها على بلورة إذ نحصل على شعاع منعكس ذو موجة واحدة بواسطة انعكاس براك وبعد ذلك يمر الشعاع

المنعكس خلال المادة المراد دراسة خواصها وتقاس شدة الشعاع المار من خلال هذه المادة بواسطة حجر التآين كما هو في الشكل (3) ثم يرسم خط بياني بين شدة الأشعة الخارجية من خلال مادة الامتصاص وسمك المادة كما هو مبين في الشكل (4).



الشكل (4) مخطط لتجربة امتصاص الأشعة السينية.

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \dots (2)$$

حيث (I): شدة الأشعة السينية المارة خلال المادة الماصة.

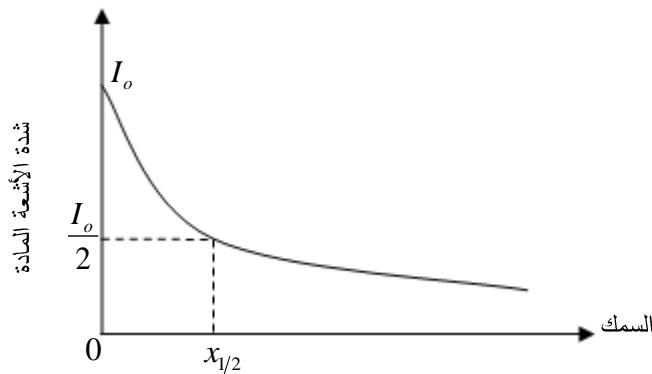
(I_0): شدة الأشعة السينية الساقطة على المادة الماصة.

(x): سمك المادة الماصة.

(μ): ثابت التناسب ويسمى بمعامل الامتصاص الخطي. وهو عبارة عن الانخفاض الجزئي لشدة الأشعة لوحدة السمك للمادة الماصة وبناء على ذلك تكون وحدتها معكوس وحدة الطول.

* أن قيمة هذا المعامل (μ) تعتمد على الطول الموجي للأشعة السينية ونوع المادة المستخدمة إذا عوضنا بقيمة ($I = \frac{I_0}{2}$) ووجدنا قيمة (x) الناتجة والتي تساوي سمك المادة اللازمة لانخفاض شدة الشعاع الخارجي إلى نصف شدة الشعاع الساقط ولهذا تسمى سمك النصف، ويرمز لها ($x_{1/2}$) وبهذا نحصل على المعادلة (3):-

$$x_{1/2} = \frac{0.693}{\mu} \dots (3)$$



الشكل (5) خط بياني لشدة الأشعة المارة خلال المادة.

* والأشعة السينية ذات الطول الموجي القصير لها قابلية كبيرة لاختراق المادة بالرغم من كونها تمتص وتطرد الإلكترونات من أي القشرة لمادة الامتصاص كما في التأثير الكهروضوئي.

* ونلاحظ أيضاً أن قيمة معامل الامتصاص (μ) تعتمد كثيراً على الكثافة مادة الامتصاص وبناءً على ذلك يمكننا أن نكتب معادلة الامتصاص على الصورة التالية:-

$$I = I_o e^{-\frac{\mu}{\rho}(\rho x)} \dots\dots(4)$$

حيث ρ : كثافة المادة الماصة للأشعة السينية.

$$I = I_o e^{-\mu_m m_a} \dots\dots(5)$$

والكمية (μ_m): هو معامل الامتصاص الكتلي ويعطى بالمعادلة التالية:-

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \dots\dots(6)$$

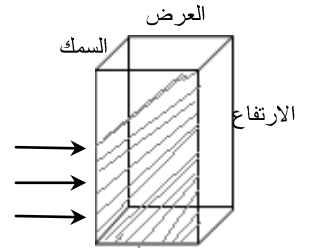
والكمية ($m_a = \rho x$) وهي الكتلة لوحدة المساحة المادة الامتصاص.

الحجم/الكتلة = الكثافة ρ

السلك × العرض × الارتفاع = الكتلة ρ

العرض × الارتفاع = الكتلة ρ × السلك

$m_a = \text{مساحة المادة الماصة} / \text{الكتلة} = \rho \times x$



مثال/ إذا كان معامل الامتصاص الكتلي (μ_m) للألمنيوم عند تعرضها للأشعة السينية بطول موجي (0.33 \AA) هو ($0.61 \text{ cm}^2/\text{gm}$). فإذا كانت كثافة الألمنيوم هي (2.70 gm/cm^3). جد: 1- معامل الامتصاص الخطي للألمنيوم. 2- سمك النصف. 3- سمك الألمنيوم لانخفاض الشدة إلى 1/24 من مقدار الأشعة الساقطة.

$$\mu = \rho \mu_m \Rightarrow$$

$$\mu = 2.7 \frac{\text{gm}}{\text{cm}^3} \times 0.61 \frac{\text{cm}^2}{\text{gm}} = 1.65 \text{ cm}^{-1}$$

معامل الامتصاص الخطي $\mu = 1.65 \text{ cm}^{-1}$

$$x_{1/2} = \frac{0.693}{\mu} = \frac{0.693}{1.65 \text{ cm}^{-1}} = 0.42 \text{ cm}$$

سمك النصف $x_{1/2} = 0.42 \text{ cm}$

$$\frac{I}{I_o} = e^{-\mu x} \Rightarrow \frac{1}{24} = e^{-\mu x} \Rightarrow \frac{1}{24} = e^{-1.65x} \Rightarrow x = \frac{\ln 24}{1.65} \Rightarrow$$

$$x = \frac{2.30 \times 1.38}{1.65} = 1.93 \text{ cm}$$

الأشعة السينية حيودها:-

* أن حيود الأشعة السينية بواسطة المحرز أو باستعمال أجسام بلورية يثبت بأن الأشعة السينية هي موجات كهرومغناطيسية.

* لكون الأطوال الموجية للأشعة السينية هي بحدود بضع انكستروم (\AA) لذلك يفضل هنا استخدام بلورات معينة أو أجسام بلورية لدراسة حيود الأشعة السينية.

* عند سقوط حزمة أشعة سينية أحادية الطول الموجي على بلورة فإن الأشعة المنتشرة تعاني تداخلاً بناءً باتجاهات معينة وتداخلاً هداماً باتجاهات أخرى. وذلك نتيجة الترتيب المنتظم للذرات داخل البلورة.

* من الممكن تطبيق قوانين الحيود بالنسبة للأشعة السينية إذا كان الطول الموجي (λ) والمسافة بين المستويات البلورية (d) معروفه.

ظاهرة كومبتن أو استقطار كومبتن (Compton Scattering)

* من الشواهد العملية والمهمة للخاصية الجسيمية للفوتونات ما أثبتته العالم كومبتن عام (1922) حيث كان يحاول دراسة تشتت الأشعة السينية بواسطة سطح من الكرافيت، وقد لاحظ في حينه أنه عند ارتطام أشعة أحادية الموجة من الأشعة السينية بسطح من الكرافيت فإن الأشعة السينية سوف تمتلك طول موجي إضافي أكبر من الطول للشعاع الساقط. وقد فسر كومبتن هذه الظاهرة على أن الاصطدام الذي يحدث بين فوتونات الأشعة السينية الساقطة والكترونات الكربون المكونة لمادة الكرافيت مشابهاً تماماً لما يحدث بين تصادم كرات البليارد، وأن سلوك الفوتونات الساقطة هو كسلوك الجسيمات الاعتيادية.

ولتوضيح سلوك ذلك يمكن القول بأن الالكترونات المكونة لذرات الكربون يمكن اعتبارها إلكترونات حرة حيث أن قوة الربط بين الالكترونات المكونة لذرات صغيرة جداً مقارنة مع القوة المؤثرة للفوتونات الساقطة. وعند انطلاق الالكترونات فإنها سوف تكسب جزءاً من طاقة الفوتونات الساقطة وستكون الفوتونات المشتتة ذات طاقة أقل. وبما أن طاقة الفوتون هي: $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ فإن النقصان في كمية الطاقة سيؤدي إلى زيادة في الطول الموجي ونتوقع من ذلك أن الفوتونات المشتتة بزاوية أكبر سوف تفقد كمية أكبر من طاقتها ولذلك ستكون بطول موجي أطول (لأن الطول الموجي يتناسب عكسياً مع كمية الطاقة) وهذا ما لاحظته كومبتن في تجربته هذه. * أن ظاهرة كومبتن هذه لا يمكن أن تفهم إلا على أساس أن الأشعة الساقطة تتصرف كتصرف الجسيمات الاعتيادية. * لقد أثبت العلم كومبتن خاصيتين مهمتين في التجربة هذه أولهما: أن الأشعة المستقطبة لها قابلية أقل على اختراق المواد الصلبة مقارنة بالأشعة الأولية.

وثانيها: أن الأشعة المستقطبة بشكل عام تمتلك طولين موجيين مختلفين. الطول الموجي الأول هو دائماً مساوي إلى الطول الموجي الساقط والطول الثاني هو أطول من الطول الموجي الأول ويعتمد في طوله على زاوية الاستقطار (ϕ) وكما في المعادلة التالية:-

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 \cdot C} (1 - \cos\phi) \dots (8)$$

حيث أن:-

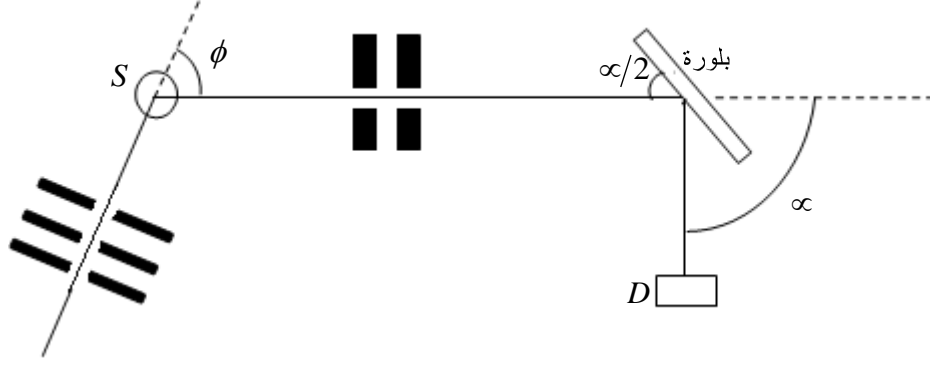
λ = طول موجة الأشعة الساقطة. m_0 : الكتلة السكونية للإلكترون. C: سرعة الضوء.

λ' = طول موجة الأشعة المستقطرة.

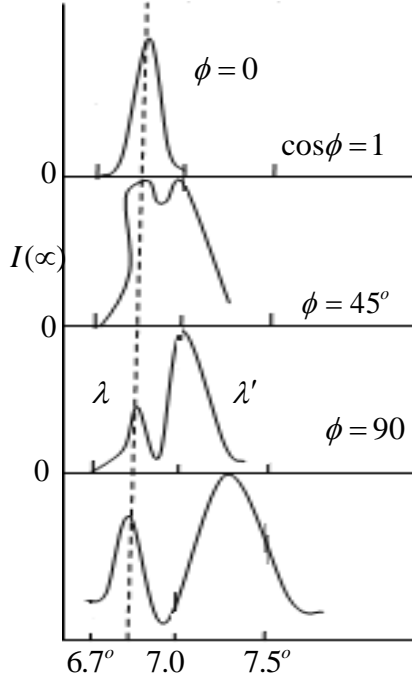
ϕ = زاوية الاستقطار.

شرح تجربة كومبتن في قياس طول الموجة المشتتة:-

يمكن توضيح تجربة كومبتن بالشكل (6) حيث توجه حزمة من الأشعة السينية بطول موجي معين وجعلها تسقط على الجسم (S) المكون من مادة الكرافيت (الكربون) وجعل الأشعة المستقطرة بزاوية (ϕ) تسقط على جسم بلوري يعمل عمل المحرز والذي بواسطته يمكن معرفة طول موجة الأشعة المستقطرة (λ'). يتبع ذلك جهاز كاشف للأشعة السينية (D) الهدف منه يتم تحديد زاوية الاستقطار وشدة الأشعة المستقطرة والذي يتحرك بشكل دائري حول موقع البلورة.



الشكل (6) أجزاء تجربة كومبتن.



الشكل (7)

الشكل (7) يوضح طيف الأشعة السينية بأربع زوايا مختلفة (θ) للاستطارة موضحاً الطول الموجي الأصلي إضافة إلى الطول الموجي المضاف.

ويلاحظ من هذا الشكل أن ابتعاد الطول الموجي (λ') عن الطول الموجي الأصلي (λ) يتناسب مع زيادة زاوية الاستطارة (ϕ) . إن وجود الطول الموجي الأصلي (λ) يبرهن على استطارة جزء من الأشعة السينية بواسطة بعض الالكترونات المرتبطة بشكل أكبر عن بقية الالكترونات والتي هي ليست بحالة حرة للاستطارة.

* ولتوضيح ظاهرة كومبتن باعتماد على العلاقة الرياضية التي بين الزخم والطاقة فإننا سنستخدم العلاقة:-

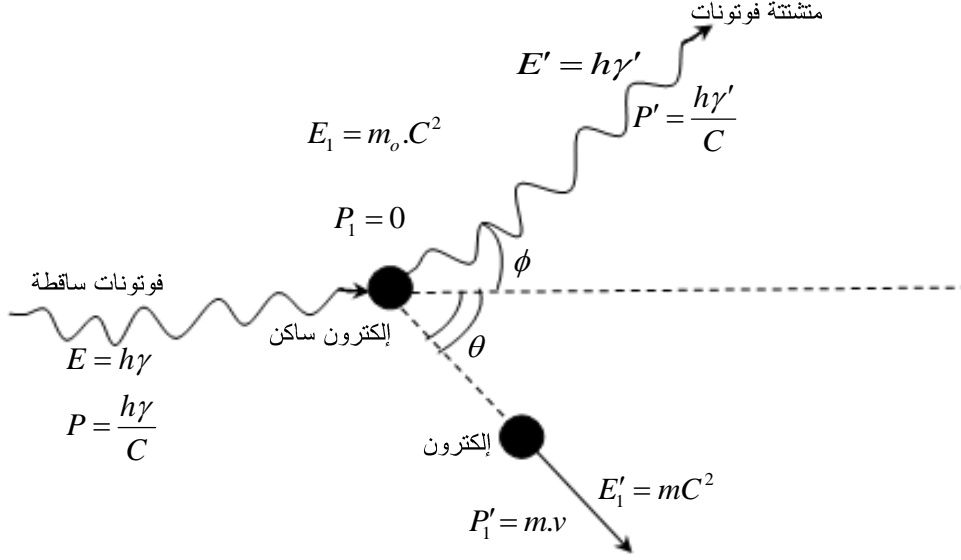
$$E = PC \dots\dots(9)$$

طاقة الفوتون. (C) سرعة الضوء و(P) زخم الفوتون

$$P = E / C \dots\dots\dots(10)$$

وان أي فوتون بطاقة مقدارها $(E = h\gamma)$ أو سيمتلك زخماً مقداره:-

$$P = E / C = h\gamma / C \dots\dots\dots(11)$$



الشكل (8) يوضح استنارة كومبتن.

ملاحظة:-

الطاقة قبل التصادم = الطاقة بعد التصادم.

$$\underbrace{\lambda\gamma'}_{\substack{\text{طاقة الفوتون} \\ \text{بعد الاستنارة}}} + \underbrace{\frac{1}{2}m.v^2}_{\substack{\text{طاقة الحركية} \\ \text{للإلكترون}}} = \underbrace{h\gamma}_{\substack{\text{طاقة الفوتون} \\ \text{الكلية}}}$$

الزخم قبل التصادم = الزخم بعد التصادم

زخم (للفوتون الساقط) = زخم الإلكترون + زخم الفوتون المستنار (بعد الاصطدام بالإلكترون)

$$\left(\frac{h\gamma}{C}\right)\cos\phi + m.v\cos\theta = \frac{h\gamma}{C}$$

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0C}(1 - \cos\phi) \quad \text{معادلة كومبتن}$$

حيث (λ) الطول الموجي للفوتون الساقط، (λ') الطول الموجي للفوتون المشتت.

حيث φ : زاوية التشتيت (الاستنارة).

m₀ : الكتلة السكونية للإلكترون.

* المعادلة الأخيرة تعطينا التغير في الطول الموجي لفوتون مشتت طول موجته (λ) وتردده (γ) بواسطة جسيم كتلته السكونية (m₀) كدالة لزاوية التشتت (φ).

* الكمية (h/m₀C) تدعى بطول موجة كومبتن للجسم المشتت λ_c. وفي حالة الإلكترون (m₀ = 9.1 × 10⁻³¹ kg) فإن طول موجة كومبتن تساوي 0.024 Å أو (2.4 × 10⁻¹² m).

* يلاحظ أن التغير في الطول الموجي (Δλ) عند زاوية تشتيت (φ = 0°) هو (صفر) أي أنه لا يوجد أي تغير في الطول الموجي وأن

أكبر قيمة هي عند (φ = 180°) حيث تكون Δλ تساوي ضعف طول موجة كومبتن $\left[2 \times \frac{h}{m_0C}\right]$.

* يلاحظ أيضا أن الطول الموجي للجسيمات الأخرى يكون أصغر بكثير لكبر كتلتها السكونية نسبة إلى الإلكترون.

* وأخيرا فإن التغير في الطول الموجي يمكن ملاحظته فقط بواسطة الأشعة السينية حيث يمثل التغير نسبة كبيرة مقارنة بطول موجة الأشعة السينية.

* إضافة إلى ذلك ملاحظة يمكن ملاحظة طول موجي في الأشعة المتشتتة مساوياً للطول الموجي الساقطة ويعزى ذلك إلى ارتداد كل ذرة التي كتلتها مساوياً عشرات الآلاف من المرات من الإلكترون نفسه. ولذلك تكون تأثير كومبتن غير محسوس وذلك لأن:-

$$\Delta\lambda \propto \frac{h}{m_o C}$$

مثال/ حزمة من الأشعة سينية أحادية الطول الموجي طول موجتها ($0.558 A^\circ$) تشتتت بزاوية (46°). جد الطول الموجي للحزمة المتشتتة.

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_o C} (1 - \cos\phi)$$

$$\Delta\lambda = 0.024 A^\circ (1 - 46)$$

$$\Delta\lambda = 7.328 \times 10^{-3} A^\circ$$

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$$

$$\lambda' = \Delta\lambda + \lambda$$

$$\lambda' = 7.328 \times 10^{-3} + 0.558$$

$$\lambda' = 0.563 A^\circ$$

نلاحظ أن الطول الموجي للفوتون المتشتت هو ($0.563 A^\circ$) وهو أكبر من الطول للفوتون الساقط والذي قيمته ($0.558 A^\circ$) إذن أن الفوتون الساقط بعد تشتته تتناقص طاقته وهذا يؤدي إلى زيادة في الطول الموجي للفوتون المتشتت.

مثال/ فوتون أشعة سينية تردده الابتدائي ($3 \times 10^{19} \text{ Hz}$) يصطدم مع إلكترون ويتشتت بزاوية (90°). جد تردد الفوتون الجديد.

$$C = \gamma\lambda \Rightarrow \lambda = C / \gamma = \frac{3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}}{3 \times 10^{19} \text{ sec}^{-1}}$$

$$\lambda = 10^{-11} \text{ m} \times 10^{10} \frac{A^\circ}{\text{m}} = 0.1 A^\circ$$

الطول الموجي لفوتون أشعة سينية الساقط ((الابتدائي)) $\lambda = 0.1 A^\circ$

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_o C} (1 - \cos\phi)$$

$$= 0.024 A^\circ (1 - \cos 90)$$

التغير في طول فوتون الأشعة السينية $\Delta\lambda = 0.024 A^\circ$

طول موجة الفوتون الساقط - طول موجة الفوتون المتشتت $\Delta\lambda$

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$$

$$0.024 A^\circ = \lambda' - 0.1$$

$$\lambda' = 0.024 + 0.1$$

$$\lambda' = 0.124 A^\circ$$

$$C = \lambda' \gamma' \Rightarrow$$

$$\gamma' = \frac{3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}}{0.124 \times 10^{-10} \text{ m}} = 2.4 \times 10^{19} \text{ sec}^{-1}$$

$$\gamma' = 2.4 \times 10^{19} \text{ Hz} \text{ تردد الفوتون المنتشت}$$

واجب

س1/ جد طاقة فوتون الأشعة السينية الذي يعطي طاقة عظمى قدرها (50keV) عند تصادمه مع إلكترون.

س2/ ما تردد فوتون أشعة سينية زحمة ($1.1 \times 10^{-23} \text{ kg} \cdot \text{sec}^{-1}$)؟

س3/ حزمة أشعة سينية تشتت بواسطة الكترونات طلقه. عنده زاوية (45°) من الاتجاه الأصلي الأشعة السينية المنتشت لها طول موجي (0.022 \AA). ما طول موجة الأشعة الساقطة؟

س4/ فوتون أشعة سينية ترددها الابتدائي ($1.5 \times 10^{19} \text{ Hz}$) يصطدم مع إلكترون ويندفع بتردد ($1.2 \times 10^{19} \text{ Hz}$) ما مقدار الطاقة الحركية المكتسبة من قبل الإلكترون.

س5/ ما طاقة فوتون إذا كان زحمة يساوي زخم بروتون طاقته ($10 \mu\text{eV}$).

س6/ ما طول موجة الأشعة السينية المنبعثة من هدف عندما تسقط عليه الكترونات طاقتها (100 keV)؟ ما هو تردد الفوتونات المنبعثة.

س7/ جهاز أشعة سينية يولد أشعة سينية طولها الموجي (0.1 \AA). ما الجهد المعجل المستخدم في الجهاز.

س8/ 1- عند أي جهد يجب أن تعمل أنبوبة الأشعة السينية لإنتاج أشعة أدنى طول موجي لها هو (0.01 \AA). 2- ما هو أعظم تردد للأشعة السينية الناتج من صمام يعمل بجهد 20 kvolt ، ؟ 60 kvolt.

س9/ ما هو سمك المادة مقدرا بعدد مرات سمك الطبقة المنصفة واللازم لإنقاص الشدة للأشعة السينية إلى مقدار 1- $\frac{1}{16}$ ، 2- $\frac{1}{80}$ ، 3-

$$\cdot \frac{1}{200}$$

س10/ معاملات الامتصاص الكتلي للأشعة السينية ذات الطول الموجي 0.2 \AA للألمنيوم 0.270 و النحاس 1.55 و الرصاص $4.90 \text{ cm}^2 / \text{gm}$.

1- ما هو سمك الطبقة المنصفة لكل المواد.

2- ما هو السمك اللازم لكل من هذه المواد لتتقيص شدة الأشعة النافذة إلى $1/32$ من شدة الشعاع الساقط اللازم للتقيص إلى $1/10$ من شدة الشعاع الساقط.