شارح: أنابيب الأشعة السينية

في هذا الشارح، سوف نتعلَّم كيف نَصِف تَولُّد الأشعة السينية باستخدام أنبوب الأشعة السينية، وكيف يمكن أن يتعدَّد طيف الأشعة السينية الناتج.

تتولَّد الأشعة السينية بانخفاض طاقة الجسيمات المشحونة.

إن أي جسيم له شحنة كهربية ويتحرَّك تكون له طاقة حركة مصاحبة.

عندما تنخفض طاقة هذا الجسيم، فإن إحدى الطرق التي يمكن أن تنتقل بها الطاقة من الجسيم هي بانبعاث الطاقة في صورة موجات كهرومغناطيسية من الجسيم. والأشعة السينية عبارة عن موجات كهرومغناطيسية لها ترددات محددة، f، تُعطى بالمدى:

$$3 \times 10^{16}\ \text{Hz} < f < 3 \times 10^{19}\ \text{Hz}.$$

بالنسبة إلى الإلكترونات الموجودة داخل الذرات، تنخفض طاقة الإلكترون بانبعاث إشعاع كهرومغناطيسي منه.

الإلكترونات الموجودة في الذرات لها طاقات محددة، تُسمى مستويات الطاقة. وعندما ينتقل إلكترون من مستوى طاقةٍ ما إلى مستوى طاقة أقل، تنبعث منه موجات كهرومغناطيسية لها طاقة تساوي الفرق بين طاقتَي المستوى الأعلى والمستوى الأقل.

ويمكن التعبير عن ذلك بالمعادلة:

$$E_\lambda = \Delta E,$$

حيث تمثِّل E_λ طاقة الموجات ويمثِّل ΔE الفرق في الطاقة بين مستويَي الطاقة الأعلى والطاقة الأقل.

يمكن تمثيل طاقة الموجة على أنها طاقة فوتون، وفي هذه الحالة يُعبَّر عن تلك العلاقة بالصورة:

$$Hf = \Delta E,$$

حيث يمثِّل H ثابت بلانك ويمثِّل f تردُّد الفوتون.

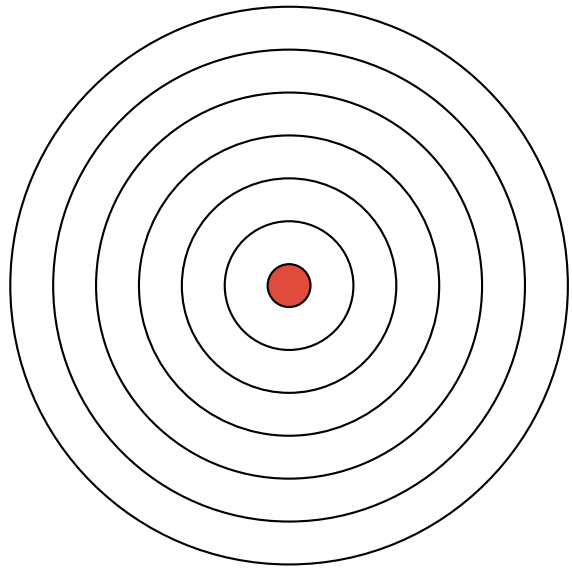
لتوليد فوتون أشعة سينية له تردد يساوي $3 \times 10^{16}\ \mathrm{Hz}$ ، يُعطى فرق مستوى الطاقة بالعلاقة:

$$\Delta E = 6.634 \times 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s} \times 3 \times 10^{16}\ \mathrm{Hz}$$
$$\Delta E = 6.634 \times 10^{-34}\ \mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}^2} \cdot \mathrm{s} \times 3 \times 10^{16} \frac{1}{\mathrm{s}}$$
$$\Delta E = 6.634 \times 10^{-16}\ \mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}^2} = 1.9902 \times 10^{-17}\ \mathrm{J}.$$

الطاقة اللازمة لإزالة إلكترون من ذرة هيدروجين تساوي $2.18 \times 10^{-18}\ \mathrm{J}$ فقط. وهذا يعني أنه لتوليد فوتون أشعة سينية له أقل طاقة مُمكنة، لا بد من حدوث تغيُّر في الطاقة أكبر من التغيُّر الذي يحدث في ذرة الهيدروجين.

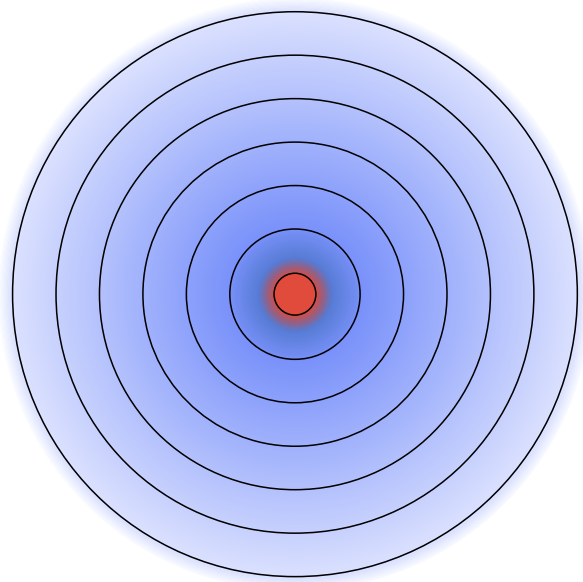
نلاحظ إذن أنه لا بد من وجود ذرة عنصر يحتوي على إلكترونات عديدة حتى تستطيع بعض الإلكترونات التي لديها طاقة كافية توليد فوتون أشعة سينية عند انتقالها إلى مستوى طاقة أقل.

تُستخدم عناصر مثل التنجستين والروديوم والموليبدينوم لتوليد فوتونات الأشعة السينية. ويوضِّح الشكل الآتي البنية الأساسية لمستويات طاقة الإلكترونات في ذرة التنجستين.



تقع النواة في مركز الذرة. والإلكترونات التي تقع على مسافات مختلفة من النواة لها طاقات مختلفة. وكلما زادت المسافة التي يبعُدها إلكترون عن النواة، زادت طاقته. ولا يوضِّح الشكل الإلكترونات نفسها.

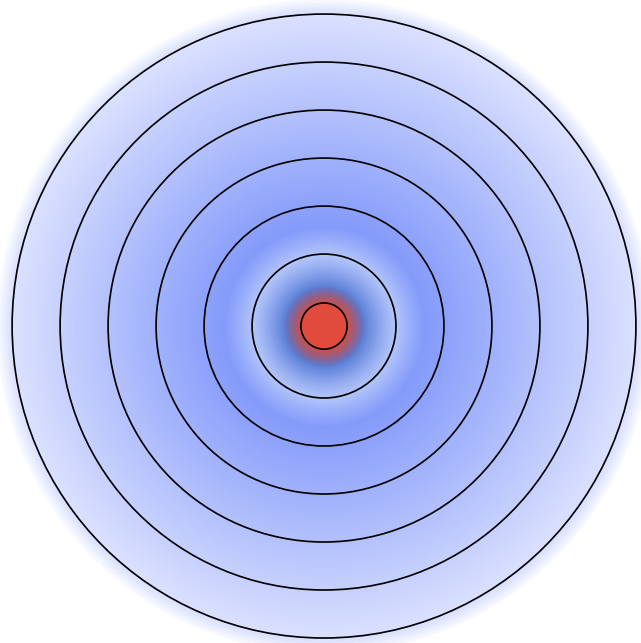
يزداد عدد الإلكترونات التي يمكن أن يكون لها طاقة معينة بالبعد عن النواة. ويمثِّل الشكل الآتي الكثافة التقريبية للإلكترونات على مسافات مختلفة من النواة. وعندما يكون اللون الأزرق أكثر كثافة، تكون كثافة الإلكترونات أكبر. يبسِّط هذا التمثيل مسألة عرض مواضع الإلكترونات المنفردة.



لا يمثِّل الشكل التعقيد الكامل للبِنية الإلكترونية لذرة التنجستين. في الواقع، توجد 20 طاقة محتملة مختلفة يمكن أن تكون لدى الإلكترون في ذرة التنجستين. ولا يمكن تمثيل هذه الطاقات بسهولة في شكل بسيط، وليس من الضروري فهم تفاصيل بِنية مستويات طاقة الإلكترونات لفهم المبادئ الأساسية لتوليد الأشعة السينية.

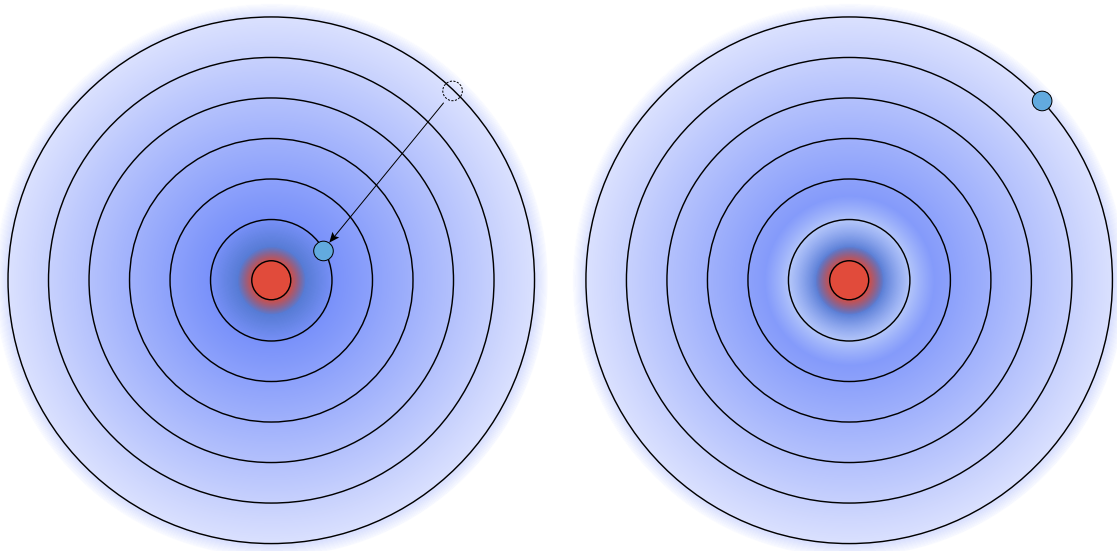
لنتناول كيف يمكن أن ينتقل إلكترون عالي الطاقة في ذرة التنجستين إلى مستوى طاقة منخفض.

لنفترض أن إلكترونًا قريبًا جدًّا من النواة تحرَّر من الذرة. ومن ثمَّ، قلَّت كثافة الإلكترونات القريبة من النواة، كما هو موضَّح في الشكل الآتي.



يمكن أن تنتقل الآن إلكترونات الذرة التي لها طاقة أعلى من طاقة الإلكترون المتحرِّر؛ لتملأ مستوى طاقة الإلكترون المتحرر.

يوضِّح الشكل الآتي انتقال إلكترون عالي الطاقة إلى مستوى طاقة منخفض.

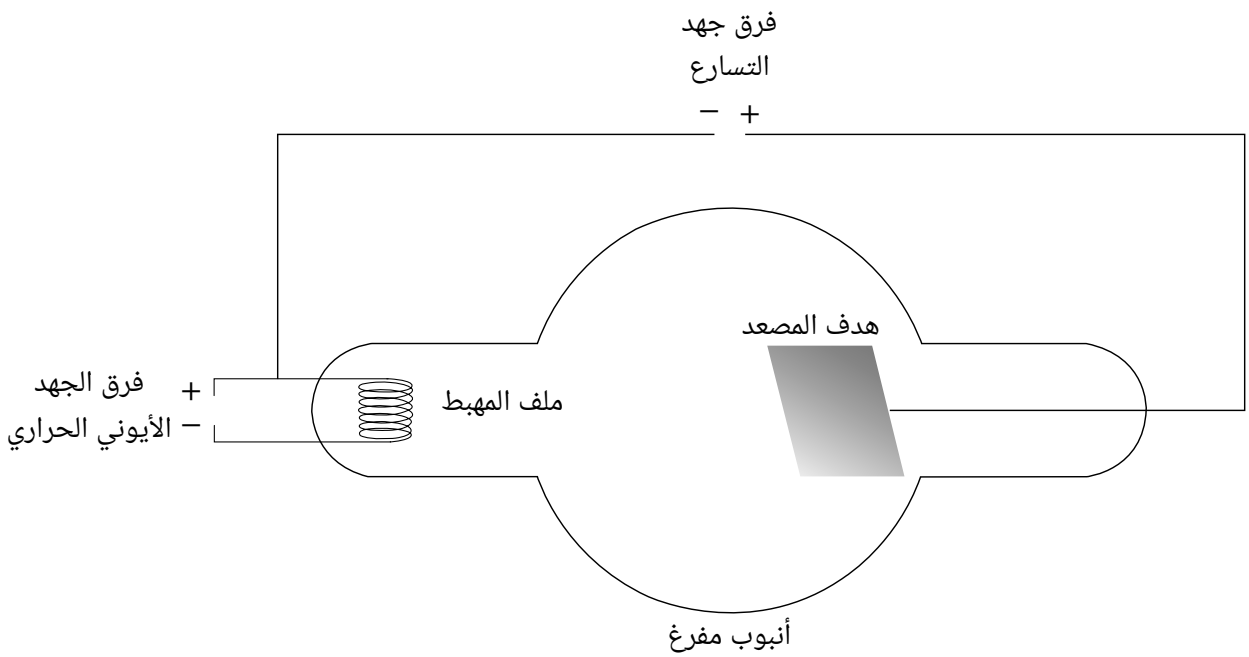


قبل الانتقال

بعد الانتقال

لقد عرفنا أنه يمكن توليد الأشعة السينية بتحرير الإلكترونات الموجودة في مستويات طاقة منخفضة من الذرات. وسنتناول الآن كيف يمكن تحقيق ذلك.

أنبوب كولِدج هو أداة تُستخدم لتوليد الأشعة السينية. ويوضِّح الشكل الآتي أنبوب كولِدج.



يحتوي أنبوب كولِدج على مصعد ومهبط داخل أنبوب مُفرَّغ. ومن ثمَّ، فالمبدأ الأساسي لأنبوب كولِدج هو إنتاج فرق جهد عبر المهبط والمصعد داخل فراغ. ويُسمى فرق الجهد هذا فرق جهد التسارع.

مهبط أنبوب كولِدج عبارة عن ملف. والملف موصَّل أيضًا بفرق جهد ثانٍ، يُسمَّى فرق الجهد الأيوني الحراري.

يوفِّر فرق الجهد الأيوني الحراري للملف طاقة تتبدَّد داخل الملف، وهو ما يؤدي إلى زيادة درجة حرارة الملف. وعند الوصول لدرجة حرارة كبيرة بما يكفي في الملف، تصبح لدى بعض الإلكترونات الحرة الموجودة في الملف سرعات كبيرة بما يكفي لتتحرر تلك الإلكترونات من الملف. ويُسمَّى هذا الانبعاث بالتأيُّن الحراري، حيث إنه يمثِّل عملية تأيُّن للذرات بالحركة الحرارية للإلكترونات الحرة.

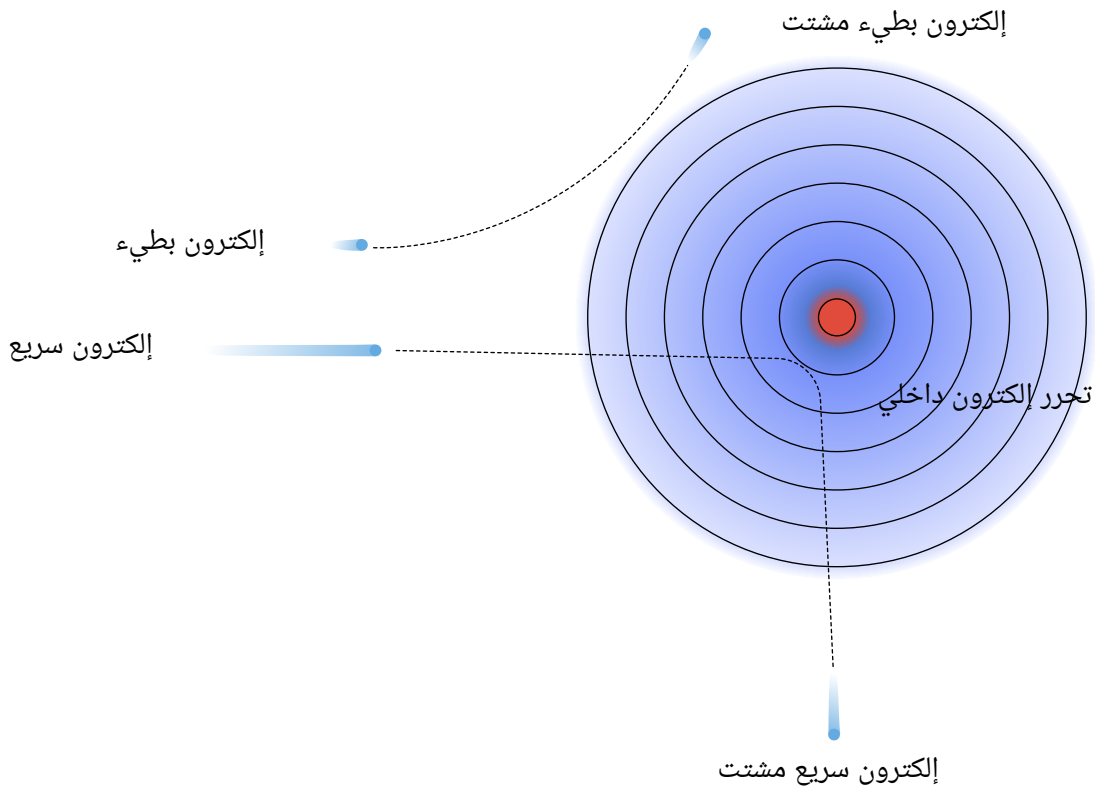
لقد ذكرنا سابقًا أنه يمكن تحفيز توليد الأشعة السينية بتحرير الإلكترونات من الذرات. ولكن تحرير الإلكترونات الحرة من الملف ليس هو ما يولِّد الأشعة السينية. ويرجع السبب في ذلك إلى ما يأتي:

- يتطلب توليد الأشعة السينية الناتج عن تحرُّر الإلكترونات أن تتحرر الإلكترونات من مستويات طاقة منخفضة في الذرات. والإلكترونات الحرة الموجودة في الملف تنبعث من مستويات طاقة عالية في الذرات.
- الإلكترونات المنبعثة بالتأيُّن الحراري لم تعد مرتبطة بالذرات بعد انبعاثها، لذا لا تنتقل إلى مستوى طاقة أي ذرة.
- لا تحتوي الذرات الموجودة في الملف على مستويات طاقة منخفضة فارغة لتنتقل إليها الإلكترونات المنبعثة.

يتطلب توليد الأشعة السينية تسارُع الإلكترونات المنبعثة بالتأيُّن الحراري من المهبط إلى المصعد. ويُسرِّع فرق جهد التسارع هذه الإلكترونات. وتتحرك الإلكترونات المُسَرَّعة في الفراغ، ومن ثم لا تَفقد طاقةً نتيجة التصادمات مع ذرات الغاز أثناء حركتها نحو هدف المصعد.

يُصنع الهدف في أنبوب كولِدج من عنصر مثل التنجستين أو الروديوم أو الموليبدينوم. ودعونا نتذكر أن انتقالات طاقة الإلكترون في ذرات هذه العناصر يمكن أن تولِّد فوتونات أشعة سينية إذا تَحرَّر منها إلكترون ذو مستوى طاقة منخفض.

يجب أن تتحرك إلكترونات المهبط التي تصطدم بالهدف بسرعة كبيرة للغاية لكي تُحرِّر إلكترونات مستوى طاقة منخفض. يقارن الشكل الآتي بين تفاعل إلكترون بطيء وإلكترون سريع مع ذرة من ذرات الهدف.



تُبعِد الإلكتروناتُ الموجودة داخل الذرة الإلكتروناتِ التي تصطدم بالذرة من خارجها.

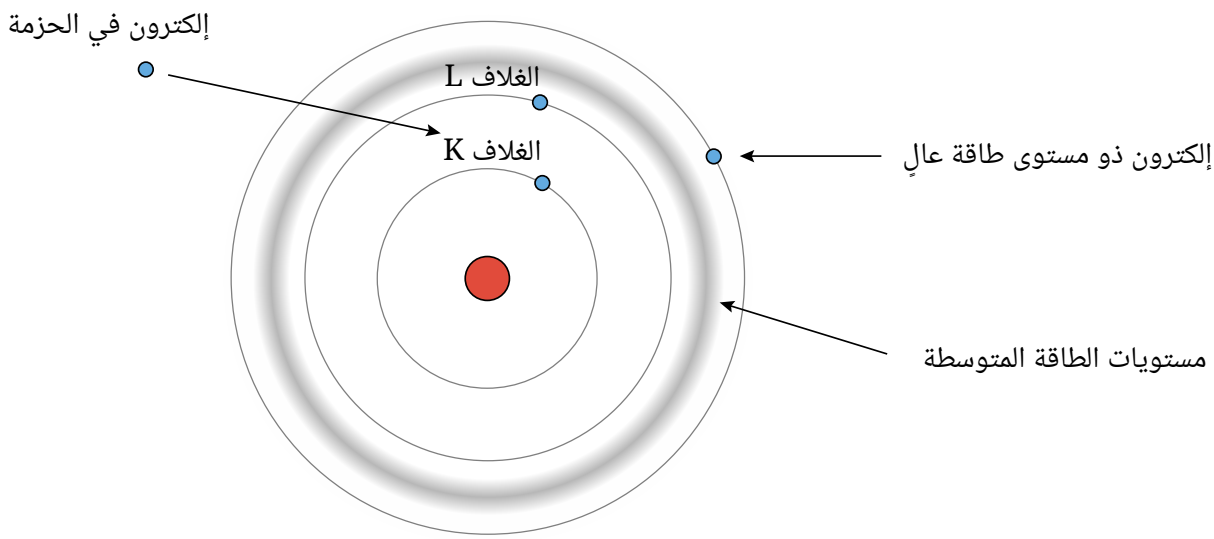
بالنسبة إلى الإلكترون البطيء، تُحوِّل قوة التنافر مسار الإلكترون بعيدًا عن الذرة دون أن يقترب الإلكترون بما يكفي من أي إلكترونات مستوى طاقة منخفض ليتفاعل معها.

أما الإلكترون السريع فتكون له كمية حركة ابتدائية كافية، بحيث تُحوِّل قوة التنافر الناتجة عن الإلكترونات الموجودة في الذرة مسار الإلكترون بعيدًا عن الذرة أيضًا، لكن بعد قطع الإلكترون مسافة كافية داخل الذرة ليتفاعل مع إلكترون مستوى الطاقة المنخفض. يمكن إذن أن يَنقل الإلكترون السريع طاقة إلى إلكترون مستوى الطاقة المنخفض فيُحرِّره من الذرة.

لنتناول الآن مثالًا يتضمن تولُّد الأشعة السينية بتحرر الإلكترونات.

مثال ١: مقارنة طاقة فوتونات الأشعة السينية المتولدة نتيجة انتقالات الإلكترونات بين مستويات الطاقة

يوضِّح الشكل ذرة في مادة الهدف المستخدمة في أنبوب كولِدج يولد الأشعة السينية. يمكن لإلكترون من حزمة الإلكترونات المستخدمة في الأنبوب أن يُحرِّر إلكترونًا من الغلاف K أو الغلاف L للذرة. أيٌّ مما يأتي يَنتج عنه انبعاث فوتون أشعة سينية من الذرة بطاقة أكبر؟



أ. تحرر إلكترون من الغلاف K للذرة.

ب. تحرر إلكترون من الغلاف L للذرة.

جـ. طاقة فوتون الأشعة السينية المنبعث من الذرة ستكون لها قيمة ثابتة أيًّا كان الإلكترون المتحرر.

د. طاقة فوتون الأشعة السينية المنبعث من الذرة ستعتمد على الطاقة الابتدائية لإلكترون الحزمة، وأيضًا على أيُّ إلكترون من إلكترونات الذرة سيتحرر.

الحل

تُعطى طاقة فوتون الأشعة السينية المنبعث، E ، بالمعادلة:

$$E = E_{\text{الابتدائية}} - E_{\text{النهائية}},$$

حيث يمثِّل $E_{\text{الابتدائية}}$ و$E_{\text{النهائية}}$ مستويَي طاقة إلكترون الذرة الذي ينتقل من مستوى طاقة أعلى إلى مستوى طاقة أقل.

يتحرر إلكترون من الذرة بواسطة إلكترون من حزمة الإلكترونات التي تصطدم بهدف أنبوب كولدج.

طاقة إلكترون الحزمة يجب أن تكون كافية لتحرير إلكترون من الذرة. وهذه هي السمة الضرورية الوحيدة لطاقة إلكترون الحزمة. حيث إن طاقة فوتون الأشعة السينية لا تأتي من طاقة إلكترون الحزمة. ومن المفيد ملاحظة أن المعادلة:

$$E = E_{\text{الابتدائية}} - E_{\text{النهائية}}$$

لا تحتوي على حد يتعلق بطاقة إلكترون الحزمة. ومن ثم يمكننا استبعاد الخيار القائل بأن طاقة فوتون الأشعة السينية المنبعث من الذرة ستعتمد على الطاقة الابتدائية لإلكترون الحزمة، وأيضًا على أي إلكترون من إلكترونات الذرة سيتحرر.

توضِّح هذه المعادلة أن طاقة فوتون الأشعة السينية تعتمد على الفرق في الطاقة بين مستوى الطاقة الابتدائي ومستوى الطاقة النهائي لإلكترون الذرة الذي تنخفض طاقته.

أكبر انخفاض في الطاقة يمكن أن يحدث نتيجة تغيير إلكترون لمستوى طاقته، هو ذلك الذي يحدث أثناء انتقال إلكترون مستوى الطاقة العالي الموضَّح إلى مستوى طاقة الإلكترون المتحرر. ونلاحظ من السؤال أن الإلكترونين المتحررين المحتملين لهما مستويا طاقة مختلفان. فإلكترون الغلاف L له طاقة أكبر من إلكترون الغلاف K.

ومن ثم نلاحظ أن المعادلة:

$$E = E_{\text{الابتدائية}} - E_{\text{النهائية}}$$

يمكن أن يكون لها القيمة:

$$E = E_{\text{الابتدائية}} - E_{\text{L}}$$

أو القيمة:

$$E = E_{\text{الابتدائية}} - E_{\text{K}},$$

حيث:

$$E_{\text{L}} > E_{\text{K}}.$$

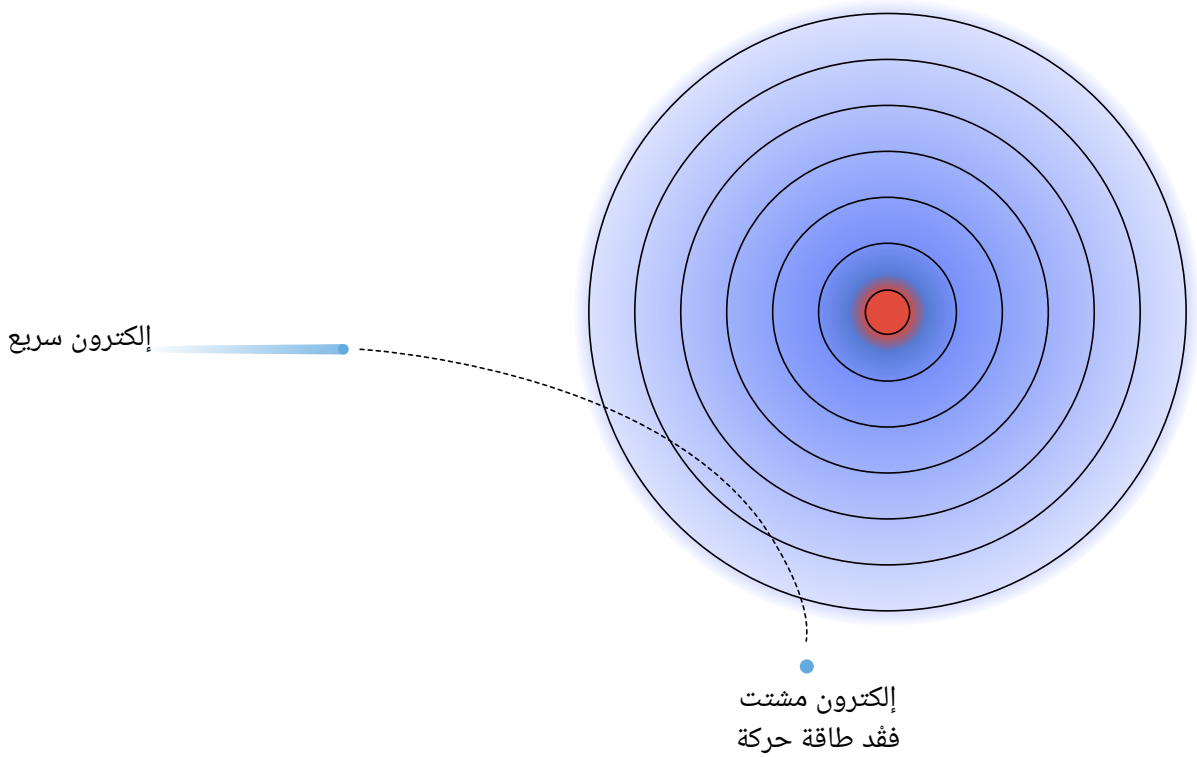
ونلاحظ من هذا أن:

$$E_{\text{الابتدائية}} - E_{\text{K}} > E_{\text{الابتدائية}} - E_{\text{L}}.$$

وهذا يخبرنا بأن طاقة الفوتون تكون أكبر عند انتقال إلكترون مستوى الطاقة العالي إلى الغلاف K مقارنةً بانتقاله إلى الغلاف L.

إذن، الإجابة الصحيحة هي تحرر إلكترون من الغلاف K للذرة.

عرفنا كيف يمكن توليد الأشعة السينية بانتقال الإلكترونات بين مستويات الطاقة في الذرات. ومع ذلك، يمكن أيضًا توليد الأشعة السينية حين تنخفض طاقة الإلكترونات الحرة. فمن الممكن ألا يُحرِّر إلكترون سريع إلكترونًا من الذرة التي يتفاعل معها. وفي هذه الحالة، يظل الإلكترون السريع متأثرًا بقوى التنافر من الذرة، ومن ثم يمكن أن تنخفض طاقته أيضًا. ويوضِّح الشكل الآتي ذلك.



يمكن لمقدار طاقة الإلكترون الحر التي انخفضت أن تنبعث في صورة فوتون منفرد. وفي هذه الحالة، تكون أقصى طاقة للفوتون المنبعث هي الطاقة الابتدائية للإلكترون الحر. وهذا يناظر تَساوي الانخفاض في طاقة الإلكترون الحر مع طاقته الابتدائية. تُسمى الأشعة السينية المنبعثة، غير الناتجة عن تحرر إلكترونات من ذرات، أشعة الانكباح السينية. فكلمة «bremsstrahlung» هي كلمة ألمانية تعني «الانكباح».

من المناسب استخدام وحدة الإلكترون فولت (eV) عند التعامل مع طاقة الإلكترونات المُسرَّعة. الإلكترون فولت يساوي الشغل المبذول، W ، على إلكترون تم تسريعه بفرق جهد مقداره فولت واحد. وهذا يُعطى بوحدة الجول بالعلاقة:

$$W \text{ جول} = \text{E كولوم} \times \text{فولت واحد} = \text{E جول},$$

حيث E يساوي تقريبًا 1.6×10^{-19} .

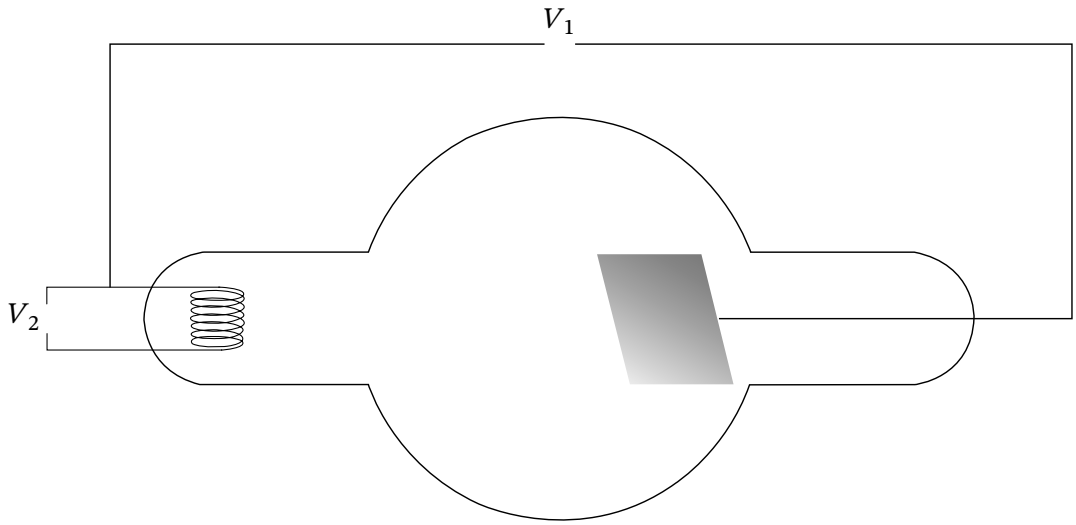
ومن ثم نلاحظ أن:

$$1 \text{ eV} \approx 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}.$$

لنتناول الآن مثالًا يتضمن طاقة فوتونات الأشعة السينية المتولدة بأنبوب كولِدج.

مثال ٢: إيجاد الطاقة القصوى للأشعة السينية المتولِّدة من أنبوب كولِدج

يوضِّح الشكل أنبوب كولِدج المُستخدَم لتوليد الأشعة السينية. فرق الجهد $V_1 = 60 \text{ kV}$ وفرق الجهد $V_2 = 12 \text{ V}$. ما الطاقة القصوى للأشعة السينية التي يمكن أن يولدها الأنبوب؟



الحل

الطاقة القصوى للأشعة السينية التي يمكن أن يولدها أنبوب كولِدج تساوي طاقة الإلكترونات، التي يسرِّعها الأنبوب، عندما تصل إلى الهدف.

وعند وصولها إلى الهدف، تساوي طاقة الإلكترونات المُسرَّعة الطاقة المنتقلة إليها بواسطة فرق الجهد الذي يسرِّعها.

يوضِّح الشكل فرقَي الجهد، $V_1 = 60\ \text{kV}$ و$V_2 = 12\ \text{V}$.

قيمة V_1 هي $60\ \text{kV}$. وهي تساوي 60 كيلو فولت، أو 60 000 فولت.

فرق الجهد المُطبَّق عبر مهبط ومصعد أنبوب كولِدج، ومن ثمَّ فرق الجهد الذي يسرِّع الإلكترونات، هو V_1. ومن ثمَّ، تُعطى أقصى طاقة للإلكترونات بالعلاقة:

$$W \text{ جول} = \text{E كولوم} \times 60\,000\ \text{V} = 60\,000\text{E جول}.$$

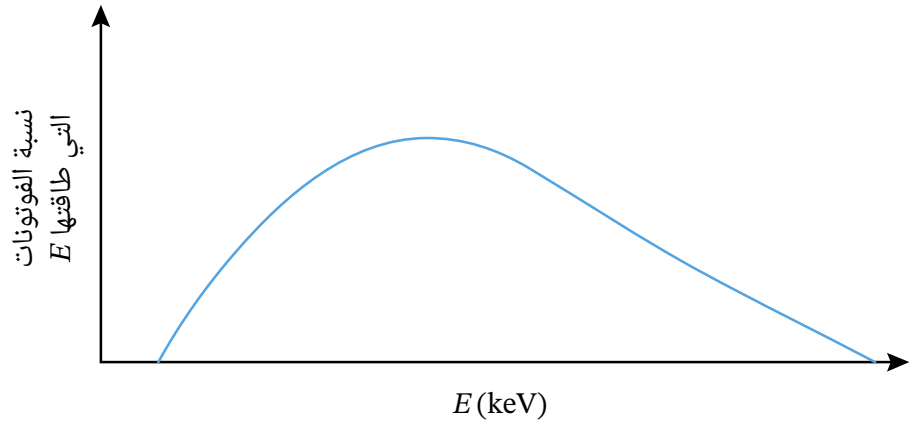
ويمكن التعبير عن هذا أيضًا بـ 60 000 إلكترون فولت (eV)، أو 60 كيلو إلكترون فولت (keV).

عرفنا إذن أن فوتون الأشعة السينية يمكن أن يناظر إلكترونًا حرًّا تنخفض طاقته من طاقته الابتدائية إلى صفر. بالإضافة إلى ذلك، هناك احتمالان آخران يجب أخذهما في الاعتبار:

- انخفاض طاقة الإلكترون الحر، لكن ليس إلى صفر.
- انبعاث أكثر من فوتون من الإلكترون الحر أثناء انخفاض طاقته.

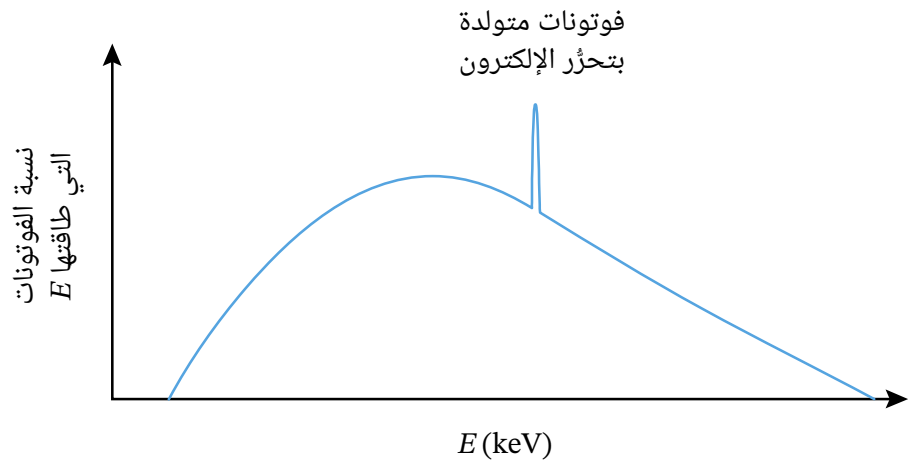
تعني هذه الاحتمالات أن طاقات فوتونات أشعة الانكباح السينية المنبعثة من أنبوب كولِدج يمكن أن تتباين، بناءً على مقدار انخفاض طاقة الإلكترونات الحرة، وعدد الفوتونات المنبعثة من الإلكترونات الحرة أثناء انخفاض طاقتها.

يوضِّح الشكل الآتي طيف فوتونات أشعة الانكباح السينية المتولدة من أنبوب كولِدج.



يمكننا أن نلاحظ من الطيف أن النهاية العالية الطاقة لِلطَّيف تمثِّل أقصى طاقة للفوتون يمكن أن يولدها الأنبوب، وهي تناظر طاقة الإلكترونات المُسرَّعة.

لا يتضمن هذا الطيف فوتونات الأشعة السينية الناتجة عن تحرر الإلكترونات. ويوضِّح الشكل الآتي طيف أنبوب كولِدج آخر. يحتوي الطيف على «قفزة» توضِّح مدًى ضيقًا جدًّا من طاقات الفوتون التي تتولد ضمنها فوتونات أكثر من تلك المتولدة ضمن طاقات مماثلة خارج المدى الضيق.



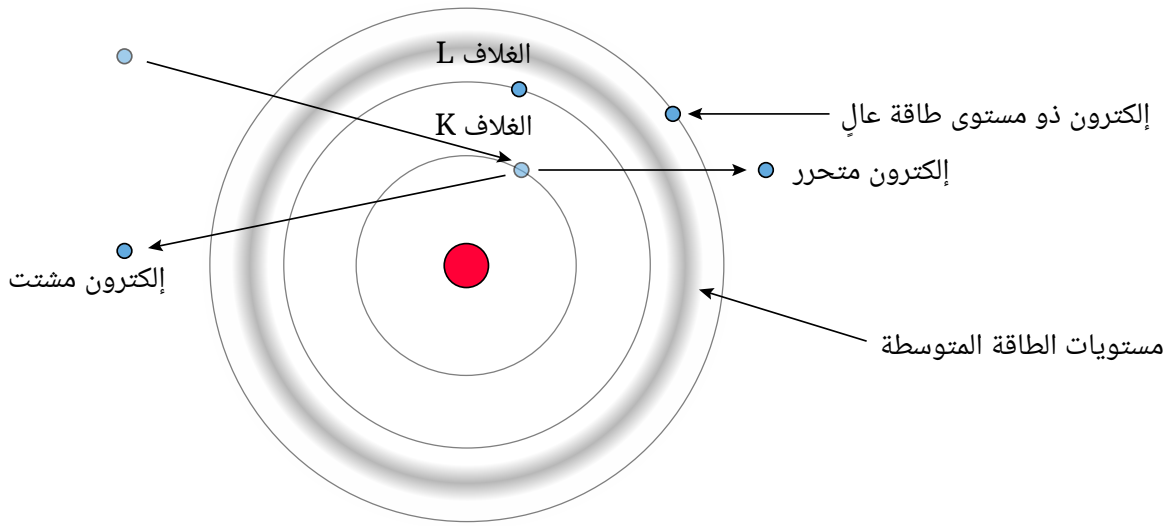
وتَظهر تلك القفزة في الطيف بسبب انتقالات طاقة الإلكترون الناتجة عن تحرر الإلكترون. وتناظر طاقات القفزة الانتقالات بين مستويات طاقة الإلكترون في الذرة. وتضاف نسبة الفوتونات المتولدة عن هذه الانتقالات إلى نسبة فوتونات أشعة الانكباح التي لها هذه الطاقة.

تُسمى هذه القفزة بالخط المُميز لِلطَّيف. ومن المهم أن نلاحظ أن القفزة لها عرض ما، وأنها ليست خطًّا بالمعنى الحرفي. وقد يبدو هذا غير متَّسق مع فكرة أن هناك مجموعة محددة من مستويات الطاقة داخل الذرة، لكنه يتسق مع فكرة أن الجسم يتكون من عدة ذرات. في جسم كهذا، ينقسم مستوى الطاقة المرتبط بالذرة إلى مدًى من مستويات الطاقة المتقاربة للغاية، لكنها تظل مختلفة.

لنتناول الآن مثالًا يتضمن تولُّد الخطوط المميزة.

مثال ٣: تحديد التغيُّر في طاقة إلكترون يولِّد خطًّا طيفيًّا سينيًّا مميزًا

يوضِّح الشكل ذرة في مادة الهدف في أنبوب كولِدج يولِّد الأشعة السينية. يُحرِّر إلكترون من حزمة الإلكترونات المستخدمة في الأنبوب إلكترونًا من الغلاف K للذرة، ويتشتت. يمكن أن ينتقل إلكترون مستوى الطاقة العالي، أو إلكترون الغلاف L، إلى الغلاف K. أيُّ إلكترون سيولد فوتونًا يمثِّل جزءًا من خط الطيف المميز وبطاقة أقرب إلى القيمة القصوى لطاقة الطيف؟



أ. الإلكترون ذو مستوى الطاقة العالي

ب. الإلكترون المتحرر

جـ. الإلكترون المشتت

د. إلكترون الغلاف L

هـ. جميع الإلكترونات

الحل

الخط المميز لِطَيف الأشعة السينية عبارة عن مدًى ضيق للغاية من طاقات الفوتون التي تتولد ضمنها فوتونات أكثر من تلك المتولدة ضمن طاقات مماثلة خارج هذا المدى الضيق.

يتولد المزيد من الفوتونات في المدى الضيق من الطاقات؛ لأن الفوتونات التي لها هذه الطاقات يمكن توليدها بواسطة إلكترونات أشعة الانكباح، وكذلك بواسطة تحرُّر الإلكترونات من الذرات.

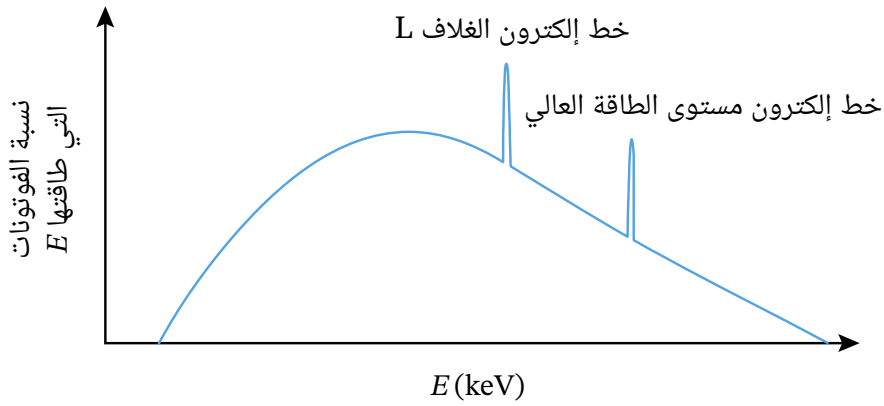
الخط المميز لِلطَّيف مهم لأنه يولِّد فوتونات تقع في مدى تردد محدود يتجاوز تولُّد أشعة الانكباح لتلك الترددات. وبالتالي، لا تُعد عملية تولُّد أشعة الانكباح جزءًا من الخط المميز.

وهذا يعني أن هذه الحالة ليست الحالة التي يساهم فيها الإلكترون المشتت في الخط المميز، ومن ثم لا يمكن أن تكون أيضًا هي الحالة التي تكون فيها كافة الإلكترونات الموجودة في الشكل ضمن الخط المميز.

يمكن أن يولد الإلكترون المتحرر أشعة الانكباح السينية، لأن طاقته قد تنخفض بعد تحرره. ومثل هذه الأشعة السينية ليست جزءًا من الخط المميز.

وهذا يترك خيار الإلكترون ذي مستوى الطاقة العالي أو خيار إلكترون الغلاف L.

يتمثَّل الفرق بين هذين الإلكترونين فيما يخص الانتقال إلى الغلاف K، في أن طاقة إلكترون مستوى الطاقة العالي تنخفض أكثر من طاقة إلكترون الغلاف L. ومن ثم، يكون لفوتون الأشعة السينية المتولد بانتقال إلكترون مستوى الطاقة العالي طاقةٌ أكبر. يوضِّح الشكل الآتي الموضعين المحتملين للخطوط المميزة.



لا يمكن أن يكون للخط المميز لِطَيف الأشعة السينية قيمة طاقة أكبر من القيمة القصوى لطاقة الطيف. وهذا يعني أن خط إلكترون مستوى الطاقة العالي يجب أن يكون أقرب إلى القيمة القصوى لطاقة الطيف.

إذن، الإجابة الصحيحة هي أن إلكترون مستوى الطاقة العالي سيولد فوتونًا يمثِّل جزءًا من الخط المميز الذي له طاقة أقرب إلى القيمة القصوى لطاقة الطيف.

لقد حددنا الآن عاملين يؤثران على طيف الأشعة السينية المتولد بواسطة أنبوب كولدج:

- مادة الهدف المستخدمة في الأنبوب
- فرق جهد التسارع

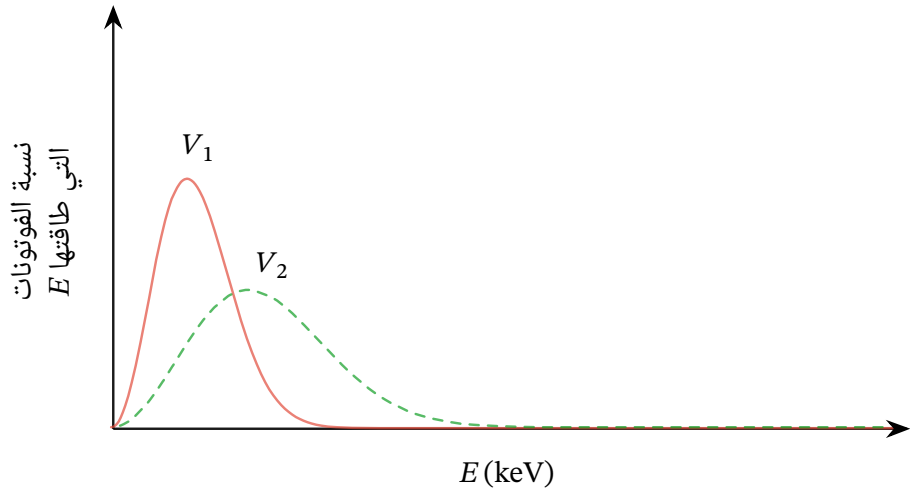
عرفنا أن مادة الهدف المستخدمة تُحدِّد الخطوط المميزة التي يمكن أن تكون موجودة في الطيف.

وعرفنا أن فرق جهد التسارع يحدِّد القيمة القصوى لطاقة الطيف.

للتوضيح على نحو أكمل، يحدِّد فرق جهد التسارع أيضًا الطاقة التي تتولد عندها أكبر نسبة من الفوتونات.

يوضِّح الشكل الآتي طيفين لفوتونات أشعة الانكباح لاثنين من أنابيب كولِدج باستخدام فرقَي جهد تسارع V_1 وV_2 حيث:

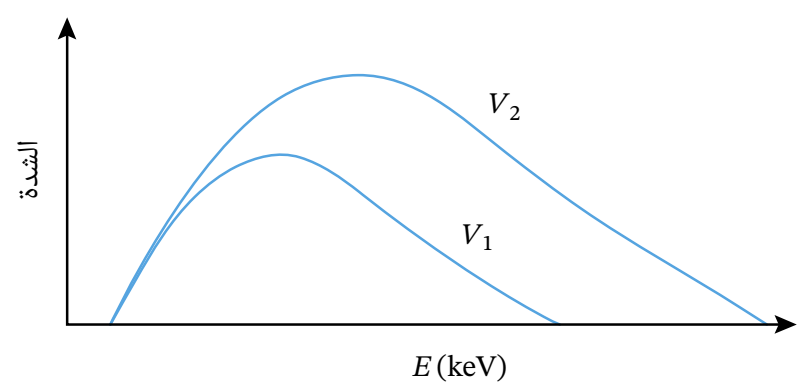
$$V_2 > V_1.$$



نلاحظ أن هذين الطيفين يتخذان شكل التلِّ بعض الشيء. قمة تلِّ الطيف الذي له قيمة طاقة قصوى أكبر تناظر قيمة طاقة أكبر من قمة تلِّ الطيف الذي له قيمة طاقة قصوى أقل.

من المهم ملاحظة أن التمثيل البياني المستخدم لمقارنة هذين الطيفين لا يوضِّح شدة إشعاع الأشعة السينية المنبعثة من أنبوب كولِدج عند طاقات مختلفة، وإنما يوضِّح فقط توزيعات طاقات الفوتونات التي تكوِّن الإشعاع المنبعث.

إذا تمت مقارنة شدة إشعاع الأشعة السينية بالنسبة إلى V_1 وV_2 سنلاحظ أن شكلَي الطيفين يتأثران كما في الشكل الآتي.



يمكننا أن نفهم الفرق بين شكلَي الطيفين هُنا بالنظر إلى طاقة الإلكترونات التي تولدهما. تنبعث أشعة الانكباح السينية من الإلكترونات عندما تنخفض طاقة هذه الإلكترونات. وتعني زيادة الطاقة الابتدائية لهذه الإلكترونات أن هذه الإلكترونات يمكن أن تغيِّر الطريقة التي تبعث بها الفوتونات بطريقتين مختلفتين:

- يمكن أن يبعث الإلكترون فوتونًا ذا طاقة أكبر.
- يمكن أن ينبعث عدد أكبر من فوتونات لها طاقة معينة.

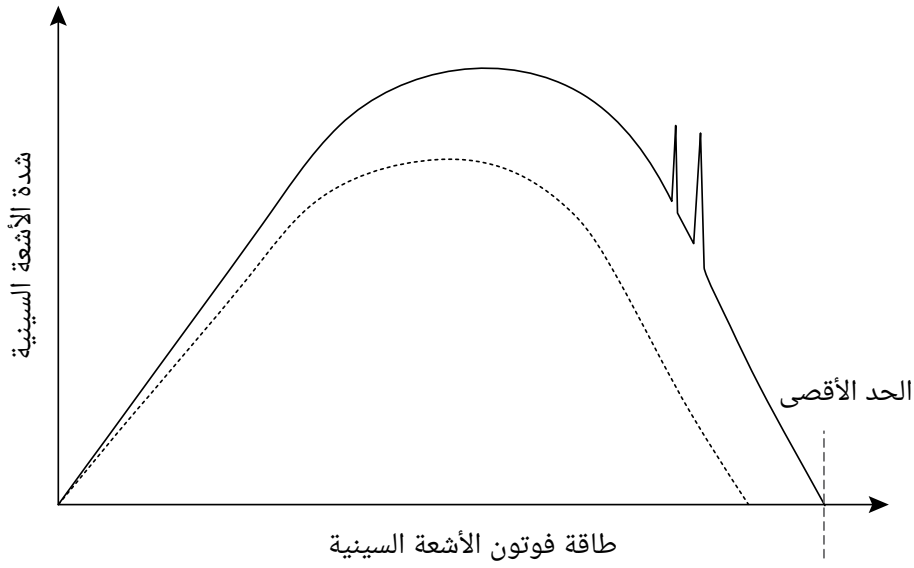
تعتمد شدة إشعاع الأشعة السينية المنبعثة بطاقة معينة من أنبوب كولِدج على كلٍّ من عدد الفوتونات المتولدة بطاقة معينة وطاقة الفوتونات.

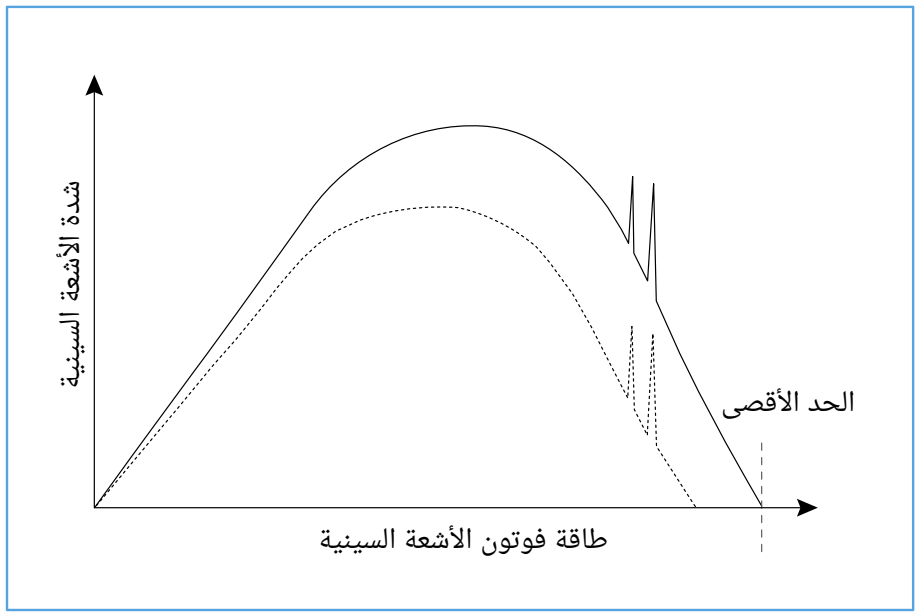
من المهم أيضًا ملاحظة أن أي إلكترون له طاقة ابتدائية أكبر يمكن أن يقترب بسهولة أكثر وبدرجة كافية من نواة الذرة لتحرير إلكترون من مستوى طاقة أقل، مقارنةً بإلكترون له طاقة ابتدائية أقل.

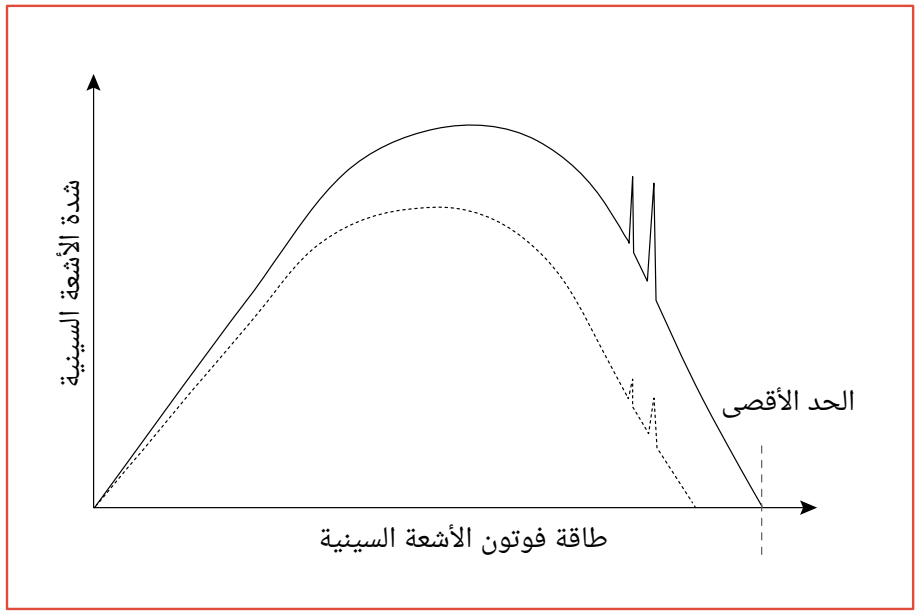
لنتناول الآن مثالًا يقارن بين جهد التسارع لأنبوب كولِدج وطيف الأشعة السينية للأنبوب.

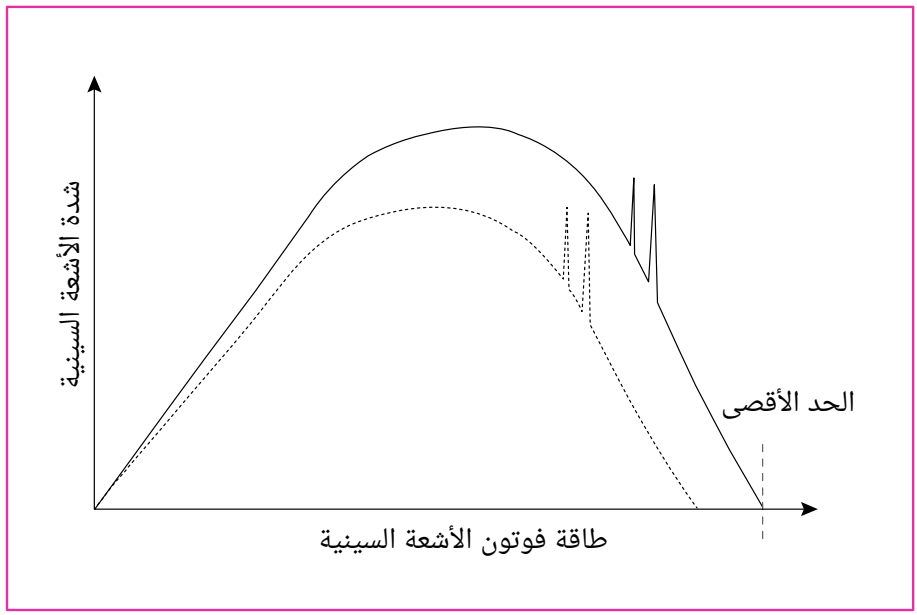
مثال ٤: مقارنة فرق جهد التسارع لأنبوب كولِدج بالخطوط الطيفية المميزة المتولدة منه

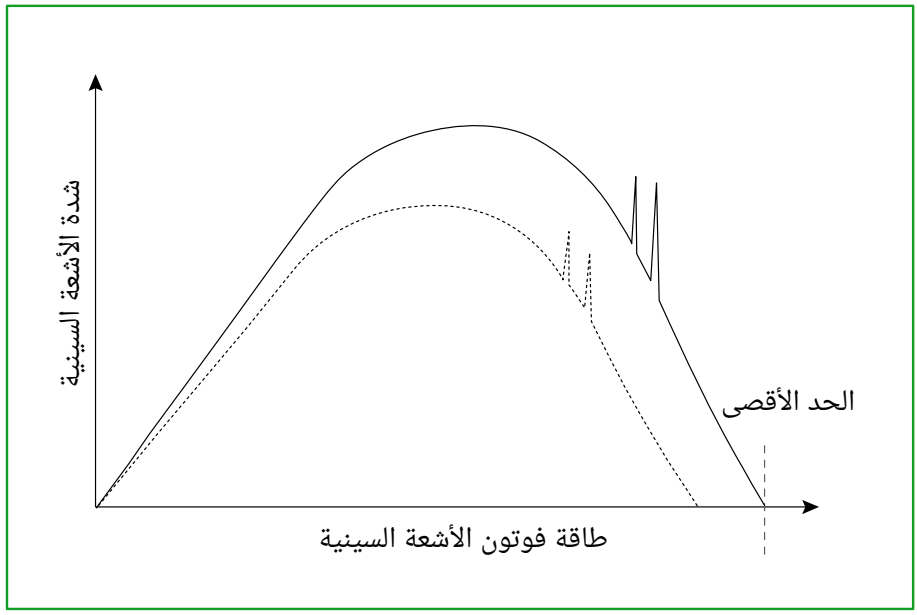
يوضِّح الخط المتصل على التمثيل البياني الشدة النسبية للأشعة السينية في طيف الأشعة السينية لمختلف طاقات فوتون الأشعة السينية الناتجة عن اصطدام حزمة من الإلكترونات بالهدف. يوضِّح الخط المُنقَّط على التمثيل البياني أشعة الانكباح التي ستَنتج عن اصطدام حزمة إلكترونات بالهدف نفسه، لكن عند تسارعها عبر فرق جهد أقل. أيٌّ مما يأتي يوضِّح توضيحًا صحيحًا الخطوط المميزة التي سيتم رصدها عند استخدام حزمة الإلكترونات ذات الجهد الأقل؟

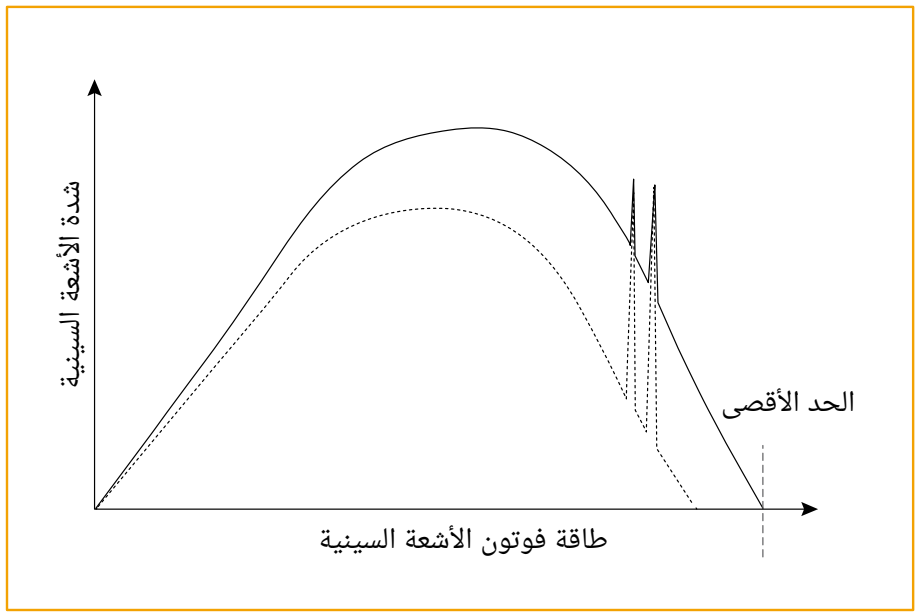



شدة الأشعة السينية
الحد الأقصى
طاقة فوتون الأشعة السينية


شدة الأشعة السينية
الحد الأقصى
طاقة فوتون الأشعة السينية


شدة الأشعة السينية
الحد الأقصى
طاقة فوتون الأشعة السينية


شدة الأشعة السينية
الحد الأقصى
طاقة فوتون الأشعة السينية



الحل

الخطوط المميزة لِطَيف الأشعة السينية لها قيم طاقة ثابتة بفعل مادة الهدف المستخدمة في أنبوب كولِدج. ولا يمكن أن يؤدي تغيير فرق الجهد الذي يُسرِّع الإلكترونات إلى تغيير هذه الطاقة.

وهذا يعني أن موضع الخطوط المميزة على محور الطاقة في الرسم البياني لا يمكن أن يتغير. ومن ثم، يمكن استبعاد التمثيلين البيانيَّين الموضَّحين بالإطارين الوردي والأخضر.

توضِّح جميع التمثيلات البيانية المتبقية خطوطًا مميزة ذات طاقات صحيحة. لكن شدة الخطوط مختلفة في كل تمثيل بياني.

يمكننا ملاحظة ما يأتي:

- في التمثيل البياني ذي الإطار الأزرق، انخفضت شدة القيمة القصوى للخطوط المميزة بنفس المقدار تقريبًا الذي انخفضت به شدة أشعة الانكباح لهذه الطاقات.
- في التمثيل البياني ذي الإطار الأصفر، لم تنخفض شدة القيمة القصوى للخطوط المميزة.
- في التمثيل البياني ذي الإطار الأحمر، انخفضت شدة القيمة القصوى للخطوط المميزة بمقدار أكبر بكثير من انخفاض شدة أشعة الانكباح لهذه الطاقات.

لكي نحدِّد أيٌّ من هذه التمثيلات البيانية الثلاثة صحيح، علينا التفكير في النقاط الآتية.

الخطوط المميزة لها قيم طاقة أقل من طاقة الفوتون القصوى التي تولدها الإلكترونات بعد انخفاض فرق جهد التسارع. وهذا يعني أنه بعد انخفاض فرق الجهد، تظل لدى الإلكترونات طاقة كافية لتحرير الإلكترونات من الذرات، وتوليد خطوط

طيفية مميزة. ومن ثم نلاحظ أن إلكترونات الحزمة التي ستحرر الإلكترونات من ذرات الهدف ستظل تفعل ذلك بعد انخفاض فرق جهد التسارع. نفترض هنا أن إلكترونات الحزمة كلها متساوية في الطاقة.

خفض فرق الجهد الذي يُسرِّع الإلكترونات، لا يقلل عدد الإلكترونات في حزمة الإلكترونات، وإنما يقلل فقط طاقة الإلكترونات. لا يقل عدد إلكترونات الحزمة التي حَرَّرَت الإلكترونات من الذرات ابتداءً بانخفاض طاقة الإلكترونات، وذلك شريطة أن تظل لدى إلكترونات الحزمة طاقة كافية لتحرير الإلكترونات. نفترض كذلك أن الإلكترونات المتحررة من الذرات تحررت من مستويات الطاقة نفسها قبل انخفاض فرق الجهد وبعده.

بوضع هذه النقاط في الاعتبار، نتوقع أن تنخفض شدة الطيف عند طاقات الخطوط المميزة؛ فقط بسبب الانخفاض في شدة أشعة الانكباح الناتج عن انخفاض فرق جهد التسارع لقيم الطاقة نفسها التي للخطوط المميزة.

يوضِّح التمثيل البياني ذو الإطار الأصفر أنه لا يوجد انخفاض في شدة الخطوط المميزة، ومن ثم يمكننا استبعاده.

يوضِّح التمثيل البياني ذو الإطار الأزرق انخفاضًا في الشدة يساوي تقريبًا الانخفاض في شدة أشعة الانكباح. وقد يبدو أن هذا هو التمثيل البياني الصحيح، حيث لاحظنا أنه من المنطقي استنتاج أن الانخفاض في شدة أشعة الانكباح فقط يسبب انخفاضًا في شدة قيم طاقة الخطوط المميزة.

لكن يجب أن نفكر كذلك في أن ذرات الهدف تُبعِد الإلكترونات التي تقترب منها. ويجب أن يقترب الإلكترون من نواة الذرة لتحرير إلكترون بدلًا من أن تشتته الذرة. وهذا يعني أن يقل احتمال أن تُحرِّر الإلكترونات ذات الطاقة الأقل إلكترونًا من الذرة، على الرغم من أن لديها طاقة كافية للقيام بذلك. ومن ثم تولد الإلكترونات ذات الطاقة الأقل عددًا أقل من فوتونات الأشعة السينية لها قيمة طاقة الخط المميز.

يوضِّح التمثيل البياني ذو الإطار الأحمر انخفاضًا في الشدة عند طاقات الخطوط المميزة أكبر بكثير من الانخفاض في شدة أشعة الانكباح.

إذن، يمثِّل التمثيل البياني ذو الإطار الأحمر التغير في طيف الأشعة السينية تمثيلًا صحيحًا.

عرفنا أن شدة إشعاع الأشعة السينية المتولدة لطاقة معينة بواسطة أنبوب كولِدج تعتمد على عدد فوتونات الأشعة السينية المتولدة عند هذه الطاقة. ويُولَّد كلُّ فوتونِ أشعةٍ سينيةٍ بسبب انخفاض طاقة الإلكترون. ومن ثم يتأثَّر عدد فوتونات الأشعة السينية المتولدة لطاقة معينة بعدد الإلكترونات المنبعثة من مهبط أنبوب كولِدج.

معدل انبعاث الإلكترونات من مهبط أنبوب كولِدج هو مقدار تيار حزمة الإلكترونات الناتجة من المهبط. ويُسمى هذا تيار الحزمة.

يمكن تغيير تيار الحزمة بتغيير فرق الجهد الأيوني الحراري. وكلما زاد فرق الجهد الأيوني الحراري، زادت الإلكترونات المنبعثة بالتأيُّن الحراري، وزاد تيار الحزمة.

إن أقصى فرق جهد أيوني حراري يكون صغيرًا جدًّا مقارنةً بفرق جهد التسارع، لذا يكون لزيادة فرق الجهد الأيوني الحراري تأثير ضئيل على طاقات الإلكترونات المُسرَّعة التي تصطدم بالهدف.

لنتناول الآن مثالًا يتضمن تغيُّر تيار حزمة الإلكترونات في أنبوب كولِدج.

مثال ٥: تحديد تأثير تغيُّر تيار حزمة الإلكترونات على أنبوب كولِدج

أيٌّ من الآتي يجب أن يتغيَّر عند تغيُّر تيار حزمة الإلكترونات في أنبوب كولِدج؟

أ. معدل تولُّد فوتونات الأشعة السينية

ب. الطاقة القصوى لفوتونات الأشعة السينية المتولدة

ج. وجود الخطوط المميزة في طيف الأشعة السينية المتولدة

د. سرعة فوتونات الأشعة السينية المتولدة

هـ. الطاقة المتوسطة لفوتونات الأشعة السينية المتولدة

الحل

التيار هو معدل تدفق الشحنة. والإلكترونات الموجودة في حزمة الإلكترونات لأنبوب كولِدج مشحونة، ومن ثم يكون تيار الحزمة هو معدل تدفق هذه الإلكترونات.

تتمثل إحدى الطرق التي يمكن بها زيادة التيار في أن تتحرك الجسيمات المشحونة المتدفقة بسرعة أكبر. لكن لتتحرك الإلكترونات الموجودة في حزمة الإلكترونات بأنبوب كولِدج بسرعة أكبر، لا بد أن تزداد طاقتها. بوصف أدق، تكون زيادة طاقة الإلكترونات نتيجة لزيادة فرق جهد التسارع في أنبوب كولِدج، أكثر من كونها نتيجة لزيادة تيار الحزمة. حيث إن زيادة تيار حزمة الأنبوب فقط يجب ألا تتضمن تغيير طاقة إلكترونات الحزمة.

إذا لم تتغير طاقة إلكترونات الحزمة المستخدمة، فلا يمكن أن تتغير الطاقة القصوى والطاقة المتوسطة لهذه الإلكترونات. تنبعث الفوتونات من إلكترونات الحزمة عندما تنخفض طاقتها. ومن ثم نلاحظ أن الطاقة القصوى والطاقة المتوسطة للفوتونات المنبعثة من هذه الإلكترونات لن تتغير.

يعتمد توليد خطوط مميزة لِطَيف الأشعة السينية على بِنْية مستوى طاقة ذرات مادة الهدف، وعلى إذا ما كانت إلكترونات حزمة الأنبوب لديها طاقة كافية لتوليد خط مميز. ولا يتأثر أيٌّ من هذين العاملين بتغير تيار الحزمة.

تُناظر الزيادة في تيار الحزمة زيادة في المعدل الذي تتحرر به إلكترونات الحزمة من مهبط الأنبوب. فكلما زاد معدل تحرر هذه الإلكترونات، زاد معدل الإلكترونات التي تصطدم بالهدف. وكلما زاد معدل الإلكترونات التي تصطدم بالهدف، زاد معدل فوتونات الأشعة السينية المتولدة.

ومن ثم نرى أن الإجابة الصحيحة هي أن تغيُّر تيار حزمة الإلكترونات يُغيِّر معدل تولُّد فوتونات الأشعة السينية.

لنلخِّص الآن ما تعلمناه في هذا الشارح.

النقاط الرئيسية

- تَبعث الإلكتروناتُ التي تنخفض طاقتها انخفاضًا كافيًا فوتوناتِ الأشعة السينية.
- يمكن للإلكترونات الحرة والإلكترونات الموجودة داخل ذرات أن تبعث فوتونات الأشعة السينية عندما تنخفض طاقتها.

- يستخدم أنبوب كولِدج الانبعاث بالتأيُّن الحراري للحصول على إلكترونات حرة تكوِّن حزمة إلكترونات.
- يستخدم أنبوب كولِدج فرق جهد لتسريع حزمة الإلكترونات تجاه هدفٍ ما.
- يولِّد أنبوب كولِدج الأشعة السينية عندما تصطدم إلكترونات الحزمة بالهدف وتنخفض طاقتها.
- تولِّد الإلكترونات التي تتشتت من ذرات الهدف مدى طاقة متصلًا من فوتونات الأشعة السينية. ويُسمى ذلك بأشعة الانكباح.
- بعض الإلكترونات التي تصطدم بالهدف تُحرِّر إلكترونات من مستويات طاقة منخفضة في الذرات. ويتسبَّب ذلك في انتقال الإلكترونات من مستويات طاقة عالية إلى مستويات طاقة منخفضة، وهو ما ينتج عنه انبعاث فوتونات أشعة سينية ذات طاقات معينة. وتُسمَّى هذه الطاقات الخطوط المُميَّزة.
- زيادة فرق الجهد الذي يُسرِّع حزمة الإلكترونات تزيد الطاقة القصوى والطاقة المتوسطة لفوتونات الأشعة السينية. كما أنها تزيد أيضًا شدة الخطوط المُميَّزة.
- زيادة معدل الانبعاث بالتأيُّن الحراري تزيد تيار الحزمة. وهذا يزيد شدة جميع أجزاء طيف الأشعة السينية.