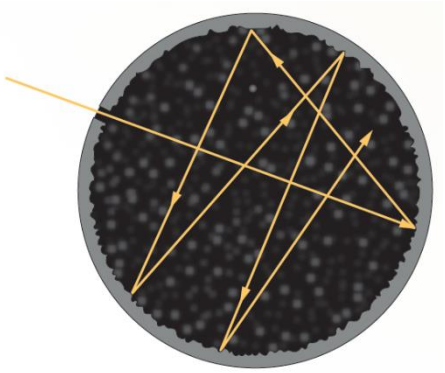
الفيزياء الحديثة

الدرسُ الأولُ: الطبيعة الجُسيميّة للضوء Particle Nature of Light

إشعاع الجسم الأسود Blackbody Radiation

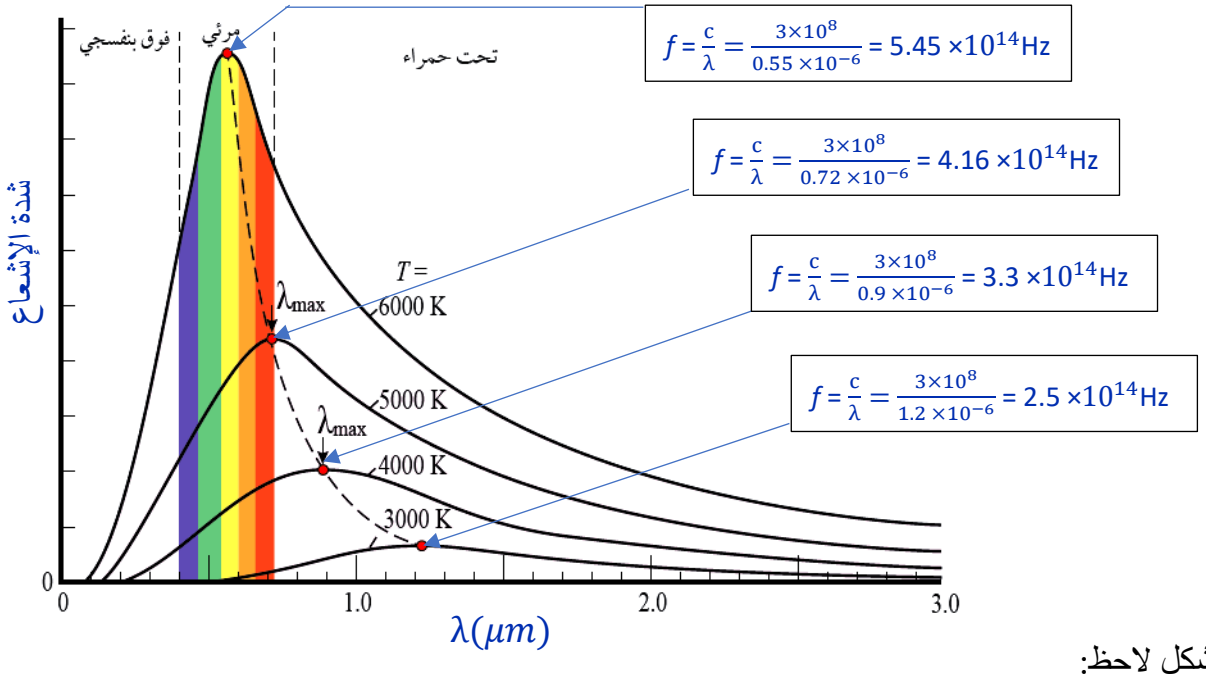
الجسم الأسود Blackbody : وهو عبارة عن جسم مثاليّ يمتصّ الأشعة الكهرومغناطيسية الساقطة عليه كلها بغضّ النظر عن تردّداتها، ويُشعّها أيضًا بالكفاءة نفسها. ويعتمد انبعاث الأشعة منه على درجة حرارته فقط.

ما هو سبب تسمية الجسم السود بهذا الاسم ؟
لأنّ الجسم الذي يمتص الأشعة الساقطة عليه كلها يكون أسود اللون.



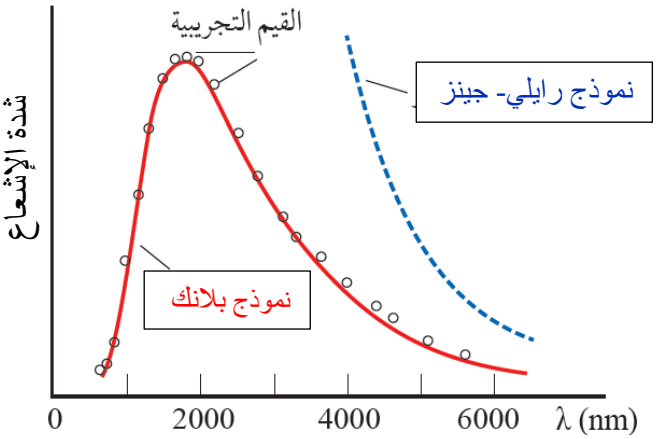
والشكل المجاور يوضّح تصوّرًا للجسم الأسود . ومن الشكل لاحظ:
1. ثقب صغير في جسم أجوف جدرانه الداخلية سوداء.
2. الأشعة التي تدخل الجسم من خلال الثقب تُمتصّ امتصاصًا كاملاً.

ويوضّح الشكل التالي علاقة شدّة الإشعاع المنبعِث من الجسم الأسود بالطول الموجيّ للأشعة المنبعِثة منه عند درجات حرارة مختلفة.



من الشكل لاحظ:
1. الرسم لشدة الإشعاع مع الطول الموجي (λ) .
2. قمّة منحنى شدّة الإشعاع تنزاح نحو الأطوال الموجية المنخفضة (λ_{max}) بارتفاع درجة حرارة الجسم الأسود.
3. قمّة منحنى شدّة الإشعاع تنزاح نحو الترددات العالية (f_{max}) بارتفاع درجة حرارة الجسم الأسود.

تفسير سلوك شدّة الإشعاع المنبعِث من الجسم الأسود



مقارنة نموذج رايلي-جينز ونموذج بلانك بالنتائج التجريبية لإشعاع الجسم الأسود.

a) نموذج رايلي- جينز

ملاحظات على نموذج رايلي – جينز

1. يمثل هذا النموذج الفيزياء الكلاسيكية .
2. امتصاص الطاقة يكون متصلاً ، أي أنّ الأجسام تُشعّ الطاقة، وتمتصّها بأيّ مقدا وعند أيّ تردّد.
3. أنّ الطاقة التي تحملها الموجة تعتمد على سعتها لا على تردّدها.
4. تؤول شدة الإشعاع إلى اللانهاية عندما يؤول الطول الموجي إلى الصفر (كارثة الأشعة فوق البنفسجية)
5. أظهر نموذج رايلي- جينز توافقًا مقبولًا مع النتائج التجريبيّة في منطقة الأطوال الموجيّة الكبيرة (الأشعة تحت الحمراء)، في حين أظهر عدم توافق في منطقة الأطوال الموجيّة القصيرة (كارثة الأشعة فوق البنفسجية).
6. تشع الأجسام ضوءًا مرئيًّا حتى عند درجة حرارة الغرفة، دون الحاجة الى تسخينها. وهذا يتعارض مع النتائج التجريبية .

b) نموذج ماكس بلانك

ملاحظات على نموذج ماكس بلانك:

1. يمثل هذا النموذج الفيزياء الحديثة (فيزياء الكم).
2. امتصاص الطاقة يكون غير متصل ، أي أنّ الأشعة الصادرة عن الأجسام ناتجة عن مُتذبذِبات الإلكترونات في الذرات مثلا وأنّ هذه المتذبذِبات تشعّ الطاقة أو تمتصّها بكميات محدّدة وغير متصلة.
3. تطابقت حساباته مع النتائج التجريبية تمامًا.
4. الطاقة التي تشعّها الأجسام أو تمتصّها عند تردّد معيّن تكون عددًا صحيحًا من مضاعفات طاقة الحزمة (الكمة) الواحدة ؛ وطاقة الكمة الواحدة يُعبَّر عنها بالعلاقة الآتية:

$$E = hf$$

حيث (h) : ثابت بلانك وقيمته ($6.63 \times 10^{-34}\text{J.s}$) .

(f) : تردّد الموجة بوحدة ($\text{Hz} = \frac{1}{s}$).

(E) : طاقة الأشعة الكهرومغناطيسية التي يشعّها جسم أو يمتصهابوحدة (J).

وحدة قياس الطاقة المستخدمة في الفيزياء الذريّة هي الإلكترون فولت (eV) حيث:

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

الإلكترون فولت (eV) : هو الطاقة التي يكتسبها إلكترون عند تسريعه بفرق جهد مقداره (1V).

5. نتج عن نموذج ماكس بلانك مبدأ جديد يسمى بمبدأ تكمية الطاقة .

مبدأ تكمية الطاقة : أن الطاقة الشعاعية المنبعثة أو الممتصة تساوي عددا صحيحا من مضاعفات الكمة الواحدة (hf).

$$E_n = nhf$$

حيث n عدد صحيح موجب. وبذلك، فإنّ طاقة الأشعة الصادرة عن جسم عند التردّد f يمكن أن تأخذ قيمًا، مثل:

$$hf,\ 2hf,\ 3hf,\ 4hf,\ldots$$

مثال 1: كتاب

جسم ساخن بدرجة حرارة معينة، ومعظم الأشعة الصادرة عنه تردّدها يساوي ($f = 1 \times 10^{15}$ Hz)، جد طاقة الكمة الواحدة من الإشعاع عند هذا التردّد.

المُعطيات:

$f = 1 \times 10^{15}$ Hz ،$h = 6.63 \times 10^{-34}$J.s

المطلوب:

$E = ?$

الحلّ:

$$E = hf = 6.63 \times 10^{-34} \times 1 \times 10^{15} = 6.63 \times 10^{-19}\text{J}$$

ولتحويلها بوحدة الإلكترون فولت (eV):

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

وبذلك تصبح طاقة الكمة الواحدة تساوي:

$$E_{(eV)} = \frac{6.63 \times 10^{-19}}{1.6 \times 10^{-19}} = 4.14\text{ eV}$$

مثال 2: كتاب

جد طاقة كمة أشعّة سينيّة تردّدها (4.20×10^{18} Hz).

المُعطيات : $f = 4.20 \times 10^{18}$ Hz, $h = 6.63\ 10^{-34}$ J.s

المطلوب: طاقة الكمة الواحدة $E = ?$

الحلّ:

$$E = h\,f = 6.63 \times 10^{-34} \times 4.20 \times 10^{18} = 2.78 \times 10^{-15}\text{J}$$

$$E_{(eV)} = \frac{2.78 \times 10^{-15}}{1.6 \times 10^{-19}} = 17403\text{ eV} = 17.4\text{ keV}$$

تمرين 1: كتاب

إذا كان تردد موجة الضوء الأحمر يساوي ($4.6 \times 10^{14} Hz$)، أجد طاقة الكمة الواحدة له.

$$E = h\,f = 6.63 \times 10^{-34} \times 4.6 \times 10^{14} = 3.05 \times 10^{-19}\text{J}$$

$$E_{(eV)} = \frac{3.05 \times 10^{-19}}{1.6 \times 10^{-19}} \approx 2\text{ eV}$$

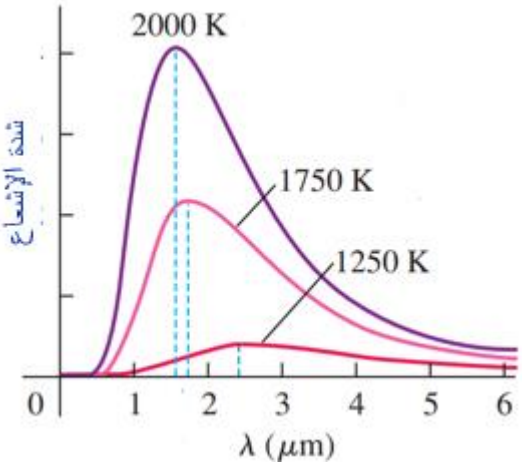
عند تسخين سلك فلزّي ،بواسطة موقد تدريجيا اجب عن الأسئلة التالية؟

1. ما ألوان الوهج الصادرة عن السلك التي تنتج من التسخين تدريجيا؟ وما سبب تغير اللون؟

يبدأ السلك بالتوهج باللون الأحمر ثم الأصفر ثم الأزرق، وإذ ارتفعت درجة حرارة السلك أكثر سيتوهج باللون الأبيض وعندما ترتفع درجة الحرارة يزداد تردد المتذبذبات ، فتتبعث أشعة كهرمغناطيسية بترددات أكبر وبشدة أعلى. وباستمرار ارتفاع درجة حرارة الجسم تستمر الزيادة في ترددات الأشعة المنبعثة وشدتها فتبدأ ألوان الطيف المرئي بالظهور تباعا بدءًا من أقل تردد والذي يقابل الضوء الأحمر، ثم البرتقالي ثم الأصفر وهكذا حتى يشع الجسم كافة ألوان الطيف المرئي وعندها يظهر الإشعاع الصادر عن الجسم باللون الأبيض الذي هو مزيج من ألوان الطيف المرئي.

2. ما مدى صحّة نموذج رايلي- جينز حيث يتوقع انبعاث ضوء مرئي، بالإضافة إلى الأشعة تحت الحمراء عند درجة حرارة الغرفة.

يصدر عن الأجسام أشعة كهرمغناطيسية في منطقة الأشعة تحر الحمراء عندما تكون درجة حرارتها أكبر من الصفر المطلق(0 K) .لكن عند درجة حرارة الغرفة لا تبعث الأجسام أشعة كهرمغناطيسية في منطقة الضوء المرئي بخلاف ما يتنبأ به نموذج رايلي - جينز.



في الشكل المجاور ماذا تمثل المساحة تحت المنحنى عند درجات الحرارة المختلفة في منحنى شدة الشعاع مع الطول الموجي؟

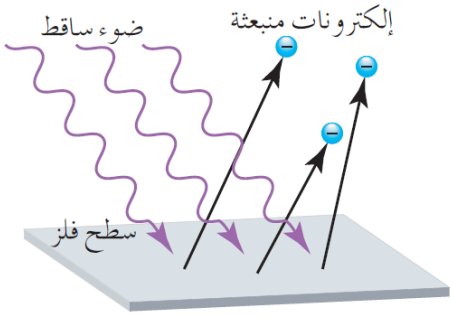
المساحة تحت المنحنى تمثّل معدل الطاقة الكلية المشعّة لكل وحدة مساحة .

الظاهرة الكهرضوئيّة Photoelectric Effect

الظاهرة الكهرضوئية Photoelectric Effect: ظاهرة انبعاث إلكترونات من سطح فلز عند سقوط إشعاع كهرمغناطيسي بتردّد مناسب عليه.

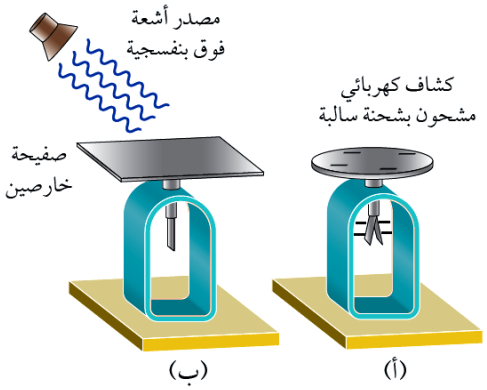
الإلكترونات الضوئية Photoelectrons :الإلكترونات المنبعثة من سطح فلزّ عند سقوط إشعاع كهرمغناطيسي بتردّد مناسب عليه.

لاحظ العالم هيرتز Hertz خلال تجاربه، عام 1887 تحديدًا، أنّ الشرارة الكهربائية تحدث على نحوٍ أسرع في جهاز الإرسال الخاص به عند تعريضه لأشعة فوق بنفسجية. وفيما بعد تبيّن أنّ سبب ذلك هو انبعاث إلكترونات من سطح فلزّ.عند سقوط إشعاع كهرمغناطيسي بتردّد مناسب عليه، كما في الشكل المجاور.



انبعاث إلكترونات من سطح فلزّ عند سقوط إشعاع بتردّد مناسب على سطحه.

ولتوضيح الظاهرة الكهروضوئية كما في الشكل المجاور (أ) و (ب) ، أشحن الكشاف الكهربائي بالحثّ مُستخدِمًا قضيبَ زجاجٍ ودلِكه بقطعة من الحرير(لإكسابه شحنة سالبة)كما في الشكل (أ)، وألاحظ انفراج ورقتي الكشاف الكهربائي. ثم أضع صفيحة من الخارصين فوق قرص الكشاف الكهربائي كما في الشكل (ب)



ومن الملاحظات العملية عند إجراء التجربة السابقة :

1. عند تسليط ضوء احمر على صفيحة الخارصين لم يتغير انفراج ورقتي الكشاف ، وعند زيادة كمية الضوء (شدّته) عند استخدام مصدري ضوء أحمر معًا لم يتغير انفراج ورقتي الكشاف أيضا. ما يدل على أن طاقة الضوء لم تزداد بزيادة شدته.
2. عند زيادة تردّد الإشعاع الساقط (استخدام مصدر الأشعة فوق البنفسجية)، قل انفراج ورقتي الكشاف. ما يدل على أن طاقة الإشعاع تزداد بزيادة تردده.

تفسير الظاهرة الكهرضوئيّة

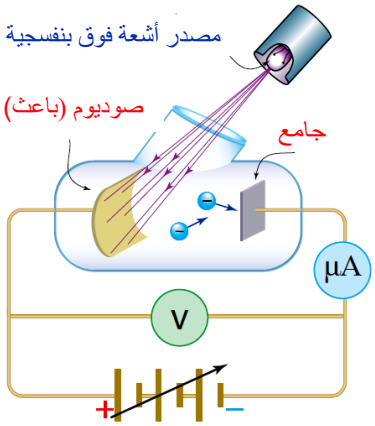
a. تفسير الفيزياء الكلاسيكيّة و النظرية الكهرومغناطيسية، التي ترتكز على النموذج الموجيّ

1. تنبعث الإلكترونات عند أيّ تردّد للأشعة الساقطة على سطح الفلزّ، لأنّها تمتص الطاقة بأيّ مقدار وعند أيّ تردّد وبشكلٍ مستمر، وسقوط الأشعة على سطح الفلزّ مدّة زمنيّة مناسبة سيُمكِّن الإلكترونات من امتصاص الطاقة اللازمة لتحريرها من سطح الفلزّ.
2. لا تنبعث الإلكترونات الضوئية انبعاثًا فوريًّا؛ لأنّها تحتاج إلى وقت كافٍ لامتصاص الطاقة اللازمة من الأشعة الساقطة على الفلزّ لتتحرّر من سطحه.
3. زيادة شدّة الأشعة تزيد من الطاقة الحركيّة العظمى للإلكترونات الضوئية المتحرّرة.

من الواضح أنّ التنبّؤاتِ جميعَها تخالف النتائج التجريبية، وبذلك شكّلت الظاهرة الكهرضوئية دليلاً آخرَ على عجز الفيزياء الكلاسيكيّة بنموذجها الموجيّ للضوء عن تفسير سلوك الجُسيمات دون الجاهريّة.

b. تفسير الفيزياء الحديثة :(1. تفسير لينارد 2. تفسير اينشتاين 3. تفسير ميليكان)

1. تفسير لينارد



يبيّن الشكل المجاور رسمًا تخطيطيًّا لجهازٍ استخدمه العالم لينارد Lenard لإجراء كثيرٍ من التجارب الخاصّة بالظاهرة الكهرضوئية؛ ويتكوّن من أنبوب من زجاج الكوارتز مُفرَّغ من الهواء تجنّبًا لفقد الإلكتروناتِ طاقةً حركيّةً نتيجة تصادمها بجُسيمات الهواء. ويحتوي الجهاز أيضًا على قطبين فلزّيّين، أحدهما مصنوع من فلزّ الصوديوم يُسمّى الباعث، موصول بالقطب الموجب لمصدر فرق جهد قابل للضبط، والآخر يُطلق عليه اسم الجامع يتصل بالقطب السالب لمصدر فرق الجهد. عند سقوط أشعة كهرمغناطيسية بتردّد مناسب على الباعث تتحرّر الإلكترونات من سطحه، وتنطلق نحو الجامع. ويُستدلّ على ذلك من خلال التيار الكهربائي الذي يقرؤه الميكرو أميتر (μA) الذي يُسمّى التيار الكهرضوئيّ كلّما ازدادت سالبيّة جهد الجامع، ازدادت قوّة تنافر الإلكترونات الكهربائيّة مع الجامع، فيقلّ التيار الكهرضوئي حيث لا يصل الجامع إلاّ الإلكترونات التي تمتلك طاقة حركية كافية للتغلّب على قوة التنافر الكهربائية مع الجامع. ويُسمّى فرق الجهد الذي يصبح عنده التيار الكهرضوئيّ صفرًا **جهد الإيقاف** Stopping potential (V_s) ، والذي يستطيع إيقاف الإلكترونات ذات الطاقة الحركيّة العظمى (K_{max}) قبل وصولها إلى الجامع. ويرتبط جهد الإيقاف بالطاقة الحركيّة العظمى للإلكترونات بالعلاقة الآتية:

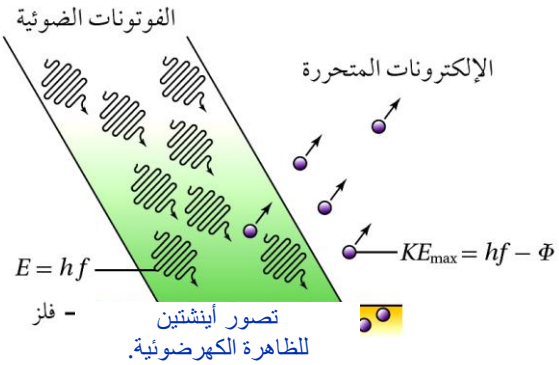
$$K_{max} = e\, V_s$$

حيث e تساوي القيمة المطلقة لشحنة الإلكترون.

ويختصر تفسير لينارد على الظاهرة الكهرضوئيّة بما يلي:

1. تتحرّر إلكترونات من سطح الفلزّ فقط عندما يكون تردّد الأشعة الساقطة على سطحه أكبر من تردّد معيَّن، يُسمّى **تردّد العتبة** Threshold frequency.
2. تنبعث الإلكترونات الضوئية بطاقات حركية متفاوتة تتراوح قيمها من صفر إلى قيمة عظمى (K_{max})
3. القيمة العظمى للطاقة الحركية للإلكترونات (K_{max}) المنبعثة من سطح الفلزّ تتناسب طرديًّا مع تردّد الأشعة الساقطة عليه، ولا تعتمد على شدّة الأشعة.
4. يزداد عدد الإلكترونات المنبعثة بزيادة شدّة الأشعة دون زيادة في الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية.
5. تنبعث الإلكترونات انبعاثًا فوريًّا بمجرد سقوط الأشعة على سطح الفلزّ .

2. تفسير اينشتاين



تصور أينشتين للظاهرة الكهرضوئية.

1. افترض اينشتاين الطبيعة المزدوجة للضوء أيْ إنّ للأشعة الكهرمغناطيسية طبيعة جُسيميّة إضافة إلى طبيعتها الموجيّة.
2. لتفسير الظاهرة الكهرضوئية استخدم أينشتين فرضيّة تكمية الطاقة لبلانك، وافترض أنّ طاقة الأشعة الكهرمغناطيسية مركّزة في جُسيمات أُطلِقَ على كلٍّ منها اسم فوتون، وطاقة الفوتون الواحد تساوي ($E = hf$)
3. عند سقوط فوتون على إلكترونات الفلزّ، فإنّ الإلكترون الواحد منها، إمّا أنْ يمتص طاقة الفوتون كاملة، وإمّا أنّه لا يمتصها نهائيّا،
4. حتى يتحرّر الإلكترون من سطح الفلز، يجب أن يمتلك طاقة كافية للتغلّب على قوة التجاذب الكهربائي مع النوى الموجبة للفلز، وأقلّ طاقة كافية لتحرير إلكترون من سطح الفلز تُسمى **اقتران الشغل (Φ).**

والجدول المحاور يوضح اقتران الشغل لبعض الفلزات.

الفلز	Φ (eV)
سيزيوم	2.14
صوديوم	2.28
بوتاسيوم	2.30
نحاس	4.7
تنغستون	4.55
ذهب	5.10

على ماذا يعتمد اقتران الشغل (Φ).

يعتمد على نوع الفلزّ كما في الجدول المجاور فإذا كانت طاقة الفوتون الذي يمتصّه الإلكترون (hf) أكبر من Φ ، فإنّ الإلكترون يتحرّر ممتلكاً طاقة حركية. ولا يتحرّر إن كانت (hf) أقلّ من Φ .

وتُحسب الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحرّرة (K_{max}) باستخدام العلاقة الآتية:

$$K_{max} = hf - \Phi$$

$$K_{max} = \frac{1}{2} m v_{max}^2$$

حيث :

m: كتلة الالكترون المتحرر.

v_{max} :السرعة العظمى للإلكترونات المتحرّرة.

أمّا عندما تكون طاقة الفوتون مساوية لاقتران الشغل، فإنّ الإلكترون يتحرّر بطاقة حركية مساوية للصفر. ويُسمى تردّد الأشعة الكهرمغناطيسية في هذه الحالة **بتردّد العتبة** للفلزّ(f_o) ، ويُعرف بأنّه أقلّ تردّد يتطلّبه تحرير إلكترونات ضوئيّة من سطح فلزّ دون إكسابها طاقةً حركيّة. ويُحسب من اقتران الشغل للفلزّ حسب العلاقة:

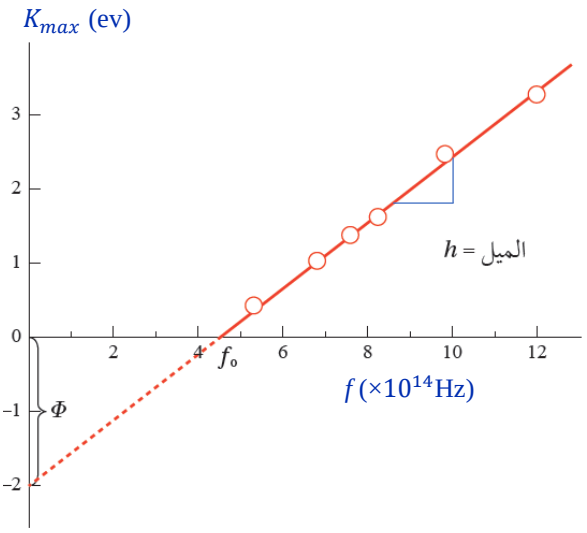
$$f_o = \frac{\Phi}{h}$$

هل يمكن أن تكون الطاقة الحركيّة لجسم سالبة؟ ولماذا؟

لا يمكن أن تكون الطاقة الحركية سالبة فهي تعتمد على الكتلة وعلى مربع السرعة، وكل من الكميتين دائما موجبة.

3. تفسير ميليكان

أجرى العالم ميليكان قياسات تجريبيّة للتحقّق من علاقة أينشتاين للظاهرة الكهرضوئيّة، حيث استخدم ميليكان أشعة كهرمغناطيسيّة بتردّدات مختلفة، وقاس جهد الإيقاف عند كل تردّد، ومثّل العلاقة البيانيّة بين الطاقة الحركيّة العظمى للإلكترونات المتحرّرة وبين تردّد الأشعة الساقطة على الباعث برسم بياني فكانت كما في الشكل المجاور :



ملاحظات مليكان :

1. أنّ العلاقة بين الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحرّرة وتردّد الأشعة الساقطة على الباعث علاقة خطّيّة، وهذا يتفق مع تفسير أينشتاين للظاهرة الكهرضوئية.
2. يمثّل ميل الخط في الرسم ثابت بلانك، في حين يمثّل تقاطع امتداد الخط مع محور الطاقة ($-\Phi$) وتمثل نقطة تقاطع الخط مع محور التردّد، تردّدَ العتبة.
3. اثبت ميليكان أنّ التيار الكهرضوئي يزداد بزيادة شدّة الإشعاع الساقط على الباعث. وفسّر أينشتين ذلك بأنّ زيادة شدّة الأشعة الكهرمغناطيسية تعني زيادة عدد الفوتونات الساقطة على الباعث في الثانية الواحدة، ونظرًا إلى أنّ كل فوتون يحرّر إلكترونًا، لذا يجب أن يزداد عدد الإلكترونات المتحرّرة في الثانية الواحدة.

ملاحظات على الشكل السابق :

1. العلاقة التي تربط الطاقة الحركية العظمى باقتران الشغل وتردّد الأشعة الكهرمغناطيسية، أنّ الطاقة الحركيّة العظمى تتناسب طرديًّا مع تردّد الأشعة لا مع شدّتها.
2. استطاع النموذج الجُسيميّ للإشعاع تفسير الانبعاث الفوري للإلكترونات من سطح الفلزّ؛ لأنّه يفترض أنّ الطاقة مركّزة في الفوتون، وبمجرد امتصاص الإلكترون للفوتون، فإنّه يكتسب طاقة تُحرّره من الفلزّ مهما كانت شدّة الإشعاع، على أنْ يكون تردّد الفوتون أكبر من تردّد العتبة للفلزّ.
3. استطاع النموذج الجُسيميّ للإشعاع تفسير التفاوت في الطاقة الحركية للإلكترونات المنبعثة من صفر إلى طاقة حركيّة عظمى، وذلك حسب طاقة ربط الإلكترون بذرات الفلزّ، إضافة إلى عمق موقع الإلكترون تحت سطح الفلزّ، فالإلكترونات ذات طاقة الربط الأصغر والأقرب لسطح الفلزّ تتحرّر بطاقة حركيّة أكبر.

لماذا رسم امتداد الخط البياني عند قيم الطاقة السالبة مُتقطّعًا ولم يرسم خطاً متصلاً؟

لأن انبعاث الإلكترونات لا يحدث إذا كان تردد الأشعة الساقطة على الفلز أقل من تردد العتبة. وبالتالي لا وجود لقيم طاقة حركية سالبة.

أذكر فرضيّة أينشتين التي استخدمها في تفسير نتائج الظاهرة الكهرضوئية.

لتفسير نتائج الظاهرة الكهرضوئية افترض العالم أينشتاين أن الضوء يتكون من جسيما ت (فوتونات)وطاقة كل فوتون ($E = h\,f$) و عندما يسقط الفوتون على إلكترونات الفلز فإن الإلكترون الواحد منها إما أن يمتص طاقة الفوتون كاملة أو لا يمتصها نهائيا. وحتى يتمكن الفوتون من تحرير إلكترون من سطح الفلز يجب أن تكون طاقته مساوية لاقتران الشغل للفلز أو أكبر منه.

مثال 3: كتاب

إذا كان اقتران الشغل لفلزّ(2.0 eV) وسقط على سطحه إشعاع كهرمغناطيسي طاقة الفوتون الواحد منه (6.0 eV) جد ما يلي:
أ . تردّد العتبة للفلزّ.
ب. الطاقة الحركيّة العظمى للإلكترونات المنطلِقة من سطح الفلزّ.

المُعطيات : $\Phi = 2.0\ \text{eV},\ hf = 6.0\ \text{eV},\ h = 6.63 \times 10^{-34}\text{J.s}$

المطلوب : $f_o = ?,\ K_{max} = ?$

الحلّ:
أ .أحسب تردّد العتبة من اقتران الشغل للفلزّ:

$$f_o = \frac{\Phi}{h} = \frac{2.0\times1.6\times10^{-19}}{6.63 \times 10^{-34}} = 4.86\times10^{14}\text{Hz}$$

ب.أحسب الطاقة الحركيّة العظمى من العلاقة:

$$K_{max} = hf - \Phi$$
$$= 6.0 - 2.0 = 4.0\ \text{eV}$$
$$= 4.0 \times 1.6 \times 10^{-19} = 6.4\times 10^{-19}\text{J}$$

مثال 4: كتاب

سقط إشعاع كهرمغناطيسي طول موجته (460 nm) على فلزٍّ اقترانُ الشغل له (2.2 eV) ، جد الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحرّرة من سطح الفلزّ بوحدة الجول(J).

المُعطيات:
$c = 3\times10^8\ \text{m/s},\ \Phi = 2.2\ \text{eV},\ \lambda = 460\ \text{nm} = 460\times10^{-9}\text{m},\ h = 6.63\times10^{-34}\text{J.s}$

المطلوب :
$K_{max} = ?$

الحلّ:
أجد تردّد الضوء الساقط على الفلزّ كما يلي:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3\times10^8}{460 \times 10^{-9}} = 6.5 \times10^{14}\text{Hz}$$

أحوّل وحدة قياس اقتران الشغل من (eV) إلى وحدة جول(J) كما يلي :

$$\Phi = 2.2\ \text{eV} = 2.2\times 1.6 \times 10^{-19} = 3.5\times 10^{-19}\ \text{J}$$

ثمّ أعوّض في العلاقة:

$$K_{max} = hf - \Phi$$

$$= 6.63 \times 10^{-34}\times 6.5 \times10^{14} - 3.5\times 10^{-19}$$
$$= 8.1 \times10^{-20}\text{J}$$

مثال 5: كتاب

إذا كانت الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحرّرة من سطح النحاس تساوي (22.6 eV) عند سقوط أشعة فوق بنفسجيّة تردُّدها (6.60×10^{15}Hz) على سطحه. أجد اقتران الشغل للنحاس بوحدة (eV).

المُعطيات:

$$K_{max} = 22.6 \text{ eV}, f = 6.60 \times 10^{15} \text{ Hz}, h = 6.63 \times 10^{-34} \text{J.s}$$

المطلوب:

$$\Phi = ?$$

الحلّ:

أجد (hf) بوحدة (eV) كما يلي :

$$hf = 6.63 \times 10^{-34} \times 6.60 \times 10^{15} = 4.38 \times 10^{-18} \text{J}$$

$$= \frac{4.38 \times 10^{-18}}{1.6 \times 10^{-19}} = 27.3 \text{ eV}$$

$$K_{max} = hf - \Phi$$

$$\rightarrow \Phi = 27.3 - 22.6 = 4.7 \text{ eV}$$

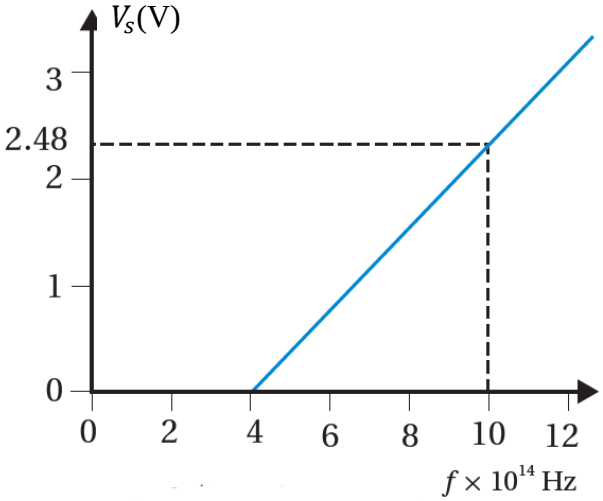
مثال 6: كتاب

يمثّل الرسم البياني في الشكل المجاور العلاقة بين جهد الإيقاف وتردُّدِ الفوتونات الساقطة على مهبط خلية كهرضوئية، مستعينًا بالبيانات المبيّنة على الرسم، أحسب ما يأتي:

أ . مقدار ثابت بلانك.

ب. اقتران الشغل لمهبط الخلية.

ج. الطاقة الحركية العظمى (بالجول) للإلكترونات المنبعثة عند إسقاط أشعة تردّدها (12×10^{14} Hz) على مهبط الخلية.



المُعطيات : الرسم البياني

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}, c = 3 \times 10^{8} \text{ m/s}$$

المطلوب :

$$h = ? \ , \Phi = ?, K_{max} = ?$$

ملاحظة : استخدم ثابت بلانك الذي حسبته في الفرع (أ) لحل الفرعين (ب) و (ج) .

الحل:

أ . مقدار ثابت بلانك:

$$h = \text{slope} \times e = \frac{\Delta V_s}{\Delta f} \times e = \frac{2.48 - 0}{(10-4) \times 10^{14}} \times 1.6 \times 10^{-19} = 6.6 \times 10^{-34} \text{J.s}$$

ب.اقتران الشغل، لاحظ أنّ تقاطع الخط المستقيم مع محور التردّد هو تردّد العتبة ($f_0 = 4 \times 10^{14} Hz$)

$$\Phi = hf_0 = 6.6 \times 10^{-34} \times 4 \times 10^{14} = 2.64 \times 10^{-19} \text{J}$$

ج. الطاقة الحركية العظمى (K_{max}):

$$K_{max} = hf - \Phi$$

$$= 6.6 \times 10^{-34} \times 12 \times 10^{14} - 2.64 \times 10^{-19} = 5.3 \times 10^{-19} \text{J}$$

تمرين 1: كتاب

أراد طالب قياس تردّد العتبة لفلزّ في تجربة الظاهرة الكهرضوئية، فاستخدم أشعة كهرمغناطيسية طول موجتها (300 nm) ،ووجد أنّ التيار الكهرضوئي يصبح صفراً عند فرق جهد (2.1 V) ، أجد تردّد العتبة للفلزّ.

الحل:

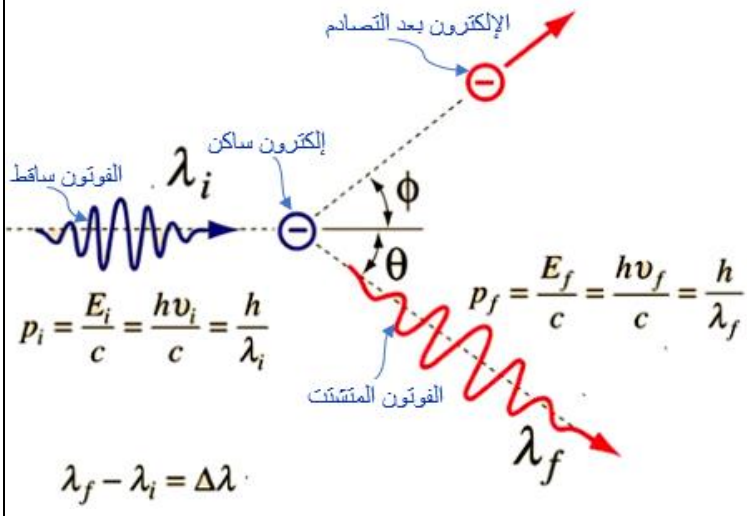
$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3\times10^{8}}{300\times10^{-9}} = 1.0\times10^{15}\text{Hz}$$

$$K_{max} = e\,V_s$$
$$= 1.6\times10^{-19}\times 2.1 \approx 3.4\times10^{-19}\ \text{J}$$

$$\Phi = hf - K_{max}$$
$$= 6.63\times10^{-34}\times1.0\times10^{15} - 3.4\times10^{-19} \approx 3.2\times10^{-19}\text{J}$$

$$f_o = \frac{\Phi}{h} = \frac{3.2\times10^{-19}}{6.63\times10^{-34}} = 4.8\times10^{14}\text{Hz}$$

ظاهرة كومبتون Compton Effect



بعد نجاح أينشتين في تفسير الظاهرة الكهرضوئية باستخدام النموذج الجُسيمي للإشعاع الكهرمغناطيسي، جاءت ظاهرة كومبتون اختبارًا أخر لهذا النموذج .حيث أسقط كومبتون أشعة سينيّة على هدف من الغرافيت (الكربون)، ونظرًا إلى أنّ الطاقة الكليّة للإلكترونات في الغرافيت صغيرة جدًّا مقارنة بطاقة فوتونات الأشعة السينية، فإنّ طاقة تلك الإلكترونات تُهمَل وتُعدّ ساكنة.

لاحظ كومبتون ما يلي :

1. أنّ طول موجة الأشعة السينيّة المشتَّتة (λ_f) أكبر من طول موجة الأشعة السينيّة الساقطة (λ_i)
2. أصبحت الإلكترونات الساكنة متحركة وتمتلك طاقة حركية .

تفسير كومبتون :

فسر كومبتون نتائج هذه الظاهرة بالاعتماد على قانوني حفظ الزخم الخطي والطاقة وافتراض أنّ

1. الأشعة الكهرمغناطيسية تتفاعل مع الإلكترون بوصفها جُسيمات طاقةُ كلٍّ منها (hf)، ومقدار زخمه الخطي $(p = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda})$.
2. ونتيجة لتصادم الفوتون الساقط مع الإلكترون يكتسب الإلكترون طاقة، ويتحرك بمسار يصنع زاوية (ϕ) مع مسار الفوتون الساقط ، في حين ينحرف اتجاه الفوتون المشتَّت بزاوية (θ) ، ويستمر بالسرعة نفسها (c) ، ولكن بطول موجيّ أكبر(تردد اقل أي طاقة اقل).
3. يكتسب الالكترون طاقة (E_e) تساوي الفرق بين طاقة الفوتون الساقط وطاقة الفوتون المتشتت.

ويمكن التعبير عما سبق رياضيا كما يلي:

$$\lambda_f > \lambda_i \quad , \quad f_f < f_i \quad , \quad E_f < E_i$$

$$E_e = E_i - E_f = hf_i - hf_f$$

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

كيف اختلف تفاعل الفوتون مع الإلكترون في ظاهرة كومبتون عن تفاعله مع الإلكترون في الظاهرة الكهرضوئية.

في ظاهرة كومبتون يمتص الإلكترون جزءًا من طاقة الفوتون الساقط، في حين يمتص الإلكترون طاقة الفوتون كلّها في الظاهرة الكهرضوئية. ومرةً أخرى فشلت الفيزياء الكلاسيكية بنموذجها الموجيّ للضوء في تفسير هذه الظاهرة، في حين نجح في ذلك النموذج الجُسيمي للضوء.

لماذا لم يستخدم كومبتون الضوء المرئي في تجربته؟

لأن طاقة أي من ألوان طيف الضوء المرئي أقل من طاقة الأشعة السينية وقريبة من طاقة الإلكترونات في الغرافيت؛ وبالتالي لا يمكن إهمال طاقة الإلكترون (واعتباره ساكنا) مقارنة بطاقة الضوء المرئي.

في تجربة كومبتون، قارن بين الأشعة الساقطة والأشعة المشتّتة من حيث :الطول الموجيّ والتردّد والسرعة.

يزداد الطول الموجي للأشعة المشتّتة ويقل ترددها وتبقى سرعة الأشعة الكهرمغناطيسية ثابتة.

مثال 7: كتاب

فوتون أشعة سينيّة تردّده (4.20×10^{18} Hz) أجد طاقته ومقدار زخمه الخطّي.

المُعطيات:

$f = 4.20 \times 10^{18}$ Hz , $c = 3 \times 10^{8}$m/s, $h = 6.63 \times 10^{-34}$J.s

المطلوب:

$E = ?$, $p = ?$

الحلّ:

$$E = h f = 6.63 \times 10^{-34} \times 4.20 \times 10^{18} = 2.78 \times 10^{-15} \text{ J}$$

$$= \frac{2.78 \times 10^{-15}}{1.6 \times 10^{-19}} = 17375 \text{ eV} = 17.3 \text{ keV}$$

$$p = \frac{E}{c} = \frac{2.78 \times 10^{-15}}{3 \times 10^{8}} = 9.27 \times 10^{-24} \text{ kg.m/s}$$

مثال 8: كتاب

أجد طاقة وتردّد فوتون مقدار زخمه الخطي (8.85×10^{-26}kg. m/s).

المُعطيات:

$h = 6.63 \times 10^{-34}$J.s , $p = 8.85 \times 10^{-26}$kg.m/s , $c = 3.0 \times 10^{8}$ m/s

المطلوب:

$E = ?$, $f = ?$

الحلّ:

$$p = \frac{E}{c} \longrightarrow E = Pc = 8.85 \times 10^{-26} \times 3.0 \times 10^{8} = 2.66 \times 10^{-17} \text{J}$$

$$= \frac{2.66 \times 10^{-17}}{1.6 \times 10^{-19}} \approx 166 \text{ eV}$$

$$E = h f$$

$$2.66 \times 10^{-17} = 6.63 \times 10^{-34} \times f \rightarrow f \approx 4 \times 10^{16} \text{ Hz}$$

مثال 9: كتاب

سقط فوتون أشعة غاما طاقته (662 keV) على إلكترون ساكن، فاكتسب الإلكترون طاقة مقدارها (49 keV)، جد ما يأتي:

أ . طول موجة الفوتون الساقط.

ب. طاقة الفوتون المشتَّت.

ج. مقدار التغيّر في الطول الموجيّ للفوتون.

المُعطيات : $h = 6.63 \times 10^{-34}$J.s, $c = 3 \times 10^{8}$ m/s, $E_i = 662$ keV, $E_e = 49$ keV

المطلوب : $\lambda_i = ?$, $E_f = ?$, $\Delta\lambda = ?$

الحلّ:

أ . نحوّل طاقة الفوتون الساقط إلى وحدة جول، ثمّ نحسب الطول الموجيّ:

$$E_i = 662 \text{ keV} = 662 \times 10^{3} \times 1.6 \times 10^{-19} = 1.1 \times 10^{-13} \text{ J}$$

$$E_i = h f_i = h \frac{c}{\lambda_i} \rightarrow \lambda_i = \frac{hc}{E_i} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^{8}}{1.1 \times 10^{-13}} = 1.8 \times 10^{-12} \text{m}$$

ب. طاقة الفوتون المشتَّت:

$$E_f = E_i - E_e = 662 - 49 = 613 \text{ keV} = 613 \times 10^{3} \times 1.6 \times 10^{-19} = 9.8 \times 10^{-14} \text{ J}$$

ج. مقدار التغيّر في الطول الموجيّ للفوتون أجد طول موجة الفوتون المشتّت (بعد التصادم).

$$E_f = h\,f_f = h\frac{c}{\lambda_f} \longrightarrow \lambda_f = \frac{hc}{E_f} = \frac{6.63\times10^{-34}\times3\times10^{8}}{9.8\times10^{-14}} = 2\times10^{-12}\text{m}$$
$$\Delta\lambda = \lambda_f - \lambda_i = 2\times10^{-12} - 1.8\times10^{-12} = 0.2\times10^{-12}\text{ m}$$

تمرين 2: كتاب

أجد مقدار الزخم الخطّي لكلّ ممّا يأتي:
أ . فوتون أشعّة مرئيّة طاقته $(3.00\times10^{-19}\text{J})$.
ب.فوتون أشعّة فوق بنفسجيّة تردّده $(5.4\times10^{15}\text{ Hz})$.
ج.فوتون أشعّة سينيّة طول موجته (2.00 nm)

الحلّ:
أ . فوتون أشعّة مرئيّة طاقته $(3.00\times10^{-19}\text{J})$:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{3.00\times10^{-19}}{3\times10^{8}} = 1\times10^{-27}\text{kg.m/s}$$

ب.فوتون أشعّة فوق بنفسجيّة تردّده $(5.4\times10^{15}\text{ Hz})$:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{6.63\times10^{-34}\times5.4\times10^{15}}{3\times10^{8}} \approx 1.2\times10^{-26}\text{ kg.m/s}$$

ج.فوتون أشعّة سينيّة طول موجته (2.00 nm):

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda} = \frac{6.63\times10^{-34}}{2.00\times10^{-9}} = 3.32\times10^{-25}\text{ kg.m/s}$$

أسئلة مراجعة الدرس الأول

1. **الفكرة الرئيسة:** أوضّح المقصود بكلٍّ من: الجسم الأسود، الظاهرة الكهرضوئيّة، اقتران الشغل للفلزّ، تردّد العتبة.

الجسم الأسود: جسم مثالي يمتص جميع الأطوال الموجية للأشعة الكهرمغناطيسية ويشعها، و يعتمد انبعاث الأشعة منه على درجة حرارته فقط.

الظاهرة الكهرضوئية: انبعاث إلكترونات من سطح فلز عند سقوط إشعاع كهرمغناطيسي بتردد مناسب عليه.

اقتران الشغل للفلز: أقل طاقة للأشعة الكهرمغناطيسية تكفي لتحرير إلكترونات من سطح الفلز دون إكسابها طاقة حركية.

تردد العتبة: أقل تردد يتطلبه تحرير إلكترونات ضوئية من سطح فلز دون إكسابها طاقة حركية.

2. **أحسب:** سقط فوتون أشعّة سينيّة مقدار زخمه الخطي (4.3×10^{-23}kg. m/s) على إلكترون حرّ، فكان مقدار الزخم الخطي للفوتون بعد تشتّته (3.2×10^{-23}kg. m/s) ، أجد الطاقة التي اكتسبها الإلكترون بوحدة (eV).

الحل :

$$E_e = E_i - E_f = p_i c - p_f c = (p_i - p_f)\, c$$
$$= (4.3 \times 10^{-23} - 3.2 \times 10^{-23}) \times 3 \times 10^8 = 3.3 \times 10^{-15}\ \text{J}$$
$$= \frac{3.3 \times 10^{-15}}{1.6 \times 10^{-19}} = 20.6\ \text{keV}$$

3. **أستخدم المتغيّرات:** سقط ضوء طول موجته (300 nm) على سطح فلزّ تردّد العتبة له (5.0×10^{14}Hz) ، أجد:

أ . اقتران الشغل للفلز.

ب. الطاقة الحركيّة العظمى للإلكترونات المتحرّرة.

الحل :

أ . اقتران الشغل للفلز :

$$\Phi = hf_0 = 6.63 \times 10^{-34} \times 5.0 \times 10^{14} = 3.3 \times 10^{-19}\text{J}$$

ب. الطاقة الحركيّة العظمى للإلكترونات المتحرّرة:

$$K_{max} = hf - \Phi$$
$$= h\frac{c}{\lambda} - \Phi = 6.63 \times 10^{-34} \times \frac{3 \times 10^8}{300 \times 10^{-9}} - 3.3 \times 10^{-19} = 3.3 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

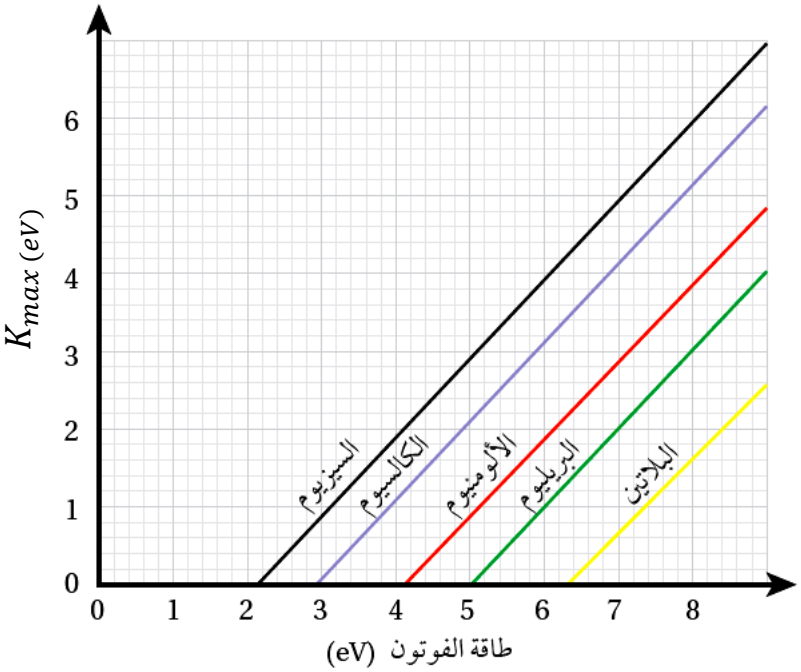
4. أحلّل رسمًا بيانيًّا: يمثّل الرسم البيانيّ المجاور العلاقة بين الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحرّرة من سطح الفلزّ وطاقة فوتون الإشعاع الكهرمغناطيسي الساقط على سطح الفلزّ، وذلك لفلزات عدّة.

أ . جميع الخطوط مستقيمة ومتوازية، أفسّر ذلك.

ب. أرتّب تردّد العتبة للفلزّات من الأصغر إلى الأكبر.

ج. إذا سقط ضوء طاقته (10 eV) على البيريليوم، أجد الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحرّرة منه.

د . إذا سقط ضوء طول موجته (350 nm) ، فمن أيّ الفلزّات يستطيع تحرير إلكترونات؟ ومن أيّها لا يستطيع؟ أيّ الفلزات تتحرّر منه إلكترونات بطاقةٍ حركيّة عظمى أكبر؟



أ. حسب العلاقة:

$$K_{max} = hf - \Phi$$

حيث (hf) طاقة الفوتون، فإن ميل الخط يجب أن يساوي (1) لجميع الخطوط

ب. أرتّب تردّد العتبة للفلزّات من الأصغر إلى الأكبر:

تردد الضوء يساوي تردد العتبة عندما تكون طاقة الفوتون مساوية لاقتران الشغل أي عندما ($K_{max} = 0$) ومن الشكل نجد:

(البلاتين) f_o > (البريليوم) f_o > (الألمنيوم) f_o >(الكالسيوم) f_o > (السيزيوم) f_o

ج. الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحرّرة من فلز البيريليوم عند سقوط فوتون طاقته (10eV)عليه :

$$K_{max} = hf - \Phi$$
$$= 10.0 - 5.0 = 5.0 \text{ eV}$$

د. الفلزات التي تستطيع تحرير الإلكترونات عند سقوط فوتون طول موجته طول موجته (350 nm) .

يجب أولا حساب طاقة الالكترون الساقط بوحدة (eV) ، ثم مقارنتها باقتران الشغل للفلزات الخمسة في الشكل :

$$E = hf = h\frac{c}{\lambda} = 6.63 \times 10^{-34} \times \frac{3 \times 10^{8}}{350 \times 10^{-9}} = 5.7 \times 10^{-19} \text{ J} = \frac{5.7 \times 10^{-19}}{1.6 \times 10^{-19}} = 3.6 \text{ eV}$$

وفوتونات تمتلك هذه الطاقة تستطيع تحرير إلكترونات من سطحي الكالسيوم والسيزيوم، لكنها لا تستطيع تحرير إلكترونات من سطو ح الألمنيوم والبريليوم والبلاتين. والطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحررة من السيزيوم تكون أكبر منها للكالسيوم؛ لأن اقتران الشغل للسيزيوم أقل

5. **أستخدم المتغيّرات:** سقط إشعاع كهرمغناطيسي طول موجته (80 nm) على سطح فلزّ اقتران الشغل له (5.1 eV) ، أجد أصغر (وأكبر) طاقة حركية للإلكترونات المتحرّرة من سطح الفلزّ.

$$K_{min} = 0$$

$$K_{max} = h\frac{c}{\lambda} - \Phi$$

$$= 6.63 \times 10^{-34} \times \frac{3 \times 10^{8}}{80 \times 10^{-9}} - 5.1 \times 1.6 \times 10^{-19} = 1.7 \times 10^{-18} \text{J}$$

$$= \frac{1.7 \times 10^{-18}}{1.6 \times 10^{-19}} = 10.4 \text{ eV}$$

6. **أناقش:** بيّنت التجارب أنّ زيادة شدّة الضوء الساقط على سطح فلزّ لا تؤدي إلى زيادة الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحرّرة من سطحه. أناقش فشل الطبيعة الموجيّة للضوء في تفسير هذه المشاهدة.

يفترض النموذج الموجي للضوء أن طاقة الضوء تعتمد على شدته وأن الأجسام تمتص الطاقة من الضوء بشكل متصل، فلو كانت هذه الفرضية صحيحة لزادت الطاقة الحركية العظمى بزيادة شدة الضوء الساقط على الفلز وهو ما تعارض مع النتائج التجريبية للظاهرة الكهرضوئية.

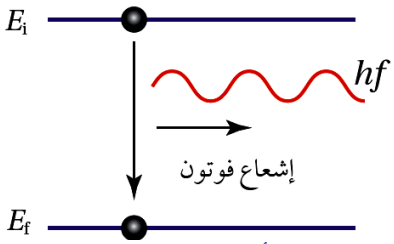
الدرسُ الثاني: التركيب الذرّي Atomic Structure

نموذج بور لذرّة الهيدروجين:

اعتمد بور على نموذج العالم طومسون والعالم رذرفورد حتى وصل الى نموذجه لبناء الذرة كما يلي :

1. بداية، افترض طومسون أنّ الذرة عبارة عن كرة مصمتة موجبة الشحنة تتوزّع فيها الإلكترونات سالبة الشحنة، وأنّ الذرة متعادلة كهربائيًّا؛ لأنّ مجموع الشحنة السالبة يساوي مجموع الشحنة الموجبة.
2. جاء العالم رذرفورد أثبتت عدم صحّة هذا النموذج. ففي تجربته الشهيرة عام 1911 ،أسقط رذرفورد جُسيمات ألفا على صفيحة رقيقة من الذهب، وافترض، بناءً على مشاهداته التجريبية، أنّ الذرة تتكوّن من نواة موجبة الشحنة تشغل حيزًا صغيرًا جدًّا، تتركّز فيه غالبية كتلة الذرة، تدور حوله إلكترونات سالبة الشحنة مثل دوران الكواكب حول الشمس. ولم يُكتب لهذا النموذج النجاح؛ لأنّه لم يستطع تفسير استقرار الذرة. حيث إن الإلكترون جُسيم مشحون يدور حول النواة، ويغيّر من اتجاه حركته بشكل مستمر، وبذلك يمتلك تسارعًا مركزيًّا، وحسب النظرية الكهرمغناطيسية فإنّه سيشعّ (يفقد) طاقة بشكل متصل، ونتيجة فقدانه الطاقة؛ فإنّه سينجذب نحو النواة ما يؤدّي إلى انهيار الذرة. وهذا يخالف النتائج التجريبية، حيث الذرة مستقرة والطاقة التي تشعّها منفصلة ذات قيم محدّدة.
3. جاء العالم بور و كان مقتنعًا بصحّة نموذج رذرفورد، لكنّه اختلف معه في كيفيّة إشعاع الإلكترون للطاقة، فافترض أنّ الإلكترون يفقد الطاقة على شكل كمات محدّدة من الطاقة (فوتونات)، لا على شكل متّصل. واستخدم بور مبدأ تكمية الطاقة، ونموذج رذرفورد إضافة إلى النموذج الجُسيمي للإشعاع ليبني نموذجاً للذرة عُدَّ فيما بعد أهمّ الإنجازات العلميّة في ذلك الوقت. تتلخص فرضيات بور لذرة الهيدروجين فيما يلي:
   أ. يدور الإلكترون حول البروتون (النواة) في مسارات دائرية تحت تأثير قوة التجاذب الكهربائي.
   ب. توجد مدارات محدّدة (مستويات طاقة) مسموح للإلكترون بأن يحتلّها، وإذا بقي في مستوى الطاقة نفسه فلا يشعّ طاقة ولا يمتصّها.

ج. . يشعّ الإلكترون طاقة أو يمتصّها فقط إذا انتقل من مستوى طاقة إلى مستوى آخر. فعند انتقال الإلكترون من مستوى طاقة أعلى إلى مستوى طاقة أقلّ، فإنّه يشعّ فوتونًا طاقته تساوي الفرق بين طاقتي المستويين، كما في الشكل المجاور (أ)، ويمكن أيضًا أن يمتص الإلكترون فوتونًا، وينتقل إلى مستوى طاقة أعلى عندما تكون طاقة الفوتون الممتَصّ مساوية لفرق الطاقة بين المستويين، كما في الشكل المجاور (ب) وفي كلتا الحالتين فإنّ طاقة الفوتون (E) المنبَعِث أو الممتَصّ يُعبَّر عنها بالعلاقة:



الشكل (أ): إشعاع الذرة لفوتون في هذه الحالة الذرة تفقد طاقة.

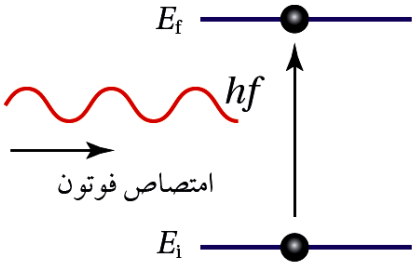
$$E = |E_f - E_i| = hf$$

حيث :

E_f : طاقة المدار (مستوى الطاقة) النهائي الذي انتقل إليه الإلكترون.

E_i : طاقة المدار (مستوى الطاقة) الابتدائي الذي انتقل منه الإلكترون.

f : تردّد الفوتون المنبَعِث أو المُمتَصّ.



الشكل (ب): امتصاص الذرة لفوتون في هذه الحالة الذرة تكتسب طاقة.

د. المدارات المسموح للإلكترون أن يحتلها هي تلك التي يكون فيها مقدار زخمه الزاويّ ($L = m_e vr$) يساوي عددًا صحيحًا من مضاعفات ($\hbar$)، حيث :

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.05 \times 10^{-34}\text{J.s}$$

$$L = n\hbar = m_e vr$$

حيث :

n: رقم المدار ويأخذ قيمًا صحيحة 1,2,3 ,…, وهكذا

m_e: كتلة الإلكترون وتساوي 9.11×10^{-31}kg

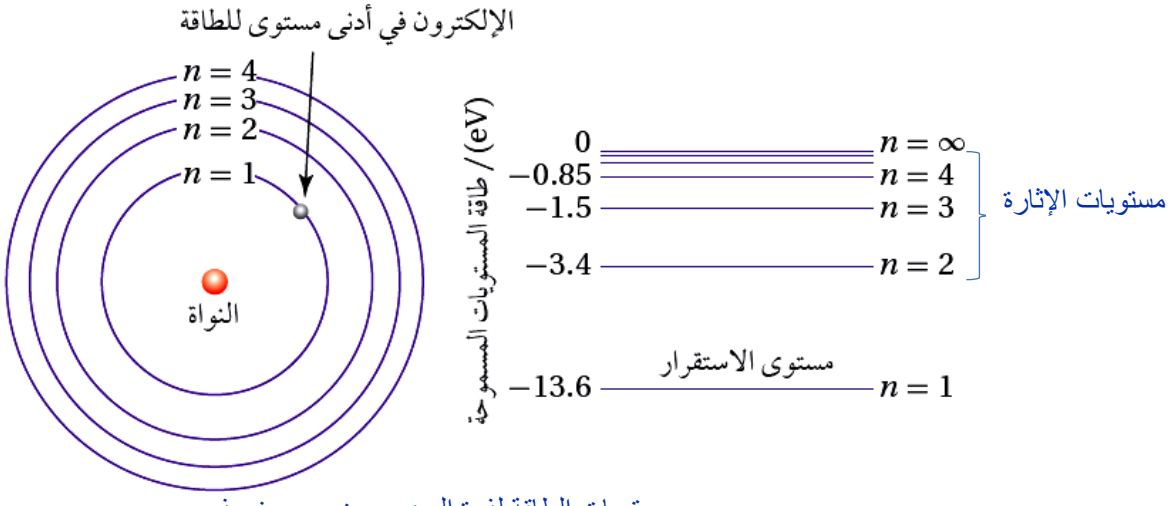
r : نصف قطر مدار الإلكترون

ففي المدار الأول (n =1) يكون الزخم الزاويّ للإلكترون ($\hbar$) ، وفي المدار الثاني ($2\hbar$) وهكذا .

ويُعبَّر عن طاقة الإلكترون في مستوى الطاقة (n) في ذرة الهيدروجين بوحدة (eV) بالعلاقة الآتية:

$$E_n = -\frac{13.6}{n^2}$$

حيث (n = 1,2,3,4,….) هو رقم المدار (مستوى الطاقة) ويُسمّى الرقم الكمّي.



مستويات الطاقة لذرة الهيدروجين حسب نموذج بور.

أُلاحظ من العلاقة والشكل السابق ما يلي:

1. أنّ مستويات الطاقة غير متصلة (منفصلة) وتأخذ قيمًا محدّدة، أيْ إنّها (مكمّاة)، فمثلاً طاقة المستوى الأول (-13.6 eV) وطاقة المستوى الثاني (-3.40 eV) والشكل يبيّن مستويات الطاقة لذرة الهيدروجين، حيث يُمثَّل كلُّ مستوًى بخطٍّ أفقيٍّ مُبَيَّنًا بجانبه الرقمُ الكميُّ الرئيسُ (n) ، وطاقةُ المستوى بوحدة (eV).
2. أنّ الإلكترون في مستوى الطاقة الأول يمتلك أقلّ طاقة وهي ($E_1 = -13.6$ eV) ، ويُسمّى مستوى الاستقرار (Ground state).
3. أمّا مستويات الطاقة (E_n) حيث ($n > 1$) ، فتُسمّى مستويات الإثارة (Excited states)
4. حتى ينتقل إلكترون في الذرة من مستوى الطاقة الأول ($E_1 = -13.6$ eV) إلى مستوى الطاقة الثاني ($E_2 = -3.4$ eV) يجب أن يمتص فوتونًا طاقته تساوي الفرق بين طاقتي المستويين، أيْ (10.2 eV)
5. حتى ينتقل إلكترون من مستوى الطاقة الأول ($n = 1$) إلى مستوى الطاقة ($n = \infty, E_\infty = 0$) ، فيتطلّب امتصاص فوتون طاقته (13.6 eV) ، وتُسمّى **طاقة التأيُّن Ionization energy** .

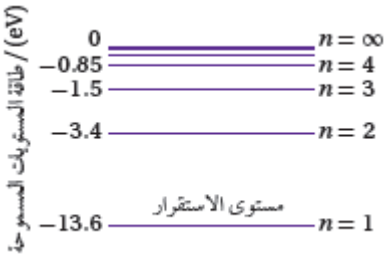
طاقة التأيُّن Ionization energy : وهي أقلّ طاقة لازمة لتحرير الإلكترون من الذرة دون إكسابه طاقة حركية.

والإشارة السالبة لطاقة المستوى (n) تعني ضرورة تزويد الإلكترون بطاقة مقدارها ($+\frac{13.6}{n^2}$,eV) لتحريره من الذرة.

ماذا يحدث للإلكترون إذا زادت طاقة الفوتون الذي يمتصّه على طاقة التأيُّن؟

يمتص الإلكترون جميع طاقة الفوتون ويتحرر من الذرة. ويتحول ما يزيد من طاقة الفوتون عن طاقة التأيّن إلى طاقة حركية يمتلكها الإلكترون.

مثال 10: كتاب



اعتمادًا على الشكل المجاور الذي يمثل مستويات الطاقة في نموذج بور لذرة الهيدروجين ، أجد طاقة الفوتون المنبعث عند انتقال الإلكترون من مستوى الطاقة الثالث إلى مستوى الطاقة الثاني بوحدة (eV) ثمّ أحوّله إلى وحدة (J) .

المُعطيات :

$$1\ \text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J},\ E_3 = -1.50\ \text{eV},\ E_2 = -3.40\ \text{eV}$$

المطلوب:

$$E = ?$$

الحل :

$$E = |\Delta E| = |E_f - E_i| = |E_2 - E_3|$$

$$= |-3.40 - (-1.50)| = 1.90\ \text{eV}$$

$$= 1.90 \times 1.6 \times 10^{-19} = 3.04 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

مثال 11: كتاب

اعتمادًا على الشكل المجاور الذي يمثل مستويات الطاقة في نموذج بور لذرة الهيدروجين ، جد طاقة الفوتون اللازمة لنقل الإلكترون من مستوى الاستقرار (n_1) إلى مستوى الطاقة الثالث بوحدة (eV) .

المُعطيات :

$$E_3 = -1.50\mathrm{eV},\ E_1 = -13.6\ \mathrm{eV}$$

المطلوب:

$$E = ?$$

الحل :

$$E = |\Delta E| = |E_f - E_i| = |E_3 - E_1|$$

$$= -1.50 - (-13.6)| = 12.1\ \ \mathrm{eV}$$

مثال 12: كتاب

لإلكترون في مستوى الطاقة الثاني لذرة الهيدروجين، جد ما يأتي:

أ . الزخم الزاويّ للإلكترون.

ب. طاقة الإلكترون.

المُعطياتُ:

$$\hbar = 1.05 \times 10^{-34}\mathrm{J.s}\ ,\ n = 2$$

المطلوبُ:

$$L = ?\ ,\ E_2 = ?$$

الحلّ:

أ. الزخم الزاويّ للإلكترون:

$$L = n\,\hbar = 2\hbar = 2 \times 1.05 \times 10^{-34} = 2.1 \times 10^{-34}\mathrm{J.s}$$

ب. طاقة الإلكترون:

$$E_n = -\frac{13.6}{n^2}$$

$$E_2 = -\frac{13.6}{2^2} = -\ 3.4\ \mathrm{eV}$$

مثال 13: كتاب

أجد تردّد الفوتون اللازم لنقل إلكترون في ذرة الهيدروجين من مستوى الطاقة الثاني إلى مستوى الطاقة الثالث.

المُعطيات : $h = 6.63 \times 10^{-34}\mathrm{J.s},\ 1\ \mathrm{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\mathrm{J},\ n_i = 2,\ n_f = 3$

المطلوب : $f = ?$

الحلّ:

$$E = |\Delta E| = |E_f - E_i| = \left| -\frac{13.6}{{n_f}^2} - \frac{-13.6}{{n_i}^2} \right| = \left| -\frac{13.6}{3^2} - \frac{-13.6}{2^2} \right|$$

$$= |-1.5 - (-3.4)| = 1.9\ \mathrm{eV} = 1.9 \times 1.6 \times 10^{-19} = 3.0 \times 10^{-19}\mathrm{J}$$

$$f = \frac{E}{h} = \frac{3.0 \times 10^{-19}}{6.63 \times 10^{-34}} = 4.5 \times 10^{14}\ \mathrm{Hz}$$

تمرين 3: كتاب

انتقل إلكترون ذرة الهيدروجين من مستوى الطاقة (n_i) إلى مستوى الطاقة الثاني، فانبعث فوتون بطاقة $(4.08 \times 10^{-19}\text{J})$. جد قيمة رقم مستوى الطاقة (n_i) .

الحلّ:

$$|\Delta E| = \frac{4.08 \times 10^{-19}}{1.6 \times 10^{-19}} = 2.55 \text{ eV}$$

فعند انتقال الإلكترون من مستوى طاقة أعلى إلى مستوى طاقة أقلّ، فإنّه يشعّ فوتونًا طاقته تساوي الفرق بين طاقتي المستويين لذلك يكون الالكترون قد فقد طاقة بمقدار 2.55 eV وتكون $(\Delta E = -2.55eV)$

$$\Delta E = E_f - E_i = -\frac{13.6}{{n_f}^2} - \frac{-13.6}{{n_i}^2}$$

$$-2.55 = -\frac{13.6}{2^2} - \frac{-13.6}{{n_i}^2} = -3.4 + \frac{13.6}{{n_i}^2}$$

$$0.85 = \frac{13.6}{{n_i}^2} \longrightarrow n_i = \sqrt{\frac{13.6}{0.85}} = \sqrt{16} = 4$$

الأطياف الذريّة Atomic Spectra

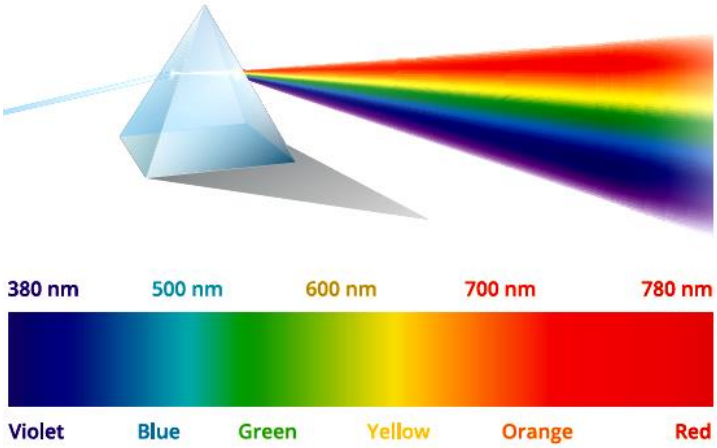
تقسم أنواع الطيف الى نوعين:

1. الطيف المتصل Continuous spectrum

الطيف المتصل : وسُمّي متّصلً لأنّه يحتوي الأطوال الموجيّة كافة بدءًا من اللون الأحمر وصولً إلى اللون البنفسجي

كيف نحصل على ألوان الطيف المتصل؟

نحصل على ألوان الطيف المتصل بتمرير ضوء الشمس أو مصباح التنغستن على منشور كما في الشكل التالي :



ملاحظات على الشكل :

1. تم التعامل مع جزء من طيف الأشعة المرئي لسهولة تميزه بالعين المجردة وما ينطبق علية يعمم على كافة الترددات في طيف الأشعة .
2. لا يوجد حدود فاصلة بين الألوان وعند الانتقال من لون الى لون أخر مجاور يكون اللون مزيج بين اللونين .

2. الطيف الذريّ غير المتصل Discontinuous spectrum

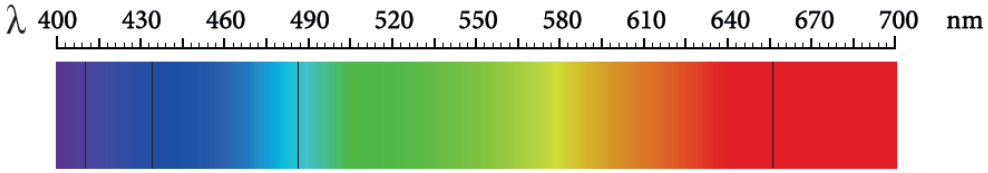
الطيف الذريّ غير المتصل هو الطيف الناتج عن ذرات عنصر واحد ويقسم الى نوعين :

أ. **طيف الامتصاص الخطّي: Absorption Line Spectrum**

طيف الامتصاص الخطّي : ظهور خطوط معتمة منفصلة على خلفية مضيئة بعد إمرار ضوء الشمس خلال غاز عنصر معيّن.

كيف نحصل على طيف الامتصاص الخطّي ؟

إذا مُرّر ضوء الشمس خلال غاز عنصر معيّن، فإنّ ذرات الغاز تمتص أطوالاً موجيّةً معيّنة فقط ، وبتحليل الطيف النافذ لوحظ وجود خطوط معتمة منفصلة على خلفية مضيئة.

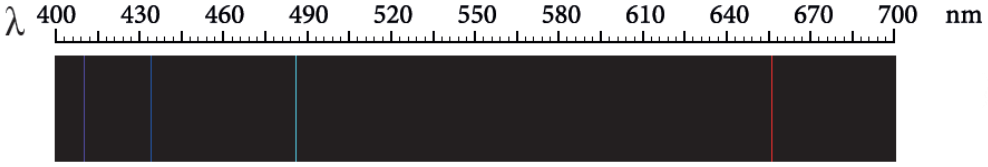


ب. **طيف الانبعاث الخطّي Emission line spectrum.**

طيف الانبعاث الخطّي : ظهور خطوط مضيئة على خلفية معتمة بعد تحليل الضوء المنبعث من ذرات العناصر المثارة (في مستوي الإثارة).

كيف نحصل على طيف الانبعاث الخطّي ؟

عندما تكون الذرة في مستوى الإثارة (نتيجة امتصاص الذرة فوتونًا ذا طاقة معينة، وانتقال الالكترون فيها إلى مستوى طاقة أعلى) ، فتسعى الذرة الى العودة الى مستوى الاستقرار ببعث فوتون طاقته (E) تساوي الفرق بين طاقتي المستويين اللذين ينتقل بينهما. وبذلك، فإنّ للأشعة المنبعثة طولاً موجيًّا (لونًا) محدّدًا. وكلّما تغيّر أحد المستويين أو كلاهما تتغيّر طاقة الفوتون المنبعث، ما يؤدّي إلى إشعاع الذرة ألوانًا مختلفة تكون غير متصلة؛ لأنّ مستويات الطاقة غير متصلة أيضًا.

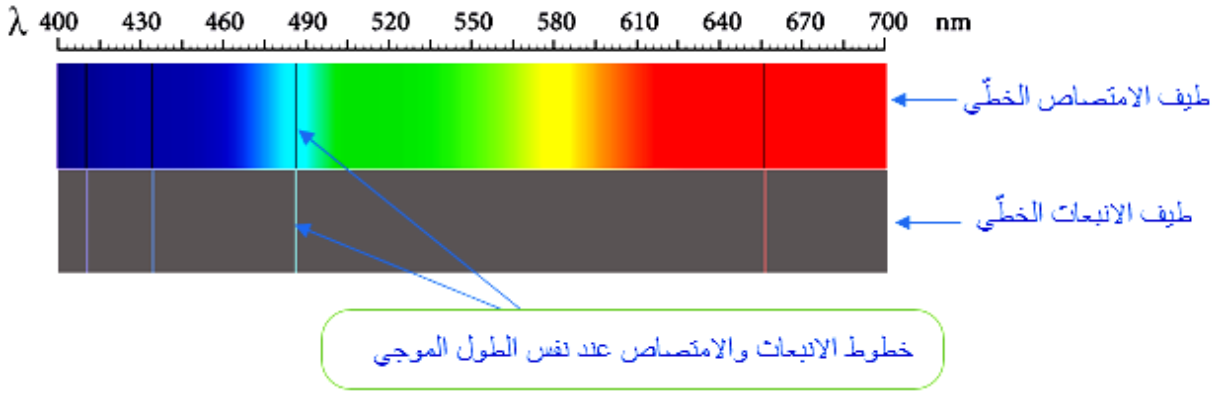


ما العلاقة بين طيف الانبعاث الخطّي و طيف الامتصاص الخطّي؟

عند مقارنة طيف الانبعاث الخطّي و طيف الامتصاص الخطّي لنفس العنصر يكون هناك تطابق في الأماكن التي يحدث فيها امتصاص وانبعاث ،

فالخطوط المعتمة الناتجة عن فقدان أطوال موجيّة معينة امتصّتها ذرات الغاز، وهي تقابل تمامًا الخطوط المضيئة التي ظهرت في طيف الانبعاث الخطّي لذرات العنصر نفسه، ؛ لأنّ الأطوال الموجيّة المحدّدة من الطيف التي تمتصّها ذرات عنصر معيّن هي الأطوال الموجيّة نفسها التي تشعّها. لذا، يُعدّ طيف العنصر من الخصائص المميزة له (مَزِيَّة خاصّة) ، كالبصمة للإنسان، ولا يمكن لعنصرين أن يكون لهما الطيف الخطّي نفسه.

والشكل المجاور يمثل طيف الامتصاص والانبعاث للعنصر نفسه (ذرة الهيدروجين).



ما الفرق بين الطيف الناتج عن أشعة الشمس المرئيّة (ضوء الشمس) والطيف الناتج عن غاز عنصرٍ ما عند عبور ضوء الشمس خلاله؟

طيف ضوء الشمس المرئي تظهر فيه جميع ألوان الطيف المرئي أي أنه طيف متصل. وعند عبور ضوء الشمس خلال غاز عنصر ما فإن هذا العنصر يمتص بعض الألوان من ضوء الشمس فيظهر ذلك على شكل خطوط معتمة في الطيف المرئي المتصل يسمى (طيف الامتصاص الخطي للعنصر).

نموذج بور وطيف ذرة الهيدروجين
Bohr's Model and the Hydrogen Spectrum

يمثل الشكل المجاور نموذج بور لطيف ذرة الهيدروجين ، ومن الشكل يمكن ملاحظة ما يلي :

1. يمثل هذا الطيف طيف الانبعاث الخطي لذرة الهيدروجين في منطقة الضوء المرئي فقط.
2. نجح بور في تفسير طيف ذرة الهيدروجين والأيونات ذات الإلكترون الواحد، لكنه فشل في تفسير أطياف الذرات عديدة الإلكترونات.
3. نجح نموذج العالم بور في حساب الأطوال الموجيّة لطيف ذرة الهيدروجين. فعند انتقال الإلكترون من مستوى الطاقة (n_i) إلى مستوى الطاقة(n_f)، فإنّ طاقة الفوتون (hf) بوحدة الجول، هي:

$$hf = |E_f - E_i| = 13.6e \left| \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right|$$

وبالتعويض عن التردّد ($f = c/\lambda$) وقسمة المعادلة (hc) على نحصل على:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{13.6e}{hc} \left| \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right|$$

حيث e : هي القيمة المطلقة لشحنة الإلكترون.

المقدار ($\frac{13.6e}{hc}$) : ثابت يُسمّى ثابت ريدبيرغ (R_H) ويساوي ($R_H = 1.097 \times 10^7 m^{-1}$).

(λ) : الطول الموجي للفوتون المنبعث.

وبذلك تصبح العلاقة كما يلي :

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left| \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right|$$

هل نجح نموذج بور في التنبّؤ بالأطوال الموجيّة لطيف انبعاث ذرّة الهيدروجين؟

نجح نموذج بور في التنبؤ بالأطوال الموجية لطيف ذرة الهيدروجين. فقد تمكن بور باستخدام نموذجه لذرة الهيدروجين من حساب الأطوال الموجية للطيف المرئي لذرة الهيدروجين.

هل يمكن تفسير الأطياف الذريّة باستخدام مفاهيم الفيزياء الكلاسيكية؟ أفسّر إجابتي.

لا يمكن تفسير الأطياف الذرية باستخدام مفاهيم الفيزياء الكلاسيكية، لأن هذه المفاهيم تفترض أن الذرة تستطيع أن تشع الضوء أو تمتصه بأي تردد، وبالتالي فالطيف المتوقع من الذرات حسب مفاهيم الفيزياء الكلاسيكية يجب أن يكون طيفاً متصلا ، وهذا يخالف النتائج التجريبية.

مثال 14: كتاب

أجدُ طول موجة الفوتون المنبعِث عند انتقال إلكترون ذرة الهيدروجين من مستوى الطاقة الثاني إلى مستوى الطاقة الأول.

المُعطيات : $R_H = 1.097 \times 10^7\ m^{-1}, n_f = 1\ ,\ n_i = 2$

المطلوب : $\lambda = ?$

الحلّ:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left| \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right| = 1.097 \times 10^7 \left| \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right|$$

$$= 1.097 \times 10^7 \left| \frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right|$$

$$\frac{1}{\lambda} = 1.097 \times 10^7 \times \frac{3}{4} = 8.228 \times 10^6\ m^{-1}$$

$$\rightarrow \lambda = 1.215 \times 10^{-7}\ \text{m} = 121.5\ \text{nm}$$

مثال 15: كتاب

أجدُ الأطوال الموجيّة للفوتونات المنبعِثة عند انتقال إلكترون ذرة الهيدروجين من مستويات الطاقة: الثالث، والرابع، والخامس، والسادس إلى مستوى الطاقة الثاني. وأقارن الأطوال الموجيّة التي حصلت عليها بتلك الموجودة في شكل طيف الانبعاث الخطي في نموذج بور.

المُعطيات : $R_H = 1.097 \times 10^7\ m^{-1}, n_f = 2\ ,\ n_i = 3\ ,\ 4\ ,\ 5\ ,\ 6$

المطلوب : $\lambda = ?$

الحلّ:

أحسب طول موجة الفوتون المنبعث عند انتقال الإلكترون من مستوى الطاقة الثالث إلى مستوى الطاقة الثاني من العلاقة:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left| \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right| = 1.097 \times 10^7 \left| \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right|$$

$$= 1.097 \times 10^7 \left| \frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right|$$

$$\frac{1}{\lambda} = 1.523 \times 10^6\ m^{-1}$$

$$\rightarrow \lambda = 6.563 \times 10^{-7}\ \text{m} = 656.3\ \text{nm}$$

نكرّر العملية عندما $n_i = 4\ ,\ 5\ ,\ 6$

n_i	3	4	5	6
القيم المحسوبة λ	656.3 nm	486.2 nm	434.1 nm	410.2 nm
القيم التجريبيّة λ	656.2 nm	486.1 nm	434.0 nm	410.1 nm

نلاحظ أنّ الأطوال الموجيّة تقع كلّها ضمن الأطوال الموجيّة للطيف المرئي، وأنّ القيم المحسوبة من علاقة بور قريبة جدًّا من القيم التجريبية، ما يدلّ على صحة نموذج بور لذرة الهيدروجين.

تمرين 4: كتاب

انتقل إلكترون ذرة الهيدروجين من مستوى الطاقة الرابع إلى مستوى الطاقة الأول، حسب نموذج بور.
أحسبُ طول موجة الفوتون المنبعث وتردّده وطاقته وزخمه الخطيّ.

الحلّ:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left| \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right| = 1.097 \times 10^7 \left| \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right|$$

$$= 1.097 \times 10^7 \left| \frac{1}{1^2} - \frac{1}{4^2} \right|$$

$$\frac{1}{\lambda} = 1.028 \times 10^7 \, m^{-1}$$

$$\rightarrow \lambda = 97.23 \times 10^{-9} \text{ m} = 97.23 \text{ nm}$$

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8}{97.23 \times 10^{-9}} = 3.085 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

$$E = hf = 6.63 \times 10^{-34} \times 3.085 \times 10^{15} = 2.05 \times 10^{-18} \text{J} = 12.8 \text{ eV}$$

$$p = \frac{E}{C} = \frac{2.05 \times 10^{-18}}{3 \times 10^8} = 6.83 \times 10^{-27} \text{kg.m/s}$$

الطبيعة الموجيّة-الجُسيميّة Wave-Particle Duality

في الشكل المجاور بعض الظواهر التجريبية التي اعتمدت أن الضوء عبارة عن أمواج واستطاع بناءا على ذلك تفسير ظاهرتي التداخل والحيود ، وعلى اعتبار أن الضوء عبارة عن جسيمات استطاع تفسير ظواهر مثل إشعاع الجسم الأسود وظاهرة كومبتون والتأثير الكهرضوئي والأطياف الذرية . فافترض العلماء أنّ للإشعاع الكهرمغناطيسي طبيعة **موجيّة – جُسيميّة مزدوجة.**
أنّ الضوء يتكوّن من جُسيمات (فوتونات) تمتلك زخمًا خطّيًّا يُحسب مقداره من العلاقة:

	الضوء كموجة	الضوء كجسيم
التداخل	✓	✗
الحيود	✓	✗
إشعاع الجسم الأسود	✗	✓
ظاهرة كومبتون	✗	✓
التأثير الكهروضوئي	✗	✓
الأطياف الذرية	✗	✓

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

اقترح العالم دي بروي de Broglie عام 1923 أنّ للأجسام الماديّة طبيعة موجيّة. واستخدم العلاقة السابقة في حساب الطول الموجيّ لجسم ما على النحو الآتي:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

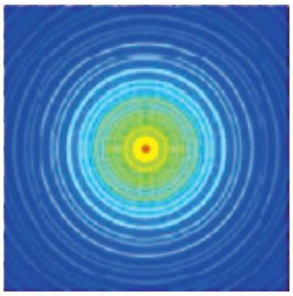
حيث:

λ : طول موجة دي بروي، ويُطلق عليها اسم الموجة المصاحِبة للجسم.
h : ثابت بلاك
p : مقدار الزخم الخطّي للجسم.
m : كتلة الجسم
v : سرعة الجسم

ما هي طبيعة الموجات المصاحبة للجسيمات (موجات دي بروي)؟

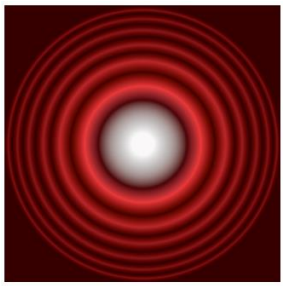
1. ليست موجات ميكانيكية (مثل موجات الصوت) ، وليست كهرمغناطيسية (مثل أمواج الضوء).
2. طول موجة دي بروي المصاحِبة لجسم كبير (جاهري)، نجد أنّها صغيرة جدًّا، بل أصغر بكثير من أبعاد الجسم.
3. طول موجة دي بروي المُصاحِبة لجُسيم صغير مثل الإلكترون قريب من قيمة المسافة الفاصلة بين الذرات في الموادّ الصُّلبة.

تمكّن العالمان دافسون Davisson وجيرمر Germer بعد ثلاث سنوات من وضع دي بروي لفرضيته من الكشف تجريبيًّا عن الطبيعة الموجيّة للإلكترونات عند إسقاط حزمة من الإلكترونات على بلورة من النيكل، حيث المسافة بين ذرات النيكل مُقارِبة لطول موجة دي بروي المصاحِبة للإلكترونات. وقد أظهرت نتائج التجربة وجود نمط حيود للإلكترونات كما هو مبيَّن في الشكل المجاور(أ) الذي يشبه نمط حيود الضوء المبيَّن في الشكل (ب).



(أ)

نمط حيود
إلكترونات أُسقطت على
بلورة من النيكل



(ب)

نمط حيود
حزمة ضوئية أُسقطت
على فتحة دائريّة.

أذكر فرضيّة دي بروي .

للجسيمات المادية طبيعة جسيمية - موجية مزدوجة، وأن الطول الموجي لجسيمة يعطى بالعلاقة:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

مثال 16: كتاب

أجد طول موجة دي بروي المصاحِبة لِ:
أ . إلكترون سرعته 1.00×10^6 m/s .
ب. رصاصة كتلتها $m_b = 50.0$ g تتحرك بسرعة $v_b = 400$ m/s.

المُعطيات : $h = 6.63 \times 10^{-34}$J.s, $m_e = 9.11 \times 10^{-31}$kg, $v_e = 1.00 \times 10^6$ m/s
$m_b = 50.0 \times 10^{-3}$kg, $v_b = 400$ m/s
المطلوب : $\lambda_e = ?, \lambda_b = ?$

الحلّ:
أ . الإلكترون :

$$\lambda_e = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{9.11 \times 10^{-31} \times 1.00 \times 10^6} = 7.27 \times 10^{-10}\text{m} = 0.727\text{ nm}$$

أُلاحظ أنّ طول موجة دي بروي المصاحِبة للإلكترون تقارب المسافة الفاصلة بين الذرات في البلورات، لذلك يمكن ملاحظة نمط الحيود للإلكترونات على نحو ما جاء في تجربة دافسون وجيرمر.

ب. الرصاصة:

$$\lambda_e = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{50.0 \times 10^{-3} \times 400} = 3.32 \times 10^{-35}\text{m} = 3.32 \times 10^{-26}\text{nm}$$

من الواضح أنّ طول موجة دي بروي المصاحبة للرصاصة صغير جدًّا حتى مع المقارنة بالمسافات الفاصلة بين الذرات في البلورات، لذلك لا يمكن مشاهدة نمط حيود للأجسام الجاهريّة.

مثال 17: كتاب

تسارع إلكترون من السكون بفرق جهد مقداره (2.7 V) ، أجد طول موجة دي بروي المصاحِبة له عند نهاية مدّة تسارُعه.

المُعطيات : $v_i = 0, h = 6.63 \times 10^{-34}$J.s, $m_e = 9.11 \times 10^{-31}$kg, $\Delta V = 2.7$ V
المطلوب : $\lambda_b = ?$
الحلّ:
نجد أولاً مقدار السرعة النهائيّة للإلكترون من العلاقة:

$$K = \frac{1}{2} mv^2 = e\,\Delta V$$
$$\frac{1}{2} \times 9.11 \times 10^{-31} \times v^2 = 1.6 \times 10^{-19} \times 2.7$$
$$v = 9.73 \times 10^5 \text{ m/s}$$

ثمّ نجد طول موجة دي بروي المصاحِبة له:

$$\lambda_e = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{9.11 \times 10^{-31} \times 9.73 \times 10^5} = 7.5 \times 10^{-10}\text{m} = 0.75\text{ nm}$$

تمرين 5: كتاب

1. قاس سعيد طول موجة دي بروي لحزمة من الإلكترونات فوجدها ($2.24 \times 10^{-10}\text{m}$) ، جد فرق الجهد المستَخدم في تسريع الإلكترونات.

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{2.24 \times 10^{-10}} = 2.96 \times 10^{-24}\text{kg.m /s}$$

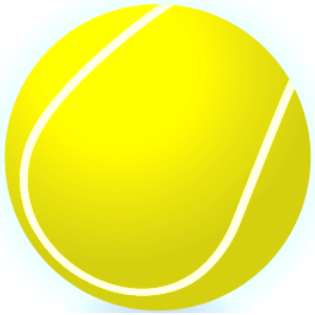
$$v = \frac{p}{m} = \frac{2.96 \times 10^{-24}}{9.11 \times 10^{-31}} = 3.25 \times 10^{6}\text{ m /s}$$

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = e\,\Delta V$$

$$\frac{1}{2} \times 9.11 \times 10^{-31} \times (3.25 \times 10^{6})^2 = 1.6 \times 10^{-19} \times \Delta V$$

$$\Delta V = 30.1\text{V}$$

2. ضربت مريم كرة تنس كتلتها (60 g) وقطرها (6.5 cm) ، فتحرّكت بسرعة (25 m/s)
   أ . جد طول موجة دي بروي المصاحِبة لها.
   ب. أقارن بين طول موجة دي بروي وقطر كرة التنس.



أ . طول موجة دي بروي المصاحبة للكرة:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{60 \times 10^{-3} \times 25} = 4.42 \times 10^{-34}\text{m}$$

ب. المقارنة:

إن طول موجة دي بروي (λ) المصاحبة للكرة أصغر بكثير من قطر كرة التنس، وهذا يفسر صعوبة تصميم تجربة للكشف عن الأطوال الموجية المصاحبة للأجسام الجاهرية.

أسئلة مراجعة الدرس الثاني

1. **الفكرة الرئيسة:** أوضّح المقصود بكلٍّ من: طيف الامتصاص الخطّي، طيف الانبعاث الخطّي.

طيف الامتصاص الخطي: الأطوال الموجية التي تمتصها غازات العناصر وتظهر على شكل خطوط معتمة منفصلة على خلفية مضيئة.

طيف الانبعاث الخطي: الأطوال الموجية التي تشعها ذرات العناصر المثارة وتظهر على شكل خطوط مضيئة منفصلة على خلفية سوداء.

2. **أذكر** حدود نموذج بور.

حدود نموذج بور: لم يستطع تفسير الأطياف الذرية للذرات عديدة الإلكترونات.

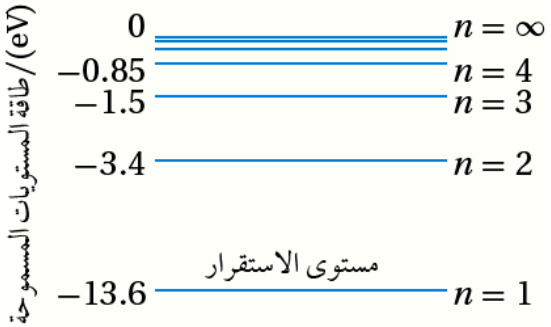
3. **أستخدمُ الأرقام:** أجدُ الزخم الزاويّ وطاقة الإلكترون في المدار الرابع لذرة الهيدروجين.

$$L = n\,\hbar = 4\hbar = 4 \times 1.05 \times 10^{-34} = 4.2 \times 10^{-34}\,\text{J.s}$$

$$E_n = -\frac{13.6}{n^2}$$

$$E_4 = -\frac{13.6}{4^2} = -0.85\ \text{eV}$$

4. **أحلّل الشكل:** إلكترون موجود في مستوى الاستقرار لذرة الهيدروجين. بالاعتماد على الشكل المجاور، أجدُ أصغر ثلاث قيم للطاقة يمكن لهذا الإلكترون أن يمتصّها.



لنقله إلى مستوى الطاقة الثاني:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = -3.4 - (-13.6) = 10.2\ \text{eV}$$

لنقله إلى مستوى الطاقة الثالث:

$$\Delta E = E_3 - E_1 = -1.5 - (-13.6) = 12.1\ \text{eV}$$

لنقله إلى مستوى الطاقة الرابع:

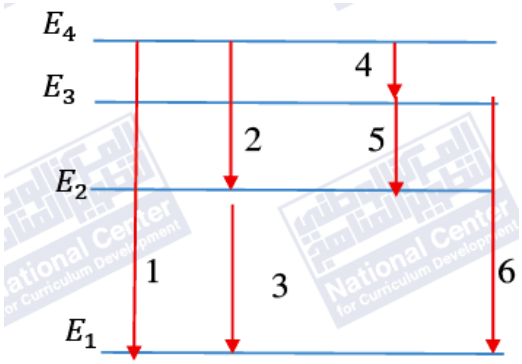
$$\Delta E = E_4 - E_1 = -0.85 - (-13.6) = 12.75\ \text{eV}$$

5. **أصنّف** الكميّات الفيزيائيّة الآتية (الطول الموجيّ، التردّد، الطاقة، الزخم الخطّي) من حيث ارتباطها بالطبيعة الموجيّة أو الجُسيميّة للمادّة.

الكميات المرتبطة بالطبيعة الموجية : الطول الموجي، التردد.
الكميات المرتبطة بالطبيعة الجسيمية : الزخم الخطي.
بينما فيما يخص الطاقة، فالجسيمات والموجات تحمل طاقة.

6. **أستنتج:** إلكترون في مستوى الطاقة الرابع لذرة الهيدروجين، ما الانتقالات التي يمكن أن يفقد بها الإلكترون طاقته، أوضّح ذلك على رسم لمستويات الطاقة.

الإجابة كما هي موضحة في الشكل المجاور.



7. **أحسب** طول موجة الإشعاع اللازم لنقل إلكترون من مستوى الاستقرار لذرة الهيدروجين إلى مستوى الطاقة الثالث.

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left| \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right| = 1.097 \times 10^7 \left| \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right|$$

$$= 1.097 \times 10^7 \left| \frac{1}{3^2} - \frac{1}{1^2} \right|$$

$$\frac{1}{\lambda} = 0.9751 \times 10^7 \; m^{-1}$$

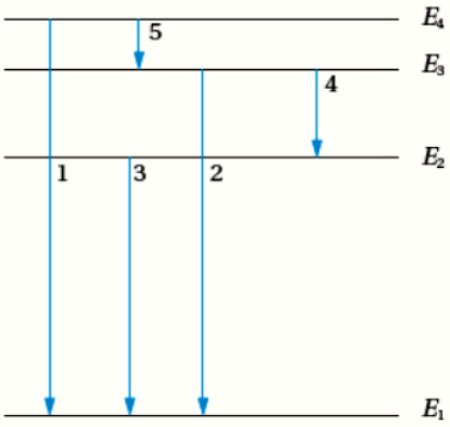
$$\rightarrow \lambda = 103 \times 10^{-9} \text{ m} = 103 \text{ nm}$$

8. **أحلّل الشكل:** يمثّل الشكل المجاور مستويات الطاقة المسموح بها لإلكترون في ذرة ما، والانتقالات بين مستويات الطاقة (الأرقام من 1 إلى 5)

أ . أيّ الانتقالات ينتج عنه انبعاث فوتون بأكبر طول موجيّ؟

ب. أيّ الانتقالات ينتج عنه انبعاث فوتون بأكبر طاقة؟

ج . أيّ الانتقالات ينتج عنه انبعاث فوتون بأقلّ تردّد؟



أ. انتقال الإلكترون من مستوى الطاقة الرابع إلى مستوى الطاقة الثالث ينتج عنه انبعاث فوتون بأكبر طول موجي (الانتقال 5).

ب. انتقال الإلكترون من مستوى الطاقة الرابع إلى مستوى الطاقة الأول ينتج عنه انبعاث فوتون بأكبر طاقة (الانتقال 1).

ج. أقل تردد يكافئ أكبر طول موجي، (الانتقال 5).

9. **أستخدم الأرقام:** بروتون طاقته (10 MeV) ، أجد طول موجة دي بروي المصاحِبة له حيث كتلة البروتون (1.67×10^{-27}kg).

$$K = 10 \text{ M eV} = 10\times10^{6} \text{ eV} = 10\times10^{6}\times 1.6 \times 10^{-19} = 1.6 \times 10^{-12} \text{ J}$$

$$K = \frac{1}{2} mv^2$$

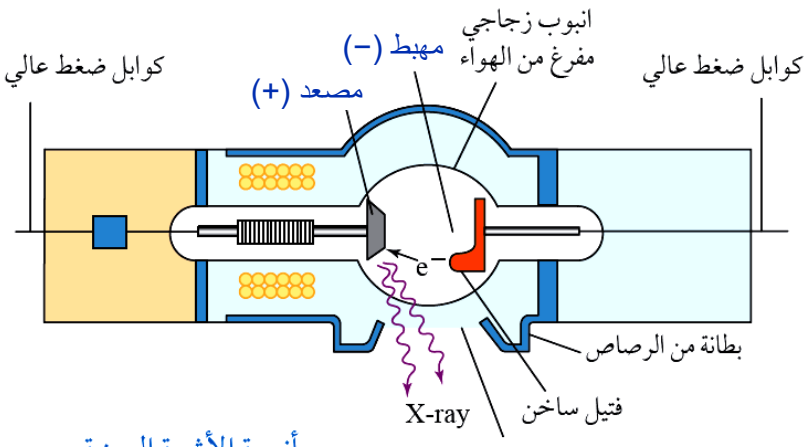
$$1.6 \times 10^{-12} = \frac{1}{2} \times 1.67 \times 10^{-27} \times (v)^2$$

$$v = 4.4\times10^{7} \text{m /s}$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{1.67 \times 10^{-27}\times4.4\times10^{7}} = 9 \times 10^{-15} \text{ m}$$

الإثراء والتوسّع: **الفيزياء والطب: الأشعة السينيّة**

الأشعة السينيّة X-ray : أشعة ذات طاقة كبيرة (أطوال موجيّة قصيرة : 10^{-11}- 10^{-8}m = λ)
تنبعث من سطح فلزّ عند اصطدام إلكترونات ذات طاقة عالية به.

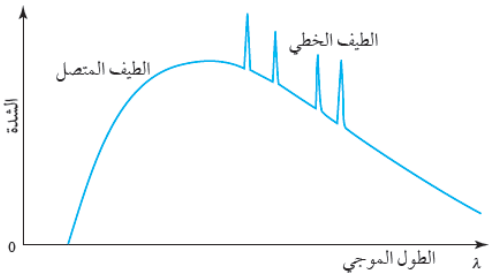


أنبوبة الأشعة السينية

في الشكل المجاور الذي يمثل أنبوب الأشعة السينية للعالم رونتغن ، ما هي مكونات الأنبوب وما وظيفة كل منها؟

1. أنبوب مفرَّغ من الهواء : وظيفته السماح للإلكترونات التسارع دون التصادم مع ذرات الهواء .
2. فتيل فلزيّ مهبط (−): تنبعث منه إلكترونات عند تسخينه (مصدر الكترونات).
3. فرق جهد كهربائي كبير وظيفته تسريع الإلكترونات المنتجة من الفتيل وإكسابها طاقة حركية عالية .
4. المِصعد(+)، وهو عبارة عن مادّة فلزيّة تنبعث منه الأشعة السينيّة عند اصطدام الإلكترونات فيها.
5. بطانة من الرصاص لمنع الأشعة من التشتت في كل الاتجاهات .
6. نافذة الأشعة لخروج الأشعة السينية منها.

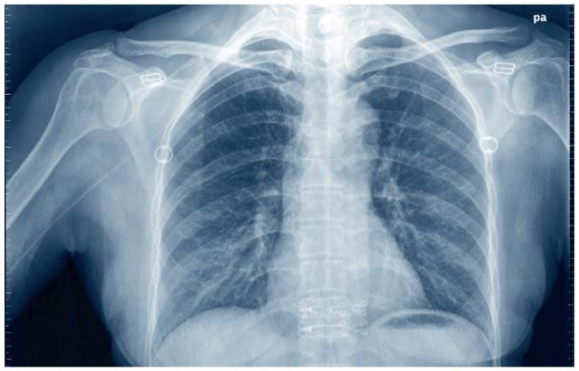
ما هي خصائص طيف الأشعة السينية الناتجة من أنبوب الأشعة السينية ؟



الطيف الخطّي والمتصل للأشعة السينية.

1. طيف الأشعة السينية يتكوّن من طيف متّصل وطيف خطّي كما في الشكل المجاور.
2. عند اقتراب الإلكترونات المُسرَّعة من ذرات المِصعد تتباطأ بفعل القوّة الكهربائية، وتفقد جزءًا من طاقتها الحركية التي تظهر على شكل أشعة كهرمغناطيسية ذات طاقة متّصلة.
3. عندما يصطدم أحد الإلكترونات المُسرّعة بأحد الإلكترونات في مستويات الطاقة الداخلية لذرة المصعد فيحرّره، ونتيجة لذلك، ينتقل إلكترون من المستويات الخارجية للطاقة لملء الفراغ الداخلي، ويصاحب ذلك انبعاث فوتون بطاقة محدّدة تساوي فرق الطاقة بين المستويين، ويظهر ذلك على شكل طيف خطّي في طيف الأشعة السينيّة.

4. تمتاز الأشعة السينيّة بقدرتها على النفاذ في الأوساط المادّية، ويعتمد ذلك على الوسط؛ فمثلً قدرتها على النفاذ خلال الكتلة العضلية تكون أكبر من قدرتها على النفاذ خلال العظام. ولهذا السبب، استُخدمت الأشعة السينيّة في الطبّ لتصوير العظام داخل جسم الإنسان، كما في الشكل المجاور، والتحقّق من وجود كسور فيها .



صورة مأخوذة عن طريق الأشعة السينيّة للقفص الصدري.

أسئلة مراجعة الوحدة

1. أضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة لكل جملة ممّا يأتي:

1. أيٌّ ممّا يأتي يؤدي إلى زيادة الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحرّرة من سطح فلزّ؟
   a) زيادة شدة الضوء الساقط على الفلزّ
   b) تقليل شدة الضوء الساقط على الفلزّ
   c) زيادة تردّد الضوء الساقط على الفلزّ
   d) تقليل تردّد الضوء الساقط على الفلزّ

2. وفقاً لتصوّر الفيزياء الكلاسيكية للظاهرة الكهرضوئية:
   a) تتحرّر الإلكترونات تحرّرًا فوريًّا.
   b) تزداد الطاقة الحركيّة العظمى للإلكترونات المتحرّرة بزيادة تردّد الضوء الساقط.
   c) يستغرق تحرّر الإلكترونات بعض الوقت حتى تتمكّن من اكتساب الطاقة اللازمة للتحرّر.
   d) لا تتحرّر الإلكترونات من سطح الفلزّ عند الترددات العالية للضوء.

3. طبقًا لظاهرة كومبتون، فإنّ:
   a) سرعة الفوتونات الساقطة وتردّدها أكبر من سرعة وتردّد الفوتونات المشتَّتة.
   b) تردّد الفوتونات المشتَّتة أكبر من تردّد الفوتونات الساقطة.
   c) طول موجة الفوتونات المشتَّتة أكبر من طول موجة الفوتونات الساقطة.
   d) طاقة الفوتونات المشتَّتة أكبر من طاقة الفوتونات الساقطة.

4. إذا تضاعف الطول الموجيّ للفوتون مرتين فإنّ:
   a) طاقته تقلّ إلى النصف، وكذلك زخمه الخطي.
   b) طاقته تبقى ثابتة ويقلّ زخمه الخطي إلى النصف.
   c) طاقته تتضاعف مرتين ويبقى زخمه ثابتاً الخطي.
   d) طاقته تبقى ثابتة ويبقى زخمه الخطي كذلك.

5. يُحسب الزخم الخطي للفوتون من العلاقة:
   a) mv (b $E\,c$ (c $\frac{E}{C}$ (d $\frac{h}{f}$

6. شدّة الطاقة المنبَعثة من جسم أسود درجة حرارته مقاربة لدرجة حرارة الشمس تكون:
   a) أكبر ما يمكن عند الأطوال الموجيّة الكبيرة جدًّا للإشعاع.
   b) أكبر ما يمكن عند الأطوال الموجيّة القصيرة جدًّا للإشعاع.
   c) أكبر ما يمكن في منطقة الأطوال الموجيّة للضوء المرئي.
   d) متساوية عند جميع الأطوال الموجيّة للإشعاع.

7. لم يتطابق نموذج رايلي - جينز مع النتائج التجريبية لإشعاع الجسم الأسود في منطقة:
   a) الأطوال الموجيّة الكبيرة .
   b) الأطوال الموجيّة القصيرة.
   c) الترددات الصغيرة.
   d) الأطوال الموجيّة جميعها للإشعاع.

8. إذا انتقل إلكترون من مستوى الطاقة الرابع إلى مستوى الطاقة الثاني في ذرة الهيدروجين، فإنّ الفرق في الزخم الزاويّ للإلكترون حسب نموذج بور، هو:

a) $2\hbar$ b) $3\hbar$ c) $\hbar$ d) $4\hbar$

9. يزداد طول موجة دي بروي المُصاحِبة لجُسيم إذا:

a) أزادت طاقته الحركيّة b) زادت كتلته c) زادت سرعته d) قل زخمه الخطي

10. يزداد عدد الإلكترونات المتحررة من سطح فلز عند سقوط ضوء عليه بزيادة:

a) شدّة الضوء b) تردّد الضوء c) طول موجة الضوء d) طاقة الضوء

11. عندما تتفاعل الفوتونات مع الإلكترونات على نحو ما هو في الظاهرة الكهرضوئية، فأيّ العبارات الآتية صحيحة؟

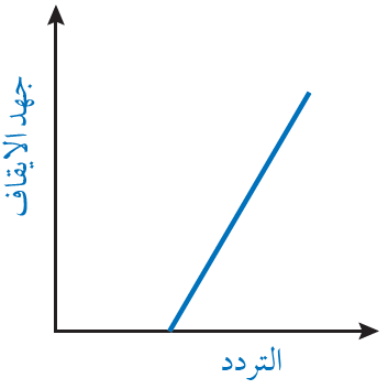
a) يفقد الفوتون جزءًا من طاقته، ويزداد تردده.
b) يفقد الفوتون جزءًا من طاقته، ويقلّ طول موجته.
c) يمتصّ الإلكترون طاقة الفوتون كلّها.
d) يفقد الفوتون جزءًا من طاقته، ويبقى تردّده ثابتًا.

12. أُسقط فوتونان مختلفان في التردّد على الفلزّ نفسه، فانطلق إلكترونان متساويان في الطاقة الحركيّة. فإنّ ذلك يعود إلى:

a) أنّ الإلكترونين انطلقا من عمقين مختلفين من الفلزّ.
b) اختلاف اقتران الشغل.
c) اختلاف طاقة الفوتونين.
d) اختلاف شدّة الضوء.

13. يمثّل الرسم البياني المجاور العلاقة بين جهد الإيقاف وتردّد الضوء الساقط في الخلية الكهرضوئية، ميل هذه العلاقة هو:

a) h b) $\frac{e}{h}$ c) $\frac{h}{e}$ d) $\frac{\emptyset}{h}$



الإجابات:

13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
c	a	c	a	d	a	b	c	c	a	c	c	c

2. **أستخدم المتغيّرات:** إلكترون ذرة الهيدروجين زخمه الزاويّ ($3\hbar$) ، أجد طاقته.

الحلّ:

$$L = n\hbar = 3\ \hbar \Rightarrow n = 3$$

$$E_n = -\frac{13.6}{n^2}$$

$$E_3 = -\frac{13.6}{3^2} = -1.5\ \text{eV}$$

3. **أستخدم المتغيّرات:** سقط ضوء طول موجته (300 nm) على سطح فلزّ اقتران الشغل (2.2 eV) أجد ما يأتي:

أ. تردّد العتبة للفلزّ.

ب. الطاقة الحركيّة العظمى للإلكترونات المتحرّرة.

الحلّ:

أ. تردّد العتبة للفلزّ:

$$f_o = \frac{\Phi}{h} = \frac{2.2\times 1.6\times 10^{-19}}{6.63\times 10^{-34}} = 5.3\times 10^{14}\text{Hz}$$

ب. الطاقة الحركيّة العظمى للإلكترونات المتحرّرة:

$$K_{max} = hf - \Phi$$

$$= h\frac{c}{\lambda} - \Phi = 6.63\times 10^{-34}\times\frac{3\times 10^{8}}{300\times 10^{-9}} - 2.2\times 1.6\times 10^{-19}$$

$$= 3.1\times 10^{-19}\ \text{J}$$

4. **أُصدر حكماً:** سقط ضوء على سطح فلزّ فتحرّرت منه إلكترونات، أُبيّن ما يحدث لعدد الإلكترونات المتحرّرة وطاقتها إذا:

أ . زادت شدّة الضوء مع بقاء تردّده ثابتاً.

ب. زاد تردّد الضوء مع بقاء شدّته ثابتة.

الحلّ:

		عدد الإلكترونات المتحررة	الطاقة الحركية العظمى
أ.	ازدادت شدة الضوء مع بقاء تردده ثابت .	يزداد	لا تتأثر
ب.	زاد تردد الضوء مع بقاء شدته ثابتة.	لا يتأثر	تزداد

5. **أناقش:** إلكترون في مستوى الاستقرار لذرة الهيدروجين، أناقش ما يحدث للإلكترون إذا سقط عليه فوتون طاقتُه:

أ . 7.0 eV ب. 12.1 eV ج . 20.0 eV

أ. الإلكترون لا يمتص طاقة لأن طاقة الفوتون الساقط غير كافية لنقل الإلكترون إلى أيٍّ من مستويات الطاقة. فأقل طاقة يمكن أن يمتصها إلكترون تساوي (13.6−3.4 =10.2 eV) لنقله من مستوى الاستقرار إلى مستوى الطاقة الثاني.

ب. الإلكترون يمتص الفوتون و ينتقل الى مستوى الطاقة الثالث.

ج. الإلكترون يمتص الفوتون، ويُستهلك (13.6 eV) الطاقة ليتحرر من الذرة، وما يزيد عن ذلك (6.4eV) يظهر على شكل طاقة حركية للإلكترون.

6. **أتوقّع:** إلكترون في مستوى الطاقة الثالث لذرة الهيدروجين، أتنبّأ بقيم الطاقة التي يمكن أن يخسرها الإلكترون.

الحلّ:

يمكن أن ينتقل إلى مستوى الطاقة الأول فيكون فرق الطاقة

$$\Delta E = E_1 - E_3 = -13.6 - (-1.5) = -12.1 \text{ eV}$$

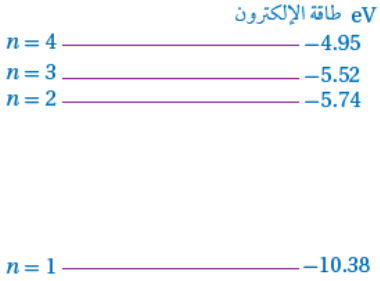
أو يمكن أن ينتقل إلى مستوى الطاقة الثاني

$$\Delta E = E_2 - E_3 = -3.4 - (-1.5) = -1.9 \text{ eV}$$

ثم من مستوى الطاقة الثاني إلى مستوى الطاقة الأول

$$\Delta E = E_1 - E_2 = -13.6 - (-3.4) = -10.2 \text{ eV}$$

والإشارة السالبة تعني أن الإلكترون فقد طاقة.



7. **أحلّل الشكل:** يبيّن الشكل المجاور بعض مستويات الطاقة لإلكترون في ذرة الزئبق:

أ . أجد أعلى طاقة فوتون يمكن أن ينبعث من الانتقالات بين هذه المستويات .

ب. أجد أقلّ طاقة فوتون يمكن أن ينبعث من الانتقالات بين هذه المستويات.

الحلّ:

أ. أعلى طاقة فوتون يمكن أن ينبعث عندما ينتقل الإلكترون من مستوى الطاقة $(n = 4)$ إلى مستوى الاستقرار $(n = 1)$ حيث تساوي:

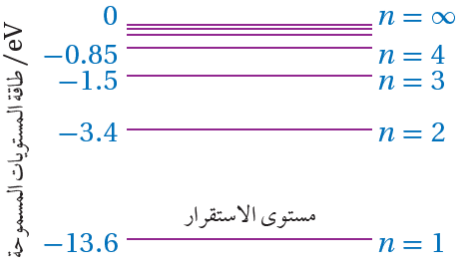
$$\Delta E = |-10.38 - (-4.95)| = 5.43 \text{ eV}$$

ب.أقل طاقة فوتون يمكن أن ينبعث عندما ينتقل الإلكترون من مستوى الطاقة ($n = 3$) إلى مستوى الطاقة ($n = 2$) حيث تساوي:

$$\Delta E = |-5.74 - (5.52)| = 0.22 \text{ eV}$$

8. **حلّ المشكلات:** ظهر خط مُعتم في طيف الامتصاص لذرة الهيدروجين عند التردّد($6.15\times 10^{14}\text{Hz}$) ، بالاعتماد على مستويات الطاقة لذرة الهيدروجين في الشكل، أُبيّن بالحسابات بينَ أيّ مستويي طاقة انتقل الإلكترون ليظهر هذه الخط المعتم.

الحلّ:



أحسب طاقة الفوتون:

$$E = hf = 6.63 \times 10^{-34} \times 6.15 \times 10^{14}$$
$$= 4.08 \times 10^{-19} \text{ J}$$

ثم أحولها إلى وحدة (eV)

$$E = \frac{4.08 \times 10^{-19}}{1.6 \times 10^{-19}} = 2.55 \text{ eV}$$

وهذه الطاقة تساوي فرق الطاقة بين مستويي الطاقة الرابع والثاني، وهذا يعني أن الإلكترون انتقل من مستوى الطاقة الثاني إلى مستوى الطاقة الرابع.

9. **أستخدم المتغيّرات:** سُرّعَ إلكترون بفرق جهد (ΔV) ، أثبتُ أنّ طول موجة دي بروي المصاحِبة له يساوي ($\frac{h}{\sqrt{2\,m\,e\,\Delta V}}$).

الحلّ:

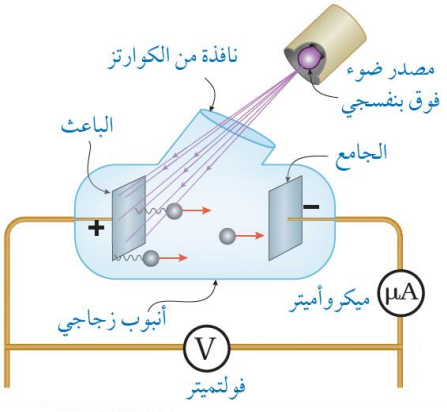
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = e\,\Delta V$$

$$v^2 = \frac{2e\,\Delta V}{m} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2e\,\Delta V}{m}}$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{h}{m\sqrt{\frac{2e\,\Delta V}{m}}} = \frac{h}{\sqrt{\frac{2e\,\Delta V m^2}{m}}} = \frac{h}{\sqrt{2me\,\Delta V}}$$

10. **التفكير الناقد** يمثّل الشكل المجاور تجربة لدراسة الظاهرة الكهرضوئية قام بها العالم لينارد، وكان تردّد الضوء الساقط (8×10^{14} Hz) اعتمادًا على ذلك، أُجيب عمّا يأتي:



أ . أبيّن ماذا يحدث لقراءة الأميتر عند زيادة فرق الجهد، وأناقشُ أفراد مجموعتي في سبب ذلك.

ب.عند فرق جهد (2 V) أصبحت قراءة الأميتر(صفرًا). فماذا يُسمّى فرق الجهد في هذه الحالة؟

ج. أناقش أفراد مجموعتي في تأثير زيادة شدة الضوء في قراءة الأميتر عندما تكون قراءته صفرًا.

د . أناقش أفراد مجموعتي في تأثير زيادة تردّد الضوء في قراءة الأميتر عندما تكون قراءته صفرًا.

هـ. كيف تعارضت النتائج في (ج) و (د) مع الفيزياء الكلاسيكية؟

و . أحسب تردّد العتبة لفلزّ الباعث.

الحلّ:

أ. تقلّ قراءة الأميتر مع زيادة فرق الجهد، إن الجهد السالب للجامع يؤثر بقوة تنافر في الإلكترونات ويعيق وصولها للجامع، ولا يصل الجامع إلاّ الإلكترونات التي تمتلك طاقة حركية تكفي للتغلب على قوة التنافر الكهربائي. وبزيادة فرق الجهد تزداد سالبيّة الجامع ما يزيد من قوة تنافر الإلكترونات مع الجامع فيقل عددها الذي يستطيع الوصول للجامع فيقل التيار وتقل بذلك قراءة الأميتر.

ب. يُسمّى فرق جهد الإيقاف.

ج. تبقى قراءة الأميتر صفراً، حيث إن زيادة شدة الضوء لا تؤدي لزيادة الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المنبعثة.

د. لا تبقى قراءة الأميتر صفراً، أي أن تياراً قد نشأ؛ ما يعني أن الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات قد ازدادت وتغلبت على قوة التنافر الكهربائي مع الجامع، وعليه فإن طاقة الضوء تعتمد على تردّده.

هـ. تتنبأ الفيزياء الكلاسيكية بزيادة طاقة الضوء عند ازدياد شدته وبذلك لا تبقى قراءة الأميتر صفراً عند زيادة شدة الضوء في الفرع (ج). كما تتنبأ الفيزياء الكلاسيكية بأن تبقى قراءة الأميتر تساوي صفرا في الفرع (د) .

و. أحسب تردد العتبة لمادة الباعث:

$$K_{max} = hf - \Phi \Rightarrow \Phi = hf - K_{max}$$
$$hf_o = hf - eV_s$$
$$f_o = \frac{hf - eV_s}{h} = f - \frac{eV_s}{h} = 8 \times 10^{14} - \frac{1.6\times10^{-19}\times2}{6.63 \times 10^{-34}} = 3.2 \times10^{14}\text{Hz}$$

11. يظهر في طيف امتصاص غاز الهيليوم (12) خطٌّ مُعتِم في منطقة الضوء المرئي:

أ . **أفسّر** سبب ظهور هذه الخطوط.

ب. **أحسب:** أحدُ الخطوط يقابل الطول الموجيّ(686.7 nm) ، أحسُب الطاقة التي امتصها الإلكترون لينتج هذا الخط بوحدة (eV).

الحلّ:

أ. سبب ظهور هذه الخطوط هو امتصاص الإلكترونات في ذرة الهيليوم فوتونات طاقتها تساوي فرق الطاقة بين مستويات الطاقة في ذرة الهيليوم.

ب.

$$E = hf = h\frac{c}{\lambda} = 6.63 \times10^{-34}\times \frac{3 \times 10^{8}}{686.7\times10^{-9}} = 2.89 \times10^{-19}\text{ J}$$
$$= \frac{2.89 \times10^{-19}}{1.6\times10^{-19}} = 1.81\text{ eV}$$

12. **أحسُب:** سقط ضوء على سطح فلزٍّ، فكانت الطاقة الحركيّة العظمى للإلكترونات المنبعثة (2 eV) ، وكان أكبر طول موجيّ يتطلّبه تحرير إلكترونات من سطح الفلزّ يساوي (682 nm) أحسب ما يأتي:

أ . اقتران الشغل للفلز.

ب. فرق جهد القطع (الإيقاف).

الحلّ:

أ . اقتران الشغل للفلز:

$$\Phi = hf_o = h\frac{c}{\lambda} = 6.63 \times10^{-34}\times \frac{3 \times 10^{8}}{682\times10^{-9}} = 2.92 \times10^{-19}\text{ J}$$

ب. فرق جهد القطع (الإيقاف):

$$K_{max} = eV_s \Rightarrow V_s = \frac{K_{max}}{e} = \frac{2\times1.6\times10^{-19}}{1.6\times10^{-19}} = 2\text{ V}$$

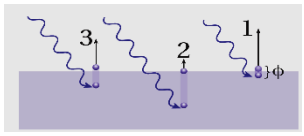
13. **أفسّر:** يبيّن الشكل المجاور توضيحاً بسيطاً للتصوّر الذي وضعه أينشتين للظاهرة الكهرضوئية.

أ . ما فرضيته فيما يتعلق بالضوء؟

ب. ما علاقة عدد الإلكترونات المتحرّرة بشدة الضوء الساقط على الفلزّ؟

ج. رتّب الطاقة الحركية للإلكترونات المتحرّرة (1،2،3) من الأصغر إلى الأكبر .

د . كيف فسّر أينشتين التفاوت في الطاقة الحركية للإلكترونات المتحرّرة؟



الحلّ:

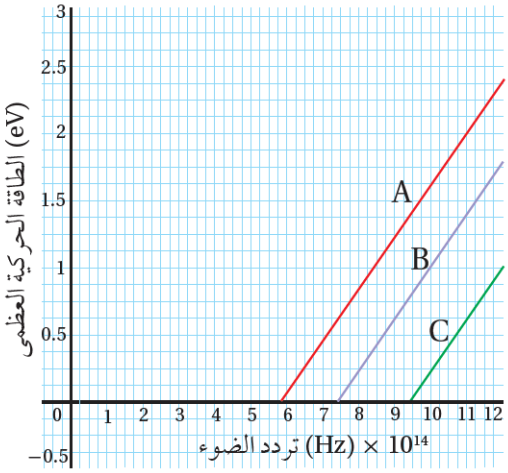
أ. افترض أن الضوء يتكون من كمات منفصلة من الطاقة (فوتونات)، تتناسب طاقة الفوتون الواحد منها طردياً مع تردده.

ب. ترتبط شدّة الضوء بعدد الفوتونات الساقطة على الفلز في وحدة الزمن، وبما أن الفوتون الواحد يعطي طاقته جميعها لإلكترون واحد فقط فإن عدد الإلكترونات المتحررة في وحدة الزمن يزداد بزيادة شدة الضوء.

ج. ($K_1 > K_3 > K_2$)،(بافتراض أن الفوتونات جميعها تمتلك مقدار الطاقة نفسه)

د. تتفاوت الطاقة الحركية للإلكترونات المنبعثة من صفر إلى الطاقة الحركية العظمى، وذلك حسب طاقة ربط الإلكترون وعمق موقعه تحر سطح الفلز، فالإلكترونات ذات طاقة الربط الأصغر والأقرب لسطح الفلز تتحرر بطاقة حركية أكبر.

14. **أحلّل رسمًا بيانيًّا:** يمثّل الشكل المجاور رسمًا بيانيًّا لتغيّر الطاقة الحركيّة العظمى مع تردّد الضوء الساقط لثلاثة فلزّات مختلفة، اعتمادًا على الشكل أجيب عمّا يأتي:



أ. أفسّر توازي المنحنيات الثلاثة.

ب. أجد مقدار ثابت بلانك بوحدة (eV.s) وبوحدة(J.s) (أستخدم الخط A).

ج. أجد اقتران الشغل للفلز(A).

د. إذا سقط ضوء تردّده(8×10^{14} Hz) ، أُحدّد أيّ الفلزات الثلاثة تنطلق منه إلكترون ضوئية. وأيّها تنطلق منه الإلكترونات بطاقة حركيّة عظمى أكبر.

ه. أرتّب اقتران الشغل للفلزات تصاعديًّا من الأصغر إلى الأكبر.

الحلّ:

أ. توازي الخطوط الثلاثة يعني رياضياً أنّ ميلها متساوٍ. وباستخدام العلاقة: ($K_{max} = h\,f - \phi$) فإن ميل كل من الخطوط الثلاث يساوي ثابر بلانك (h) .

ب.

$$h = \text{slope} = \frac{\Delta K_{max}}{\Delta f} = \frac{2-0}{(11.0-5.8)\times 10^{14}} = 3.85\times 10^{-15}\ \text{eV.s}$$

$$= 3.85\times 10^{-15}\times 1.6\times 10^{-19} = 6.16\times 10^{-34}\text{J.s}$$

القيمة المحسوبة لثابت بلانك (h) تختلف قليلا عن القيمة المقبولة نظرا لأخطاء تجريبية.

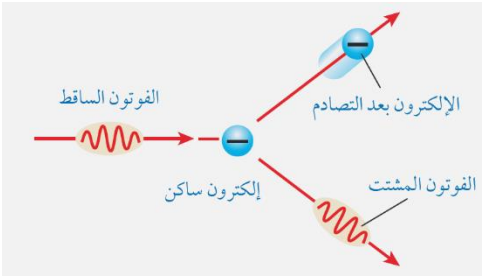
ج. اقتران الشغل للفلز(A):

$$\Phi = hf_o = 6.16 \times 10^{-34} \times 5.8 \times 10^{14} = 3.6 \times 10^{-19} \text{J}$$

د. تتحرر إلكترونات من الفلز (A) والفلز(B) ، وتكون الطاقة الحركية العظمى أكبر للإلكترونات المتحررة من الفلز (A).

ه. $\phi(\text{A}) < \phi(\text{B}) < \phi(\text{C})$

15. **أحلل:** أسقط كومبتون أشعة سينيّة على هدف من الغرافيت كم هو مبيّن في الشكل المجاور:



أ . أقارن بين الأشعّة المشتّتة والأشعّة الساقطة من حيث التردّد والطول الموجيّ والسرعة.

ب . ماذا تساوي طاقة الإلكترون بعد التصادم؟

الحلّ:

أ. تردد الأشعة المشتتّة وطاقتها أقل مقارنة مع الكميات المقابلة للأشعة الساقطة، ولكنها ذات طولٍ موجيّ أكبر. الأشعة المشتتّة والأشعة الساقطة يمتلكان مقدار السرعة نفسه وهو مقدار سرعة الضوء.

ب. $E_e = E_i - E_f$ ، حيث E_i طاقة الضوء الساقط و E_f طاقة الضوء المشتت.

16. **أستخدم المتغيّرات:** أجد النسبة بين الزخم الخطّي لفوتون طاقته (E) ، والزخم الخطّي لإلكترون حرّ يملك الطاقة نفسها.

الحلّ:

$$E_e = K_e = \frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2E}{m}}$$

$$p_e = mv = m\sqrt{\frac{2E}{m}} = \sqrt{2mE}$$

$$\frac{p_p}{p_e} = \frac{\frac{E}{c}}{\sqrt{2mE}} = \frac{E}{c} \times \frac{1}{\sqrt{2mE}} = \frac{1}{c} \times \sqrt{\frac{E}{2m}}$$

17. **أذكر:** للضوء طبيعة مزدوجة موجيّة - جُسيميّة، أذكر ظواهر فيزيائية تدلّ على أنّ للضوء طبيعة موجيّة، وظواهرَ أخرى تدلّ على أنّ له طبيعة جُسيميّة.

الحلّ:

طبيعة موجية: الحيود والتداخل.

طبيعة جسيمية: الظاهرة الكهرضوئية، تأثير كومبتون، إشعاع الجسم ألأسود، الأطياف الذرية.

18. **أستنتج:** الأجسام كلّها في الغرفة تبعث أشعّة كهرمغناطيسيّة، فلماذا لا نستطيع رؤية هذه الأجسام في غرفة مُعتمة؟

الحلّ:

لأن الأجسام في درجة حرارة الغرفة تشع أشعة كهرمغناطيسية ذات أطوال موجية كبيرة في منطقة الطول الموجي للأشعة تحر الحمراء التي لا تستطيع العين البشرية رؤيتها.

19. **أستخدم المتغيّرات:** إذا كان الطول الموجيّ لفوتون قبل الاصطدام بإلكترون حرّ ساكن $(60\times10^{-9}\text{m})$، وبعد الاصطدام به صار $(80\times10^{-9}\text{m})$ أحسب مقدار ما يأتي:

أ . الزخم الخطيّ للفوتون قبل التصادم.

ب. الطاقة التي اكتسبها الإلكترون في أثناء عملية التصادم.

الحلّ:

أ . الزخم الخطيّ للفوتون قبل التصادم:

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{60\times10^{-9}} = 1.11 \times10^{-26}\text{kg.m /s}$$

ب. الطاقة التي اكتسبها الإلكترون في أثناء عملية التصادم:

$$E_e = E_i - E_f = p_i c - p_f c = \left(\frac{h}{\lambda_i} - \frac{h}{\lambda_f}\right) c = \left(\frac{1}{\lambda_i} - \frac{1}{\lambda_f}\right) hc$$

$$= \left(\frac{1}{60\times10^{-9}} - \frac{1}{80\times10^{-9}}\right) 6.63 \times 10^{-34}\times3\times10^{8}$$

$$= 8.3\times10^{-19}\text{ J}$$

$$= 5.2\text{ eV}$$

20. **أفسّر** اعتمادًا على النموذج الجُسيميّ للضوء:

أ . زيادة شدّة الضوء الساقط تؤدّي إلى زيادة التيار الكهرضوئيّ دون زيادة الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحرّرة.

ب. الانبعاث الفوري للإلكترونات من سطح الفلزّ عند سقوط إشعاع كهرمغناطيسيّ بتردّد مناسب على سطحه .

الحلّ:

أ. زيادة شدة الضوء تعني زيادة عدد الفوتونات الساقطة على الفلز في وحدة الزمن وبما أن كل فوتون يحرر إلكتروناً واحداً؛ سيزداد عدد الإلكترونات المتحررة في وحدة الزمن وبالتالي يزداد التّيار الكهرضوئي.

ب. حسب تفسير أينشتين، فإن الإلكترون يمتص الفوتون فورياً ويتحرر مباشرة من سطح الفلز إذا كان تردد الإشعاع الكهرمغناطيسي أكبر من تردد العتبة أو يساويه.

21. **أفسر:** سقطت حزمتان ضوئيتان بتردّدين مختلفين(f_1, f_2) على سطحي فلزّين مختلفين على الترتيب (X, Y)، اقتران الشغل لهما $(\Phi_x > \Phi_y)$ ، فتحرّرت إلكترونات لها الطاقةُ الحركية العظمى نفسُها من سطحي الفلزّين، فأيُّ الحزمتين تردّدها أكبر؟ أفسّر إجابتي.

الحلّ:

$$\Phi_x > \Phi_y$$
$$hf_1 - K_{max} > hf_2 - K_{max}$$

بطرح (K_{max}) من الطرفين لأنها متساوية

$$hf_1 > hf_2$$

وبالقسمة على (h)

$$f_1 > f_2$$

بما أن الطاقة الحركية العظمى متساوية في كلا الحالتين، فإن الفلز الذي له اقتران شغل أكبر سقط عليه ضوء بتردد أكبر.

22. **أستخدم المتغيرات:** في الخلية الكهرضوئيّة، إذا كانت الطاقة الحركيّة العظمى للإلكترونات الضوئيّة المُنطلِقة من سطح فلزّ الباعث $(1.6 \times 10^{-19}\ J)$ جول عند سقوط ضوء طول موجته $(380\ nm)$، أحسبُ ما يأتي:

أ . اقتران الشغل لفلزّ الباعث.

ب. تردّد العتبة للفلزّ

ج. جهد الإيقاف.

الحلّ:

أ . اقتران الشغل لفلزّ الباعث.

$$\Phi = hf - K_{max}$$
$$= h\frac{c}{\lambda} - K_{max}$$

$$= 6.63 \times 10^{-34} \times \frac{3 \times 10^{8}}{380 \times 10^{-9}} - 1.6 \times 10^{-19}$$
$$= 5.2 \times 10^{-19} - 1.6 \times 10^{-19} = 3.6 \times 10^{-19}\ J$$

ب. تردّد العتبة للفلزّ

$$f_o = \frac{\Phi}{h} = \frac{3.6 \times 10^{-19}}{6.63 \times 10^{-34}} = 5.4 \times 10^{14} Hz$$

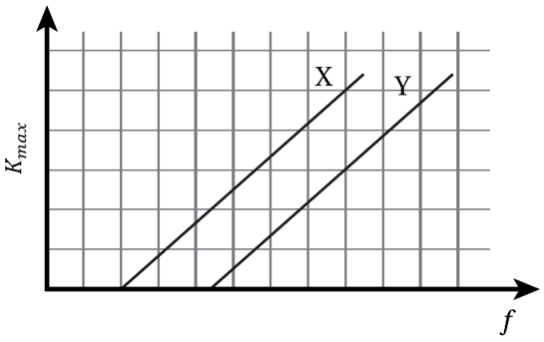
ج. جهد الإيقاف.

$$K_{max} = eV_s \Rightarrow V_s = \frac{K_{max}}{e} = \frac{1.6 \times 10^{-19}}{1.6 \times 10^{-19}} = 1\ V$$

أسئلة التفكير الواردة في كتاب الأنشطة

1. أضعُ دائرةً حول رمز الإجابة الصحيحة لكُلّ جملة ممّا يأتي:

1. أيٌّ ممّا يأتي يمثّل الترتيب الصحيح للون توهّج سلك فلزي عند تسخينه؟
   a) الأبيض ثم الأزرق ثم الأصفر ثم الأحمر.
   b) الأزرق ثم الأبيض ثم الأحمر ثم الأصفر.
   c) الأحمر ثم الأصفر ثم الأزرق ثم الأبيض.
   d) الأزرق ثم الأبيض ثم الأصفر ثم الأحمر.
2. عند تسليط ضوء أحمر على صفيحة خارصين لا تنبعث إلكترونات من سطحه، أمّا إذا زادت شدّة الضوء الأحمر فانه:
   a) تنبعث إلكترونات من سطح الخارصين بعددٍ قليلٍ فورًا.
   b) لا تنبعث إلكترونات من سطح الخارصين.
   c) تنبعث إلكترونات من سطح الخارصين بعدد كبير فورًا.
   d) تنبعث إلكترونات من سطح الخارصين بعد مدة كافية من الزمن.
3. عند تسليط أشعة فوق بنفسجية بشدّة منخفضة على سطح الخارصين انبعثت الكترونات من سطحه، ماذا يحدث عند زيادة شدة الضوء الساقط؟
   a) يزداد مقدار جهد القطع.
   b) لا يتغير عدد الالكترونات المنبعثة.
   c) تزداد طاقة الطاقة الحركية للالكترونات المنبعثة.
   d) يزداد عدد الالكترونات المنبعثة.
4. يوضح الشكل المجاور العلاقة بين تردد الضوء الساقط على سطح فلزين مختلفين (X,Y) والطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحررة من الفلزين. إذا سقط على الفلزين ضوء له التردد نفسه وأكبر من تردد العتبة لهما، فإن الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحررة من الفلز(x).



   a) أكبر منها للفلز (y)؛ لأن اقتران الشغل للفلز (y)أكبر.
   b) أقل منها للفلز (y)؛ لأن اقتران الشغل للفلز((y) أكبر.
   c) أكبر منها للفلز (y)؛ لأن اقتران الشغل للفلز (y)أصغر .
   d) أصغر منها للفلز (y)؛ لأن اقتران الشغل للفلز (y) أصغر.
5. استخدمت حنين في تجربة كهرضوئية مصدر ضوئي ينبعث منه (10^{10}) فوتون في الثانية الواحدة وطاقة كل فوتون(7.2 eV) على فلز اقتران الشغل له (3.4 eV)، إن أكبر عدد ممكن من الإلكترونات المتحررة التي تصل الجامع في وحدة الزمن
   a) 10^{12}
   b) 10^{13}
   c) 10^{2}
   d) 10^{10}

الإجابات :

1	2	3	4	5
c	b	d	a	d

2. جهاز إرسال راديو FM ينتج في كل ثانية طاقة مقدارها (130 kW) ليبث موجات كهرمغناطيسية ترددها(99.7 MHz) ، أجد عدد الفوتونات التي يبثها جهاز الإرسال في الثانية الواحدة.

الحلّ:

أجد طاقة الفوتون الواحد

$$E = hf = 6.63 \times 10^{-34} \times 99.7 \times 10^{6} = 6.61 \times 10^{-26} \text{J}$$

أجد عدد الفوتونات في الثانية الواحدة من قسمة الطاقة المنبعثة في الثانية الواحدة على طاقة الفوتون الواحد:

$$n = \frac{130 \times 10^{3}}{6.61 \times 10^{-26}} = 1.97 \times 10^{30} \ photon$$

3. استخدم حازم مصدرين للضوء في تجربة كهرضوئية لتحديد اقتران الشغل لفلز معين. وعند استخدام ضوء أخضر طول موجته (546.1 nm) حصل على جهد إيقاف (0.376 V) . بناءً على هذا القياس، جد جهد الإيقاف الذي يمكن قياسه عند استخدام ضوء أصفر طول موجته (587.1 nm) .

الحلّ:

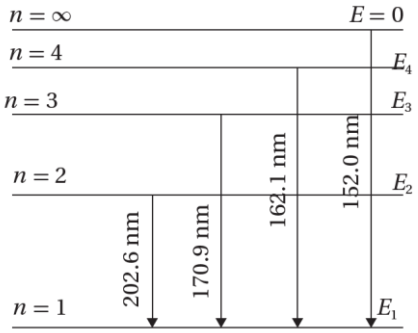
في الحالة الأولى (546.1 nm) :

$$\Phi = hf - K_{max}$$
$$= h\frac{c}{\lambda} - K_{max}$$
$$= h\frac{c}{\lambda} - eV_s$$
$$= 6.63 \times 10^{-34} \times \frac{3 \times 10^{8}}{546.1 \times 10^{-9}} - 1.6 \times 10^{-19} \times 0.376 = 3.04 \times 10^{-19} \text{J}$$

في الحالة الثانية (587.1 nm) :

$$\Phi = h\frac{c}{\lambda} - eV_s$$
$$eV_s = h\frac{c}{\lambda} - \Phi$$
$$1.6 \times 10^{-19} \times V_s = 6.63 \times 10^{-34} \times \frac{3 \times 10^{8}}{587.1 \times 10^{-9}} - 3.04 \times 10^{-19}$$
$$1.6 \times 10^{-19} \times V_s = 3.48 \times 10^{-20}$$
$$V_s = \frac{3.48 \times 10^{-20}}{1.6 \times 10^{-19}} = 0.22 \text{ V}$$

4. رصد علماء الفلك خطوط الطيف لضوء قادم من مجرة بعيدة لذرة جديدة أحادية الإلكترون فكانت على نحو ما هو موضح في الشكل المجاور، أجد طاقة المستوى الأول والثاني والثالث.



الحلّ:

1. تحسب طاقة المستوى الأول كما يلي :

$$E_\infty - E_1 = hf = h\frac{c}{\lambda}$$

$$0 - E_1 = 6.63\times10^{-34}\times\frac{3\times10^{8}}{152\times10^{-9}} = 1.31\times10^{-18}$$

$$E_1 = -1.31\times10^{-18}\text{J} = \frac{-1.31\times10^{-18}}{1.6\times10^{-19}} = -8.2\text{ eV}$$

2. تحسب طاقة المستوى الثاني كما يلي :

$$E_2 - E_1 = hf = h\frac{c}{\lambda}$$

$$E_2 - (-1.31\times10^{-18}) = 6.63\times10^{-34}\times\frac{3\times10^{8}}{202.6\times10^{-9}}$$

$$E_2 = 9.82\times10^{-19} - 1.31\times10^{-18}$$

$$= -3.28\times10^{-19}J = \frac{-3.28\times10^{-19}}{1.6\times10^{-19}} = -2.05\text{ eV}$$

3. تحسب طاقة المستوى الثالث كما يلي :

$$E_3 - E_1 = hf = h\frac{c}{\lambda}$$

$$E_3 - (-1.31\times10^{-18}) = 6.63\times10^{-34}\times\frac{3\times10^{8}}{170.9\times10^{-9}}$$

$$E_3 = 11.63\times10^{-19} - 1.31\times10^{-18}$$

$$= -1.47\times10^{-19}J = \frac{-1.47\times10^{-19}}{1.6\times10^{-19}} = -0.92\text{ eV}$$

5. جسم كروي صغير قطره (1×10^{-6}m) وكتلته (1×10^{-12} kg) يتحرك بسرعة (1×10^{5} m/s) ، هل يمكن الكشف عن موجات دي بروي المصاحبة له؟ أفسّر إجابتي.

الحلّ:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

$$= \frac{6.63\times10^{-34}}{1\times10^{-12}\times1\times10^{5}} = 6.63\times10^{-27}\ m$$

وهذا الطول أصغر بكثير من قطر الجسم، لذا لا يمكن الكشف عن موجات دي بروي المصاحبة له.

أسئلة وزارة + أسئلة إضافية

مثال 1: وزارة 2020تكميلي

استنادا للظاهرة الكهروضوئية فان أثر نقصان الطول الموجي الساقط في كل من (تيار الإشباع والسرعة العظمى للالكترونات الضوئية المنبعثة) على الترتيب هو:

a) (يقل ، لا تتغير) b) (لا يتغير، تزداد) c) (لا يتغير، تقل) d) (يزداد ، لا تتغير)

الجواب الصحيح : b) (لا يتغير، تزداد)

مثال 2: وزارة 2020 تكميلي

إذا تحرك جسيم كتلته $(1\times10^{-24}kg)$ بسرعة $(660m/s)$، فان طول موجة دي برولي المصاحبة لحركة الجسيم بالمتر تساوي:

a) (1×10^{-12}) b) (5.3×10^{-11}) c) (2×10^{-11}) d) (3.3×10^{-12})

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$
$$= \frac{6.63\times10^{-34}}{1\times10^{-24}\times660} = 1\times10^{-12}\ m$$

الجواب الصحيح : a) (1×10^{-12})

مثال 3: وزارة 2020 تكميلي

إذا أصدر جسيم ما إشعاعا طول موجته (λ) ، وطاقة الكمة الواحدة منه (E)، فان المقدار $(E\times\lambda)$ يساوي

a) ثابت بلانك b) تردد الإشعاع c) ثابت بلانك × سرعة الفوتون d) ثابت بلانك/ سرعة الفوتون

الجواب الصحيح : c) ثابت بلانك × سرعة الفوتون

مثال 4: وزارة 2021 تكميلي

إذا كان اقتران الشغل لفلز ما يساوي $(6.6\times10^{-19}J)$ ، فان أكبر طول موجي للضوء الساقط على الفلز بالنانومتر والذي يسمح بتحرير الالكترونات من سطح الفلز دون أن تمتلك طاقة حركية يساوي:

a) 200 b) 300 c) 317 d) 512

الجواب الصحيح : b) 300

مثال 5: وزارة 2020 تكميلي

إذا علمت أن الزخم الزاوي لإلكترون ذرة الهيدروجين في أحد مستويات الطاقة $(\frac{2h}{\pi})$ ،فان مستوى الطاقة الذي يوجد فيه الالكترون هو المستوى :

a) الأول b) الثاني c) الثالث d) الرابع

$$n\frac{h}{2\pi} = \frac{2h}{\pi} \rightarrow n = 4$$

الجواب الصحيح : d) 4

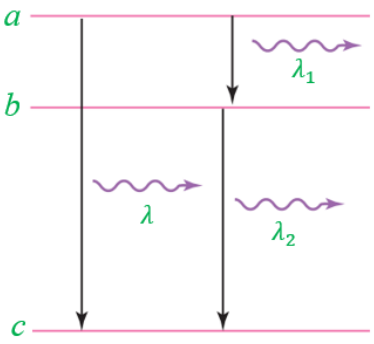
مثال 6: وزارة 2022

في الظاهرة الكهروضوئية ، إن تردد العتبة لفلز مادة المهبط يعتمد على :

a) طول موجة الضوء الساقط على المهبط
b) شدة الضوء الساقط على المهبط
c) نوع فلز مادة المهبط
d) المدة الزمنية لتعرض المهبط للضوء

الجواب الصحيح : c) نوع فلز مادة المهبط

مثال 7: وزارة 2020 تكميلي



يبين الشكل المجاور انتقالين متتاليين لإلكترون ذرة الهيدروجين ، إذا انتقل الالكترون من مستوى الطاقة (a) الى مستوى الطاقة (c) مباشرة فان الطول الموجي للفوتون المنبعث (λ) يكون:

a) $\lambda > \lambda_1$
b) $\lambda > \lambda_2$
c) $\lambda < \lambda_2 < \lambda_1$
d) $\lambda > \lambda_2 > \lambda_1$

الجواب الصحيح : c) $\lambda < \lambda_2 < \lambda_1$

مثال 8: وزارة 2022

إذا سقط ضوء على أربع فلزات مختلفة ، وانبعثت الكترونات ضوئية منها جميعها ،فان الفلز الذي تمتلك الكتروناته المنبعثة أكبر طاقة حركية (K_{max}) هو الذي اقتران الشغل له بوحدة (eV) يساوي:

a) 4 b) 3 c) 2 d) 1

الجواب الصحيح : d) 1

مثال 9: وزارة 2022

في نموذج بور لذرة الهيدروجين ينبعث فوتون تردده$(\frac{R_H\, c}{4}, Hz)$عند انتقال الكترون ذرة الهيدروجين من:

a) اللانهاية الى المستوى الثاني
b) اللانهاية الى المستوى الرابع
c) المستوى الثاني الى المستوى الأول
d) المستوى الرابع الى المستوى الثاني

الجواب الصحيح : a) اللانهاية الى المستوى الثاني

مثال 10: وزارة 2022 تكميلي

في الظاهرة الكهروضوئية إذا انبعثت الكترونات ضوئية بسرعة عظمى $(2\times10^6\ \mathrm{m/s})$، وكانت نسبة كتلة الالكترون الى شحنته تساوي $(-5.7\times10^{-12}\ \mathrm{kg/c})$، فان فرق الجهد اللازم لإيقاف هذه الالكترونات بوحدة (V) يساوي:

a) -11.4 b) -8.2 c) -5.7 d) -2.8

$$K_{max} = e\, V_s$$

$$V_s = \frac{K_{max}}{e} = \frac{\frac{1}{2} m\, v_{max}^2}{e} = \frac{1}{2} \times \frac{m}{e} \times v_{max}^2 = \frac{1}{2} \times -5.7\times10^{-12} \times (2\times10^6)^2$$

$$= -11.4\ \mathrm{V}$$

الجواب الصحيح : a) -11.4 V

مثال 11: وزارة 2022 تكميلي

وفق تفسير أينشتين للظاهرة الكهروضوئية ، زيادة شدة الضوء الساقط المناسب تزيد من مقدار التيار الكهروضوئي بسبب:

a) نقصان تردد الضوء الساقط
b) زيادة طول موجة الضوء الساقط
c) نقصان سرعة الالكترونات المنبعثة
d) زيادة عدد الالكترونات المنبعثة

الجواب الصحيح : d) زيادة عدد الالكترونات المنبعثة

مثال 12: وزارة 2022 تكميلي

وفقا لنموذج بور فان ذرة الهيدروجين المثارة لكي تصل الى حالة الاستقرار:

a) تمتص فوتونا أو أكثر وتظهر الفوتونات الممتصة على هيئة طيف متصل .
b) تمتص فوتونا أو أكثر وتظهر الفوتونات الممتصة على هيئة طيف خطي.
c) تبعث فوتونا أو أكثر وتظهر الفوتونات المنبعثة على هيئة طيف متصل.
d) تبعث فوتونا أو أكثر وتظهر الفوتونات المنبعثة على هيئة طيف خطي.

الجواب الصحيح : d) تبعث فوتونا أو أكثر وتظهر الفوتونات المنبعثة على هيئة طيف خطي

مثال 13: وزارة 2022 تكميلي

الكترون كتلته (m_e) وبروتون كتلته (m_p) لهما الطاقة الحركية نفسها ، فان نسبة طول موجة دي بروي المصاحبة للإلكترون الى طول موجة دي بروي المصاحبة للبروتون ($\frac{\lambda_e}{\lambda_p}$) تساوي :

a) $\left(\frac{m_p}{m_e}\right)^2$ b) $\left(\frac{m_e}{m_p}\right)^2$ c) $\sqrt{\frac{m_p}{m_e}}$ d) $\sqrt{\frac{m_e}{m_p}}$

$$K_e = K_p \rightarrow \frac{1}{2} m_e v_e^2 = \frac{1}{2} m_p v_p^2 \rightarrow v_p^2 = \frac{m_e v_e^2}{m_p} \rightarrow v_p = \sqrt{\frac{m_e v_e^2}{m_p}} = v_e \sqrt{\frac{m_e}{m_p}}$$

$$\lambda_e = \frac{h}{m_e v_e}$$

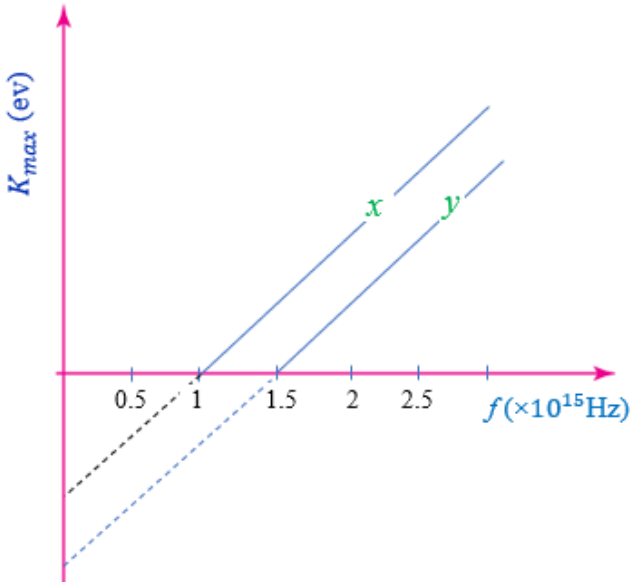
$$\lambda_p = \frac{h}{m_p v_p}$$

$$\frac{\lambda_e}{\lambda_p} = \frac{\frac{h}{m_e v_e}}{\frac{h}{m_p v_p}} = \frac{m_p v_p}{m_e v_e} = \frac{m_p v_e \sqrt{\frac{m_e}{m_p}}}{m_e v_e}$$

$$\left(\frac{\lambda_e}{\lambda_p}\right)^2 = \frac{{m_p}^2 {v_e}^2 \frac{m_e}{m_p}}{{m_e}^2 {v_e}^2} = \frac{m_p}{m_e} \rightarrow \frac{\lambda_e}{\lambda_p} = \sqrt{\frac{m_p}{m_e}}$$

الجواب الصحيح : c) $\frac{\lambda_e}{\lambda_p} = \sqrt{\frac{m_p}{m_e}}$

مثال 14: وزارة 2019



في تجربة لدراسة الظاهرة الكهرضوئية مُثلت العلاقة بين تردد الضوء الساقط على سطح الفلز والطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحررة كما في الشكل المجاور، أجب عمّا يأتي:

1. احسب طول موجة العتبة للفلز (x)
2. احسب فرق جهد القطع لمنحنى الفلز (y) عندما يسقط عليه ضوء تردده $(3\times10^{15}\text{Hz})$
3. أي الفلزين تنبعث منه إلكترونات ممتلكة طاقة حركية أكبر عند سقوط ضوء له التردد نفسه على سطحيهما؟

الحل :

1. طول موجة العتبة للفلز (x):

$$f_0 = \frac{c}{\lambda} \rightarrow \lambda = \frac{c}{f_0} = \frac{3\times10^{8}}{1\times10^{15}} = 3\times10^{-7}\text{m}$$

2. فرق جهد القطع لمنحنى الفلز (y):

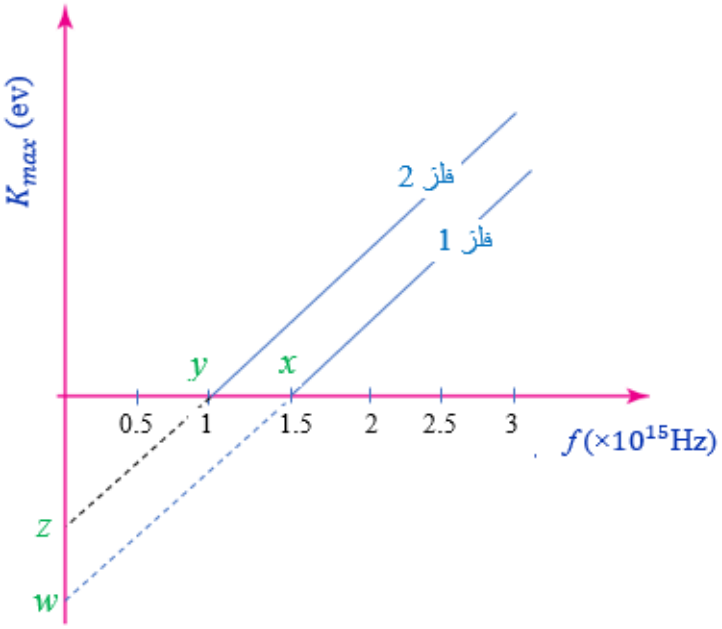
$$K_{max} = \text{e}\, V_s$$
$$f_o = \frac{\Phi}{h}$$

$$K_{max} = hf - \Phi \rightarrow \text{e}\, V_s = hf - hf_o$$
$$1.6\times10^{-19} \times V_s = 6.63\times10^{-34} \times (3\times10^{15} - 2\times10^{15})$$
$$V_s = \frac{6.63\times10^{-19}}{1.6\times10^{-19}} = 4.143\ \text{V}$$

3. حسب العلاقة $(K_{max} = hf - \Phi)$، تنبعث من الفلز (x) إلكترونات ممتلكة طاقة حركية أكبر عند سقوط ضوء له التردد نفسه على سطح الفلزين .

مثال 15: وزارة 2019

يبين الشكل المجاور علاقة تردد الضوء الساقط على سطح فلز والطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحررة، اعتمد على البيانات المثبتة على الشكل اجب عن الفقرات (1) ، (2) ، (3) الآتية:



1. يمثل ميل المنحنيات:

a) تردد العتبة b) ثابت بلانك c) اقتران الشغل d) جهد القطع

الجواب الصحيح : b) ثابت بلانك

2. لتحرير إلكترونات من سطح الفلز (1)، دون أن تمتلك طاقة حركية فإن علينا إسقاط ضوء تردده بالهيرتز:

a) يساوي $(1.5\times10^{15}\text{Hz})$ b) اقل من $(1.5\times10^{15}\text{Hz})$

c) يساوي $(2\times10^{15}\text{Hz})$ d) اقل من $(2\times10^{15}\text{Hz})$

$$K_{max} = hf - hf_o$$

$$0 = hf - hf_o \rightarrow f = \frac{hf_o}{h} = f_o = 1.5\times10^{15}\text{Hz}$$ (يساوي تردد العتبة للفلز)

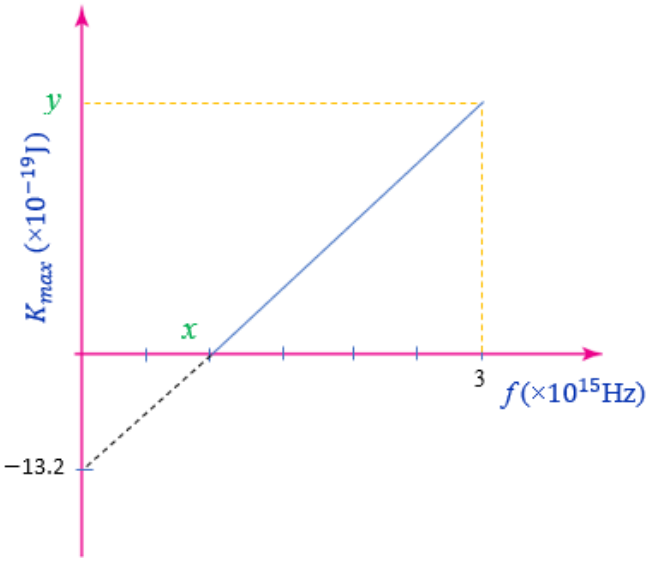
الجواب الصحيح : a) يساوي $(1.5\times10^{15}\text{Hz})$

3. أقل طاقة تلزم لتحرير إلكترون من سطح الفلز (2) تمثل:

a) (x) b) (y) c) (z) d) (w)

الجواب الصحيح : c) (z)

مثال 16: وزارة 2017 شتوية



يُمثل الشكل المجاور العلاقة البيانية بين تردد الضوء الساقط على باعث خلية كهروضوئية والطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحررة، بالاعتماد على القيم المثبتة في الشكل **أجب عما يأتي :**

1. ما مقدار كل من $(x\ ,\ y)$؟
2. كيف يمكن زيادة شدّة التيار في الخلية الكهروضوئية؟

الحل :

1. مقدار كل من $(x\ ,\ y)$:

لحساب قيمة (x)

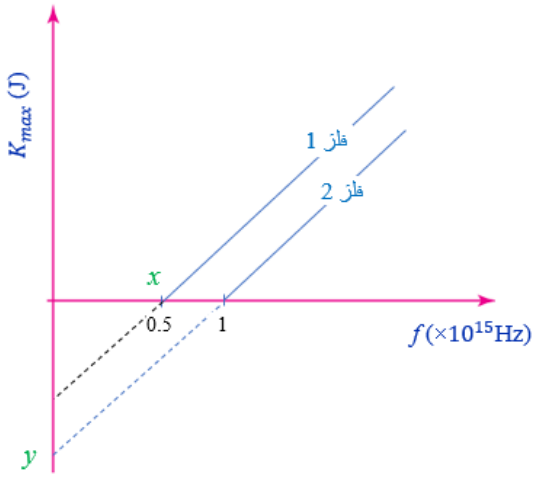
$$\Phi = hf_o$$
$$13.2\times10^{-19} = 6.63\times10^{-34} \times f_o$$
$$f_o = \frac{13.2\times10^{-19}}{6.63\times10^{-34}} = 2\times10^{15}\ \text{Hz}$$

لحساب قيمة (y)

$$K_{max} = hf - \Phi$$
$$= (6.63 \times 10^{-34} \times 3\times10^{15}) - (13.2\times10^{-19}) = 6.69 \times10^{-19}\text{J}$$

2. زيادة شدة التيار تتم عن طريق زيادة شدة الضوء الساقط.

مثال 17: وزارة 2016 صيفية



يبين الشكل المجاور العلاقة بين تردد ضوء يسقط على فلزين (1) و (2) والطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المنبعثة، معتمداً على الشكل وبياناته، **أجب عما يأتي:**

1. أي الفلزين يتطلب طاقة أقل لتحرير الإلكترونات من سطحه؟ لماذا؟
2. على ماذا تدل النقطة (x) ؟
3. احسب مقدار (y)؟
4. إذا سقط ضوء طول موجته (400 nm) على كل من الفلزين، بيّن أي الفلزين ستنبعث منه الإلكترونات .ثمّ احسب الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المنبعثة.

الحل :

1. الفلز (1) ، لان تردد العتبة له اقل وبالتالي اقتران الشغل له اقل.
2. تدل النقطة (x) على تردد العتبة للفلز (1).
3. مقدار (y) التي تمثل اقتران الشغل للفلز (1):

$$\Phi = hf_o$$
$$\Phi_1 = 6.63\times10^{-34} \times 1\times10^{15} = 6.63 \times10^{-19}\ \text{J}$$

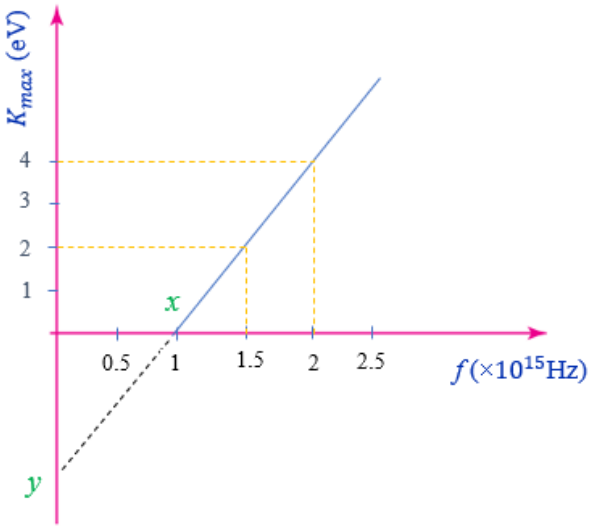
4. يجب حساب تردد الضوء الناتج من الطول الموجي (400 nm) لمقارنته ب تردد العتبة للفلزين:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3\times10^{8}}{400\times10^{-9}} = 0.75\times10^{15}\text{Hz}$$

وهذا التردد يستطيع تحرير الكترونات من سطح الفلز (1) فقط . ولحساب الطاقة الحركية العظمى المنبعثة منه عند هذا التردد :

$$K_{max} = hf - \Phi$$
$$K_{max} = hf - hf_o$$
$$= (\ 6.63 \times 10^{-34} \times (0.75\times10^{15} - 0.5 \times 10^{15}\ )\ = 1.6 \times10^{-19}\text{J}$$

مثال 18: وزارة 2015 صيفية



الرسم البياني المجاور يمثل العلاقة البيانية بين تردد الضوء الساقط على سطح فلز والطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية المتحررة ، معتمداً على الرسم البياني **أجب عمّا يأتي:**

1. ماذا تمثل كل من النقطتين (x)، (y) ؟
2. احسب ميل الخط المستقيم؟
3. ماذا يمثّل ميل الخط المستقيم؟ وما وحدة قياسه؟
4. احسب فرق جهد القطع عندما يسقط ضوء تردده $(2\times10^{15}\text{Hz})$ على سطح الفلز؟

الحل:

1. النقطة (x) تمثل تردد العتبة للفلز:

$(x) = 1\times10^{15}$ Hz

والنقطة (y) تمثل دالة الشغل للفلز :

$$(y) = \Phi = hf_o = 6.63\times10^{-34} \times 1\times10^{15} = 6.63\times10^{-19}\ \text{J}$$

2. ميل الخط المستقيم :

$$slope = \frac{\Delta K_{max}}{\Delta f} = \frac{(4-2)\times1.6\times10^{-19}}{(2-1.5)\times10^{15}} = 6.4\times10^{-34}\ \text{J.s}$$

3. يمثل ميل الخط ثابت بلانك (h) ووحدته (J.s) .
4. فرق جهد القطع يمكن حسابه من الشكل عند التردد $(2\times10^{15}\text{Hz})$ كما يلي :

$$K_{max} = \text{e}\ V_s$$
$$4\times1.6\times10^{-19} = 1.6\times10^{-19}V_s$$
$$V_s = 4\ \text{V}$$

مثال 19: وزارة 2019

تعتمد طاقة الموجات الضوئية، وفقاً للفيزياء الكلاسيكية على :

a) ترددها **b)** زمنها الدوري **c)** طولها الموجي **d)** شدتها

الجواب الصحيح: d) شدتها

مثال 20: وزارة 2019 تكميلي

سقط فوتون على هدف الكربون، أي العبارات الآتية تصف طاقة الفوتون المتشتت وتردده على الترتيب مقارنة بطاقة وتردد الفوتون الساقط:

a) طاقته أكبر، وتردده أكبر
b) طاقته أكبر، وتردده أقل
c) طاقته أقل، وتردده أكبر
d) طاقته أقل، وتردده أقل

الجواب الصحيح: d) طاقته أقل، وتردده أقل

مثال 21: وزارة 2019

تسمى الطاقة اللازم إعطاءها لإلكترون ذرة الهيدروجين لكي يغادر مداره نهائياً دون إكسابه طاقة حركية
a) طاقة التأين b) طاقة الإثارة c) طاقة المدار d) اقتران الشغل

الجواب الصحيح: a) طاقة التأين

مثال 22: وزارة 2019 تكميلي

الطيف الذي يظهر على هيئة خطوط سوداء تتخلل الطيف المتصل للضوء يسمى طيف:
a) غير مرئي b) مرئي c) امتصاص خطي d) انبعاث خطي
الجواب الصحيح: c) امتصاص خطي

مثال 23: وزارة 2019 شتوية

في ظاهرة كومبتون، فإن الفوتون المتشتّت يُماثل الفوتون الساقط في مقدار:
a) السرعة b) الزخم الخطّي c) الطول الموجي d) التردد
الجواب الصحيح: a) السرعة

مثال 24: وزارة 2018 شتوية

تكون سرعة إلكترون ذرة الهيدروجين أكبر ما يمكن عندما يكون في المستوى:
a) الأول b) الثاني c) الثالث d) الرابع
الجواب الصحيح: a) الأول

مثال 25: وزارة 2018 شتوية

مقدار الطاقة التي يجب تزويد الإلكترون بها ليتحرر من المستوى الثاني لذرة الهيدروجين دون إكسابه طاقة حركية بوحدة إلكترون فولت :
a) 13.6 b) 3.4 c) 1.5 d) 0.85

$$E_n = -\frac{13.6}{n^2} = -\frac{13.6}{2^2} = -3.4 \text{ eV}$$

الجواب الصحيح: b) 3.4

مثال 26: وزارة 2017 شتوية

إذا علمت أن الزخم الزاوي لإلكترون ذرة الهيدروجين في مستوى ما يساوي $(3.15\times10^{-34}\text{kg.m}^2/\text{s})$ احسب رقم المستوى الذي يتواجد فيه الإلكترون.

الحل:

$$L = n\hbar = n\frac{h}{2\pi}$$

$$3.15\times10^{-34} = n\frac{6.63\times10^{-34}}{2(3.14)} \longrightarrow n = \frac{3.15\times10^{-34}}{1.056\times10^{-34}} = 3$$

مثال 27: وزارة 2016 صيفية

إذا كان الزخم الزاوي لإلكترون ذرة الهيدروجين في إحدى مستويات الطاقة يساوي $(\frac{3h}{\pi})$ احسب الطاقة الكلية للإلكترون في هذا المستوى.

الحل:

$$L = n\hbar = n\frac{h}{2\pi}$$

$$n\frac{h}{2\pi} = \frac{3h}{\pi} \rightarrow n = 6$$

$$E_n = -\frac{13.6}{n^2} = -\frac{13.6}{6^2} = -0.38\ \text{eV}$$

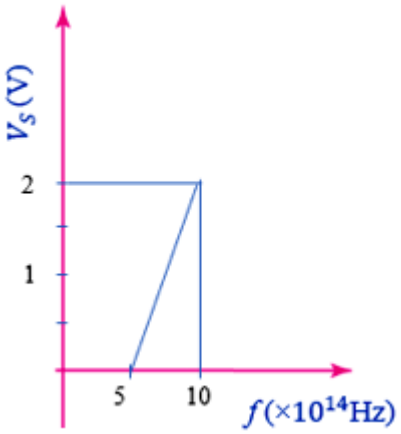
مثال 28: وزارة 2010 شتوية

يفقد الفوتون جزءاً من طاقته مع بقاء سرعته ثابتة نتيجة اصطدامه بالإلكترون في:

a) الظاهرة الكهرضوئية b) الأشعة السينية c) نسبية آينشتين d) ظاهرة كومبتون

الجواب الصحيح: d) ظاهرة كومبتون

مثال 29: وزارة 2021 تكميلي



استخدم طالب الخلية الكهروضوئية في إجراء تجربة لدراسة العلاقة بين تردد الضوء الساقط على فلز وجهد القطع ، ثم رسم العلاقة البيانية بينهما كما في الشكل المجاور . قيمة ثابت بلانك (h) التي حصل عليها الطالب بوحدة (J.s) هي:

a) (6.6×10^{-34}) b) (6.4×10^{-34})
c) (3.3×10^{-34}) d) (3.2×10^{-34})

$$h = slope \times e = \frac{\Delta V_S}{\Delta f} \times e$$

$$= \frac{(2-1)}{(10-7.5)\times10^{14}} \times 1.6\times10^{-19} = 6.4\times10^{-34}\text{J.s}$$

الجواب الصحيح : b) 6.4×10^{-34} J.s

مثال 30: إضافي

نسبة طول موجة دي بروي المصاحبة لإلكترون كتلته ($m_e = 9.106 \times 10^{-31} Kg$) الى طول موجة دي بروي المصاحبة لبروتون كتلته ($m_p = 1.672 \times 10^{-27} Kg$) لهما الطاقة الحركية نفسها تساوي :

1 (a 0.023 (b 42.8 (c 0.5 (d

$$\frac{\lambda_e}{\lambda_p} = \sqrt{\frac{m_p}{m_e}}$$

$$= \sqrt{\frac{1.672\times10^{-27}}{9.106\times10^{-31}}} = 42.8$$

الجواب الصحيح : c) 42.8

مثال 31: إضافي

إن طول موجة دي بروي بوحدة (m) المصاحِبة لإلكترون كتلته ($m_e = 9.106 \times 10^{-31} Kg$) سُرِّعَ بفرق جهد (500 V) يساوي :

4.41×10^{-18} (a 5.49×10^{-11} (b 4.5×10^{-28} (c 4.41×10^{-11} (d

$$K = \frac{1}{2} mv^2 = e\,\Delta V$$

$$v^2 = \frac{2e\,\Delta V}{m} \Rightarrow v^2 = \frac{2 \times1.6\times10^{-19}\times500}{9.106\times10^{-31}} = 1.757 \times10^{14}$$

$$\Rightarrow v = 1.326 \times10^{7}\, m/s$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{6.63\times10^{-34}}{9.106\times10^{-31}\times 1.32 \times10^{7}} = 5.49 \times10^{-11}\ \text{m}$$

or

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2me\,\Delta V}} = \frac{6.63\times10^{-34}}{\sqrt{2\times9.106\times10^{-31}\times1.6\times10^{-19}\times 500}} = 5.49 \times10^{-11}\ \text{m}$$

الجواب الصحيح : b) 5.49×10^{-11}

مثال 32: إضافي

النسبة بين الزخم الخطّي لفوتون طاقته ($E=3.2\times10^{-19}$) ، والزخم الخطّي لإلكترون حرّكتلته ($m_e = 9.106\times10^{-31}Kg$) يملك الطاقة نفسها تساوي:

9.623×10^{-3} (d 6.432×10^{-3} (c 5.721×10^{13} (b 1.397×10^{-3} (a

$$E_e = K_e = \frac{1}{2}m_e{v_e}^2 \Rightarrow v_e = \sqrt{\frac{2\times3.2\times10^{-19}}{9.106\times10^{-31}}} = 8.384\times10^5\ m/s$$

$$p_e = m_e v_e = 9.106\times10^{-31}\times 8.384\times10^5 = 7.634\times10^{-25}\ kg.m/s$$

$$p_p = \frac{E}{C} = \frac{3.2\times10^{-19}}{3\times10^8} = 1.067\times10^{-27}\ kg.m/s$$

$$\frac{p_p}{p_e} = \frac{1.067\times10^{-27}}{7.634\times10^{-25}} = 1.397\times10^{-3}$$

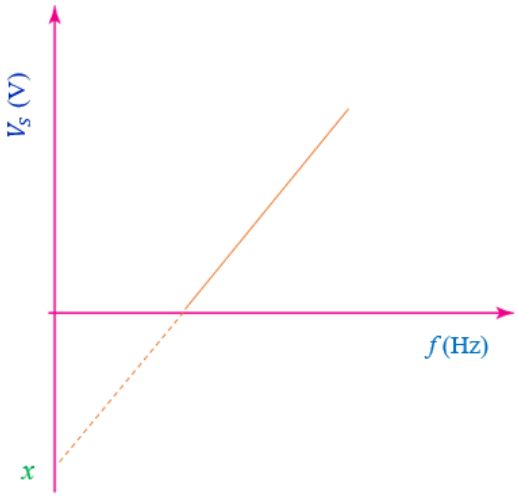
or

$$\frac{p_p}{p_e} = \frac{1}{c}\times\sqrt{\frac{E}{2m_e}} = \frac{1}{3\times10^8}\times\sqrt{\frac{3.2\times10^{-19}}{2\times9.106\times10^{-31}}} = 1.397\times10^{-3}$$

الجواب الصحيح : b) 5.49×10^{-11}

مثال 33: إضافي

يمثّل الرسم البياني المجاور العلاقة بين جهد الإيقاف وتردّد الضوء الساقط في الخلية الكهرضوئية، معتمدا على الشكل وبيانته اجب عن الفقرتين (1) و (2) :



1. ميل هذه العلاقة هو:

$\frac{e}{h}$ (b h (a

$\frac{\emptyset}{h}$ (d $\frac{h}{e}$ (c

الجواب الصحيح : c) $\frac{h}{e}$

2. النقطة (x) تمثل :

$\frac{e}{\emptyset}$ (b $\emptyset$ (a

$\frac{\emptyset}{e}$ (d $\frac{\emptyset}{h}$ (c

الجواب الصحيح : d) $\frac{\emptyset}{e}$

ملخص قوانين الوحدة السادسة

طاقة كمة الإشعاع:

$f = \frac{c}{\lambda}$, Hz

$E = hf$, J

$E_n = nhf$

حيث (h) : ثابت بلانك وقيمته (6.63×10^{-34}J.s)

(f) : تردّد الموجة بوحدة ($\text{Hz} = \frac{1}{s}$).

(E) : طاقة الأشعة الكهرومغناطيسية التي يشعّها جسم أو يمتصهابوحدة (J)

(n) : عدد صحيح موجب. وبذلك، فإنّ طاقة الأشعة الصادرة عن جسم عند التردّد f يمكن أن تأخذ قيمًا مثل:

$hf, 2hf, 3hf, 4hf, \ldots$

الظاهرة الكهروضوئية

$K_{max} = \text{e}\, V_s$

$K_{max} = \frac{1}{2} m\, v_{max}^2$

$K_{max} = hf - \Phi$

$f_o = \frac{\Phi}{h}$

حيث (e) : تساوي القيمة المطلقة لشحنة الإلكترون.

(V_s) : جهد الإيقاف الذي يستطيع إيقاف أكثر الالكترونات طاقة حركية.

(K_{max}) : اعلى طاقة حركية للالكترونات.

(m): كتلة الالكترون المتحرر.

v_{max} : السرعة العظمى للإلكترونات المتحرّرة.

(Φ) : اقتران الشغل وهوأقلّ طاقة كافية لتحرير إلكترون من سطح الفلز.

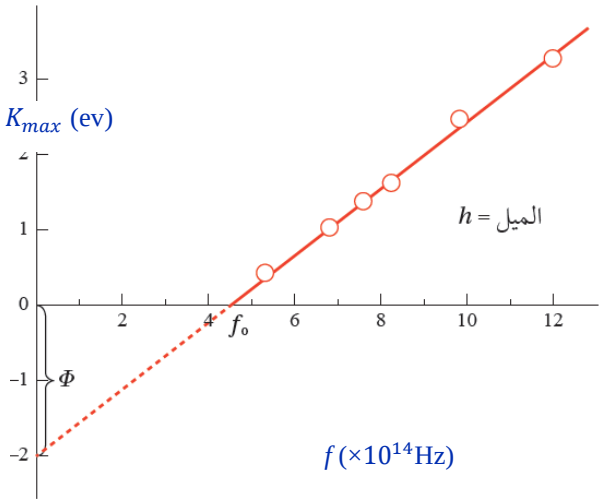
(f_o) : بتردّد العتبة للفلزّ ويُعرف بأنّه أقلّ تردّد يتطلّبه تحرير إلكترونات ضوئيّة من سطح فلزّ دون إكسابها طاقةً حركيّة

وحدة قياس الطاقة المستخدمة في الفيزياء الذريّة هي الإلكترون فولت (eV) حيث:

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

لحساب ثابت بلانك من منحنى $(K_{max}\ , f)$

$h = slope = \frac{\Delta K_{max}}{\Delta f}$

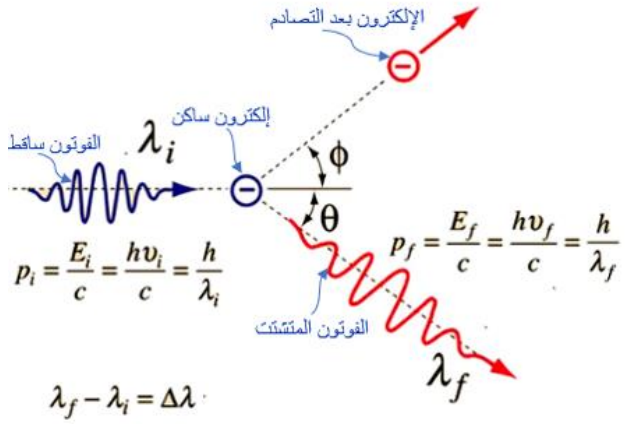


لحساب ثابت بلانك من منحنى $(V_s\ , f)$

$h = slope \times e = \frac{\Delta V_s}{\Delta f} \times e$

$slope = \frac{h}{e}$

ظاهرة كومبتون



$$\lambda_f > \lambda_i \quad , \quad f_f < f_i \quad , \quad E_f < E_i$$

$$E_e = E_i - E_f = hf_i - hf_f$$

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

حيث :

(λ_i) : الطول الموجي للفوتون الساقط .

(λ_f) : الطول الموجي للفوتون المتشتت.

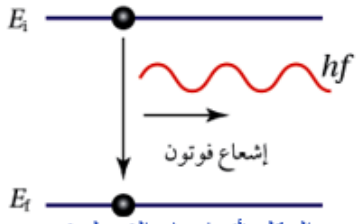
(E_i) : طاقة الفوتون الساقط .

(E_f) : طاقة الفوتون المتشتت.

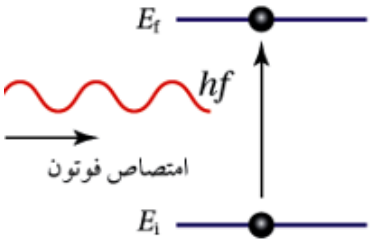
(E_e) : الفرق بين طاقة الفوتون الساقط وطاقة الفوتون المتشتت.

(p) : الزخم الخطي للفوتون.

نموذج بور لذرة الهيدروجين



الشكل (أ): إشعاع الذرة لفوتون في هذه الحالة الذرة تفقد طاقة.



الشكل (ب): امتصاص الذرة لفوتون في هذه الحالة الذرة تكتسب طاقة.

$$E = |E_f - E_i| = hf$$

حيث :

E_f : طاقة المدار (مستوى الطاقة) النهائي الذي انتقل إليه الإلكترون.

E_i : طاقة المدار (مستوى الطاقة) الابتدائي الذي انتقل منه الإلكترون.

f : تردّد الفوتون المنبَعِث أو المُمتَصّ.

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.05 \times 10^{-34}\text{J.s}$$

$$L = n\hbar = \frac{nh}{2\pi} = m_e vr$$

حيث :

n: رقم المدار ويأخذ قيمًا صحيحة 1,2,3 ,…, وهكذا

m_e: كتلة الإلكترون وتساوي $9.11 \times 10^{-31}\text{kg}$

r : نصف قطر مدار الإلكترون

ألأطياف الذريّة

$$hf = |E_f - E_i| = 13.6e \left| \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right|$$

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left| \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right|$$

حيث e : هي القيمة المطلقة لشحنة الإلكترون.

المقدار $\left(\frac{13.6e}{hc}\right)$: ثابت يُسمّى ثابت ريدبيرغ (R_H) ويساوي $(R_H = 1.097 \times 10^7 m^{-1})$.

(λ) : الطول الموجي للفوتون المنبعث.

ملاحظة : الطاقة في المالانهاية تساوي صفر

الطبيعة المزدوجة وموجات دي بروي

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

حيث:

λ : طول موجة دي بروي، ويُطلق عليها اسم الموجة المصاحِبة للجسم.

h : ثابت بلاك

p : مقدار الزخم الخطّي للجسم.

m : كتلة الجسم

v : سرعة الجسم

طول موجة دي بروي المصاحِبة لإلكترون سُرِّعَ بفرق جهد (ΔV)

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = e\,\Delta V$$

$$v^2 = \frac{2e\,\Delta V}{m} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2e\,\Delta V}{m}}$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{h}{m\sqrt{\frac{2e\,\Delta V}{m}}} = \frac{h}{\sqrt{\frac{2e\,\Delta V m^2}{m}}} = \frac{h}{\sqrt{2me\,\Delta V}}$$

النسبة بين الزخم الخطّي لفوتون طاقته (E) ، والزخم الخطّي لإلكترون حرّ يملك الطاقة نفسها

$$E_e = K_e = \frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2E}{m_e}}$$

$$p_e = m_e v_e = m_e\sqrt{\frac{2E}{m_e}} = \sqrt{2m_e E}$$

$$\frac{p_p}{p_e} = \frac{\frac{E}{c}}{\sqrt{2m_e E}} = \frac{E}{c} \times \frac{1}{\sqrt{2m_e E}} = \frac{1}{c} \times \sqrt{\frac{E}{2m_e}}$$

نسبة طول موجة دي بروي المصاحبة لإلكترون كتلته (m_e) الى طول موجة دي بروي المصاحبة لبروتون كتلته (m_p) لهما الطاقة الحركية نفسها تساوي :

$$K_e = K_p \rightarrow \frac{1}{2} m_e v_e^2 = \frac{1}{2} m_p v_p^2 \rightarrow v_p^2 = \frac{m_e v_e^2}{m_p} \rightarrow v_p = \sqrt{\frac{m_e v_e^2}{m_p}} = v_e \sqrt{\frac{m_e}{m_p}}$$

$$\lambda_e = \frac{h}{m_e v_e}$$

$$\lambda_p = \frac{h}{m_p v_p}$$

$$\frac{\lambda_e}{\lambda_p} = \frac{\frac{h}{m_e v_e}}{\frac{h}{m_p v_p}} = \frac{m_p v_p}{m_e v_e} = \frac{m_p v_e \sqrt{\frac{m_e}{m_p}}}{m_e v_e}$$

$$\left(\frac{\lambda_e}{\lambda_p}\right)^2 = \frac{{m_p}^2 {v_e}^2 \frac{m_e}{m_p}}{{m_e}^2 {v_e}^2} = \frac{m_p}{m_e} \rightarrow \frac{\lambda_e}{\lambda_p} = \sqrt{\frac{m_p}{m_e}}$$