الخواص الموجية و الجسيمية للضوء

حتى بدايات القرن العشرين، اكتفى الفيزيائيون بمفهوم الموجة والجسيم لتفسير ظواهر عديدة في الكهرُمغناطيسة، الحرارة، وبشكل عام في العالم المحسوس بالنسبة للانسان. من انتشار الأمواج المغناطيسية إلى الحرارة النوعية للمواد والنظرية الحركية للغازات حتى التفاعلات الكيماوية مرورا بالصوت والنظام الشمسي.

في عام ١٩٠٠ بالضبط واجهت الفيزيائيين مشكلة جديدة، أطلق عليها اسم "إشعاع الجسم الأسود" أجبرتهم على عدم الاكتفاء بهذيْن المفهوميْن كتعبيريْن مستقليْن. وفي نفس الفترة تقريباً، ظهرت ظاهرة الأثر الكهروضوئي والتي حيرت المجتمع العلمي. أظهرت التجربة أنّ اسقاط ضوء ذي طول موجة محدد على سطح معدن يسبب ظهور تيار كهربائي أُطلق عليه اسم تيار الكهروضوئي (photoelectric current).

I- الأمواج

١- تعريف الموجة

يُستخدم مفهوم الموجة، للتعبير عن انتقال الطاقة. فالموجة الميكانيكية كموجة الصوت، الناتجة عن ازعاج ميكانيكي لوسط مادي. تُعبّر عن كيفية انتشار الطاقة الميكانيكية في هذا الوسط، وتُعبر الموجة الكهرومغناطيسية عن انتشار الطاقة الكهرومغناطيسية في الفراغ.

٢- تصنيف الأمواج

1- من حيثُ اعتمادها على الزمكان وانتشارها:

- دورية
- غير دورية

2- من حيثُ شكل مقدمة الموجة wavefront اثناء الانتشار:

- الموجة المستوية plane wave : مقدمة الموجة سطح مستوٍ.
- الموجة الكروية spherical wave : مقدمة الموجة سطح كروي.

3- من حيثُ "ازعاج" الوسط الناقل:

- الموجة المستعرضة : transverse wave

وفيها تكون إزاحة جزيئات الوسط عن وضع الاتزان عمودية على اتجاه انتشار الموجة مثل الموجة الناشئة عن اهتزاز سلك.

- الموجة الطوليّة

وفيها تكون ازاحة جزيئات الوسط عن وضع الاتزان في اتجاه انتشار الموجة -مثل امواج الصوت

4- من حيثُ الوسط الناقل

- الموجة الميكانيكيّة وتحتاج الى وسط ناقل
- الموجة الكهرُمغناطيسية لا تحتاج الى وسط ناقل بلْ تنتشر في الفراغ.

II- الطبيعة الموجية الكهرُمغناطيسية للضوء

في عام ١٨٦٤ ، اقترح ماكسويل فكرة أنّ تسريع الشحنات الكهربائية يُولد "إزعاجات" كهربائية و ومغناطيسية تنتشر في الفراغ بشكل لانهائي. وإذا كان اهتزاز الشحنة دوريّا فإن الازعاج يكون على شكل أمواج يتذبذب فيها مجال كهربائي ومجال مغناطيسي عموديا الواحد على الآخر وعلى اتجاه انتشار الموجة.

الاكتشاف الأهم كان أن سرعة انتشار هذه الموجات يُساوي بالضبط سرعة الضوء في الفراغ $c=3.10^8 m.s^{-1}$ و الاستنتاج الذي فرض نفسه هو أن الضوء نفسه أمواج كهرُمغناطيسية.

وجد ماكسويل أنّ $c=1/\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$ حيث ε_0 و μ_0 هما على التوالي سماحيّة و إنفاذيّة الفراغ.

III- الجسم الأسود

الجسم الأسود هو جسما مثاليا يمتص كل موجات الضوء الساقطة عليه دون أن يعكس أي منها. و بعد وصول حرارته إلى الدرجة T يقوم بدوره بإشعاع موجات حرارية موزعة على جميع نطاقات التردد.

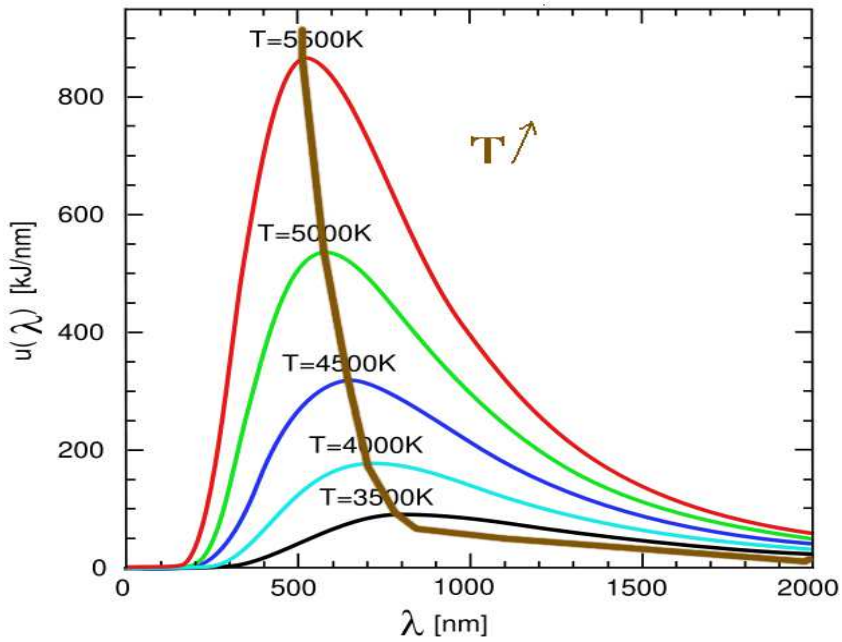
توصل العالم الألماني ماكس بلانك عام 1900 م من خلال دراسته لإشعاع الجسم الأسود إلى العلاقة الآتية بين الطاقة المنبعثة من الجسم الأسود ودرجة حرارته إلى العلاقة:

$$dI(\lambda,T)=\frac{8\pi h c}{\lambda^5}\cdot\frac{d\lambda}{\exp\frac{h c}{k_B \lambda T}-1}$$

حيث:

- dI : الطاقة الصادرة من ١ م^2 من سطح الجسم الأسود في الثانية في بين التردد ν و $\nu+d\nu$ عند درجة حرارة: T
- $h=6,6110^{-34}$ j.s : ثابت بلانك.
- $c=3.10^8$ m.s^{-1} : سرعة الضوء في الفراغ.
- $K_B=1,3810^{-23}$ J.K^{-1} :ثابت بولتزمان.

عند رسم $u=\frac{dI}{d\lambda}$ اعتمادا على λ نجد المنحى التالي :



وهذا التوزيع يتميز بقمة عند طول موجة معين λ_m تعتمد على درجة حرارة T للجسم الأسود.

ونلاحظ أنّ تلك القمة تنزاح بارتفاع درجة حرارة الجسم الأسود في اتجاه طول الموجة القصيرة.

و العلاقة بين λ_m و T هي: $\lambda_m = \frac{3000\ \mu m\, k}{T}$ و التي تسمى بقانون فين.

عند تكامل بالنسبة ل λ نحصل على:

$$I = \int_0^{+\infty} \frac{8\,\pi\,h\,c}{\lambda^5} \cdot \frac{d\,\lambda}{\exp\frac{h\,c}{k_B \lambda T} - 1}$$

$$= \sigma T^4$$

أي أنّ معدل إشعاع (انبعاث) الطاقة الحرارية من جسم أسود ساخن يتناسب مع الأس الرابع لدرجه الحرارة المطلقة : $I = \sigma T^4$.

حيث $\sigma = 6{,}67.10^{8}\ w/m^{2}k^{4}$ ثابت ستيفان.

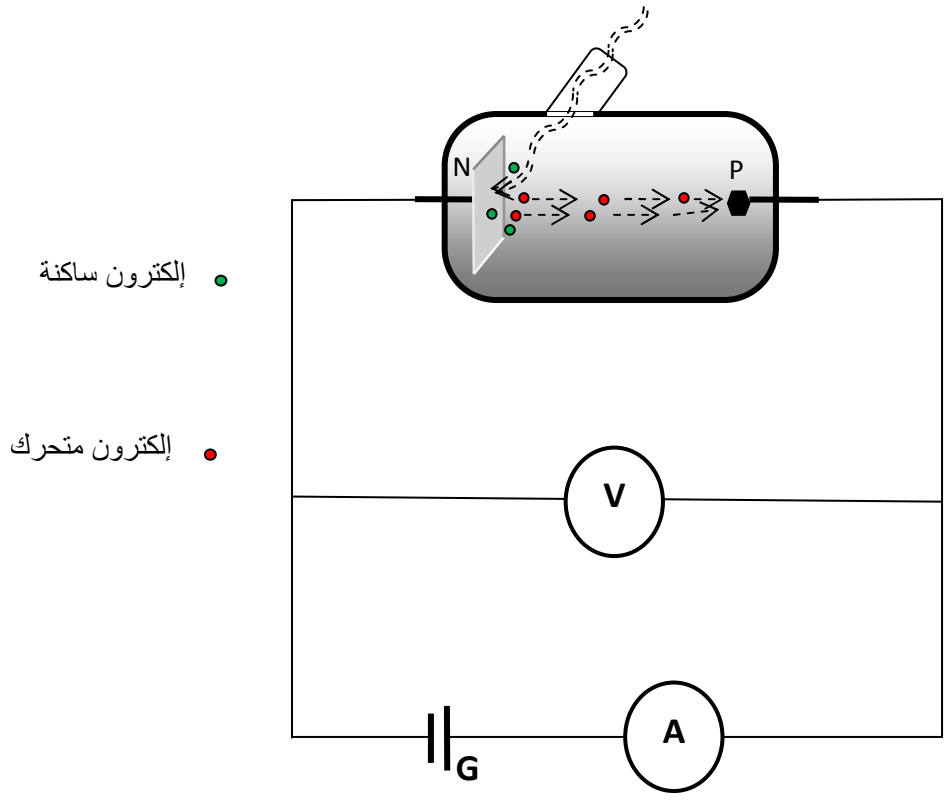
IV- ظاهرة الإنبعاث الكهروضوئي

إذا سقط ضوء على سطح معدن فإن تياراً ينبعث لحظياً من سطح المعدن.

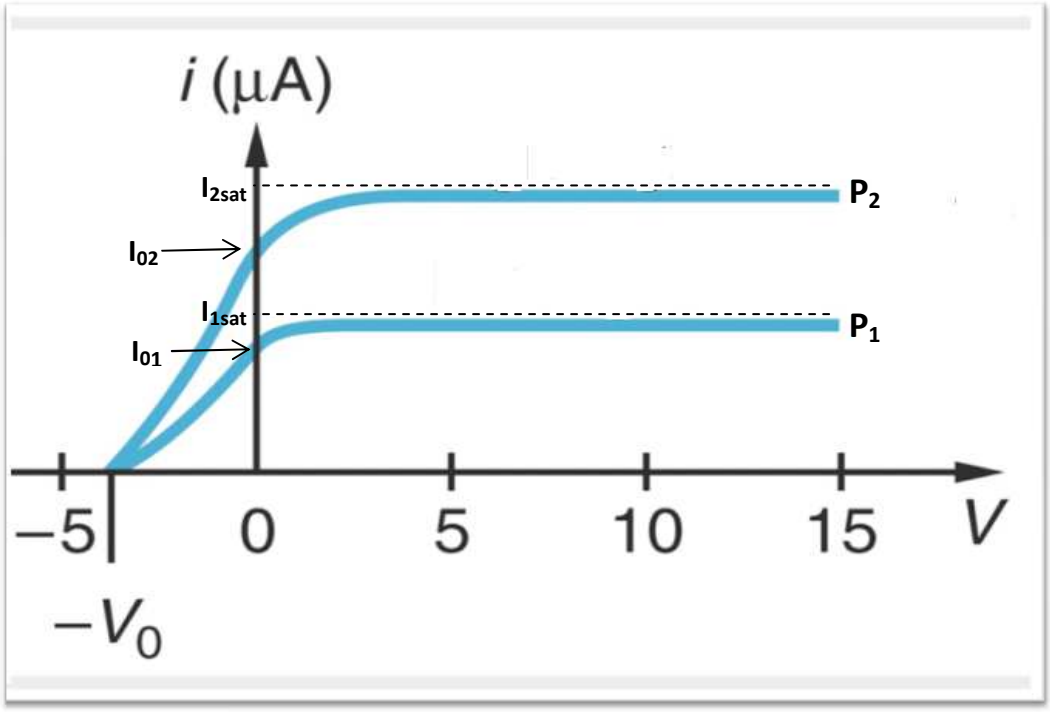
يتكون الجهاز المستعل لدراسة هذه الظاهرة من أنبوبة زجاجية مفروغة من الهواء ومزودة بنافذة من الكوارتز وذلك لأن الزجاج يمتص معظم الأشعة المستخدمة قبل وصولها للسطح المعدني.

تحتوي الأنبوبة قطب سالب و قطب موجب متصلان خارجيا بمولد جهد مع الأميتروالفولتميتر تستخدم لمراقبة التغيرات في التيار والجهد على التوالي.

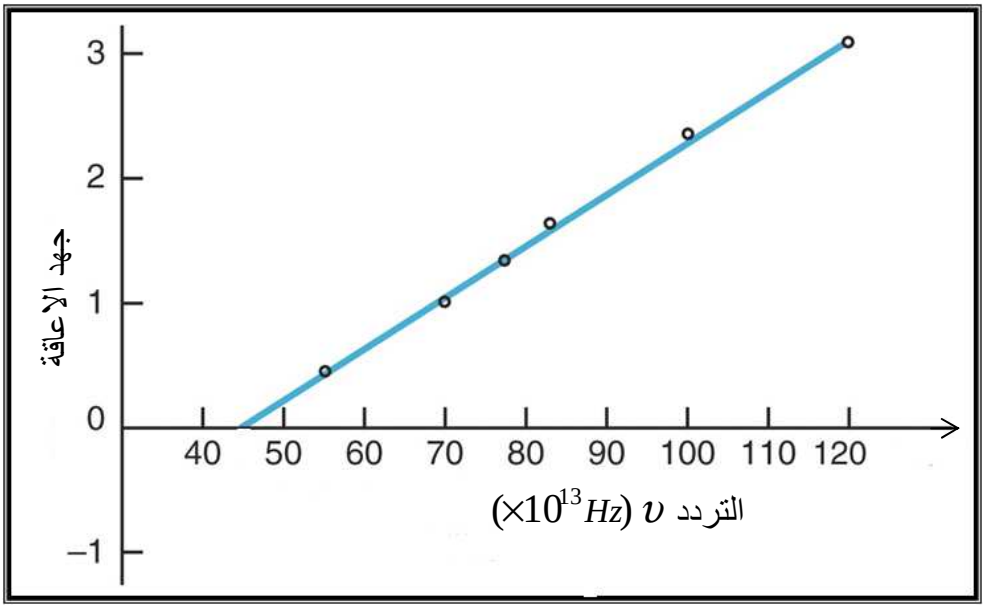
عند إسقاط أشعة فوق البنفسجية على القطب السالب نلاحظ تدفق التيار في الدائرة الكهربائية.



نركز الضوء بقدرة ثابتة على القطب السالب و نغير الجهد نلاحظ أن شدة التيار الكهربائي تتغير بدلالة الجهد على النحو التالي.



اد تكون معدومة عندما نركز على الأنبوبة جهدا سالبا $-V_0$ ، القيمة المطلقة V_0 تسمى "جهد الاعاقة ". و قيمتها تبقى نفسها أيا كانت الشدة P للضوء الساقط على اللوح المعدني و لكنها تتغير بتغير تردده الموجي υ. هذا التغير يكون على نحو المنحنى التالي الذي يبين بأن V_0 يتناسب طرديا مع التردد.



كما نلاحظ كذلك بأن شدة التيار الكهربائي تؤول من خط مقارب أفقي حيث قيمتها تتصاعد مع شدة الضوء المستخدم.

إستخدم إنشتين النظرية الكمية إذ إعتبر أنّ الضوء هو عبارة عن كمات من الطاقة سميت فوتونات، و أنّ طاقة الفوتون وفقا للنظرية الكمية هي $h\upsilon$.

عندما يصطدم فوتون بسطح فلز فإنه يعطي طاقته كلها لأحد الإلكترونات، الذي يستطيع أن يقفز حاجز الجهد السطحي و يصبح حرا. و تسمى الطاقة اللازمة لتحرير الإلكترون من ذرات المادة **بدالة الشغل الكهرضوئي** حيث يأخذ هذا الشغل الشكل التالي: $W = e V_0$.

الفرق بين الطاقة المكتسبة و شغل التحرر تظهر على شكل طاقة حركية لتحرك الإلكترون وإن كانت هذه الطاقة كافية فإن الإلكترون يصل إلى القطب الموجب و إلا فستبقى في منتصف الطريق.

$$h\upsilon = W + \frac{1}{2}mv^2$$

أو $h\upsilon = e.V_0 + \frac{1}{2}mv^2$ حيث v السرعة التي ينطلق بها الإلكترون عند خروجه من السطح.

و عندما يخرج الإلكترون بسرعة معدومة فإنّ:

$$h\upsilon = e.V_0 = h\upsilon_0 = h\frac{c}{\lambda_0}$$

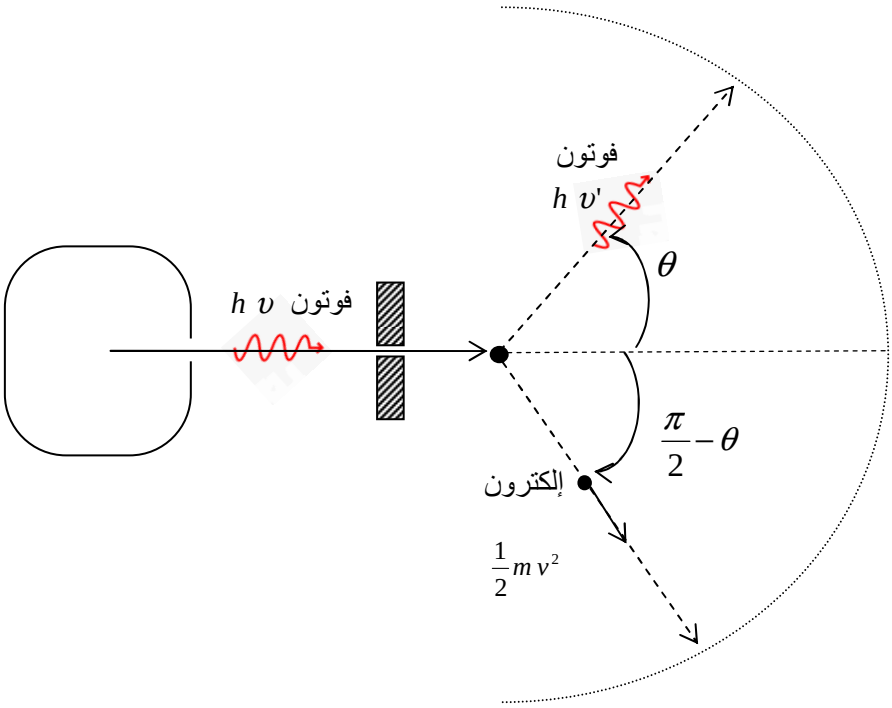
حيث υ_0 عتبة التردد للإصدار الكهروضوئي تعتبر λ_0 أقصى طول موجة يمكن إستعماله لإخراج الإلكترون من الفلز.

و هذا يؤدي إلى:

$$\boxed{h\frac{c}{\lambda} = h\frac{c}{\lambda_0} + \frac{1}{2}m\,v^2}$$

V- ظاهرة كومبتون

تعتمد ظاهرة كمبتون في تفسيرها على ان الضوء يتكون من فوتونات لها طاقة $h\upsilon$ وكمية حركة $h\frac{\upsilon}{c}$ ولا يمكن تفسيرها على اعتبار النموذج الموجي للضوء. تم التحقق من هذه الظاهرة عملياً في عام 1923 في جامعة سانت لويس من قبل العالم آرثر كمبتون وذلك بإسقاط أشعة اكس على لوح من الكربون كما هو موضح في الشكل التالي:



ولتفسير هذه الظاهرة اعتمد كمبتون على ان الاشعة الساقطة تتكون من سيل من الفوتونات لها طاقة وكمية حركة.

وعندما يتصادم فوتون مع الالكترون في لوح الكربون فإنها تفقد جزء من طاقتها لتتحول إلى طاقة حركة للإكترون و بتطبيق قانون الحفاظ على الطاقة والحفاظ على كمية الحركة نجد:

بالنسبة للطاقة: $$h\upsilon = h\upsilon' + \frac{1}{2}mv^2$$

أو $$\frac{1}{2}mv^2 = h(\upsilon - \upsilon')$$

و بالنسبة ل وكمية الحركة:

$$\begin{cases} h\frac{\upsilon}{c} = h\frac{\upsilon'}{c}\cos\theta + mv\sin\theta \\ 0 = h\frac{\upsilon'}{c}\sin\theta - mv\cos\theta \end{cases}$$

وبإعادة ترتيب متجهات كمية الحركة للفوتون والإلكترون الحر بعد التصادم كما في الشكل التالي :

$$\begin{cases} m v \sin\theta = h\dfrac{\upsilon'}{c}\cos\theta - h\dfrac{\upsilon}{c} \\ m v \cos\theta = h\dfrac{\upsilon'}{c}\sin\theta \end{cases}$$

و بالتربيع و الجمع نحصل على:

$$(m\,v)^2 = (h\,\frac{\upsilon'}{c}\sin\theta)^2 + (h\,\frac{\upsilon'}{c}\cos\theta - h\,\frac{\upsilon}{c})^2$$

مما يؤدي إلى:

$$m\,v^2 = \frac{h^2}{mc^2}(\upsilon'^2 + \upsilon^2 - 2\,\upsilon.\upsilon'\cos\theta)$$

أو

$$m\,v^2 = \frac{h^2}{mc^2}((\upsilon - \upsilon')^2 + 2\,\upsilon.\upsilon'(1-\cos\theta))$$

و بإهمال $(\upsilon - \upsilon')^2$ نحصل على:

$$m\,v^2 = \frac{h^2}{mc^2}\,2\,\upsilon.\upsilon'(1-\cos\theta)$$

مما يؤدي إلى:

$$\frac{1}{2}m\,v^2 = \frac{h^2}{mc^2}\,\upsilon.\upsilon'(1-\cos\theta)$$

و علما أنّ:

$$\frac{1}{2}mv^2 = h(\upsilon - \upsilon')$$

نحصل على:

$$h(\upsilon - \upsilon') = \frac{h^2}{mc^2}\,\upsilon.\upsilon'(1-\cos\theta)$$

و بإدراج طول الموجة نحصل على:

$$(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda'}) = \frac{h}{mc} \frac{1}{\lambda.\lambda'}(1-\cos\theta)$$

و بالضرب ب $\lambda.\lambda'$ نحصل على:

$$\boxed{(\lambda' - \lambda) = \frac{h}{mc} (1-\cos\theta)}$$

تعطي هذه العلاقة الإزاحة في طول موجة الفوتون بعد تصادمه مع الإلكترون الساكن. و يلاحظ أن المقدار h/mc هو مقدار ثابت كومبتون و يعرف بطول موجة للإلكترون و يكون:

$$\lambda_c = \frac{h}{mc} = 0{,}024\,A°$$

و بما أنّ $1-\cos\theta = 2\sin^2\theta/2$ يمكن كتابة علاقة استطارة كومبتون على النحو التالي:

$$(\lambda' - \lambda) = 4.8\times10^{-12} \sin^2\theta/2 .$$

مسألة 1:

1- جد معدل درجة حرارة سطح الشمس علما بأنها تظهر بلون أصفر طوله الموجي $\lambda=0.6\,\mu m$.

2- أحسب ما تفقده الشمس من كتلتها في الثانية بسبب الإشعاع.

3- جد النسبة بين الكتلة المفقودة في السنة وكتلة الشمس.

$$M_s = 2.10^{30}\,Kg \text{ و } R_s = 7.10^8\,m$$

مسألة 2:

نعتبر سطح معدني من الفضة يتميز بدالة شغل $W = 4.7\,eV$ و مركز عليه تدفق ضوئي طوله الموجي $\lambda = 0.2\ \mu m$ و قدرته $P = 3\,Watt$.

1- جد تردد الضوء المستعمل.

2- أحسب طاقة الفتون الواحد و عدد الفتونات الساقطة في الثانية على سطح الفضة.

3- جد السرعة العظمى للإلكترونات المنبعثة من السطح ثم أحسب جهد الإيقاف.

4- حدد تردد الأشعة التي يجب أن تسقط على النحاس لكي تخرج الإلكترونات بطاقة حركة عظمى مقدارها $E_K = 8\,eV$.

5- أحسب عتبة التردد للإصدار الكهروضوئي وبذلك الطول الموجي المطابق.

6- هل تنطلق الإلكترونات من سطح الفضة عند سقوط الأشعة الضوئية عليها؟

مسألة 3:

نأخذ فوتون طوله الموجي $\lambda = 0.7\ \mu m$ الذي يصطدم بإلكترون ساكن مما يؤدي إلي تحرك الإلكترون بسرعة v و خروج الفوتون بطول موجي λ' مخالف للأول وحيث تكون زاوية الإستطارة بينهما $\theta = 60°$.

1- جد التغير في طول الموجة و التغير في الطاقة إثر التصادم.

2- أحسب طاقة حركة الإلكترون.

3- ناقش الشروط الواجب إتخاذها لإيجاد طاقة قصوى أو دنيا للإلكترون.

4- جد التغير في طول موجة فوتون إصطدم بإلكترون مرتبط إرتباطا وثيقا بذرة كربون إذا كانت زاوية الإستطارة تساوي 90° وأن الكتلة المولية للكربون هو $M = 12\ g.mol^{-1}$.

الحل

مسألة 1:

1- نستعمل قانون فين $\lambda.T=3000\ \mu m.K$ و حيث أنّ $\lambda=0.6\ \mu m$ مما يؤدي إلى:

$$T=\frac{3000}{0.6}=5000K$$

2- نستعمل قانون ستيفان لحساب الطاقة المفقودة في وحدة المساحة في الثانية:

$$\varphi=\frac{\Delta E}{\Delta t.S}=\sigma T^4$$

و حيث : $\Delta t.S=1\times1=1$ نجد:

$$\begin{aligned}\Delta E&=\sigma T^4\\&=5,67.10^{-8}.(5.10^3)^4\\&=3,54.10^7\ j\end{aligned}$$

الطاقة الكلية المفقودة من سطح الشمس:

$$\begin{aligned}\Delta E_t&=\Delta E\times4\pi R_s^2\\&=3,54.10^7\times4\times3.14\times(7.10^8)^2\\&=2,2.10^{26}\ j\end{aligned}$$

يمكن حساب الكتلة التي تفقدها الشمس في الثانية بإستعمال المعادلة: $\Delta E_t=\Delta m.c^2$

مما يعطي الكتلة المفقودة:

$$\Delta m = \frac{\Delta E_t}{c^2}$$
$$= \frac{2,2.10^{26}}{9.10^{16}}$$
$$= 2,4.10^{9}\ Kg$$

3- الكتلة المفقودة في السنة هي:

$$\Delta m_y = 365 \times 24 \times 3600 \times \Delta m$$
$$= 1,8.10^{17}\ Kg$$

مما يؤدي إلى النسبة التالية: $\frac{\Delta m_y}{M_s} = 9.10^{-14}$.

مسألة 2:

1- تردد الضوء هو: $\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3.10^8}{0,2.10^{-6}} = 1,5.10^{15}\ Hz$.

2- طاقة الفتون الواحد هي:

$$E_{ph} = h.\nu$$
$$= 6,62.10^{-34}.1,5.10^{15}$$
$$= 9,93.10^{-19}\ j$$