الفصل الثاني

الصفات الجسيمية للموجات

نظرية الفوتونات

من ابرز النتائج للنظرية الكمية ان الاشعاع الكهرومغناطيسي ينبعث ويشع على شكل حزم او كمات من الطاقة تسمى بالفوتونات. وان طاقة الفوتونات تتناسب طردياً مع تردده حسب العلاقة:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

حيث ان:

h : ثابت بلانك $h = 6.63 \times 10^{-34}\ \mathrm{J.s}$

ν : تردد الفوتون.

λ : الطول الموجي للفوتون.

c : سرعة الضوء في الفراغ $c = 3 \times 10^{8}\ m/s$

وحسب النظرية الحديثة للفوتونات خاصية ازدواجية (تسلك سلوك موجي وسلوك جسيمي) . ففي ظاهرة الحيود والتداخل مثلاً يسلك الفوتون كانه موجة اما في الظاهرة الكهروضوئية وظاهرة الامتصاص والاشعاع وظاهرة كومتن فان الفوتون يسلك سلوك جسيمي (دقائقي).

ان زيادة عدد الفوتونات في الاشعاع تؤدي الى زيادة شدة الاشعاع اي ان شدة الفوتونات تتناسب طردياً مع عدد الفوتونات . فاذا كان عدد الفوتونات المارة خلال مساحة معينة لوحدة الزمن يساوي (n) فان الشدة (I) تعطى بالعلاقة التالية:

$$I = energy\ of\ photon \times \frac{n}{area \times time}$$

$$I = J \times \frac{1}{m^2 \times s} = \frac{watt \times s}{m^2 \times s}$$

$$\therefore I = watt/m^2$$

ان الكتلة السكونية للفوتون تساوي صفر وحسب الاثبات التالي:

$$p = \frac{m_o v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\because p = \frac{h}{\lambda} \Rightarrow \therefore \frac{h}{\lambda} = \frac{m_o v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$m_o = \frac{h}{v\lambda}\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$\because v = c \Rightarrow \quad m_o = \frac{h}{v\lambda}\sqrt{1 - 1}$$

$$\therefore m_o = 0$$

تتحرك الفوتونات في الفراغ بسرعة الضوء (c) وعليه ووفقاً للنظرية النسبية فان الكتلة السكونية للفوتون تساوي صفر (m_o) ومن معادلة الزخم والطاقة

$$E^2 = p^2c^2 + m_o^2c^4$$

$\because \ m_o = 0$ للفوتون

$$\therefore E^2 = p^2c^2 \Rightarrow E = pc$$

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} \Rightarrow p = \frac{h\nu}{\lambda\nu}$$

$\therefore p = \frac{h}{\lambda} \Rightarrow$ زخم الفوتون

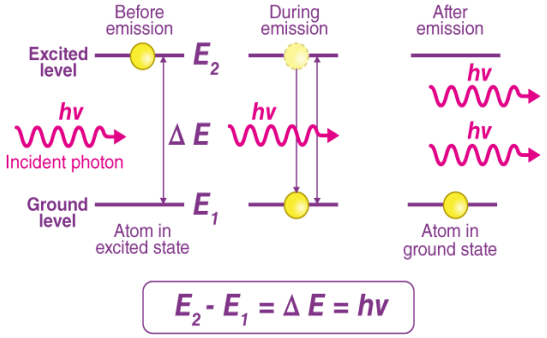
يتضح من معادلة زخم الفوتون $(p = \frac{h}{\lambda})$ الخاصية الازدواجية للفوتون اذ ان الجهة اليسرى من المعادلة تحتوي على مفهوم الجسيم (الزخم) . اما الجهة اليمنى من المعادلة تحتوي على مفهوم الموجة (الطول الموجي λ).

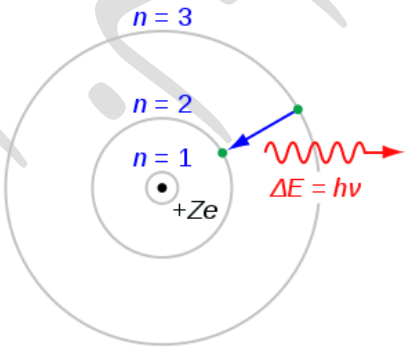
كيف يتولد الفوتون؟

ينشأ الفوتون في الغلاف الذري الالكتروني فعندما تمتص الذرة طاقة ينتقل الالكترون الى مستوى طاقة عالٍ فتصبح الذرة في حالة متهيجة فسرعان ما يقفز الالكترون الى مستوى طاقة اقل. وان فرق الطاقة بين المستويين يكون بهيئة فوتون له تردد محدداً و طول موجة محددة وفق المعادلة التالية:

$$\Delta E = E_2 - E_1$$

$$\Delta E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$





مثال1 (واجب):

احسب مقداد تردد وطول موجة فوتون طاقته $(1\ KeV)$

مثال2 (واجب):

ما مقدار زخم فوتون طاقته $(12\ MeV)$ ؟

<u>ملاحظة:</u>

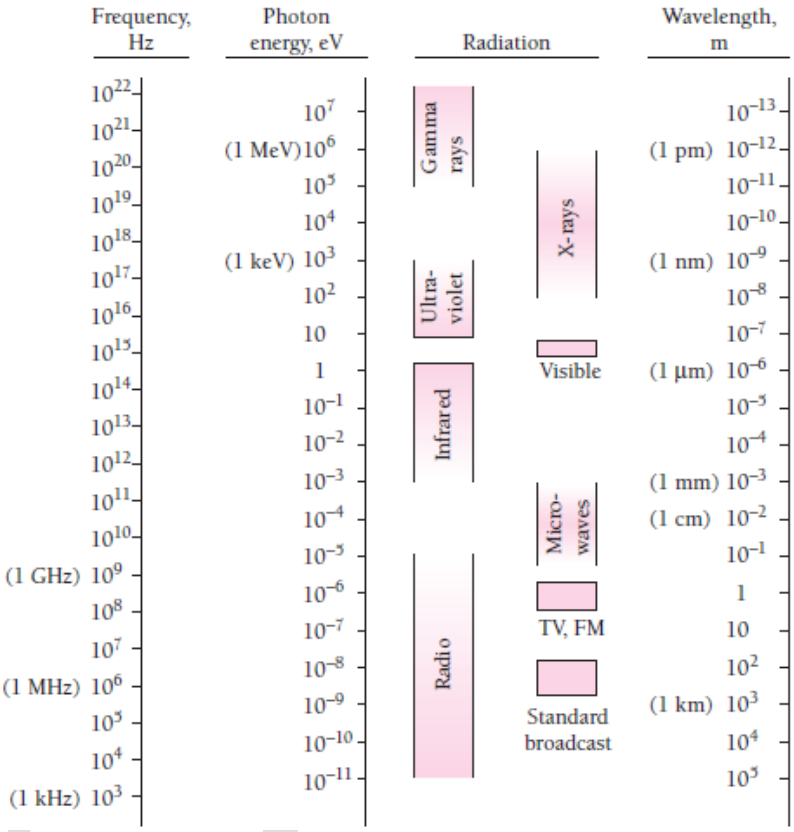
يقاس الطول الموجي بوحدة (m) علماً بان:

$$1m = 10^9 nm \Rightarrow 1nm = 10^{-9}m$$

$$1m = 10^{10} A^0 \Rightarrow 1A^0 = 10^{-10}m$$

اشعاع الجسم الاسود Black Body Radiation

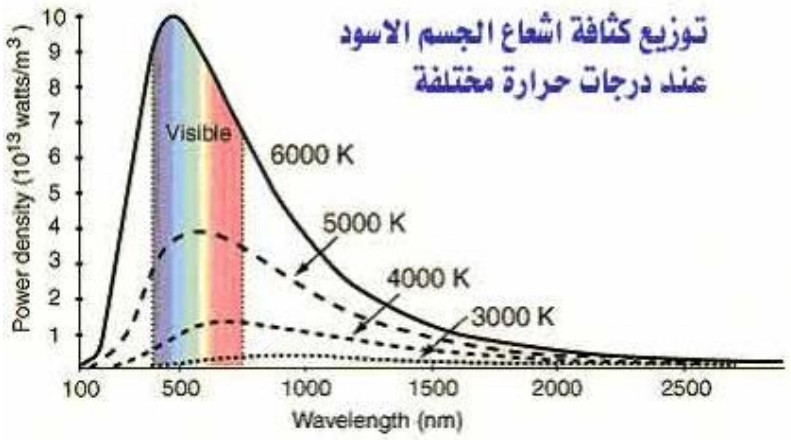
تنبعث من الاجسام الساخنة اشعاعات كهرومغناطيسية بأطوال موجية مختلفة وعندما تسقط هذه الاشعة على جسم ما فان جزءاً من طاقة الاشعاع يمتص و جزءاً ينفذ واخر ينعكس. والمخطط التالي يوضح طيف الاشعاعات الكهرومغناطيسية.

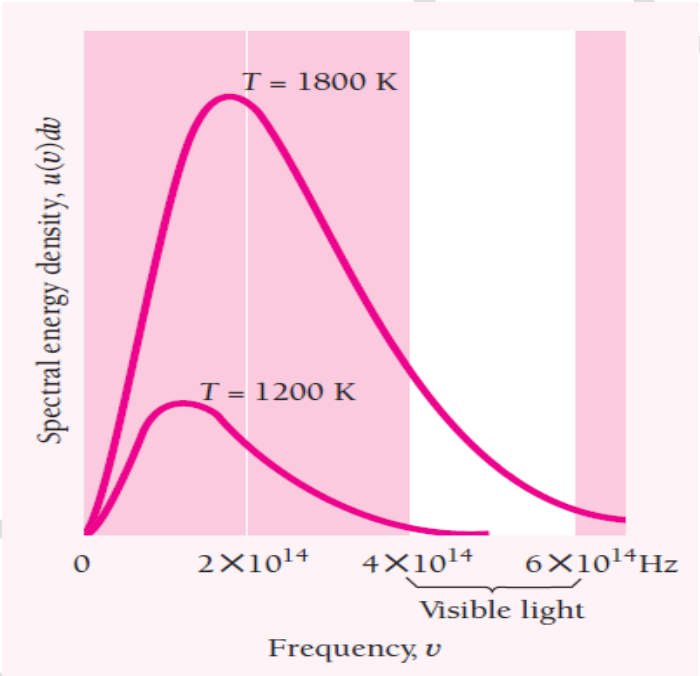


وقابلية الجسم للإشعاع ترتبط بقابليته للامتصاص فلو نظرنا الى قطعة من الحديد موضوعة فوق لهب فأننا سنراها معتمة اللون بادئ الامر ثم يظهر وهج احمر سرعان ما يميل الى البرتقالي فالأصفر واذا استمر التسخين يتحول اللون الى الازرق ثم يختفي فيقال انه وصل الى حد البياض.

فالجسم الاسود هو ذلك الجسم الذي يمتص طاقة الاشعاع الساقطة عليه جميعها اي انه جسم مثالي بامتصاصه طاقة الاشعاع الساقطة عليه وكذلك هو جسم مثالي عندما يكون مصدراً للإشعاع ويكون طيفه مستمراً في مختلف درجات الحرارة.

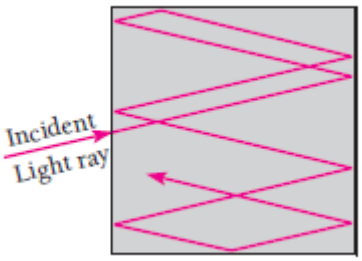
الشكل التالي يبين منحني العلاقة بين شدة الاشعاع المنبعث من الجسم الاسود كدالة للأطوال الموجية التي يبعثها هذا الجسم عند درجات حرارية مختلفة.





❖ يتألف الاشعاع المنبعث من الجسم الاسود في جميع درجات الحرارة من طيف متصل (مستمر) من الموجات ذات الاطوال الموجية المختلفة وتختلف شدة الاشعاع باختلاف درجة حرارة الجسم. فعند درجات الحرارة المنخفضة تكون ضمن موجات الاشعاع الحراري ذات طول موجي يقع في المنطقة تحت الحمراء التي لا ترى بالعين. وبارتفاع درجة الحرارة تصبح موجات الاشعاع الاكثر انبعاثاً من الجسم هي موجات اللون الاحمر ومن ثم يتغير الى اللون الازرق واخيراً يصل حد البياض.

❖ خير مثال على الجسم الاسود فتحة ضيقة في تجويف معدني فالشعاع الداخل الى الفجوة ينعكس عن جدرانها انعكاسات متتالية الى ان يتم امتصاصه كلياً(اي يتم امتصاص كامل طاقته) وعند تسخين جدران هذه الفجوة تنبعث منها اشعاعات حرارية وان الطيف المنبعث يعتمد على حرارة الجدران وعليه تكون الفجوة مشعاً حرارياً معاكسا.



❖ قابلية الجسم للامتصاص او للإشعاع تعتمد على:

a) طبيعة الجسم.
b) حالة سطحه.
c) درجة حرارته.

بالنسبة للجسم الاسود المثالي فان مقدار الانبعاثية (e) emissivity تساوي مقدار الامتصاصية (a) absorptivity وتساوي واحد.

$$e = a = 1$$

القوانين الخاصة بدراسة اشعاع الجسم الاسود

اولاً: قانون ستيفان- بولتزمان Stefan Boltzmann's law

ينص هذا القانون على ان المعدل الزمني للطاقة التي يشعها الجسم الاسود لوحدة المســـــــاحة (الشدة Intensity) تتناسب طردياً مع الاس الرابع لدرجة الحرارة المطلقة. حيث ان:

$$I = \sigma T^4$$

I: يمثل شدة الاشعاع w/m^2

T: درجة الحرارة المطلقة بوحدة K.

σ: ثابت ستيفان – بولتزمان.

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8}\ w/m^2k^4$$

ثانياً: قانون ازاحة فين Wien's Displacement law

ينص قانون فين على ان ذروة التوزيع الموجي للإشعاع المنبعث من الجسم الاسود تزاح نحو الطول الموجي الاقصر عند ارتفاع الحرارة المطلقة. اي ان الطول الموجي الاقصر عند درجات الحرارة المطلقة . اي ان الطول الموجي الذي تكون عنده الشدة اعظم ما يمكن (λ_{max}) يتناسب عكسياً مع درجة الحرارة المطلقة. اي ان:

$$\lambda_{max} \propto \frac{1}{T}$$

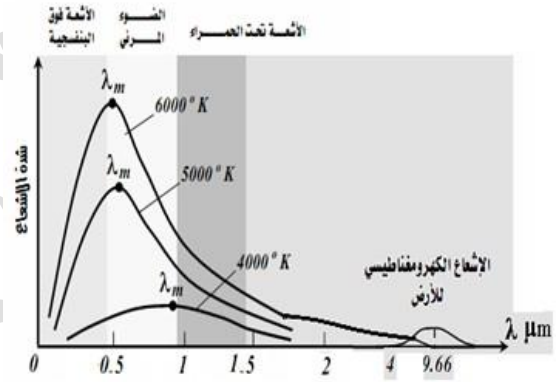
$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}$$

$$b = 2.897 \times 10^{-3} m.k$$

b : ثابت فين.

ملاحظة:

1- كلما تزداد درجة الحرارة ينزاح الطول الموجي (λ_{max}) نحو الاطوال الموجية القصيرة.
2- يستفاد من قانون فين لإيجاد درجة حرارة الشمس والنجوم.



مثال3:

اذا كان الطول الموجي لذروة الاشعاع المنبعث من جسم اسود $(\lambda_{max} = 8.5\ \mu m)$ احسب درجة الحرارة وشدة الاشعاع للسطح.

مثال4:

جسم اسود بهيئة كرة نصف قطرها (5 cm) في درجة حرارة (327 C°) . ما مقدار القدرة المنبعثة من الجسم وما مقدار الطول الموجي لذروة الاشعاع λ_{max}؟ .

ثالثاً: قانون فين لإشعاع الجسم الاسود Wien's Law

لقد قام العالم فين بوضع معادلة تفسير توزيع كثافة الطاقة على الاطوال الموجية المختلفة استناداً الى النظرية الكهرومغناطيسية لماكسويل والتي تقول ان الاشعاع ينتج عن الشحنات المعجلة اما صيغة المعادلة:

$$E_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(\frac{hc}{\lambda kT})}$$

حيث ان :

E_λ: كثافة الطاقة $\left(\frac{W}{m^3}\right)$

h: ثابت بلانك.

c: سرعة الضوء.

k : ثابت بولتزمان $(k = 1.38 \times 10^{-23}\ J/k)$.

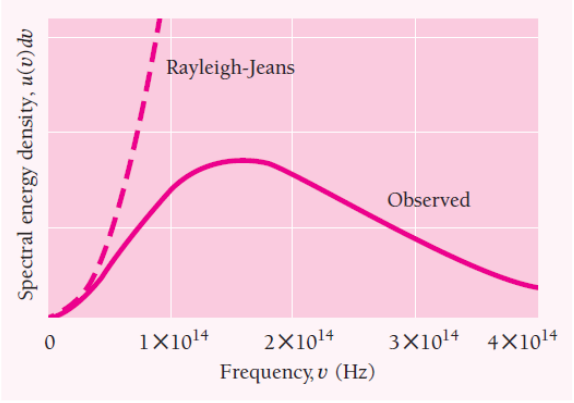
T: درجة الحرارة المطلقة بالكلفن.

- ان المعادلة التي استنتجها فين تتفق مع المنحني التجريبي للأطوال الموجية القصيرة فقط ولكنها فشلت للأطوال الموجية الطويلة , وعليه فان هذه المعادلة غير كافية لتفسير طبيعة اشعاع الجسم الاسود.

رابعاً: قانون رايلي- جينز Rayleigh- Jeans Law

لقد اعتبر العالمان رايلي و جينز ان الجسم الاسود مكون من عدد كبير من التذبذبات المشحونة التي تتحرك حركة توافقية بسيطة وهذه التذبذبات تطلق اشعة كهرومغناطيسية اثناء حركتها. وقد اشتق العالمان معادلة لحساب كثافة الطاقة:

$$E_\lambda = \frac{2\pi c}{\lambda^4} kT$$



- لقد وجد ان هذه العلاقة تتفق مع المنحني التجريبي في مجال الاطوال الموجية الطويلة فقط. بينما تتزايد في مجال الاطوال الموجية القصيرة بحيث تصبح ما لانهاية. اي ان تطبيق هذه المعادلة على الاطوال الموجية القصيرة اي الترددات العالية اعطت نتائج غير معقولة وسميت هذه المشكلة بالكارثة فوق البنفسجية .

خامساً: قانون بلانك Planck's Law

وضع بلانك نظريته لتفسير ظاهرة اشعاع الجسم الاسود وقد كانت نظريته ناجحة وذلك لاعتماده على استخدام مبدأ تكميم الاشعاع اي ان الطاقة لا تنبعث بشكل مستمر كما ادعت النظرية الكهرومغناطيسية وانما تنبعث بشكل دفعات او كمات من الطاقة تدعى بالفوتونات ومن هذه ظهرت النظرية الكمية لماكس بلانك والتي تتضمن الافتراضات التالية:

1- كمية الطاقة المنبعثة تتناسب طردياً مع التردد

$$E \propto v \Rightarrow E = hv$$

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

2- طاقة الجسيم المتذبذب تأخذ قيمة محددة (مكممة) اي ان :

$$E_n = nhv$$

n : العدد الكمي (n=1,2,3,……)

فاذا كانت (n=1) يكون المتذبذب في ادنى قيمة له في الطاقة يسمى المستوى الارضي اما اذا كانت (n=2) فان المتذبذب يكون في مستوى طاقة (1) وهكذا. ومن هنا نلاحظ ان بلانك ادخل مبدأ التكميم على المتذبذبات في الجسم الاسود ولها طاقة محدودة وقيم محددة بالعدد الكمي (n) لاوجود لقيم متصلة (مستمرة) كما افترض العالمان رايلي وجينز.

وعند امتصاص اشعة او انبعاثها من الجسم الاسود فان طاقاتها تساوي فرق الطاقة بين مستويات الطاقة بالمتذبذبات بحيث ان :

$$E = hv$$

يحمل هذا الكم من الطاقة جسيم يسمى الفوتون وتكون كمية حركته

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

وعلى اساس هذه الفرضيات تمكن العالم بلانك من اشتقاق قانون بلانك لإشعاع الجسم الاسود الذي فسر النتائج العملية.

$$E_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5}\,\frac{1}{\exp\frac{hc}{\lambda kT}-1}$$

ويمكن اشتقاق كل من قانون فين وقانون رايلي من قانون بلانك كالاتي:

$$E_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5}\,\frac{1}{\exp\frac{hc}{\lambda kT}-1}$$

1- <u>للأطوال الموجية القصيرة:</u>

$$exp\frac{hc}{k\lambda T} \gg 1$$

$$exp\frac{hc}{k\lambda T} - 1 \approx exp\frac{hc}{k\lambda T}$$

وعليه:

قانون فين:

$$E_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5}\,\frac{1}{\exp\frac{hc}{\lambda kT}}$$

2- <u>للأطوال الموجية الطويلة:</u>

$$exp\frac{hc}{k\lambda T} \approx 1 + \frac{hc}{k\lambda T}$$

$$E_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5}\,\frac{1}{1+\frac{hc}{k\lambda T}-1}$$

قانون رايلي-جينز

$$E_\lambda = \frac{2\pi c}{\lambda^4}\,kT$$

لتوضيح طيف اشعاع الجسم الاسود نطبق المعادلة التي اشتقها بلانك حيث ان:

$$E_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{1 + \frac{hc}{k\lambda T} - 1}$$

h :ثابت بلانك $h = 6.63 \times 10^{-34} J.s$

c :سرعة الضوء $c = 3 \times 10^8 m/s$

T :درجة الحرارة المطلقة.

k :ثابت بولتزمان $k = 1.38 \times 10^{-23}\ J/k$

λ :الطول الموجي بالمتر.

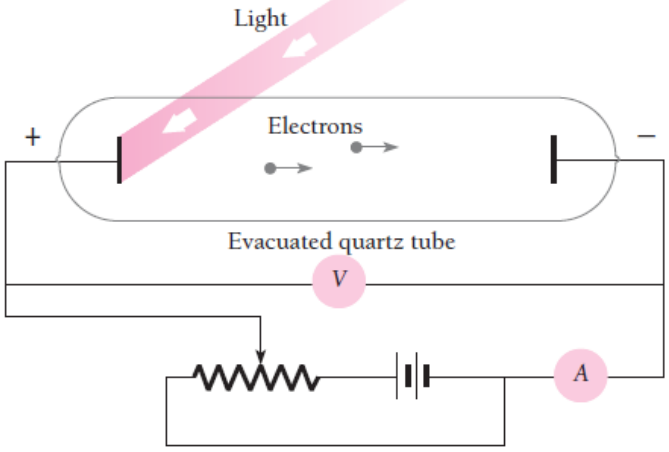
الظاهرة الكهروضوئية Photoelectric Effect

ان ظاهرة انبعاث الالكترونات من سطوح المعادن عندما يسقط عليها ضوء بتردد مؤثر تدعى بالظاهرة الكهروضوئية.

وان الالكترونات المنبعثة من سطح المعدن تسمى بالإلكترونات الضوئية (photo electronic)

يتكون الجهاز المستخدم لدراسة الظاهرة الكهروضوئية:

1- انبوبة مفرغة من الهواء وتحتوي على لوح معدني (اللوح الباعث E) ولوح اخر يسمى (اللوح الجامع C).
2- فولتميتر(V) يربط على التوازي مع الخلية و اميتر(A) لقياس التيار عند انبعاث الالكترونات.



- عند اضاءة اللوح الباعث بضوء ذو تردد مؤثر نلاحظ انحراف مؤشر الاميتر دلالة على مرور تيار كهربائي في الدائرة .
- عند زيادة الجهد الموجب للوح الجامع نلاحظ زيادة التيار حتى يصل الى مقداره الثابت يسمى بتيار الاشباع.
- عند مضاعفة شدة الضوء الساقط يتضاعف تيار الاشباع اي ان عدد الالكترونات الضوئية المنبعثة يتناسب طردياً مع شدة الضوء الساقط.
- عند جعل اللوح سالباً نلاحظ تناقص التيار تدريجياً بسبب تنافر الالكترونات مع اللوح الجامع السالب. وعند فولتية معينة يصبح التيار الكهروضوئي يساوي صفر وان هذه الفولتية تسمى فولتية القطع او جهد الايقاف (V_o) stopping potential .

جهد الايقاف Stopping Potential (V_o)

هو اقل فولتية سالبة للوح الجامع التي تجعل التيار الكهروضوئي يساوي صفر وهو لا يعتمد على شدة الضوء الساقط وانما يعتمد على تردد الضوء الساقط.

ويعتبر جهد الايقاف مقياس للطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية المنبعث K_{max}

فعندما يقارب الجهد السالب جهد الايقاف فلا تصل القطب الجامع الا تلك الالكترونات الضوئية ذات اعظم سرعة اي اعظم طاقة , اي ان:

$$K_{max} = eV_o = \frac{1}{2}mv_{max}^2$$

حيث ان:

K_{max}: الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المنبعثة.

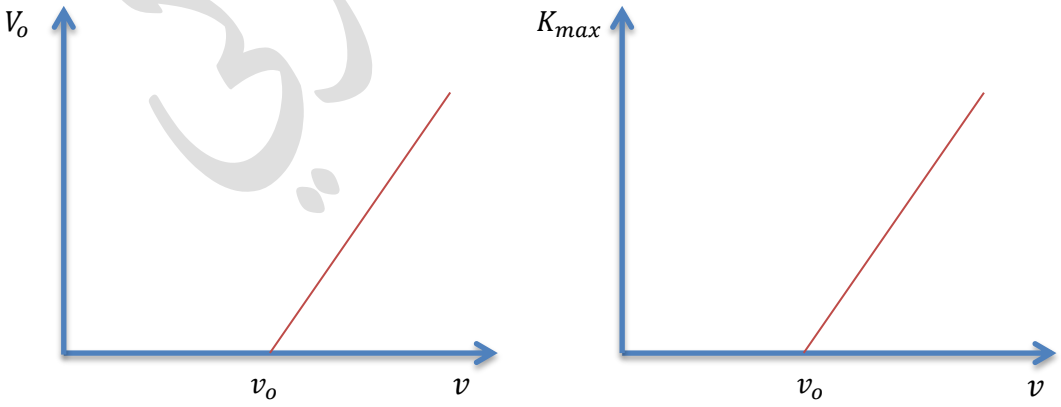
v_{max} : السرعة العظمى للإلكترونات المنبعثة.

V_o: جهد الايقاف.

e : شحنة الالكترون.

m: كتلة الالكترون.

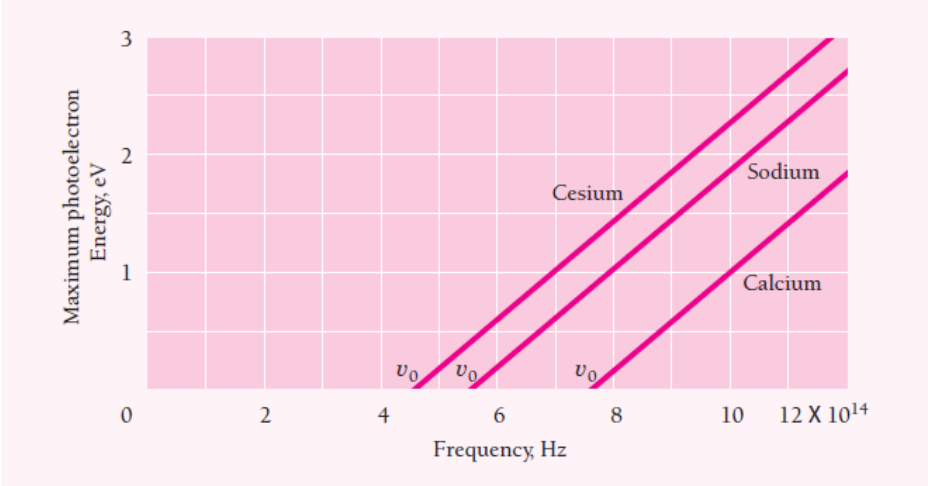
بما ان جهد الايقاف هو مقياس لـ (K_{max}) فان الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية المنبعثة لا تعتمد على شدة الضوء الساقط وانما تعتمد على تردد الضوء الساقط. لاحظ الشكل.



يتضح من الشكل بان لكل سطح باعث للإلكترونات تردد خاص يسمى بتردد العتبة v_o الذي دونه يتوقف الانبعاث الكهروضوئي مهما كبرت شدة الضوء الساقط على ذلك السطح . اي ان الانبعاث الكهروضوئي يحصل اذا كان تردد الضوء الساقط يساوي او اكبر من تردد العتبة.

تردد العتبة v_o :

هو اقل تردد للضوء الساقط على اللوح الباعث لكي يحصل الانبعاث الكهروضوئي ويعتمد على نوع مادة الهدف.



ملاحظة:

1- لقد فشلت النظرية الكهرومغناطيسية (الكلاسيكية) في تفسير الظاهرة الكهروضوئية لأنها تنبأت ان الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المنبعثة K_{max} لا تعتمد على تردد الضوء الساقط وزمن سقوط الاشعة حيث الانبعاث يحتاج الى زمن لحدوثه.

2- اما النظرية الكمية (الحديثة) فقد نجحت في تفسير الظاهرة الكهروضوئية لا نها تنبأت بان الانبعاث الكهروضوئي يحدث انياً لحظة سقوط الضوء دون الحاجة الى الوقت بشرط ان يكون تردد الضوء الساقط اكبر من تردد العتبة اي ان الانبعاث الكهروضوئي يعتمد على تردد الضوء الساقط ولا يعتمد على شدته.

المعادلة الكهروضوئية لأينشتاين

استطاع العالم أينشتاين في العام (1905) من تفسير الظاهرة الكهروضوئية معتمداً على نظرية الكم. حيث افترض ان الاشعاع الساقط على الفلز يكون بشكل فوتونات . فعند سقوط ضوء ذو تردد مؤثر على سطح معدن فان طاقة احد الفوتونات الساقطة سوف تُمتص من قبل احد الكترونات ذلك السطح. ومتى ما كانت طاقة الفوتون الساقط اكبر من دالة الشغل (W) لذلك المعدن يستطيع الالكترون الانبعاث من سطح المعدن.

ان مقدار الطاقة الحركية العظمى للإلكترون المنبعث تحتسب من المعادلة التي وضعها اينشتاين:

$$K_{max} = E - W$$

$$K_{max} = eV_o = \frac{1}{2}mv_{max}^2$$

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$W = h\nu_o = \frac{hc}{\lambda_o}$$

حيث ان:

W : دالة الشغل للمعدن وهي اقل طاقة لازمة لفك الالكترون عن سطح الفلز.

λ_o: طول موجة العتبة وهو اطول موجه يستطيع تحرير الالكترون من سطح المعدن.

- متى يحصل انبعاث كهروضوئي ومتى لا يحصل ذلك اعتماداً على المعادلة الكهروضوئية لأينشتاين:

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

$$= h(\nu - \nu_o)$$

1- اذا كان تردد الضوء الساقط يساوي تردد العتبة للمعدن فان الالكترونات الضوئية تتحرر فقط من سطح المعدن من غير ان تكتسب طاقة حركية.

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

$$K_{max} = 0$$

2- اذا كان $(\nu < \nu_o)$ فلا يحصل انبعاث كهروضوئي مهما زادت شدة الضوء الساقط ومهما طال زمن سقوطه .

3- اذا كان $(\nu > \nu_o)$ سوف تزداد الطاقة الحركية للإلكترونيات المنبعثة فتنبعث بسرع مختلفة.

مثال 5:

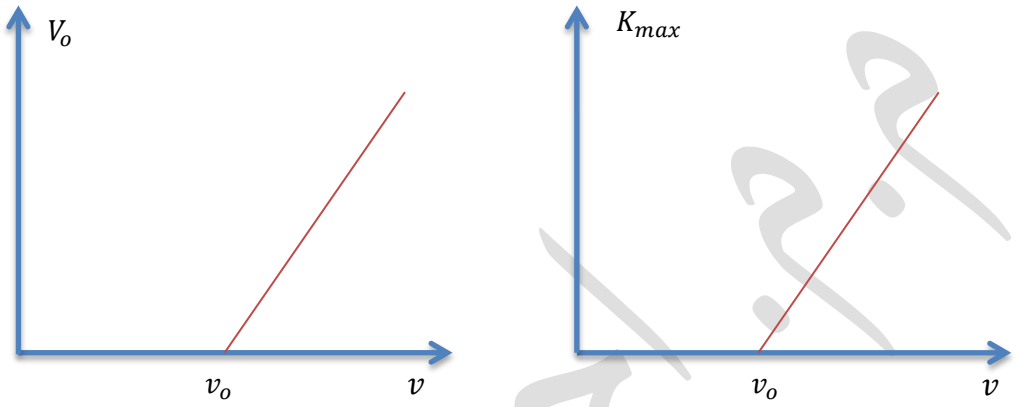
سقط ضوء اشعة فوق بنفسجية بطول موجي (350 nm) على لوح البوتاسيوم. ما مقدار الطاقة الحركية العظمى للإلكترون المنبعث بوحدة (eV) ؟علماً بان دالة الشغل للبوتاسيوم (2.2 eV).

مثال 6:

طول موجة العتبة للظاهرة الكهروضوئية للتنكستن يساوي (230 nm) . ما طول موجة الضوء اللازم لانبعاث الكترونات ضوئية من التنكستن طاقتها الحركية العظمى (1.5 eV) ؟

ملاحظة:

عند رسم العلاقة بين الطاقة الحركية العظمى للإلكترونيات الضوئية (K_{max}) وتردد الضوء الساقط نستنتج من ذلك:



- عند $(\nu = \nu_o)$ فان $k_{max}= 0$.
- عند $(\nu < \nu_o)$ فان k_{max} تكون سالبة فلا تبعث الالكترونات مهم كانت شدة الضوء الساقط وتسمى هذه الترددات غير المؤثرة.
- عند $(\nu > \nu_o)$ تكون k_{max} موجبة حيث تنبعث الالكترونات وتسمى هذه الترددات بالمؤثرة.
- من المعادلة الكهروضوئية:

$$K_{max} = h\nu - W$$

$$eV_o = h\nu - W$$

$$V_o = \frac{h}{e}\nu - W$$

استنتاجات الظاهرة الكهروضوئية

1- يكون الانبعاث الكهروضوئي آنياً فأما ان تنبعث الكترونات بسقوط اشعة ذات تردد مؤثر لحظة سقوط الاشعة او لا ينبعث مطلقاً اذا كان تردد الاشعة الساقطة غير مؤثر.

2- تنبعث الالكترونات الضوئية بسرع مختلفة بسبب اختلاف اعمار الالكترونات عن سطح الفلز وتتراوح قيمتها بين الصفر والقيمة العظمى.

3- يتناسب عدد الالكترونات الضوئية المنبعثة في الثانية الواحدة طردياً مع شدة الضوء الساقط عند ثبوت تردده.
4- تتناسب الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية المنبعثة طردياً مع تردد الضوء الساقط ضمن ترددات المؤثرة ولا تعتمد هذه الطاقة على شدة الضوء الساقط.
5- لكل مادة تردد عتبة خاص بها بحيث لا تنطلق الالكترونات من سطح المعدن اذا قل التردد عن تردد العتبة . وان تردد العتبة لمعظم المعادن ضمن ترددات الاشعة فوق البنفسجية.

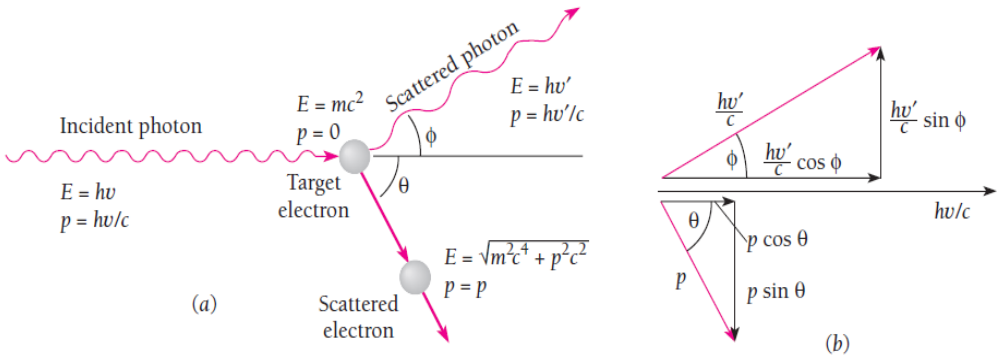
مثال 7: سقط ضوء طوله الموجي (λ)على سطح معدن معين فكانت الطاقة الحركية العظمى للالكترون المنبعث $(1\ eV)$ فاذا سقط ضوء ثاني طوله الموجي نصف الطول الموجي للضوء الاول كانت الطاقة الحركية العظمى للالكترون المنبعث تساوي $(4\ eV)$. ما مقدار دالة الشغل للمعدن ؟.

ظاهرة كومتن The Compton Effect

النظرية الكمية للضوء تفترض ان الفوتونات تسلك سلوك الجسيمات لكن ليس لها كتلة سكونيه . وعلى هذا الاساس يمكننا معالجة تصادم الفوتونات مع الالكترونات بنفس الطريقة التي نعالج بها تصادم كرات البليارد في الميكانيك الكلاسيكي.

في هذه الظاهرة يتصادم فوتون الاشعة السينية الساقط مع الكترون الذي يكون عادة في المدار الخارجي للذرة. ونتيجة التصادم يتشتت الفوتون من اتجاهه الاصلي في حين يستلم الالكترون كمية من الطاقة تجعله يتحرك بالاتجاه الموضح في الشكل ادناه. وفي هذا التصادم يفقد الفوتون طاقة تساوي الطاقة الحركية المكتسبة من قبل الالكترون والذي يسمى بالإلكترون المرتد (المستطار).

ونتيجة لهذا التصادم لاحظ كومتن حصول نقصان في طاقة الفوتون المستطار . لقد استطاع كومتن ان يشتق العلاقة بين طول موجة الفوتون الساقط (λ) وطول موجة الفوتون المتشتت المستطار(λ') بتطبيق قانوني حفظ الطاقة وحفظ الزخم. لاحظ الشكل:



الشكل يوضح تصادم فوتون مع الكترون ساكن ونتيجة للتصادم يتشتت الفوتون الساقط من اتجاهه الاصلي وبطاقة اقل .

$\emptyset$: تمثل الزاوية بين اتجاه الفوتون الساقط والفوتون المتشتت.

θ : تمثل الزاوية بين اتجاه الفوتون الساقط والالكترون المرتد.

λ : طول موجة الفوتون الساقط.

λ' : طول موجة الفوتون المتشتت.

من قانون حفظ الطاقة:

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda'} + mc^2 - m_o c^2$$

بالقسمة على (c):

$$\frac{h}{\lambda} = \frac{h}{\lambda'} + mc - m_o c \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (1)$$

Or:

$$mc = [m_o c + h\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda'}\right)]$$

من قانون حفظ الزخم الخطي:

قانون حفظ الزخم الخطي بالاتجاه الافقي تساوي:

$$\frac{h}{\lambda} = \frac{h}{\lambda'}\cos\phi + mv\cos\theta$$

$$mv\,cos\theta = h\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{\cos\phi}{\lambda'}\right) \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (2)$$

قانون حفظ الزخم الخطي بالاتجاه العمودي:

$$\frac{h}{\lambda'}\sin\phi = mv\,sin\theta \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (3)$$

بتربيع المعادلتين (2) و (3) وجمعهما ينتج:

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

$$m^2v^2\ sin^2\theta = h^2(\frac{sin^2\emptyset}{\lambda'^2})$$

وبعد الجمع ينتج:

$$m^2v^2 = h^2\left(\frac{1}{\lambda^2} - \frac{2\ cos\emptyset}{\lambda\lambda'} + \frac{1}{\lambda'^2}\right) \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (4)$$

$$\because m = \frac{m_o}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{m_o c}{\sqrt{c^2-v^2}}$$

$$\therefore m^2c^2 - m^2v^2 = m_o^2c^2$$

$$m^2v^2 = (m^2 - m_o^2)c^2 \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (5)$$

من المعادلتين (4) و (5) ينتج:

$$(m^2 - m_o^2)c^2 = h^2\left(\frac{1}{\lambda^2} - \frac{2\ cos\emptyset}{\lambda\lambda'} + \frac{1}{\lambda'^2}\right) \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (6)$$

من المعادلة (1) :

$$mc = [m_oc + h\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda'}\right)]$$

بالتربيع:

$$m^2c^2 = m_o^2c^2 + 2m_och\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda'}\right) + h^2(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda'})^2 \dots\dots\dots\dots\dots\dots (7)$$

من المعادلتين (6)و (7) ينتج:

$$h^2\left(\frac{1}{\lambda^2} - \frac{2\ cos\emptyset}{\lambda\lambda'} + \frac{1}{\lambda'^2}\right) = 2m_och\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda'}\right) + h^2(\frac{1}{\lambda^2} - \frac{2}{\lambda\lambda'} + \frac{1}{\lambda'^2})$$

بحذف الحدود المتشابهة والقسمة على h ينتج:

$$-\frac{2h\ cos\emptyset}{\lambda\lambda'} = 2m_oc\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda'}\right) - \frac{2h}{\lambda\lambda'}$$

$$-\frac{2h\ cos\emptyset}{\lambda\lambda'} = 2m_oc\left(\frac{\lambda' - \lambda}{\lambda\lambda'}\right) - \frac{2h}{\lambda\lambda'}$$

بضرب الطرفين بـ$(\lambda\lambda')$ ينتج:

$$-2h\,cos\emptyset = 2m_o c(\lambda' - \lambda) - 2h$$

$$2m_o c(\lambda' - \lambda) - 2h(1 - cos\emptyset) = 0$$

$$2m_o c(\lambda' - \lambda) = 2h(1 - cos\emptyset)$$

$$\therefore\ \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_o c}(1 - cos\emptyset) \dots\dots\dots\dots\dots\dots (8)$$

نستنتج من المعادلة (8):

1- تعطينا مقدار التغير في الطول الموجي لفوتون تشتت بواسطة جسم كتلته السكونية m_o كدالة لزاوية التشتت $\emptyset$.

2- ان هذا التغير لا يعتمد على طول موجة الفوتون الساقط وانما يعتمد على مقدار زاوية التشتت $\emptyset$.

3- ان الكمية $(\frac{h}{m_o c})$ تدعى بطول موجة كومبتن للإلكترون وتساوي:

$$\frac{h}{m_o c} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{9.1 \times 10^{-31} \times 3 \times 10^{8}} = 2.4 \times 10^{-12} m = 0.024\ A^{\circ}$$

4- ان اكبر تغير للطول الموجي يحدث عند زاوية التشتت $(\emptyset = 180°)$ حيث يكون التغير في الطول الموجي ضعف طول موجة كومتن اي ان :

$$\Delta\lambda = 2 \times 0.024$$

$$\Delta\lambda = 0.048\ A°$$

ان هذا التغير لا يمكن ملاحظته باستخدام ضوء مرئي ولكن يمكن ملاحظته باستخدام اشعة سينية.

<u>ملاحظة:</u>

يمكن حساب طاقة الفوتون المتشتت $(h\nu')$ من المعادلة (8):

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

$$\frac{c}{\nu'} - \frac{c}{\nu} = \frac{h}{m_o c}(1 - cos\emptyset)$$

بالقسمة على h:

$$\frac{c}{h\nu'} - \frac{c}{h\nu} = \frac{1}{m_o c}(1 - cos\emptyset)$$

$$\frac{c}{h\nu'} = \frac{1}{m_o c}(1 - cos\emptyset) + \frac{c}{h\nu}$$

$$h\nu' = \frac{c}{\frac{c}{h\nu} + \frac{1}{m_o c}(1 - cos\emptyset)}$$

بضرب البسط والمقام بـ $\frac{h}{c}$

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_o c^2}(1 - cos\emptyset)}$$

طاقة الفوتون المتشتت $(h\nu')$ تقل بزيادة الزاوية $(\emptyset)$ وتكون $(h\nu')$ في اقل قيمة لها عندما تكون $(\emptyset = 180)$ حيث ان:

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_o c^2}(1 - \cos 180)}$$

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{2h\nu}{m_o c^2}}$$

تكون زوج الكترون- بوزترون Pair Production

في عملية انتاج الزوج يتحول الفوتون الساقط (كطاقة $E = h\nu$) الى زوج الكترون بوزترون (كمادة). وهذه العملية تتفق تماماً مع النظرية أينشتاين الخاصة بتكافؤ الطاقة والكتلة.

والبوزترون هو جسيم كتلته مساوية الى كتلة الالكترون وشحنته مساوية ايضاً لشحنة الالكترون ولكنها موجبة.

اذا كانت طاقة الفوتون الساقط اكبر من (1.022 MeV) فانه يختفي عند اقترابه من نواة الذرة ويظهر محله زوج من الكترون – بوزترون . ويمكن التعبير عن ذلك بالمعادلة:

$$h\nu = m_- c^2 + m_+ c^2 + K_- + K_+$$

حيث ان:

$m_e c^2$: الطاقة السكونية لكل من الالكترون والبوزترون وتساوي (0.511 MeV) لذا فأن:

$$m_- c^2 + m_+ c^2 = 1.022\ MeV$$

K_- : الطاقة الحركية للإلكترون.

K_+ :الطاقة الحركية للبوزترون.

وعلى هذا فان المعادلة اعلاه تصبح:

$$h\nu = +K_- + K_+ + 2mc^2$$

$$h\nu = +K_- + K_+ + 1.022MeV$$

$$h\nu - 1.022 = K_- + K_+$$

هذا يعني ان اقل طاقة للفوتون يجب ان تساوي او اكبر من (1.022 MeV) حتى تحدث عملية انتاج زوج الكترون- بوزترون. وفي حالة ($h\nu = 1.022$ MeV) بالضبط فان :

$$(K_- = 0; K_+ = 0)$$

مثال 8:

فوتون طوله الموجي ($0.003\ A°$) ولد زوج الكترون بوزترون . احسب الطاقة الحركية لكل منهما اذا كانت الطاقة الحركية للبوزترون ضعف الطاقة الحركية للإلكترون.

مسائل الفصل الثاني

س1: ما هو التردد التي تكون عنده القدرة الاشعاعية للجسم الاسود في قيمتها العظمى عند درجة حرارة (727 c°) ؟

س2: ان معدل الطاقة الاشعاعية الواصلة على سطح الارض من الشمس تساوي ($1.4\ \mathrm{kw}/m^2$) فان كان البعد بين الارض والشمس يساوي ($D = 1.5 \times 10^{11} m$) ونصف قطر الشمس ($\mathrm{R} = 0.7 \times 10^{9} \mathrm{m}$) :

a) احسب معدل القدرة الواصلة الى الارض.
b) اذا كانت الشمس كجسم اسود مثالي ما مقدار درجة حرارة الشمس؟

س3: دالة الشغل للصوديوم تساوي ($2.3\ eV$) ما مقدار اقصى طول موجي للضوء الذي يسبب انبعاث الكترونات ضوئية من الصوديوم ؟ وما مقدار الطاقة العظمى للإلكترونات الضوئية اذا سقط ضوء طول موجته ($2000\ A°$) على سطح الصوديوم؟.

س4: هوائي جهاز ارسال يعمل بقدرة (1000 w) يبعث موجة كهرومغناطيسية بتردد ($880\ kHz$) ما عدد الفوتونات المنبعثة بالثانية الواحدة من الهوائي؟.

س5: سقط ضوء طول موجته ($3310\ A°$)على سطح فلز فتحرر الكترون بطاقة قدرها ($3 \times 10^{-19}\ J$) وعند سقوط ضوء اخر طول موجته (5000 A°) حرر الكترون بطاقة ($0.972 \times 10^{-19}\ \mathrm{J}$)احسب مقدار ثابت بلانك وطول موجة العتبة للسطح؟.

س6: ان اقل طاقة لازمة لحدوث الانبعاث الكهروضوئي من سطح الصوديوم تساوي (2.3 eV) ,هل تحصل ظاهرة الانبعاث الكهروضوئي اذا سقط ضوء طول موجته (680 nm) على سطح الصوديوم؟.

س7: اذا كانت قيمة دالة الشغل للبوتاسيوم (2 eV) وسقط عليه ضوء طول موجته (360 nm) احسب :

a) طاقة الالكترونات العظمى.
b) وجهد الايقاف.
c) السرعة الالكترونات العظمى.

س8: سقطت حزمتان ضوئيان على سطح معدن طاقة الاول (6 eV) وطاقة الثاني (3 eV) فاذا كانت السرعة العظمى للإلكترون المنبعث عن الضوء الاول تساوي ضعف سرعة الالكترون المنبعث عن الضوء الثاني . احسب دالة الشغل للمعدن.

س9: فوتون طاقته ($19.89 \times 10^{-15} J$) يصطدم مع الكترون ويتشتت بزاوية (90°) , جد تردد الفوتون المستطار؟

س10: في ظاهرة كومتن اصطدم فوتون اشعة سينية طاقته *(0.5 MeV)* مع الكترون ساكن فاكتسب الالكترون طاقة حركية مقدارها *(0.1 MeV)* جد :

a) طول موجة الفوتون المستطار.
b) مقدار زاوية استطارة الفوتون.

م.م احمد ذكي