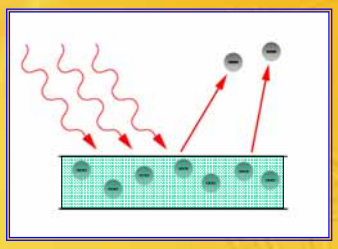
The Photoelectric Effect الظاهرة الكهروضوئية

الظاهرة الكهروضوئية هي إحدى الظواهر العديدة التي يمكن منها انبعاث الكترونات من سطح مادة فمن هذه الظواهر

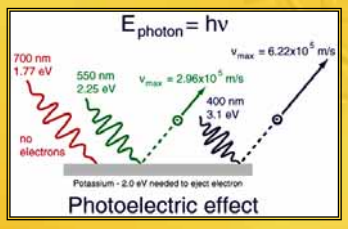


(1) الانبعاث الحراري

(2) الانبعاث الثانوي

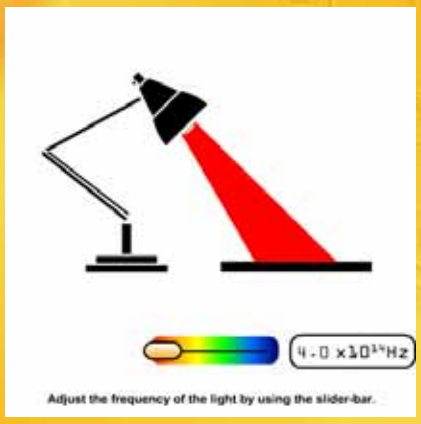
(3) الانبعاث الكهربي

(4) الانبعاث الكهروضوئي



تحدث الظاهرة الكهروضوئية عند سقوط إشعاع كهرومغناطيسي على سطح معدن فينتج عنه تحرير الكترونات من سطح المعدن.

ولتفسير ما يحدث هو إن جزء من طاقة الشعاع الكهرومغناطيسي يمتصها الإلكترون المرتبط بالمعدن يتحرر منه ويكتسب طاقة حركة.

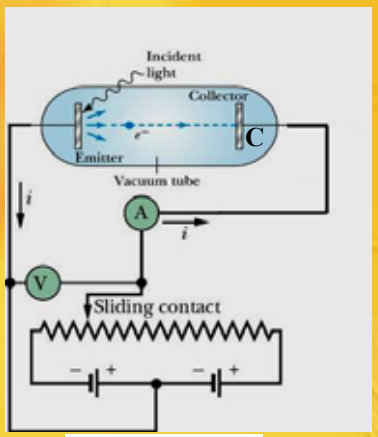


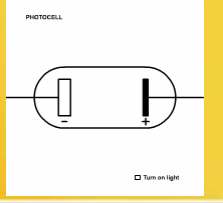
وهذه العملية تعتمد على العديد من المتغيرات وهي :

- تردد الشعاع الكهرومغناطيسي
- شدة الشعاع الكهرومغناطيسي
- التيار الفوتوضوئي الناتج
- طاقة حركة الإلكترون المتحرر من سطح المعدن
- نوع المعدن

ولفهم تأثير كل عامل من العوامل السابقة فإننا ندرس تأثير العوامل السابقة على التيار الكهربي الناتج والذي يسمى هنا التيار الفوتوضوئي لأنه نتج عن تحرير الالكترونات بواسطة الضوء (شعاع كهرومغناطيسي) من خلال إجراء تجارب عملية تعتمد على تغيير احد هذه العوامل مع تثبيت الباقي ودراسة تأثيره على التيار الفوتوضوئي. والشكل التالي يوضح الجهاز المستخدم لهذا الغرض .

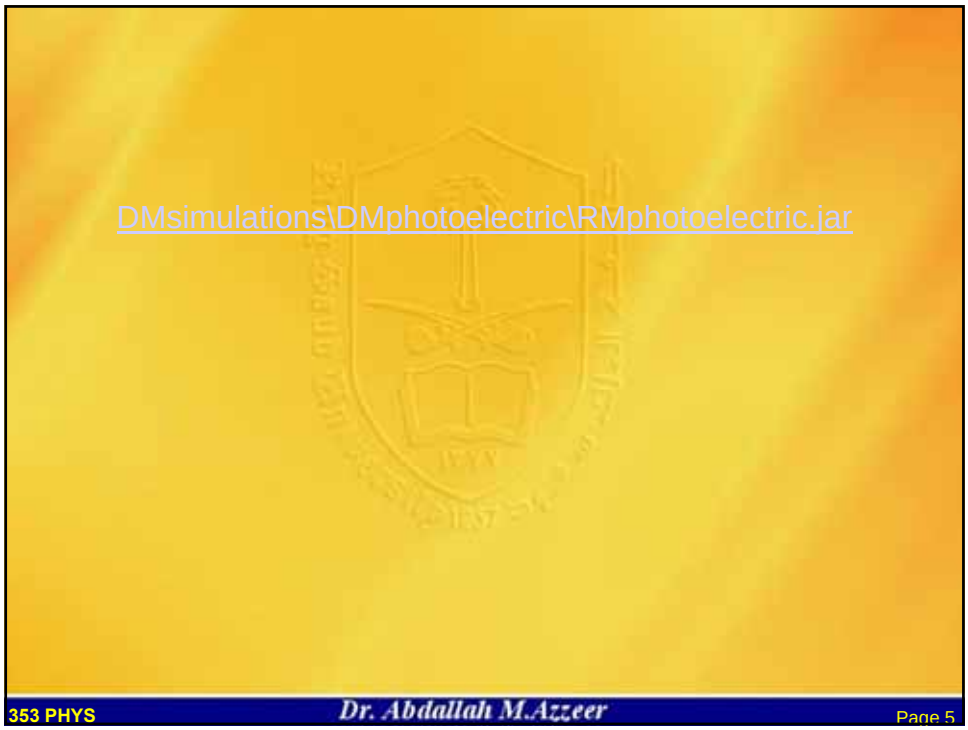
Photoelectric Effect Experimental Setup





عندما يسقط شعاع كهرومغناطيسي أحادي اللون (*Monochromatic*)على سطح معدن (الأنود) متصل مع الطرف الموجب للبطارية وموجود داخل وعاء مفرغ من الهواء لمنع تصادم الالكترونات المتحررة بجزيئات الهواء.

عندما تتحرر الالكترونات من سطح المعدن وتتمكن من الوصول إلى اللوح السالب C (الكاثود) - وفي الأغلب يكون من نفس مادة الأنود - فإن تيارا كهربيا يمر في الدائرة ويمكن قياسه من خلال الأميتر والذي يعبر عن شدة التيار الفوتوضوئي المار في الدائرة وكلما ازدادت عدد الالكترونات المتحررة من سطح المعدن كلما كان التيار الناتج اكبر. (لاحظ هنا أن اتجاه التيار الاصطلاحي في عكس اتجاه حركة الالكترونات) .



ملاحظات من التجربة

- طاقة الالكترونات المتحررة من الأنود مختلفة
- القوة الكهربية الناتجة عن المجال الكهربي بين الكاثود والأنود تعمل في عكس اتجاه حركة الالكترونات.
- طاقة حركة الالكترونات تكون مساوية للشغل المبذول عليها بواسطة المجال الكهربي من خلال العلاقة التالية:

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV \qquad (1)$$

حيث v سرعة الالكترونات و V فرق الجهد المطبق بين لوحي الانود والكاثود.

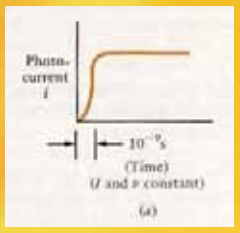
353 PHYS
Dr. Abdallah M.Azzeer
Page 6

ويعمل فرق الجهد هذا على إيقاف الالكترونات ويمكن زيادته تدريجياً إلى أن نصل إلى القيمة التي عندها يسمى فرق الجهد المطبق بفرق جهد الإيقاف ***stopping potential*** وهو الجهد اللازم لإيقاف أسرع الالكترونات أو تلك التي تمتلك أعظم طاقة حركة. وعندها يكون التيار المار في الدائرة مساوياً للصفر.

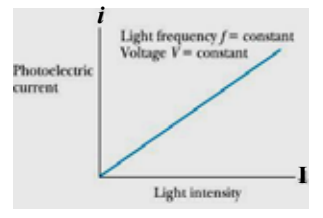
$$K_{max} = \frac{1}{2} m v_{max}^2 = eV_0 \qquad (2)$$

ومن خلال هذه المعادلة يمكن تقدير أقصى سرعة الالكترونات المنطلقة من الأنود وذلك من خلال زيادة فرق الجهد إلى أن يصبح التيار المار مساويا للصفر ومن ثم إيجاد مقدار هذا الجهد والتعويض في المعادلة (2).

النتائج العملية للتجربة

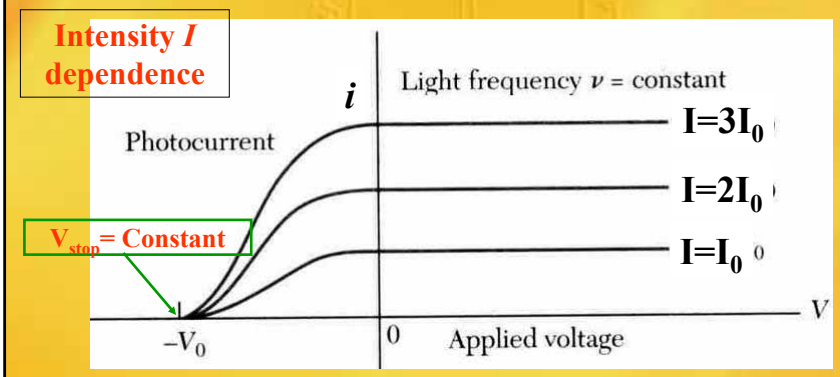


1) بمجرد تسليط الشعاع الكهروضوئي على الأنود يمر التيار في الدائرة في نفس اللحظة تقريبا وقد قدر الفارق الزمني بـ 10^{-9}s ولا يعتمد الفارق الزمني بين سقوط الشعاع الكهرومغناطيسي والمرور التيار على شدة الأشعة أو ترددها.



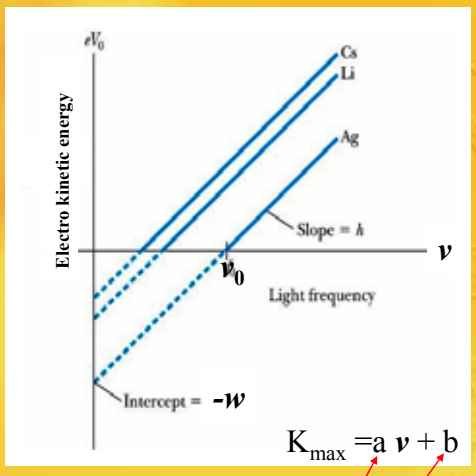
2) عند تثبيت التردد وفرق الجهد فإن التيار الكهروضوئي يزداد بزيادة شدة الأشعة الكهرومغناطيسية I الساقطة على الأنود.

3) عند ثبوت تردد الأشعة الكهرومغناطيسية وشدتها I فإن التيار الكهروضوئي يقل بزيادة فرق الجهد المطبق حتى تصل إلى القيمة صفر. وعندها تكون قيمة فرق الجهد هي V_0 والتي تسمى بجهد الإيقاف . ولا تعتمد قيمة جهد الإيقاف على شدة الأشعة الكهرومغناطيسية عند نفس التردد ولنفس المعدن



353 PHYS Dr. Abdallah M.Azzeer Page 9

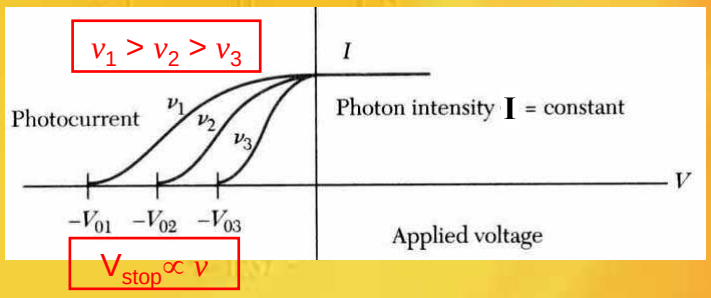
4) وجد عمليا أن قيمة جهد الإيقاف تعتمد على تردد الأشعة الكهرومغناطيسية فكلما زاد التردد كلما كانت قيمة جهد الإيقاف اكبر. قيمة جهد الإيقاف تتغير بتغير نوع مادة المعدن. كما وجد أيضا أن قيمة جهد الإيقاف لا تعتمد على شدة الأشعة الكهرومغناطيسية. كما تجدر الإشارة هنا إلى أن أدنى تردد ν_o مطلوب للانبعاث الالكتروني من سطح المعدن يسمى بالتردد الحرج *threshold frequency*.



353 PHYS Dr. Abdallah M.Azzeer Page 10

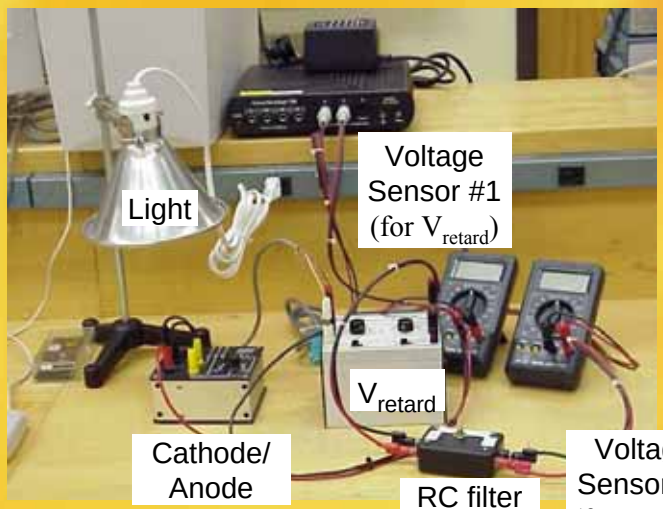
5) تعتمد الطاقة العظمى للإلكترونات المنبعثة (K_{max}) على تردد الأشعة الكهرومغناطيسية الساقطة ويكون هناك جهد إيقاف مختلف لكل تردد لنفس الشدة الضوئية

Frequency ν dependence



353 PHYS Dr. Abdallah M.Azzeer Page 11

Photoelectric Effect: Modern Physics Lab



353 PHYS Dr. Abdallah M.Azzeer Page 12

لا يمكن أن نحصل على تيار كهروضوئي إلا إذا كان تردد الأشعة الكهرومغناطيسية اكبر من التردد الحرج .

لأي معدن يستخدم في التجربة فقد وجد من تحليل النتائج العملية للتجربة (4) أن المنحنيات هي عادلة خط مستقيم يأخذ المعادلة التالية :

$$eVo = h\nu - h\nu_o \quad (3)$$

حيث أن h هي ميل المنحنى والتي وجدت أنها ثابتة لكل المعادن المستخدمة في التجارب. وأن ν_o هي التردد الحرج لكل معدن. كما يمكن كتابة المعادلة السابقة بالصورة التالية:

$$h\nu = \frac{1}{2}mv_{max}^2 + h\nu_0 \qquad (4)$$

التفسير الفيزيائي لنتائج التجارب العملية السابقة

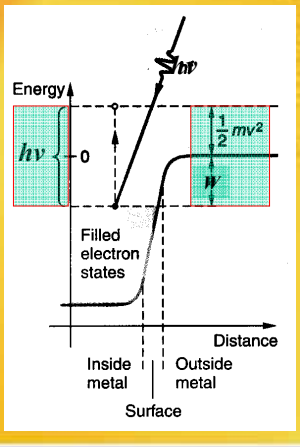
- لم يتمكن العلماء من ايجاد تفسير لنتائج التجارب العملية للظاهرة الكهروضوئية إلا بعد ان قام العالم ألبرت اينشتاين بتطبيق نظرية الكم *Quantum theory* على الاشعاع الكهرومغناطيسي في عام 1905 .
- طبقا لنظرية الكم فإن الأشعة الكهرومغناطيسية التي تعاملنا معها في الفيزياء الكلاسيكية على إنها موجات تنتشر في الفراغ تم اعتبارها في نظرية الكم على إنها جسيمات تسمى فوتونات photons كل فوتون يحمل طاقة E تعتمد على تردده من خلال المعادلة التالية :

$$E = h\nu = hc/\lambda \qquad (5)$$

- حيث ان الثابت h هو ثابت بلانك *Planck constant*

$$h=6.626\times10^{-34}\ J.s$$

- من وجهة نظر ميكانيكا الكم فإن الشعاع الضوئي ذو التردد ν يحتوي على عدد من الفوتونات طاقة كل فوتون هي $h\nu$. يتعامل كل فوتون مع إلكترون مرتبط بسطح المعدن فإذا كانت طاقة الفوتون هذه اكبر من طاقة ربط الإلكترون بالمعدن فإنه يتحرر من سطح المعدن وباقي طاقة الفوتون يكتسبها الإلكترون المتحرر على شكل طاقة حركة تمكنه من الوصول إلى الكاثود.



وبناء على ما سبق يمكن تفسير نتائج التجارب العملية للظاهرة الكهروضوئية على النحو التالي :

النتيجة (4)

توضح المعادلة (4) مفهوم الطاقة المتبادلة بين الفوتون والإلكترون الذي يعطي التيار الكهروضوئي .

$$h\nu = \frac{1}{2}mv_{max}^2 + h\nu_0 \qquad (4)$$

حيث يمثل الطرف الأيسر من المعادلة الطاقة التي يحملها الفوتون الساقط على سطح المعدن والتي يكتسبها الإلكترون المرتبط بسطح المعدن. يتحرر الإلكترون الأقل ارتباطاً بسطح المعدن مكتسباً طاقة حركية kinetic energy. أما الطرف الأيمن من المعادلة يعطي طاقة الإلكترون التي يكتسبها من الفوتون على صورة طاقة حركية وطاقة ربط. ويعبر عن طاقة ربط الإلكترون بسطح المعدن بالرمز W والذي يعرف على انه دالة الشغل work function والتي تعرف على إنها الشغل اللازم لتحرير الإلكترون الأقل ارتباطا بسطح المعدن. وتعتمد دالة الشغل على نوع المعدن .

$$W = h\nu_0 \qquad (6)$$

ويمكن كتابة المعادلة (4) على الصورة التالية :

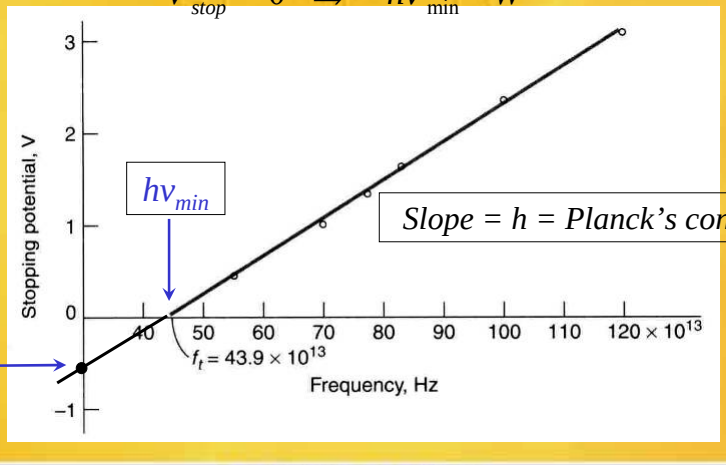
$$h\nu = \frac{1}{2}mv_{max}^2 + h\nu_0 \qquad (7)$$

ولهذا فإن تردد الأشعة الكهرومغناطيسية للحصول على تيار كهربي يجب أن يكون طاقته اكبر من دالة الشغل .

Photoelectric Effect: V_{stop} vs. Frequency

$$eV_{stop} = h\nu - W$$

$$V_{stop} = 0 \Rightarrow h\nu_{min} = W$$



النتيجة (3)

أعظم طاقة حركة يكتسبها الإلكترون عند تردد معين للأشعة الكهرومغناطيسية تعتمد فقط على التردد لان التردد يحدد قيمة طاقة الفوتون من خلال E=hν.

النتيجة (2)

شدة الأشعة الكهرومغناطيسية من وجه نظر ميكانيكا الكم تكون عبارة عن طاقة الفوتون مضروبة في عدد الفوتونات الساقطة على المعدن لكل وحدة زمن لكل وحدة مساحة. ولهذا يمكن تفسير النتيجة الثانية على انه بزيادة شدة الأشعة الكهرومغناطيسية يزداد عدد الفوتونات وبالتالي يزداد عدد الالكترونات المتحررة ويزداد التيار الكهروضوئي.

النتيجة (1)

التيار الكهروضوئي يمر في الدائرة الكهربية بمجرد سقوط الفوتون على الإلكترون بدون أي تأخير زمني لان إذا كانت طاقة الفوتون الواحد كافية لتحرير الإلكترون يتحرر مباشرة لينقل التيار ولا يحدث في أي حال من الأحوال أن تتراكم الفوتونات على الإلكترون لتكسبه الطاقة على شكل تراكمي حيث أن طاقة الربط لا تعتمد على شدة الأشعة إنما تعتمد على ترددها.

Photoelectric Table

	Wave	Particle	Result
• Increase Intensity			
– Rate	Increase	Increase	Increase
– KE	Increase	Unchanged	Unchanged
• Increase Frequency			
– Rate	Unchanged	Increase	Increase
– KE	Unchanged	Increase	Increase

Light is composed of particles photons

وحدة الإلكترون فولت

هي وحدة طاقة وتعرف على إنها مقدار الطاقة التي يكتسبها الإلكترون عندما يعجل في فرق جهد قدره 1 فولت.

$E = qV = e\,V = (1.6\times10^{-19}\ C)\ .(\ 1\ volt) = 1.6\times10^{-19}\ eV$

$1\ joul = 1.6\times10^{-19}\ eV$

Metal	Symbol	Work function
Cesium	*Cs*	1.9
Potassium	*K*	2.2
Sodium	*Na*	2.3
Lithium	*Li*	2.5
Calcium	*Ca*	3.2
Copper	*Cu*	4.7
Silver	*Ag*	4.7
Platinum	*Pt*	6.4

example

A sodium surface is illuminated with light of wavelength 300nm. The work function for sodium metal is 2.46 eV.

Find (a) The kinetic energy of the ejected photoelectrons

(b) The cutoff wavelength for sodium

(a)

The energy of the photons in the illuminating light beam is

$E = h\nu = hc/\lambda$

$E = (6.626 \times 10^{-34}\ J.s)(3.00 \times 10^{8}\ m/s) / 300 \times 10^{-9}\ m = 6.63 \times 10^{-19}\ J$

$= 6.63 \times 10^{-19}\ J / 1.60 \times 10^{-19}\ J/eV = 4.14\ eV$

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

we have $K_{max} = 4.14 - 2.46 =$ **1.68 eV.**

(b)

The cut-off wavelength can be calculated from equation $\lambda_c = hc/W$

since $W = 2.46\ eV = (2.46eV)(1.60 \times 10^{-19}\ J/eV) = 3.94 \times 10^{-19}\ J$

Then $\lambda_c = hc/W = (6.626 \times 10^{-34}\ J.s)(3.00 \times 10^{8}\ m/s) / 3.94 \times 10^{-19}\ J$

$= 5.05 \times 10^{-7}\ m =$ **505 nm**

This is in the green region of the visible spectrum

Example

Given: light with wavelength λ = 300 nm incident on a metal surface. A stopping potential, V_0 = 1.2 V is noted. Find:

(a) Maximum energy of emitted electrons
(b) Work function, W
(c) Cutoff wavelength, λ

$$K_{max} = eV_0 = 1.2\,eV = 1.2\underbrace{(1.6\times10^{-19}\,coul)}_{e}\underbrace{(1\,joule/c)}_{V} = 1.92\times10^{-19}\,joule$$

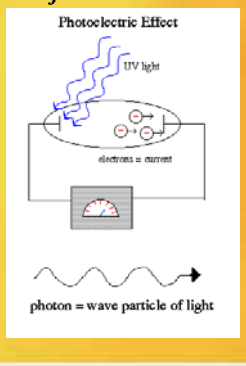
$$K_{max} = h\nu - W \Rightarrow W = h\nu - K_{max}$$

$$W = h\frac{c}{\lambda} - K_{max} = \frac{(4.136\times10^{-15}\ \text{eV}\cdot\text{s})(3\times10^{8}\ \frac{m}{s})}{300\times10^{-9}\,m} - (1.2eV)$$

$$W = (4.14eV) - (1.2eV) = 2.94\,eV = 4.70\times10^{-19}\ J$$

$$W = h\nu_0 = h\frac{c}{\lambda_0} \Rightarrow \lambda_0 = \frac{hc}{W}$$

$$\lambda_0 = \frac{(4.14\times10^{-15}eV\cdot s)(3\times10^{8}m/s)}{2.94eV} = 4.22\times10^{-7}\,m \ \text{or}\ 422\ nm$$



353 PHYS Dr. Abdallah M.Azzeer Page 23

example : (more demanding)

An isolated copper sphere of radius 5.00 cm, initially uncharged, is illuminated by ultraviolet light of wavelength 200nm. What charge will the photoelectric effect induce on the sphere? The work function for copper is 4.70 eV.

The photons, with energy **h*ν***, will be absorbed by the electrons in the sphere and will be ejected with maximum kinetic energy of **h*ν* - W**

Ie $K_{max} = h\,c/\lambda$ - W

ie K_{max} = $(6.662 \times 10^{-34}\ Js)(3 \times 10^{8}\ m/s) / (200 \times 10^{-9})(1.6 \times 10^{-19}\ J)$ eV - 4.7eV

= **1.51 eV**

With the emission of the electrons, the sphere is left with a positive charge, and therefore positive potential. The sphere potential increases to 1.51 eV, at which point no more electrons can leave. Its charge is then given by **$V = k_eQ/r$** or **$Q = rV/k_e$** where k_e is the coulomb constant

Therefore $Q = (5 \times 10^{-2}\ m)(1.51) / 8.99 \times 10^{9}$ = 8.41 x 10^{-12} Coulombs

353 PHYS Dr. Abdallah M.Azzeer Page 24