الظواهر التى تؤكد الصفة الجسيمية للأمواج

أولاً : ظاهرة التأثير الكهروضوئى Effect Photoelectric

لقد أكتشف هيـرتز عـام 1887م التأثير الكهروضوئى من خلال تجاربه العملية لأثبات نظرية ماكسويل للكهرومغناطيسية (الطبيعة الموجية للضوء) الخاصة بتوليد موجات كهرومغناطيسية نتيجة تيار كهربى متذبذب.
فالتأثير الكهروضوئي هى ظاهرة انبعاث الكترونات من سطح معدن عند سقوط ضوء فوق بنفسجى عليه ، فتنطلق الكترونات من هذا السطح وهى عبارة عن الإلكترونات الحرة ذات قوة الربط الضعيفة مع أيونات المعدن وتسمى هذه الإلكترونات بالإلكترونات الضوئية نسبة إلى السبب فى خروجها من سطح المعدن.
ببساطة نستطيع أن نقول أن أشعة الضوء الساقطة قد أمدت إلكترون ما بطاقة مساوية أو تزيد عن طاقة ربطه بسطح المعدن وبالتالـى سمح لهذا الإلكترون أن يهرب أو يتحرر.

وطبقا لقوانين الفيزياء التقليدية ، **فإن الإشعاع الكهرومغناطيسى عبارة عن مجال كهربى يتذبذب عمودى على اتجاه انبعاث الإشعاع (هنا اهملنا المجال المغناطيسى). والذى نريد أن نركز عليه هو أن شدة الأشعة تتناسب مع مربع تذبذب المجال الكهربى, ويمكن للإلكترونات التى على سطح المعدن أن تذبذب مع المجال الكهربى الساقط عليها ، وكلما ازدات شدته (سعته) تزداد سعة تذبذب الإلكترونات كثيراً مما يؤدى الى كسر ارتباطها بالسطح وانطلاقها بطاقة حركة والتى ستعتمد على سعة (شدة) المجال الكهربى للإشعاع الساقط.**

والدراسات العملية لهذه الظاهرة أوضحت أنه توجد عدة عوامل متصلة ببعضها يعتمد عليها ظاهرة التأثير الكهروضوئى وهى

1 ـ تردد أو الطول الموجى للضوء الساقط **2 ـ شدة الضوء الساقط أ،أنأت**

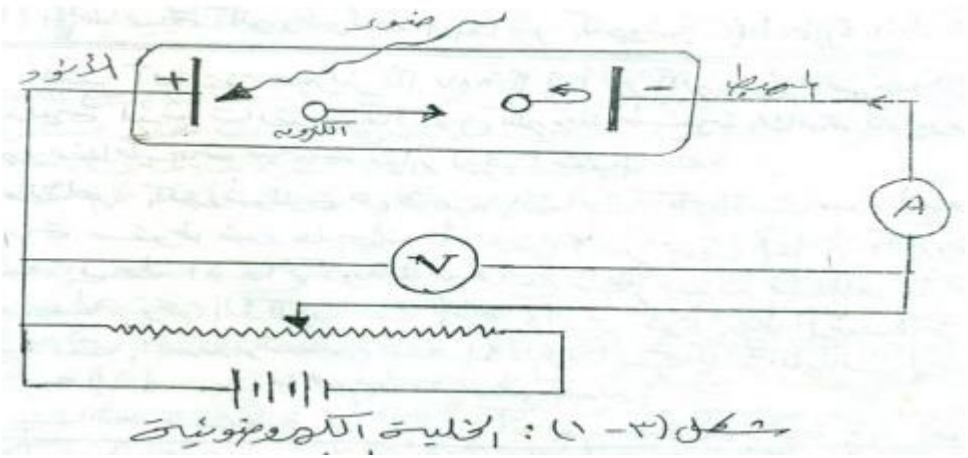
3 ـ طاقة حركة الألكترون **4 ـ طبيعة سطح المعدن التى تخرج منه الألكترونات**

والدراسات العملية لهذه الظاهرة أوضحت أنه توجد عدة عوامل متصلة ببعضها يعتمد عليها ظاهرة التأثير الكهروضوئى وهى :

1 . تردد أو الطول الموجى للضوء الساقط **2 . شدة الضوء الساقط .**

3 . طاقة حركة الألكترون $\left(\frac{1}{2}mV^2\right)$ **4 . طبيعة سطح المعدن التى تخرج منه الألكترونات.**

ويمكن دراسة هذه الظاهرة بإستخدام الخلية الكهروضوئية وهى عبارة عن أنبوبة من الزجاج أو الكوارتز ومفرغة من الهواء ، تحتوى على لوحين أو قطبين معدنيين أحدهما مغطى بطبقة من السيزيوم (الفلزات القلوية) ويمثل السطح المعدنى الذى سوف تتبعث منه الألكترونات عند سقوط الضوء عليه.



شكل (3 . 1) : الخلية الكهروضوئية

ويوضح شكل (3 . 1) رسم تخطيطى للدائرة الكهربية التى تستخدم لدراسة الظاهرة الكهروضوئية . عندما يسقط شعاع ضوئى أحادى الطول الموجى من مصدر كمصباح لقوس زئبقى على سطح معدن (المصعد أو الأنود) . عندما تنطلق الألكترونات الضوئية فإن جزء منها يتحرك فى اتجاه المهبط وعند وصولها المهبط يتكون التيار الكهروضوئى الذى يمر فى الدائرة الكهربية كما بالشكل . هناك مقياس جهد مستخدم لتزويد فرق الجهد بين قطبى الخلية (المصعد والمهبط) مكون من بطارية مصدر جهد مستمر وريوستات (مقاومة متغيرة) وفولتميتر (V) لقياس فرق الجهد بين المصعد والمهبط ، بالإضافة لوجود جهاز أميتر (A) لقياس شدة التيار الكهروضوئى.

**** الشروط الواجب توافرها عند إجراء هذه التجربة:**

1 . من المهم جدا أن يكون سطح اللوح المعدنى (المصعد) نظيفا.

2 . عند صناعة الخلايا الكهروضوئية يراعى تفريغها من الهواء ليتم التخلص من الغازات ما أمكن. ويتم ذلك برفع درجة حرارتها بالكامل إلى درجة حرارة عالية حتى يمكن التخلص من هذه الغازات التى تعوق حركة الألكترونات الضوئية بالتصادم مع جزيئات هذه الغازات أثناء حركتها فى اتجاه المهبط.

3–بعض الخلايا الكهروضوئية يكون المهبط على شكل اسطوانى لتجميع الإلكترونات الضوئية المنبعثة من المصعد . ويغطى السطح الإسطوانى للمهبط بطبقة من أكسيد النحاس أو أى مادة أخرى لاتتأثر بالضوء يمكن أن تمنع وصول الإلكترونات الضوئية إليها.

**** تفسير نتائج التجربة**

(1)العلاقة بين التيار الكهروضوئى وفرق الجهد المطبق(عند ثبوت شدة الضوء الساقط وتردده)

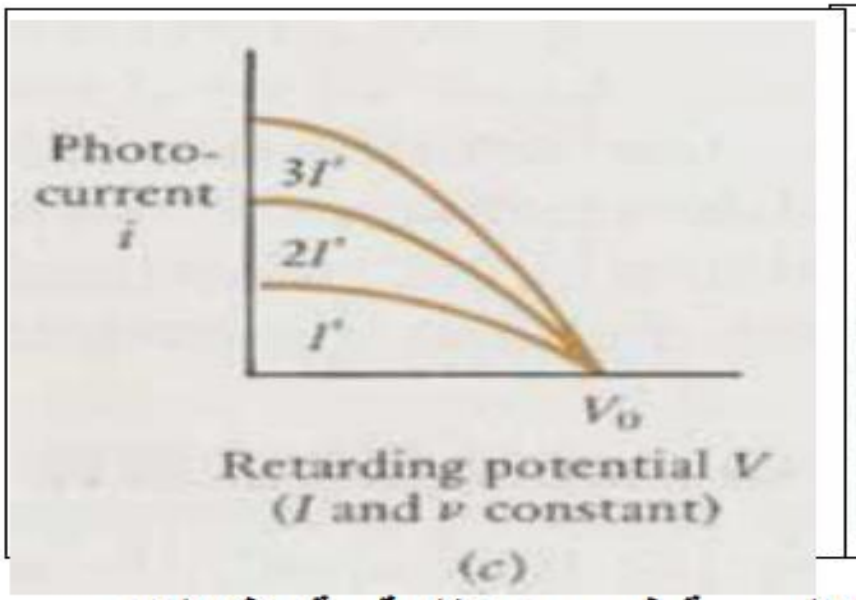
عندما يسقط ضوء آحادى اللون طول موجته λ وشدته (I) على سطح المصعد فسوف تتأثر الإلكترونات المنبعثة من السطح بالمجال الكهربى بين القطبين (المصعد والمهبط) ، وبواسطة مقياس الجهد يمكن التحكم فى قيمة فرق الجهد بين المصعد والمهبط وبالتالى يمكن تغير المجال الكهربى . فى هذه التجربة هناك حالتان يتم إجرائهما.

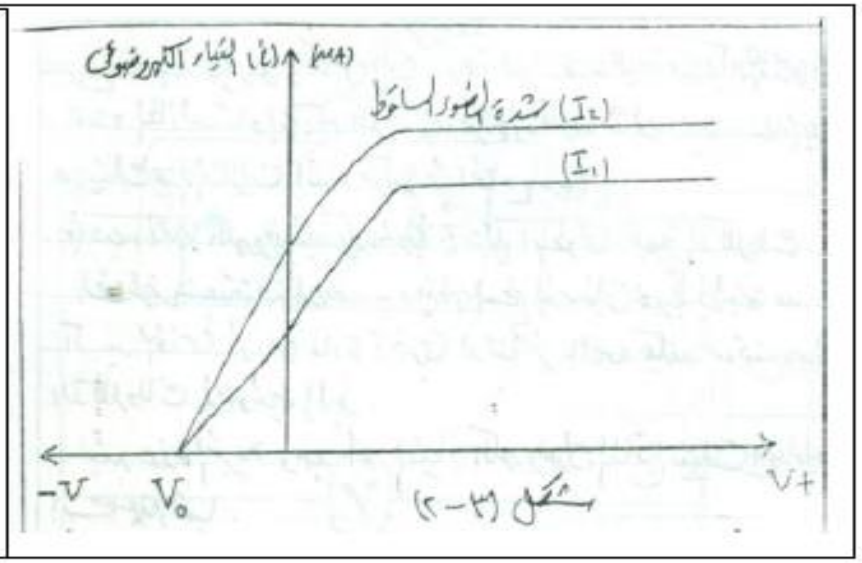
أ . إذا كان جهد المهبط موجب بالنسبة لجهد الأنود ، هذا سيؤدى إلى تعجيل الألكترونات نحو المهبط (زيادة التيار الكهروضوئي).

ب . إذا كان جهد المهبط سالبا بالنسبة لجهد الأنود . تناقصت سرعة الألكترونات نحو المهبط (نقص قيمة التيار الكهروضوئى) , وبالطبع فإن التيار الكهروضوئى الذى يسجله الأميتر سوف يتاسب مع عدد الألكترونات التى تصل إلى المهبط.

يوضح شكل (3 . 2) العلاقة بين التيار الكهروضوئى (i) على المحور الرأسى وفرق الجهد (V) بين المصعد والمهبط على المحور الأفقى.

ويلاحظ من هذا الشكل الآتـــى : .





1 – ثبوت قيمة التيار (i) لجميع قيم (V) الموجبة فى حين تقل قيمة هذا التيار عند جعل المهبط سالب بالنسبة للأنود حتى تصل قيمة التيار (i) إلى الصفر عند قيمة معينة سالبة لجهد المهبط (V_o)(يسمى بجهد الإيقاف أو التوقف لهذا الطول الموجى للضوء الساقط).

2– عند زيادة شدة الضوء الساقط من I_1 إلـى I_2 وإعادة التجربة مرة أخرى فسوف نجد أن التيار الكهروضوئى يزداد بنفس النسبة لكل قيم (V) ، وعندما يصبح فرق الجهد الواقع على المهبط سالب فإن التيار الكهروضوئى سوف يقل بسرعة شديدة حتى يصل إلى الصفر عند نفس قيمة الجهد (V_o).

*** * استخلاص النتائج الهامة من دراسة العلاقة السابقة :**

أ–هناك تناسب طردى بين (i) ، (I) يدل ذلك على أن هناك تناسبا بين عدد الألكترونات المنبعثة وشدة الضوء الساقط (I).

ب–عدم اعتماد جهد الإيقاف على شدة الضوء الساقط، ويمكن تفسير ذلك بفرض أن كمية حركة الإلكترونات التى تنبعث من المصعد لا تتعدى نهاية عظمى معينة فيها مهما تغيرت شدة الضوئى الساقط (I) والتى تعطى من العلاقة $eV_0 = \frac{1}{2} m V_{max}^2$. اذن لا تعتمد قيمة جهد الإيقاف على شدة الضوء الساقط عند نفس التردد ولنفس المعدن.

تفسير هذه العلاقة يرجع إلى أنه عندما يكون جهد المهبط سالب بالنسبة للمصعد وليكن (V) . فإنه الشغل المبذول على الإلكترون بواسطة المجال الكهربى المعاكس مساويا (ev) فإذا تساوى هذا الشغل مع طاقة الحركة للألكترون ($1/2\ m\ V^2$) فإن هذا الإلكترون سوف يتوقف عن الحركة أمام المهبط. بالنسبة للألكترونات التى تتحرك بأقصى سرعة (V_{max}) فإنها سوف تتوقف أمام المهبط إذا كان فرق الجهد الواقع على المهبط (الجهد السالب) كاف لذلك وليكن قيمته (V_0) وبالتالى سوف تتوقف الألكترونات ذات السرعات الأقل . أى ينعدم التيار الكهروضوئى (i) وعند هذه اللحظة يكـــون : $eV_0 = \frac{1}{2} m V_{max}^2$ (طاقة الألكترون

الضوئى) . وعندما تزيد قيمة فرق الجهد عن قيم أعلى من (V_o) فإن جميع الألكترونات سوف تعكس اتجاهها قبل وصولها إلى المهبط كما هو موضح بالشكل السابق .

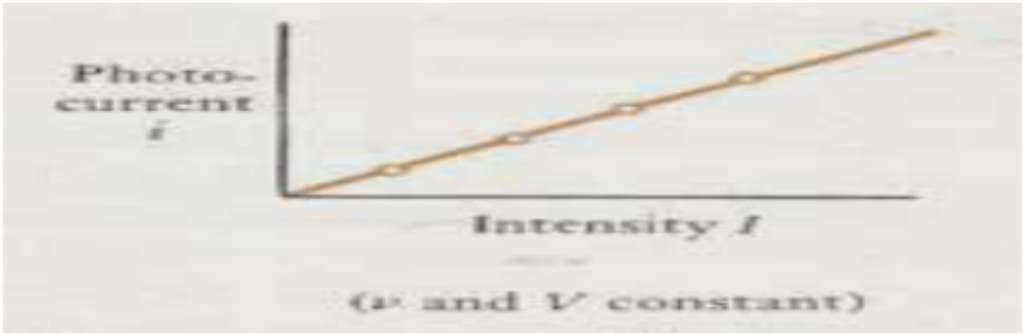
ج- يلاحظ أيضاً فى هذه التجربة أنه يوجد تيار كهروضوئى خفيف يمر فى الدائرة عندما تكون قيمة (V) بين المصعد والمهبط مساوية للصفر أى ($V = 0$) ، بمعنى أنه لايوجد فرق جهد بين المصعد والمهبط . هذا التيار الكهروضوئى الضعيف يعزى إلى أن بعض الإلكترونات المنبعثة من المصعد عند سقوط الضوء عليه يكون لها طاقة حركة كافية لإجتياز المسافة بين المهبط والمصعد.

(2) العلاقة بين التيار الكهروضوئى وشدة الضوء الساقط (عند ثبوت التردد وفرق الجهد):

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

** استخلاص النتائج الهامة من دراسة العلاقة السابقة :

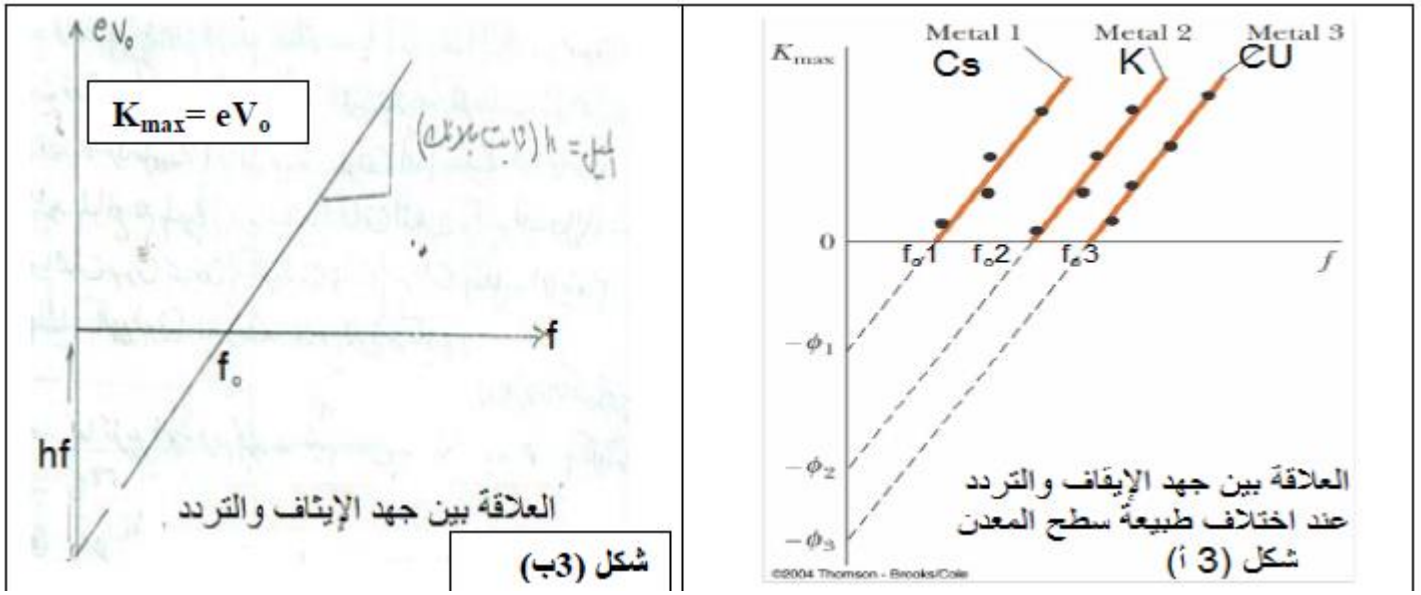
عند زيادة شدة الضوء الساقط تزداد شدة التيار الكهربي المار بالدائرة أي يزداد عدد الالكترونات المارة بالدائرة،



(3) العلاقة بين التيار الكهروضوئى وتردد الضوء الساقط (عند ثبوت v وشدة الضوء I) :

بإستخدام نفس الدائرة الكهربية السابقة فى شكل (3 . 1) بالإضافة إلى إستخدام نفس مصدر الضوء الساقط (مصباح بخار الزئبق وهو مصدر طيف خطى) ، ثم بإستخدام مجموعة من المرشحات (الفلاتر) الضوئية كل منها يسمح بنفاذ ضوء أحادى اللون طول موجته وتردده معروف فى هذه التجربة ثم بتعين جهد الإيقاف (V_o) لكل طول موجى معين .

يوضح شكل (3أ، 3ب) العلاقة بين (eV_o) وتردد الضوء الساقط (f) على سطح المصعد.



العلاقة بين جهد الإيقاف والتردد عند اختلاف طبيعة سطح المعدن

شكل (3 أ)

العلاقة بين جهد الإيقاف والتردد

شكل (3ب)

نستخلص من هذا المنحنى عمليا الآتى :

1-وجد عمليا أن قيمة جهد الإيقاف تعتمد على تردد الأشعة الكهرومغناطيسية فكلما زاد التردد كلما كانت قيمة جهد الإيقاف اكبر.

2- قيمة جهد الإيقاف تتغير بتغير نوع مادة المعدن.

3- كما وجد أيضا أن قيمة جهد الإيقاف لا تعتمد على شدة الأشعة الكهرومغناطيسية.

4- تجدر الإشارة هنا إلى أن أدنى تردد مطلوب للانبعاث الالكتروني من سطح المعدن يسمى بالتردد الحرج (f_o) *frequency* threshold. ولا يمكن أن نحصل على تيار كهروضوئي إلا إذا كان تردد الأشعة الكهرومغناطيسية الساقطة اكبر من التردد الحرج للمادة المستخدمة.

5- لأي معدن مستخدم في التجربة وجد من تحليل النتائج العملية أن المنحنيات تعطى معادلة خط مستقيم على الصورة :

$$eV_0 = \frac{1}{2} m V_{max}^2 = h(f - f_0) = hf - hf_0 \longrightarrow (1)$$

$$eV = hf - hf_0 = hf - \phi$$

$$\therefore hf = \frac{1}{2} m V_{max}^2 + \phi \longrightarrow (2)$$

حيث أن (h) هو ميل الخط المستقيم وهو مقدار ثابت لكل الأسطح الباعثة ، ويعرف بثابت بلانك وقيمته تساوى : $h = 6.6 \times 10^{-34} J.sec$

أما (f_o) يسمى بالتردد الحرج Threshold frequency . وهو أقل قيمة للتردد يمكن أن تسبب ابتعاث الكترونات من سطح الأنود ، وتعتمد قيمته على طبيعة السطح الباعث للإلكترونات والتى يوضحها الشكل التالى(3 أ) لثلاث معادن مختلفة هى السيزيوم (Cs) ، البوتاسيوم (K) ، والنحاس (Cu) . نلاحظ أنه لكل معدن تردد ضوئى حرج محدد (f_o) والتى لابد أن تكون قيمته أقل من قيمة تردد الضوء الساقط (f) أى ($f_0 < f$) حيث ينبعث من سطح هذ المعدن الكترونات كهروضوئية.

نلاحظ فى المعادلة (1) أن قيمة $\frac{1}{2} mv^2$ موجبة ، وعليه يجب أن لا يكون الفرق $hf - \phi$ سالب أى أن $hf \geq \varphi$ ، وعند التردد الحرج f_o تصبح $hf_o = \varphi$

3- التحليل الكلاسيكى والكمى للظاهرة الكهروضوئية.

أ-كلاسيكيا : تفسير الخصائص التي حيرت مكتشفيها ولم يتمكنوا من تفسيرها اعتماداً على قوانين الفيزياء الكلاسيكية:

- الطاقة القصوى للإلكترونات الضوئية المنبعثة (K_{max}) لا تعتمد على شدة الضوء الساقط،
- لا تنبعث الالكترونات عندما يكون تردد الضوء الساقط اقل من تردد العتبة (f_o) لمادة السطح،
- طاقة الالكترونات تزداد بزيادة تردد الضوء الساقط،
- الالكترونات تنبعث تقريبا في نفس اللحظة التي يسقط فيها الضوء على السطح المعدني مهما كانت شدة الضوء

لم تستطيع النظرية الكهرومغناطيسية (الكلاسيكية) أن تعطى تفسيرا واضحا للنتائج العملية التى تختص بالعلاقة الحرارية فى المعادلة (1) السابقة بين طاقة الألكترون الضوئى (ev) وتردد الضوء الساقط . حيث أنه طبقا لهذه النظرية الموجية يلزم أن تكون هناك علاقة بين شدة الضوء الساقط وطاقة الإلكترون الضوئى وحيث أن شدة الضوء الساقط (الموجة الكهرومغناطيسية) تعتمد على مربع سعة المتجه الكهربى ولاتعتمد على التردد.

ولكن النتيجة العملية التى نجحت فى تفسيرها النظرية الموجية هى التناسب الطردى بين شدة التيار الكهروضوئى (i) وشدة الإستضاءة (I) ، حيث تفسر النظرية الكلاسيكية الموجية ذلك بأنه كلما زادت شدة الإستضاءة تزيد الطاقة المصاحبة للضوء الساقط وبالتالى تزيد الطاقة الممتصة بواسطة الإلكترونات السطحية ، أى أن التيار الكهروضوئى يزداد ، وهذه هى النتيجة الوحيدة التى تتفق مع النظرية الكلاسيكية.

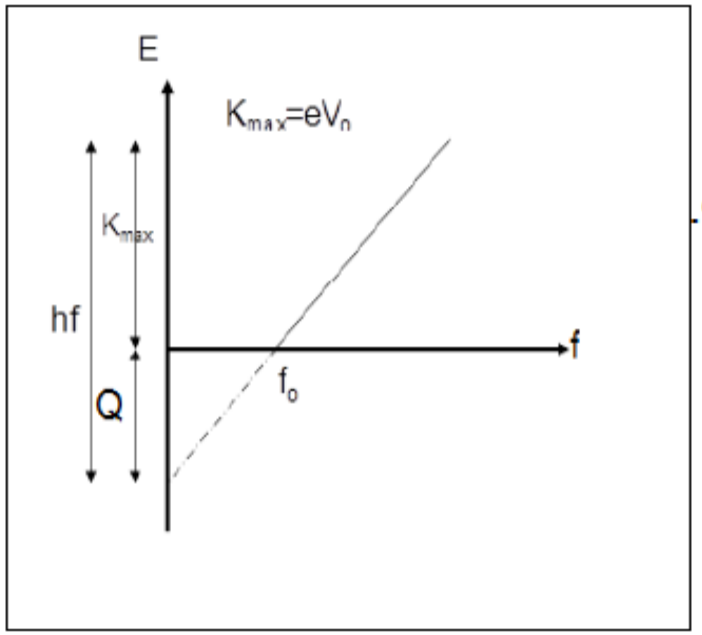
ب-كمـــيا :

تمكن اينشتاين من استخدام مبدأ بلانك الكمي على الموجات الكهرومغناطيسية لتفسير ظاهرة التأثير الكهرو-ضوئي، 1905 م، وافترض الأتي:

- عند انتقال نظام فيزيائي من مستوى طاقة معين (n) إلى مستوى أدنى (n-1) فانه تنبعث حزمة من الطاقة الكهرومغناطيسية (E) حيث؛

$$E = nhf - (n-1)fh = hf$$

h ثابت بلانك ، f التردد



– تتركز هذه الحزمة من الطاقة في حجم صغير من الفراغ وتتحرك بسرعة الضوء (C)، ويتحرك الضوء كسيل من حزم الطاقة (كمات) وسميت الفوتونات.

$$E = hf = \varphi + K_{max} = \varphi + K_{max} \quad -$$

$$K_{max} = eV_0 = hf - \varphi = \frac{1}{2} m_e v^2_{max} \quad -$$

$$V_0 = \frac{m_e \ v_{max}^2}{2\ e}$$ -

وتعرف المعادلة السابقة بمعادلة أينشتين الكهروضوئية

- حيث :E طاقة الفوتونات الساقطة ، φ دالة الشغل للمادة ووحدتها جول أو الكترون-فولت ، K_{max} الطاقة الحركية القصوى للالكترونات الضوئية ، e شحنه الالكترون ، V_o جهد الايقاف ، v_{max} السرعة القصوى للالكترونات المنبعثة ، m_e كتلة الالكترون
- **تعريف دالة الشغل للمادة Q :** هى الطاقة اللازمة لتحرير الكترون من سطح المادة وهى تساوي طاقة الربط للإلكترون
- $eV = 1.6 \times 10^{-19}\ j \rightarrow 1.6 \times 10^{-19}\ j/eV1$
- eV الأكترون-فولت: هى الطاقة اللازمة لنقل الكترون بين نقطتين فرق الجهد بينهما واحد فولت

- **تفسير خصائص الظاهرة الكهروضوئية اعتمادا على النظرية الكمية للضوء:**

1- شدة التيار (عدد الالكترونات الضوئية) المار بالدائرة تزداد بزيادة شدة الضوء أي بزيادة عدد الفوتونات (n) حيث :

$$E = nhf$$

2- تعتمد الطاقة الحركية للالكترونات على طاقة الضوء الساقط على السطح المعدني اى انها تعتمد على تردد الضوء (f) حيث (E=hf)، علما بان دالة الشغل للمادة قيمتها ثابتة

3- لا تنبعث الكترونات من سطح المعدن اذا كانت $hf < Q$، ويكون اقل طاقة لتحرير الكترون هى $hf_o = Q$ وحينها $K = 0$ (الطاقة الحركية للإلكترون تساوي صفر)

$$E = hf = W + K_{\max} \Rightarrow if\ K_{\max} = 0 \quad \therefore hf_o = W$$

4- ينبعث الالكترون الضوئي في نفس اللحظة التي يسقط فيها الضوء على سطح المعدن لان كل فوتون ساقط يصطدم بإلكترون ويحدث تبادل للطاقة بينهما – كأنه تصادم جسيم بجسيم أخر.

وبذلك طبقا لهذه النظرية الكمية يتكون الشعاع الضوئى الذى تردده (f) من فوتونات مثل الجسيمات ، كل فوتون له طاقة (hf) ، **والفوتون الواحد يمكنه أن يتفاعل مع إلكترون واحد فقط عند السطح المعدنى للمصعد ولا يمكن أن تتقاسم عدة إلكترونات طاقة الفوتون** ، من المعروف أن سرعة الفوتون تساوى سرعة الضوء ، وبالتالى تنعدم كتلته الساكنة حسب النظرية النسبية لأينشتين ($m_{0=}0$) وتكون طاقته هى كليا طاقة الحركة. أى أن تفسير أينشتين للظاهرة الكهروضوئية يتضح من أنه عند سقوط ضوء (فوتونات) على سطح معدن فإن الطاقة الداخلية للفوتون تنتقل إلى إلكترون مفرد على سطح المعدن . وعند خروج هذا الإلكترون الضوئى من هذا السطح سوف تكون له طاقة حركة ($\frac{1}{2}mV^2$) . بمعنى آخر فإن الفوتون الساقط يعطى طاقته (hf) كلها للألكترون الذى أصطدم به ، فإذا كانت الطاقة التى أكتسبها الألكترون المرتبط (hf) أكبر من طاقة ربطه بسطح المعدن فإن الزيادة فى الطاقة تظهر كطاقة حركة للإكترون المنبعث .

إستخلاص ما سبق : يمكنا الآن أن نستخلص مما سبق بأن النظرية الموجية للضوء ونظرية الكم الضوئى تكمل أحداهما الأخرى. فالنظرية الموجية تأخذ فيها الحالات التى ينتشر فيها الضوء ومايترتب عليه من ظواهر مثل الحيود والتداخل والانكسار والاستقطاب ، فى حين أن نظرية الكم الضوئى تأخذ فيها الحالات التى يتفاعل فيها الضوء مع المادة، وعلينا أن نقبل وصف الضوء وصفا كاملا.