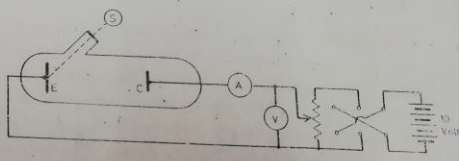
3 7 التأثير الكهروضوئي

نتحول الان من الاشعاع الحراري الى قسم اخر من الطيف الكهرومغناطيسي وتأخذ في اعتبارنا تأثيرا ينتج عن اشعاع ذو تردد اعلى . وقد ذكرنا آنفا انه حتى قبل اكتشاف الالكترون . لاحظ هالواش ان الزنك المسلط عليه اشعاع فوق البنفسجي يفقد شحنة سالبة . وقد افترضنا ان الاشعاع يدفع الزنك للتخلي عن شحنة سالبة . وفي عام 1899 اراننا لينارد Lenard ان الاشعاع يتسبب في ان يمتص المعدن الالكترونات .

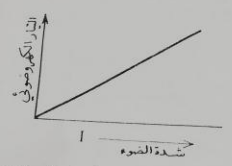
وقد سميت هذه الظاهرة بالتأثير الكهروضوئي ويمكن دراستها بالتفصيل بواسطة الجهاز المبين بالشكل (3 7) . ففي هذا الشكل يوجد مصدر للاشعاع (S) وهو ذو تردد مختلف ومعروف (f) وله شدة ضوئية (I) اما (E) فهو القطب الباعث ومصنوع من المادة المطلوب دراستها بينما (C) هو القطب الجامع وكلا القطبين يحتويهما غلاف زجاجي مفرغ الهواء له نافذة من الكوارتز تسمح بمرور الضوء المرئي والضوء فوق البنفسجي .



شكل (3 7) جهاز التأثير الكهروضوئي

تسمح الدائرة الكهربائية للقطبين أن يكونا في اوضاع متعددة للجهد كما تسمح بقياس التيار بين القطبين وقد جعلنا القطب الجامع موجبا في بداية التجربة بالنسبة الى القطب الباعث حتى تنفصل أية الكترونات مطرودة بسرعة من الباعث . ويكفي جهدا مقداره بضعة فولت ليفعل ذلك ولكنه لن يكون كافيا لتحرير الالكترونات من القطب السالب بالطريقة القذف بالايون الموجب كما هي الحال في انابيب الكاثود في محاولاتها الاولى لتشغيل انابيب الاشعة معتمة . لاسبب الالكترونات بالايونات الميكرامتر بمرور اي تيار خلال الانبوبة .

ويقيس الميكروامتر مرور التيار . ولقد وجد أن معدل انبعاث الالكترونات يتناسب مع شدة الضوء . فاذا بقي كل من تردد الضوء (f) وفرق الجهد المعجل (V) ثابتين لامكننا الحصول على معطيات مشابهة لتلك الممثلة في الشكل (3 6)



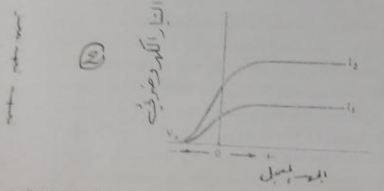
الشكل (3 6) التيار الكهروضوئي كدالة لشدة الضوء عندما تكون قيمة كل من فرق الجهد المعجل و تردد الضوء ثابتة

ومن المدهش انه اذا تسبب قليل من الضوء في تمرير عدد قليل من الالكترونات فان ضوءا اكثر يجرر عدداً كبيراً منها . واذا غيرنا أياً من تردد الضوء أو مادة القطب الباعث يتغير فقط ميل الخط البياني .

ويمكننا اجراء التجربة بأن نحتفظ بشدة الضوء ثابتة ونغير التردد ويوضح لنا الشكل (3 7) تمثيل هذه المعطيات بيانيا حيث B,A تمثلان مادتين مختلفتين ولكن قابلتين للاشعاع . أما الشيء المعنوي الذي نلاحظه من هذا الشكل هو أنه لكل مادة باعثة هناك تردد ضوئي محدد لا تنتج عنده الالكترونات الضوئية اذا قلت قيمة التردد عن هذه القيمة المحددة ويسمى ذلك التردد المعين باسم (تردد العتبة) ويرمز له بالحرف f_0 وهو احد الاشياء المحددة للمادة المشعة . أما الطول الموجي للضوء المقابل لتردد العتبة فيسمى الطول الموجي للعتبة » ويرمز له بالرمز λ_0 وبالتالي لا تنتج الكترونات ضوئية اذا زاد الطول الموجي عن هذا الحد .

ومن الصعب ان نشرح وجود تردد العتبة على أساس النظرية الموجية للضوء . فاذا فكرنا بالضوء كما لو كان متكونا من مجال كهرومغناطيسي متذبذب لأمكننا أن نتخيل أن هذا المجال يمكن توجيهه أحيانا لكي تتصاعد طرد الكترونات من السطح المعدني . ويمكننا ايضا ان نتصور بان ذلك شيئا معقولاً حيث أن ترددات معينة من الضوء تكون بحالة رنين مع الكترونات المعدن لدرجة أنه سوف يكون هناك ترددات مفضلة للضوء مع وجود معدل

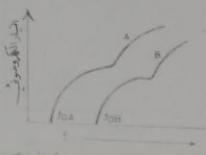
وفي تجربة كهروضوئية ثالثة . فلنجعل كل من التردد وشدة الضوء ثابتين . وليكن المتغير هو فرق الجهد عبر الخلية الكهروضوئية . فاذا بدأنا بجامع جهوي عشرة فولت موجب ثم خفضنا هذا الجهد حتى القيمة صفر ثم جعلناه سالباً حتى يتوقف التيار الضوئي كليا لنا لدينا منحني I الموضح في الشكل (3 8) ويحتاج هذا المنحني الى تفسير واضح



الشكل (3 8) التيار الكهروضوئي للجهد المعجل لضوء ذو شدة ضوئية مختلفة بنسبة 2 الى 1 مع ثبوت تردد الضوء الساقط

وعندما يصبح فرق الجهد عبر الانبوب حوالي عشرة فولت او اكثر . فان جميع الالكترونات المشعة تعبر خلال الانبوب وهذا التيار من الشحنات يسمى تيار التشبع ومن الطبيعي ان اي زيادة في الجهد الخاص بالجامع لايمكنها ان تسبب زيادة في التيار ويصبح الشغل الصافي المبذول على الالكترونات المتجمعة معتمدا على فارق الجهد الصغير فقط . وعندما ينخفض الجهد المعجل من قيم موجبة الى قيم سالبة ماراً بالقيمة صفر ينخفض تيار الانبوب بسبب الجهد المسلط المعوق الذي يتسبب في النهاية في توقف التيار تماما .

اما جهد الايقاف ويرمز له بالرمز V_0 فهو قيمة فرق الجهد المعوق الذي يكفي بالضبط لايقاف اكبر الفوتوالكترونات المنبعثة من حيث الطاقة . او بمعنى اخر اكثرها حيوية وقدرة على الحركة . وعلى ذلك يصبح حاصل ضرب جهد الايقاف والشحنة الالكترونية eV_0 مساويا لاقصى طاقة حركية يمكن للالكترون المنبعث أن يحملها . وبالنظر الى ان هذا الجهد (جهد الايقاف) له قيمة محددة . فان ذلك يصبح مؤشرا على أن الالكترونات المنبعثة لها حد اعلى محدد من الطاقة الحركية . واذا ضاعفنا شدة الضوء

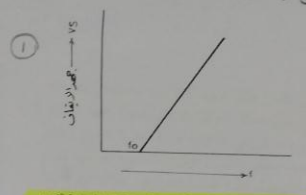


الشكل (3 9) التيار الكهروضوئي كدالة لشدة الضوء عندما تكون قيمة كل من فرق الجهد المعجل وتردد الضوء ثابتة

في عام 1905 استطاع اينشتين Einstein التوصل الى تفسير بسيط وجريء في نفس الوقت . فقد وجه الاهتمام الى شكل الطاقة المعبرة عن مادة الحركة . فبينما افترض بلانك ان الاشعاع يتكون من حزم من الطاقة توجد فقط مجاورة للباعث . افترض اينشتين ان هذه الحزم من الطاقة تحافظ على تمائلها من خلال وجودها فعلا من ان تنتشر مثل موجات الماء . اعتقد اينشتين بأن هذه الحزم المشعة تبقى مع بعضها وتحمل كمية من الطاقة تساوي hf . وبالنسبة لاينشتين . فان معنى تذبذبات الضوء لم تكن تحديدا كبيرا لتذبذبات المجال الكهربائي المتردد بقدر ما كانت مقياسا لطاقة الحزم الضوئية المسماة بالفوتون . اما تفسيره للمعطيات المبينة في الشكل (3 7) فهي ان كمية الضوء تحت تردد العتبة تماما ليس لديها طاقة كافية لكي تزيل الالكترون من المعدن بينما يستطيع ذلك الضوء الواقع فوق تردد العتبة .

اما تردد العتبة فهي تعتمد على طبيعة المادة المشعة لانه لكل مادة يوجد حد ادنى من الطاقة الضرورية لتحرير الكترون . وتعرف دالة شغل الكهروضوئي لمادة ما بانها الحد الادنى من الطاقة المطلوبة لتحرير فوتو الكترون من هذه المادة . كما انه لسوء الكترون من سطح المادة - اوتوبيا منها - تحتاج بالطبع لكمية اقل من الطاقة مما لو كان الالكترون

واذا كررت نفس التجربة باستخدام سلسلة من الترددات الضوئية المختلفة لوجدنا ان جهد الايقاف يتزايد بشكل خطي مع الترددات وتتضح هذه العلاقة اذا رسمنا جهد الايقاف في مقابل التردد . كما في شكل (9 – 3) كما انه تحت « تردد العتبة » لا تنبعث الالكترونات ويصبح جهد الايقاف مساويا للصفر



الشكل (9–3) جهد الايقاف كدالة لتردد الضوء ولاعتماد النتائج على شدة الضوء

وعلى ذلك ، عندما يزيد التردد عن « تردد العتبة » f_0 ، يزيد جهد الايقاف في علاقة خطية مع التردد .

ولكن نرى الى أي مدى تتطابق معطيات الشكل (9 – 3) مع تفسير اينشتين الفوتوني للتأثير الكهروضوئي . فلنفسر اولا الشكل (9 – 3) كما كان ليفعل هو فعند تردد ضوء أقل من « تردد العتبة » وحتى الصفر ليس هناك الكترونات فوتونية . حيث أن الفوتونات الساقطة لها طاقة أقل من دالة الشغل الخاصة بالمادة . أما بالنسبة للضوء الأعلى ترددا من « تردد العتبة » ، فان الفوتو الكترونات تنبعث . وقد تختلف كثيرا طاقة هذه الالكترونات المنبعثة نظرا لأن بعضها يكون منبعثا من داخل المعدن وبالتالي يتطلب طاقة أكبر من طاقة دالة الشغل المطلوب تحريرها . وتبعا لتصور اينشتين ، فانه لابد من وجود حدا أعلى لطاقة الالكترونات الفوتونية المنبعثة . وليس هناك فوتو الكترونات يمكنها ان تحصل على طاقة زائدة عن طاقة الفوتون القادم بأقل من الحد الادنى من الطاقة اللازمة لتحرير الكترون . وهي دالة الشغل . ونظرا لأن طاقة الفوتون تتناسب مع التردد . وايضا لأن جهد الايقاف يقيس الحد الاعلى من الطاقة الحركية للفوتوالكترونات المنبعثة . فان الخط البياني لجهد الايقاف مقابل

أما التجربة الأخيرة والتي تقودنا الى القرار الحاسم فتلخص في اضعاف الضوء المنبعث الى أبعد حد . وفي هذه الحالة ، فان عدد الفوتوالكترونات يصبح صغيرا جدا وينطلق الأمر وسائل تكنولوجية خاصة لتحديدها . أما النتيجة المعنوية لهذه التجربة فهي أن الضوء الضعيف بسبب انبعاث فوتو الكترونات قليلة العدد . الا أنها تنبعث بنفس الطاقة الحركية التي للضوء الباعث الذي يحمل نفس التردد .

وطبقا للنظرية الموجية للضوء ، فان المجالات الكهرومغناطيسية المتذبذبة تنتشر ابتداء من مصدرها والى الخارج منه . وبقابل الضوء الضعيف موجات ذات سعة صغيرة وطاقة صغيرة ايضا . واذا انتشر الضوء الضعيف على سطح ما . فللحفاظ على الطاقة يتطلب الأمر اما الا تنبعث أية فوتوالكترونات أو أن تخزن الالكترونات الطاقة الكافية ولمدد طويلة من الزمن (بحدود سنة) قبل أن تجمع طاقة كافية تمكنها من التحرر من المعدن . أما حقيقة ان الفوتو الكترونات تظهر في الحال (وبحدود جزء من الف من الثانية) وبطاقة عالية . فهذا يمكن تفسيرها فقط اذا افترضنا ان طاقة الضوء تسقط على السطح بشكل حزم مركزة وطبقا لتفسيرات اينشتين . فان الضوء الضعيف يتكون من قليل من الفوتونات كل منها له طاقة تعتمد فقط على تردد الضوء . وهذه الطاقة لاتتوزع عند انتشارها على السطح بشكل متساو كما هو مطلوب حسب النظرية الموجية . أما الفوتون الذي تم امتصاصه فيعطى كل طاقته الى الكترون واحد فقط وهذا الالكترون بالتالي سوف ينبعث بعنف . ولكي نلخص تفسيرات اينشتين للتأثير الكهروضوئي . فاننا نساوي طاقة الفوتون الساقط والذي له التردد f بمجموع دالة الشغل للباعث ($w = hf_0$) والطاقة الحركية العظمى التي يتطلبها الفوتون المطرود . أي أن

$$h f = h f_0 + \frac{1}{2} m v^2_{max}$$

أو

$$\frac{1}{2} m v^2_{max} = h f - hf_0$$

أو

$$V_s e = h f - w$$

هي معادلة خط مستقيم وهي معادلة الخط البياني في الشكل (9 – 3) ميل هذا الخط الذي يمثل V_s معبرا عنها كدالة في f يساوي h وان نقطة التقاطع مع المحور f وان w هي نقطة التقاطع للمنحنى اذا تحللنا امتداده مع V_s واذا كانت f أقل من f_0 فان V تصبح خيالية . أما المعنى الفيزيائي لذلك فهو ان الانبعاث الكهروضوئي عندئذ يصبح مستحيلا . ولقد تحققت معادلة اينشتين بدقة كبيرة على يدي ميليكان عام 1916 الذي قام بعمل قياسات معنى بها للانبعاث الفوتوني من عدة مواد مختلفة .

8 (3) الالكترون فولت :

في معادلة اينشتين فيما يقياس أقصى طاقة حركية للالكترونات المنبعثة بملاحظة فرق الطاقة الكامنة ($V_s e$) وهي تساوي الطاقة الحركية للالكترونات . وهذه الطريقة لتحديد الطاقات الالكترونية والتعبير عنها هي في الحقيقة طريقة مناسبة ونقترح وحدة جديدة للطاقة . وهذه الوحدة الجديدة تسمى الكترون فولت (e v) ونعرف بأنها كمية الطاقة المساوية للتغير في طاقة شحنة الكترونية واحدة عندما تتحرك من خلال فرق جهد مقداره فولت واحد .

ونظرا لان الالكترون فولت هو وحدة طاقة . فهو يوضع في نفس الدرجة مثل وحدات (القدم رطل) و (الكيلوات ساعة) .

ويمكن تحويل الطاقة المقاسة بوحدات الجول Joules الى الكترون فولت بالقسمة على $e_c = 1.60 \times 10^{-19}$ وفي هذه الحالة فان e_c ليست شحنة بل معامل التحويل ولها وحدات الجول لكل الكترون فولت . وتسري معادلة اينشتين (3 – 18) لاي مجموعة متجانسة من الوحدات . فاذا اخترنا وحدات فرنسية (كيلو – متر – ثانية) وقسمنا المعادلة (3–18) على معامل التحويل e_c لحصلنا على نفس المعادلة بوحدات الالكترون فولت .

$$E_K (max) = \frac{hf}{e_c} - \frac{w}{e_c} \qquad (3-19)$$

ويلاحظ ان $E_{K(max)}$ تتساوى عدديا مع V_s .

ونعني هذه المعادلة ان اقصى طاقة حركية للفوتو الكترون مقاسة بالالكترون فولت تساوي طاقة الفوتون بالالكترون فولت ناقصا دالة الشغل بالالكترون فولت ايضا واذا كان

الالكترون فولت وحدة صغيرة جدا . فمن المناسب استخدام 10^3eV اي كيلو الكترون فولت ومكا الكترون فولت التي تساوي 10^6eV وبليون الكترون فولت اي 10^9eV اي ان

10^3 ev = 1 KeV
10^6 ev = 1 MeV
10^9 ev = 1 BeV

ومن المناسب ايضا ان نعبر عن طاقة الفوتونات بالالكترون فولت على هيئة تردد الفوتون .

$$E = \frac{hf}{e_c} = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J. Sec.} \times \frac{1 \text{ ev}}{1.60 \times 10^{-19} \text{ J}} \times f$$

$$= 4.14 \times 10^{-15} f \text{ (Sec. eV)} \qquad (3-20)$$

وحيث ان $f = c/\lambda$ اذن نحصل على

$$E = 4.14 \times 10^{-15} \text{ Sec. eV} \times 3 \times 10^8 \frac{m}{Sec} \times \frac{1}{\lambda}$$

$$= \frac{1.24 \times 10^{-6}}{\lambda} \text{ (M.eV)} \qquad (3-21)$$

$$E = \frac{1.24 \times 10^{-6}}{\lambda} \text{ (m.eV)} \times \frac{1 \text{ A}}{10^{-10} \text{ m}}$$

واذا عبرنا عن الطول الموجي بوحدات الانكستروم بدلا من المتر يصبح لدينا :

$$\therefore E = \frac{1.24 \times 10^4}{\lambda} \text{ (eV.A)} \qquad (3-22)$$

واذا استخدمنا معطيات رقمية الى خمسة ارقام معنوية . تصبح النتيجة

$$E = \frac{12396}{\lambda} \text{ (eV. A)} \qquad (3-23)$$

المبعث في الثانية الواحدة من سنتيمتر مربع واحد و هو نصف قطر الشمس ($a = 6.957 \times 10^5\ km$) . هذه الطاقة هي نفسها التي يمكن استقبالها على سطح كرة مركزها هو مركز الشمس ونصف قطرها b هو متوسط المسافة بين الشمس والأرض ($b = 1.4968 \times 10^8\ km$) . ومن تعريف الثابت الشمسي نجد ان هذه الطاقة تساوي $4\pi b^2 S$ حيث ان S هو مقدار الثابت الشمسي

$$\therefore 4\pi a^2 E = 4\pi b^2 S$$

$$\therefore E = \left(\frac{b}{a}\right)^2 x\, S \qquad (3-24)$$

ومن قانون ستيفان حيث ان $E = \sigma T^4$

$$\therefore T = \left(\frac{b^2}{a^2} \cdot \frac{S}{\sigma}\right)^{\frac{1}{4}} \qquad (3-25)$$

حيث ان σ هي ثابت ستيفان ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8}\ W/m^2$) . وبالتعويض عن هذه المقادير وجد ان درجة حرارة سطح الشمس T تساوي 5780 K

... ذات سمك محدود وتحتوي هذه الطبقة على غازات شفافة وهي تعتبر المصدر الرئيسي للضوء في النهار والتي تظهر كخطوط سوداء في الطيف الشمسي . اما الطبقة الثالثة وهي الطبقة الخارجية للشمس وتعرف بالكورونا فانها تحتوي على غازات مأينة ويعتقد ان لونها ان اللون الأبيض الفضي وليس لهذه الطبقة حدود ثابتة وانما تمتد الى مسافات شاسعة خارج الشمس

تنبع الشمس كميات هائلة من الطاقة بمقدار يحوالي 3.86×10^{26} واط ولاتعتبر من هذه الطاقة الا جزء بسيط على السطح الخارجي للكرة الأرضية بمقدار يحوالي 1.67×10^{17} واط وذلك لصغر حجم الارض بالنسبة للشمس اذ يبلغ قطر الأرض $\frac{1}{110}$ من قطر الشمس وكذلك للبعد الشاسع بين الشمس والأرض ولذي يقدر بحوالي 150 مليون كيلومتر

يطلق على كمية الطاقة الشمسية التي تسقط عمودياً على السطح الخارجي للغلاف الجوي للارض في وحدة الزمن ولوحدة المساحات الموضوعة في نقطة متوسطة المسافة بين الشمس والأرض بحيث تكون اشعة الشمس عمودية في وقت الظهر في يوم صحو بالثابت الشمسي ويرمز له بالحرف S وتشير القياسات التي اجريت لايجاد قيمة الثابت الشمسي $S = 1.40 \times 10^3\ W/M^2$

يقاس الاشعاع الشمسي بواسطة وحدة تسمى لانجلي Langley وان معظم محطات العالم تقدر قيمة لانجلي المنتصة بواسطة سطح مستوى على سطح الأرض . فاذا فرضنا ان شدة الاشعاع الشمسي 1 L / min فان المتر المربع يستقبل 10^4 Cal / min وتستقبل غرفة زجاجية مساحة سطحها 100 متر مربع مليون سعرة في الدقيقة واذا كان فترة التعرض لهذا الاشعاع هي خمسمائة دقيقة (حوالي ثمانية ساعات في اليوم) فان هذه الغرفة تستقبل 500×10^6 سعرة في اليوم . وهذه الطاقة تعادل كمية الكربون المحترقة التي مقدارها كالون من الكازولين . واذا تحولت هذه الطاقة الى طاقة كهربائية بكفاءة 10 / فانها تعادل 56 kwh كيلو واط ساعة . وتتغير شدة الاشعاع حسب الموقع الجغرافي واوقات النهار وفصول السنة والـ حب والغبار

ان التوزيع الطيفي للاشعاع الشمسي يشابه تماما التوزيع الطيفي لقانون بلانك للجسم الأسود عندما تكون درجة حرارته 6000 K . ومن الممكن تطبيق قوانين الاشعاع لتعيين درجة حرارة الشمس الفعلية باستخدام قانون ستيفان على اعتبار ان الشمس جسم اسود . واستنادا الى هذا القانون فان الطاقة الكلية المنبعثة في الثانية الواحدة