The Quantum Theory of Light

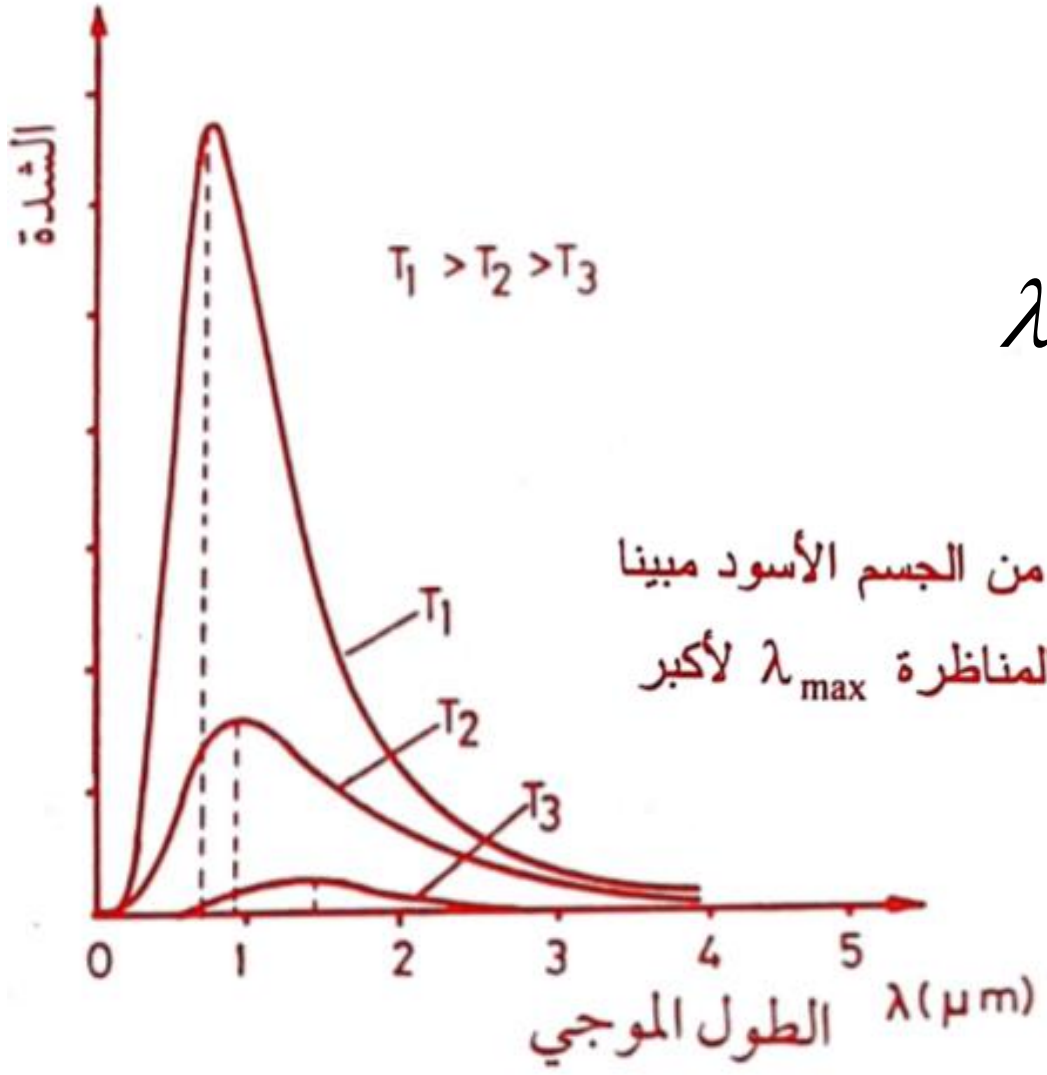
النظرية الكمية للضوء

- من الظواهر التي لم يتمكن العلماء تفسيرها على ضوء قوانين الفيزياء الكلاسيكية:
  - طيف أشعة الجسم الأسود Black body radiation spectrum
  - التأثير الكهروضوئي Photoelectric effect
  - انبعاث خطوط الأطياف المرئية من ذرات الغاز المثار

    Optical lines spectra by atoms in a gas discharge
  - أطيـاف أشعة X X-ray spectra.
  - تشتت كومبتون Compton scattering.

The Quantum Theory of Light النظرية الكمية للضوء

❑ Black body radiation spectrum طيف أشعة الجسم الأسود



$$\lambda_{max} = \frac{0.2898 \times 10^{-2}}{T}$$

طيف الاشعاعات الكهرومغناطيسية المنبعثة من الجسم الأسود مبينا تغير شدتهـــا مع الطول الموجي، والموجة المناظرة λ_{max} لأكبر شدة للإشعاع مع تغير درجات الحرارة.

النظرية الكمية للضوء The Quantum Theory of Light

جرت العديد من المحاولات لشرح منحنى طيف اشعاع الجسم الأسود:

1- باستعمال قوانين الديناميكا الحرارية حاول العالم ڤين إيجاد صيغة كلاسيكية لوصف شدة الطيف وتوصل للعلاقة

$$I(\lambda,T) = A\lambda^{-5}e^{\frac{-B}{\lambda T}}$$

حيث A، B ثوابت.

وبمقارنة هذه العلاقة مع منحنى الطيف التجريبي فإنها صحيحة فقط لأجل الأطوال الموجية القصيرة التي تقل عن 4 μm

2- باستعمال قوانين الإشعاع الحراري حاول العالمان رالي وجينز إيجاد صيغة كلاسيكية لوصف شدة الطيف وتوصلا للعلاقة

$$I(\lambda,T)=\frac{CT}{\lambda^4}$$

حيث C ثابت.

وبمقارنة هذه العلاقة مع منحنى الطيف التجريبي فإنها صحيحة فقط لأجل الأطوال الموجية الطويلة فقط .

3- توصل العالم ماكس بلانك إلى علاقة تصف بدقة طيف اشعاع الجسم الأسود وتتطابق تماما مع التجربة عند كل الأطوال الموجية وهذه العلاقة هي:

$$I(\lambda,T)=\frac{A\lambda^{-5}}{e^{\frac{B}{\lambda T}}-1}$$

حيث A، B ثوابت.

- عند الأطوال الموجية القصيرة:

$$e^{\frac{B}{\lambda T}}-1\approx e^{\frac{B}{\lambda T}}$$

$$then, I(\lambda,T)=\frac{A\lambda^{-5}}{e^{\frac{B}{\lambda T}}}=A\lambda^{-5}e^{\frac{-B}{\lambda T}}$$

وهي علاقة ڤين

- وعند الأطوال الموجية الطويلة:

$$e^{\frac{B}{\lambda T}} \approx 1+\frac{B}{\lambda T}+.....$$

$$then, I(\lambda,T)=\frac{A\lambda^{-5}}{\frac{B}{1+\frac{B}{\lambda T}}-1}=\frac{AT\lambda^{-4}}{B}, \frac{A}{B}=C$$

وهي علاقة رايلي وجينز.

وقد وجد بلانك أن :

$$A=2\pi hc^2, B=\frac{hc}{k}$$

حيث c هو سرعة الضوء ، k ثابت بولتزمان ، h ثابت بلانك.

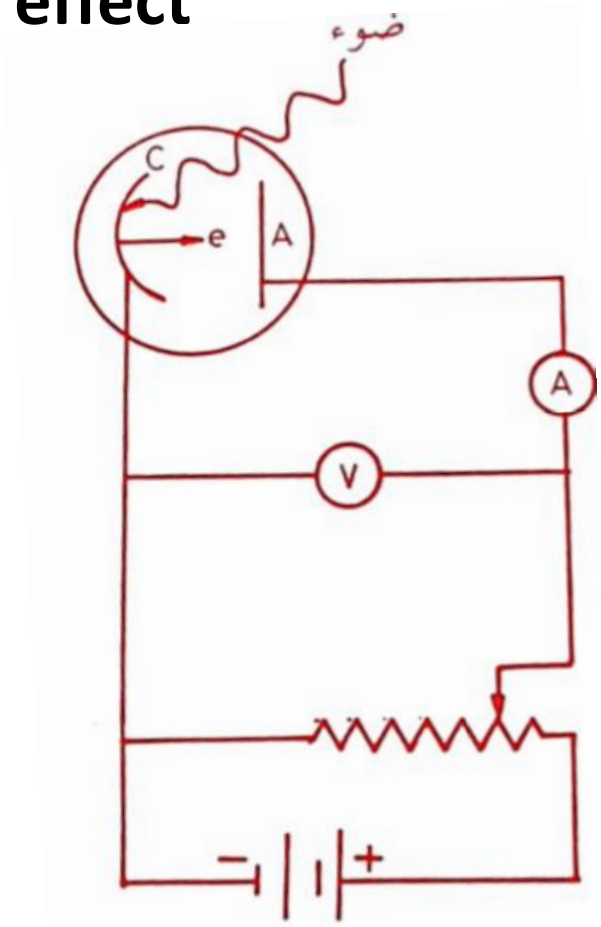
- ويمكن الحصول على قيمة طول الموجة التي تكون فيها الشدة الإشعاعية أعلى ما يمكن ($\lambda_{\max}$) وذلك بتفاضل معادلة بلانك بالنسبة الطول الموجي ومساواتها بالصفر:

$$\left.\frac{d[I(\lambda,T)]}{d\lambda}\right|_{\lambda=\lambda_{\max}} = 0$$

$$\Rightarrow \lambda_{\max} = \frac{0.2898\times10^{-2}}{T}\, meter$$

وهي نفس العلاقة التي وجدها ڤين عمليا، وقد حصل عليها بلانك نظريا مما يعني صحة قانون بلانك.

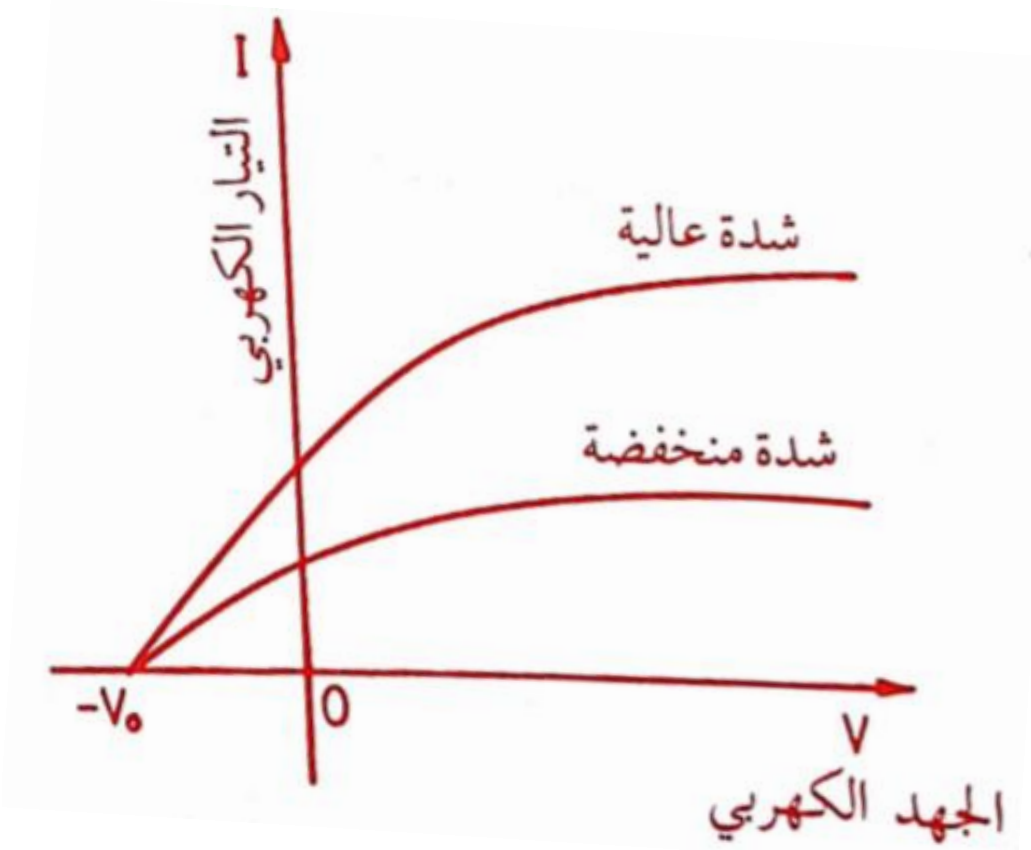
❑ التأثير الكهروضوئي Photoelectric effect



شكل تخطيطي لخلية ضوئية لمشاهدة ظاهرة التأثير الكهروضوئي.

١- عند زيادة شدة الضوء الساقط فإن قراءة الأميتر تزداد وذلك لمرور عدد أكبر من الإلكترونات.

التيار الكهربي يزداد كلما زاد فرق الجهد V حتى يصل إلى قيمة عليا ويعني ذلك أن القطب الموجب A قد جمع كل الإلكترونات المنبعثة من C.



العلاقة بين التيار والجهد الكهربي المستعمل لتجميع الإلكترونات المنبعثة بسبب التأثير الكهروضوئي لضوء شدتـــه عالية وآخر شدته منخفضة .

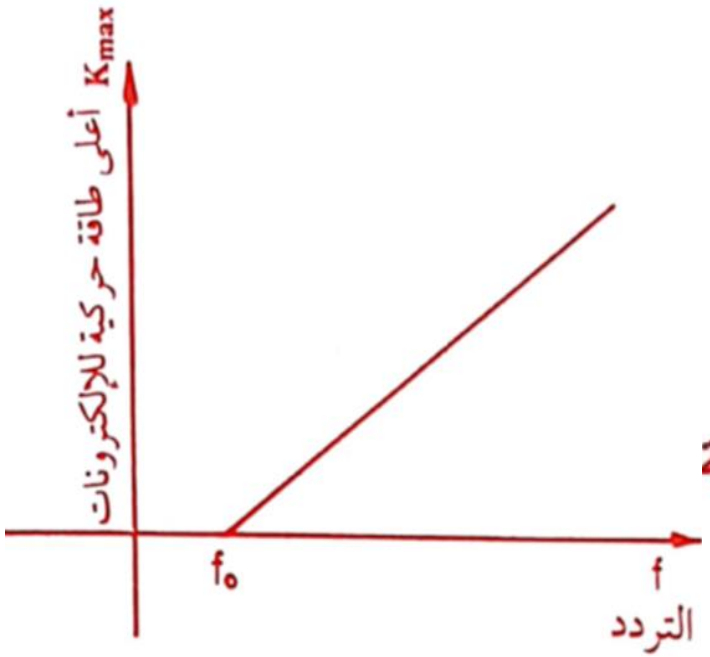
٢- إذا عكست الأقطاب وربطت الصفيحة C بالقطب الموجب للبطارية والصفيحة A بالقطب السالب فإن الإلكترونات المنبعثة من C بسبب سقوط الضوء عليها ستتنافر مع الصفيحة A ولن يصل إلى A إلا تلك الإلكترونات التي طاقتها الحركية أكبر من الطاقة الكهربائية (eV) ، وعندما يكون الجهد على A (الجهد السالب) مساويا أو أقل من قيمة معينة V_o ينقطع التيار تماما ولن تصل الإلكترونات إلى الصفيحة A ، ويسمى هذا الجهد الذي يوقف الإلكترونات تماما بجهد الإيقاف أو جهد الإعاقة V_o (Stopping Potential) ، وتكون القيمة العظمى لطاقة حركة الإلكترونات الضوئية K_{max} المنبعثة من C في هذه الحالة هي :

$$K_{max} = \frac{1}{2} m_e v_{max}^2 = e V_0$$

٣- إن جهد الإيقـــــاف V_o لا يعتمد على شدة الضوء الساقط على الصفيحة C .

٤-أن الإلكترونـــــات الضوئية لا تنبعث من معدن معين (الصفيحة C) إلا إذا كان تردد الضوء الساقط لـــــــه قيمة محددة أو أكبر منها مهمـــا زادت شدة الضوء الساقط ويسمى هـــــــذا التردد بتردد العتبة f_o (Threshold frequency) وبزيـــــادة التردد وجد أن جهد الإيقـــــاف على A يزداد أي أن طاقتـــه الحركية K_{max} تزداد

٥- أن كل معدن يستعمل كباعث للإلكترونات (الصفيحـــــة C)
له قيمة خاصة لتردد العتبة f_o كي يبدأ انبعاث الإلكترونـــات منه



العلاقة بين أعلى طاقة حركية تكتسبها الإلكترونات المنبعثة والتردد للفوتونات الساقطة على المعدن .

هناك العديد من الخصائص لهذه الظاهرة التي حـــيرت مكتشفيـــها و لم يتمكنوا من تفسيرها على ضوء الفيزياء الكلاسيكية وهي :

أ – الطاقـــة القصوى للإلكترونات المنبعثة (K_{max}) لا تعتمد على شدة الضوء الساقط فإن حزمـــــة من الضوء قوية الشدة تولد عددا من الإلكترونات أكبر مما تولده حزمة ضعيفة الشدة بنفس التردد ولكن الطـــــاقة القصوى K_{max} للإلكترونات المنبعثة هي نفسها في كلتا الحالتين

ب – الإلكترونات الضوئية لا تنبعث عندما يكون تردد الضوء أقل من قيمة معينة f_o وهي قيمة ثابتة لنوع المعدن C المستعمل .

ج – طاقة الإلكترونات تزداد كلما زاد تردد الضوء الساقط فقط .

(وهذه الخصائص الثلاث تتعارض مع النظرية الموجية المعروفة في ذلك الوقت والتي تفترض أن الإلكترونات الضوئية تنبعث عند أي تـــردد على أن تكون شدة الضوء الساقط كافية) .

د – أن الإلكترونات الضوئية تنبعث تقريبا في نفس اللحظة التي يسقط فيها الضوء على سطح المعدن حتى لو كان الضوء الساقط ضعيف الشدة . وهذا أيضا يتعارض مع الفيزياء الكلاسيكية التي تفترض أن الإلكترون يحتاج إلى وقت طويل جدا لكي يكتسب طاقة وينفصل عن سطح المعدن .

أما الخاصية الوحيدة التي يمكن تفسيرها على ضوء الفيزياء الكلاسيكية في هذه الظاهرة فهي زيادة الإلكترونات الضوئية (زيادة التيار) مع زيادة شدة الضوء الساقط .

- **النظرية الكمية والظاهرة الكهروضوئية**

Quantum theory and photoelectric effect

تمكن إينشتاين من استخدام مبدأ بلانك الكمي لتفسير ظاهرة الأثر الكهروضوئي وقد افترض ما يلي:

١- عند انتقال نظام فيزيائي من مستوى طاقة (n hf) إلى مستوى طاقة أدنى منه (n - 1) hf فإن هذا النظام أو المصدر يبعث حزمة من الطاقة الكهرومغناطيسية E مقدارها :

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

٢- تتركز هذه الحزمة من الطاقة الكهرومغناطيسية في حجم صغير من الفراغ وتتحرك بعيدا عن المصدر بسرعة الضوء (c) بدلا من انتشارها في الفراغ كالموجات المتحركة . ولذلك فهو يشبهها بسيل من حزمات الطاقة (كمات) (quanta) والتي سميت بعد ذلك بواسطة العالم لويس (Lewis) عام ١٩٢٦م بالفوتونات (Photons) .

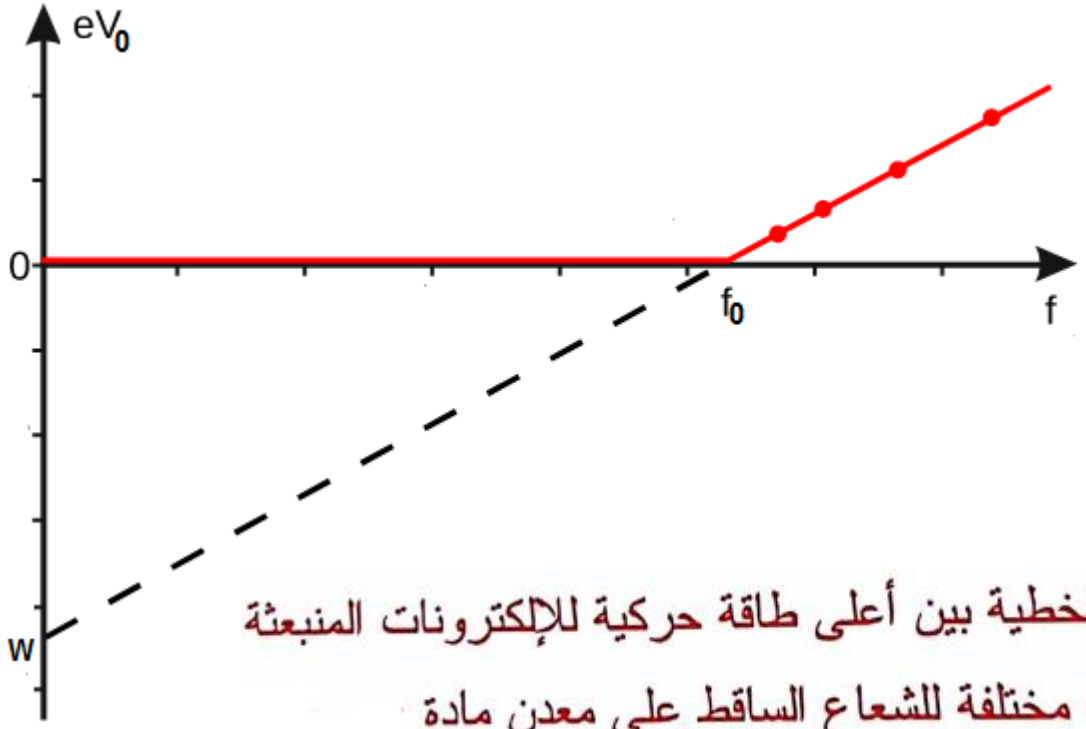
٣- في العملية الكهروضوئية تنتقل الطاقة الكلية لفوتون الضوء الساقط إلى أحد إلكترونات ذرات المعدن ، ولذلك فإن الإلكترون يمتص طاقة الفوتون فتنتقل طاقة الفوتون إلى الإلكترون ويكتسب طاقة مقدارها hf ويحتاج الإلكترون إلى طاقة معينة لكي ينفصل عن سطح المعدن مقدارها W وتسمى دالة الشغل (work function) للمادة ولذلك فإن طاقة الفوتون hf تساوي مجموع دالة الشغل اللازمة لكي ينفصل عن سطح المعدن وطاقته الحركية القصوى التي يتحرك بها أي أن : $hf = \mathrm{W} + \mathrm{K}_{\max}$

و هي علاقة أينشتاين في تفسير الظاهرة الكهروضوئية

وبالتعويض عن قيمة k_{max} نجد أن :

$$hf = W + eV_0$$

$$eV_0 = hf - W$$



العلاقة الخطية بين أعلى طاقة حركية للإلكترونات المنبعثة
وترددات مختلفة للشعاع الساقط على معدن مادة

وبهذه النظرية الكمية للضوء أمكن تفسير خصائصها وهي :

١ – لا تنبعث الإلكترونـــات الضوئية من المعدن إذا كان تردد الموجة الساقطـــــة أقل من قيمة معينة والسبب في ذلك أن طاقة الفوتون (hf) الساقط تكون أقل من دالة الشغل W للمعدن .

إذا كانت الطاقة (hf) مساويـــة أو أقل من W فإن طاقة الحركـــة للإلكترون تساوي صفرا ، ولن تتحرك الإلكترونات تجاه الصفيحـــة A مهمـــــا كانت شدة الضوء الساقط ، وتكون أقل طاقة لتحرير الإلكترون من المعدن فقط بدون إعطاءه طاقة حركية $(K_{max} = 0)$ هي : $hf_o = W + 0$

حيث أن f_o هو أقـــل تردد للضـــوء الساقط يمكن أن تنبعث عنده الإلكترونات الضوئية (Threshold frequency) .

٢ – الطاقة العظمى الحركية للإلكترونـــــات لا تعتمد علـــى شـــدة الضوء الساقط ويعزى ذلك إلى أنه عند مضاعفـــــــــة شـــدة الضوء الساقط فإن عدد الفوتونات سيتضاعف والـــذي بـــدوره سيضاعف من عدد الإلكترونات الضوئية المنبعثة (كل فوتون يحرر إلكترون) ولكن طاقتها التي تساوي hf - W لا تعتمد إلا على تردد الضوء الساقط f ودالة الشغل W .

٣ – تزيد طاقـــــة الإلكترونات الحركية فقط عند زيادة التردد وهذا واضح من المعادلة :

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

حيث W هي قيمة ثابتة للمعدن الواحد ، فالطاقة الحركية لا تعتمد إلا على f وتتناسب طردا معها .

٤ – ينبعث الإلكترون الضوئي في نفس اللحظة التي يسقط فيها الضوء على المعدن لأن كل فوتون ساقط يحمل طاقته معه ويتبادل طاقتـــه مع الإلكترون (كأنه تصادم بين جسيم وجسيم) وبذلك يحـــدث الانبعاث في نفس اللحظة التي يتفاعل فيها مع الإلكـــترون .

مثال (١٢-١) :

سقط ضوء طول موجته 300 nm على سطح معدن الصوديوم الـــــذي دالة الشغل له تساوي 2.46 eV ، احسب :

أ- الطاقة الحركية القصوى للإلكترونات الضوئية المنبعثة .

ب- طول الموجة التي يقف عندها انبعاث الإلكترونات .

$$hf = \mathrm{W} + K_{\max} \Rightarrow K_{\max} = hf - W = 4.14 - 2.46 = 1.68eV$$

$$K_{\max} = hf - W = 0 \Rightarrow hf_0 = W \Rightarrow h\frac{c}{\lambda_0} = W \Rightarrow$$

$$\lambda_0 = 5.05\times10^{-7} m = 505nm$$

❑ الأطياف الخطية Line spectra

وجد العلماء أن لكل عنصر طيف خطي مميز له واستطاعوا قياس أطوالها الموجية ولكنهم لم يعرفوا في ذلك الوقت سبب وجودها.

فعند مرور تيار كهربائي على غاز فإنه ينبعث ضوء، إذا مر خلال موشور أو محزوز حيود تتكون منه خطوط طيفية منفصلة لكل منها طول موجي محدد.

- لأجل غاز الهيدروجين

متسلسلة پالمر(طيف مرئي): $\frac{1}{\lambda_n} = \mathrm{R}(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}), n = 3,4,5,.....$

ثابت رايدبرج $, \mathrm{R} = 1.09737 \times 10^7 \, m^{-1}$

أما متسلسلات الأطياف غير المرئية فهي:

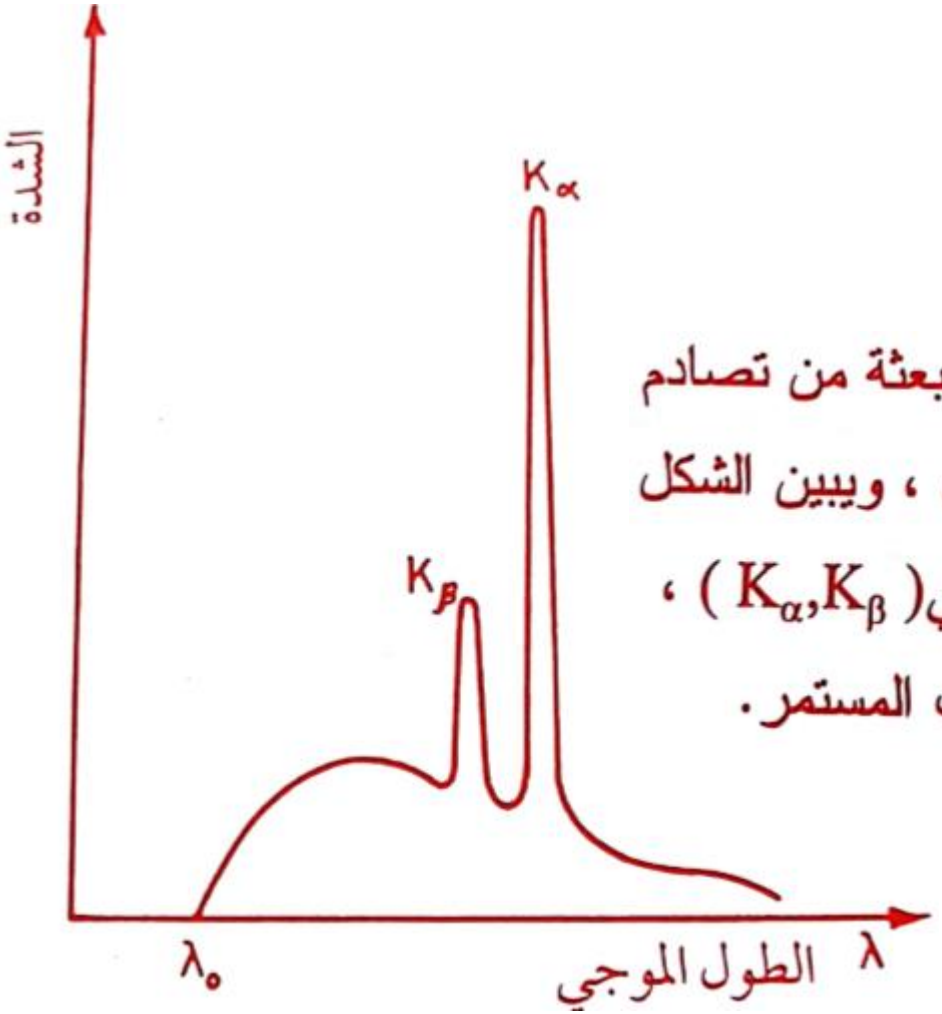
- متسلسلة ليمان: $\frac{1}{\lambda_n} = \mathrm{R}(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}), n = 2,3,4,5,.....$
- متسلسلة باشن: $\frac{1}{\lambda_n} = \mathrm{R}(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}), n = 4,5,6.....$
- متسلسلة براكيت: $\frac{1}{\lambda_n} = \mathrm{R}(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2}), n = 5,6,7.....$

❑ أطياف الأشعة السينية X-ray spectra

وجد العالم رونتجن أن إشعاعات قوية تخترق المواد ذات طبيعة مجهولة تنبعث عندما تصطدم إلكترونات سريعة على هدف من مادة معدنية ثقيلة، ولعدم معرفته بطبيعتها وسبب انبعاثها أسماءها x-ray.

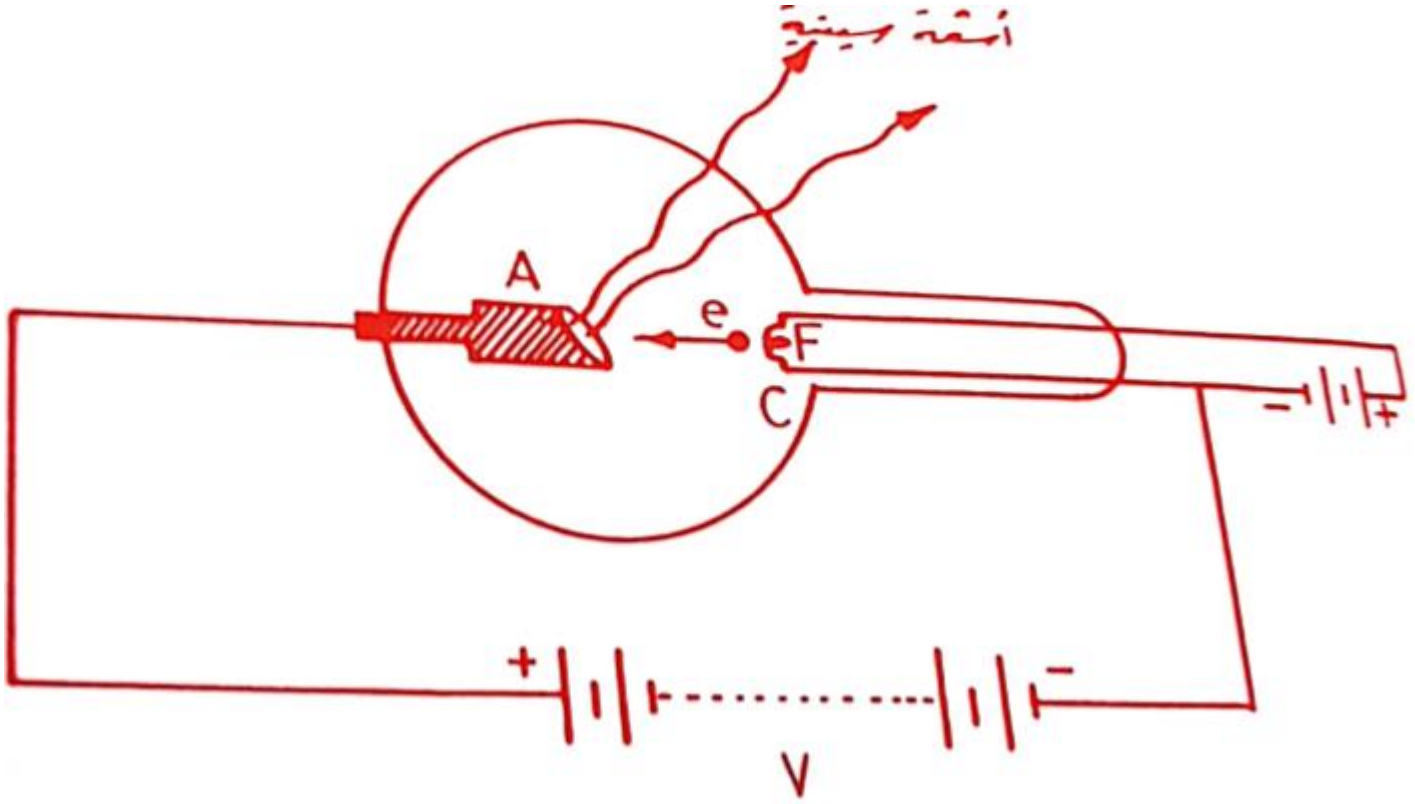
وعرفت بعد ذلك طبيعة هذه الأشعة بأنها موجات كهرومغناطيسية أطوال موجاتها قصيرة جدا في حدود 0.01 nm و 10 nm.

يتكون طيف هذه الإشعاعات الناتجة من طيف مستمر وطيف خطي كما في الشكل المجاور.



الطيف المستمر لشدة الإشعاعات السينية المنبعثة من تصادم الإلكترون المعجل مع هدف معدني ثقيـــل ، ويبين الشكل القمم المميزة للعنصر على شكل طيف خطي(K_α, K_β) ، وأقل طول موجي λ_o الذي يبدأ عنده الطيف المستمر.

❑ إنتاج الأشعة السينية



شكل تخطيطي لجهاز إنتاج الأشعة السينية

الطاقة الحركية للإلكترون المعجل:

$$K = eV$$

$$eV = hf_0 = \frac{hc}{\lambda_0} \Rightarrow \lambda_0 = \frac{hc}{eV} = \frac{1.24\times10^{-6}}{V}\, meter$$

حيث λo الطول الموجي لبداية الطيف المستمر وهو يعتمد فقط على الجهد المستعمل لتعجيل الالكترون.

الطول الموجي للفوتون المنبعث: $\frac{1}{\lambda} = \mathrm{R}Z^2\left(\frac{1}{n_f{}^2} - \frac{1}{n_i{}^2}\right)$

$$K_\alpha (2 \to 1)$$

$$K_\beta (3 \to 1)$$

$$\lambda_{k_\alpha} \rangle \lambda_{k_\beta}$$

لقد وجد تجريبيا أن طول موجة الخط المميز Kα لذرة عديدة الإلكترونات يمكن معرفته من العلاقة:

$$\frac{1}{\lambda_\alpha} = \mathrm{R}Z_{\mathrm{eff}}^2\left(\frac{1}{1^2}-\frac{1}{2^2}\right) = \frac{3}{4}RZ_{\mathrm{eff}}^2$$

$$, Z_{\mathrm{eff}} = Z - 1$$

حيث Zeff العدد الذري الفعال للعنصر المستعمل كهدف.

حيث أن الإلكترون العائد إلى المستوى الأول (K) يجد إلكترونا سالبا واحدا في نفس المستوى فتكون الشحنة الكلية هي مجموع شحنة النواة الموجبة Ze وشحنة الالكترون السالب e-. وبالتالي الشحنة الكلية:

$$Ze - e = (Z-1)e$$

١- درجة حرارة جسم الإنسان الخارجية تكون في حدود 35°C ، ما هو طول الموجة التي يكون عندها أعلى شدة للإشعاعات الصادرة من الجسم .

٢- أعلى شدة للموجات الضوئية الصادرة من الشمس هي للون الأصفر – البرتقالي ذو الطول الموجي 500 nm ، احسب درجة حرارة سطح الشمس بالدرجات المئوية.

٦- تيار الإلكترونات المنبعث من خلية كهروضوئية بسبب سقوط شعاع ضوئي طول موجته 300 nm ينقطع تماما عند استعمال جهد إيقاف كهربي مقداره 0.625 V احسب دالة الشغل (W) لهذا المعدن المستعمل في الخلية الكهروضوئية .

٧- دالة الشغل W لعنصر البوتاسيوم تساوي 2.24 eV . إذا استعمل هذا العنصر في خلية كهروضوئية وأضيء بضوء طول موجته 312.5 nm احسب :

أ- أعلى طاقة حركية للإلكترونات الضوئية المنبعثة .

ب- الجهد الكهربي الذي ينقطع عنده التيار .

جـ- الطول الموجي للضوء الساقط الذي يتوقف عنده انبعاث الإلكترونات من عنصر البوتاسيوم .

١٠- احسب أقل قيمة للطول الموجي للفوتون المنبعث في متسلسلة بالمر في ذرة الهيدروجين ($n_f = 2$) .

١١- احسب أكبر قيمة للطول الموجي للفوتون المنبعث في متسلسلة بالمر في ذرة الهيدروجين .

١٢- أحسب أقصر طول موجي لطيف الأشعة السينية المنبعثة من جهاز إنتاج الأشعة السينية عند استعمال جهد كهربي معجل للإلكترونات مقداره 18750 V .

١٣- الطول الموجي λ_α لخط الطيف المميز K_α (عندما ينتقل الإلكترون من المستوى الثاني L إلى المستوى الأول K) لعنصر معين يساوي 0.07228 nm . احسب العدد الذري لهذا العنصر .