The quantum theory of light النظرية الكمية للضوء

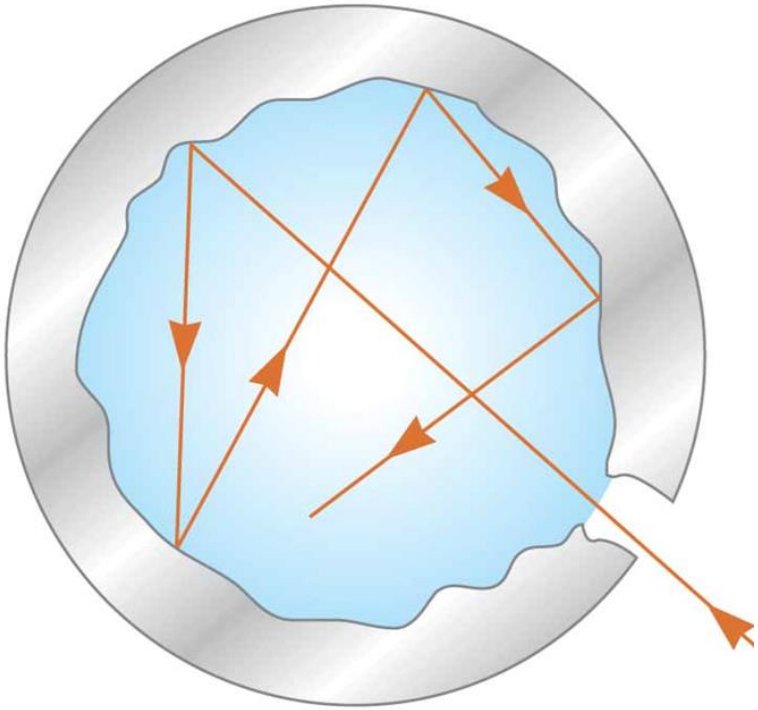
مقدمة: استنادا على قوانين الفيزياء التقليدية ولنظرية الموجية للضوء لم يتمكن العلماء من فهم وتفسير بعض الظواهر الفيزيائية ومنها:

1. **طيف أشعة الجسم الأسود**
2. **التأثير الكهروضوئي**
3. **انبعاث خطوط الأطياف المرئية من ذرات الغاز المثار**
4. **اطياف الأشعة السينية**

- **لدراسة وتفسير هذه الظواهر افترض بعض العلماء فرضيات جديدة لم يتقبلها بعض الفيزيائيين في البداية، ولكنها نجحت في فهمها وتفسيرها وخصوصا بعد اتفاق النتائج النظرية المبنية على هذه الفرضيات مع النتائج التجريبية وبذلك ثبت صحتها.**

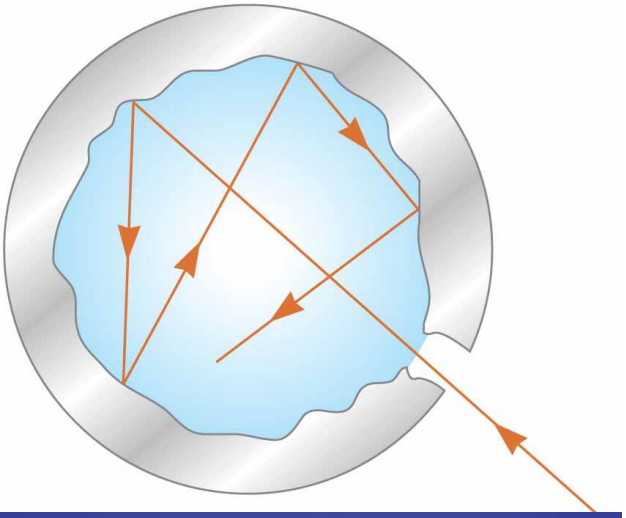
النظرية الكمية للضوء The quantum theory of light

طيف أشعة الجسم الأسود



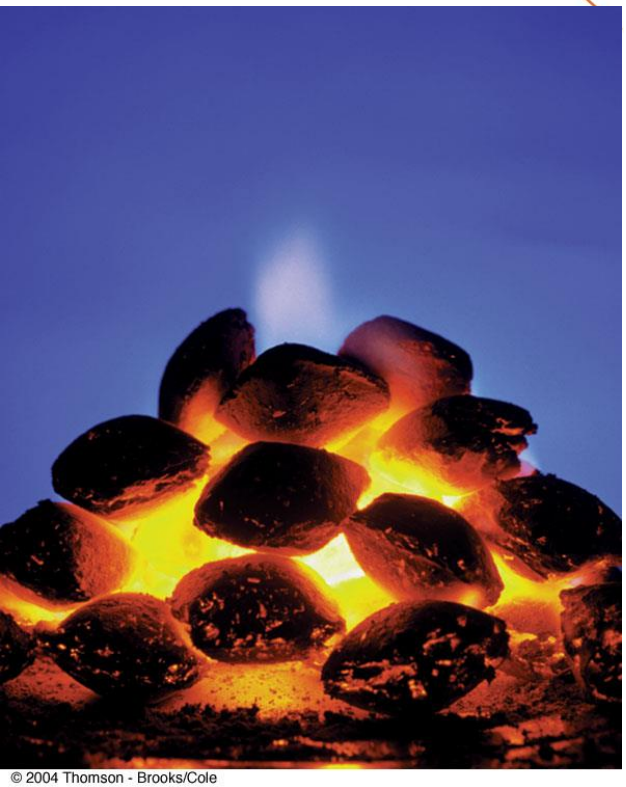
إشعاع الجسم الأسود

نموذج مثالي لجسم يمتص كامل الضوء الساقط عليه بعد انعكاسات عديدة على سطحه، ثم يشع جميع موجات الإشعاع الحراري طبقا لدرجة حرارته على شكل توزيع طيفي محدد.



أشعة الجسم الأسود:

- وجد تجريبيا انبعاث اشعاعات حرارية من أي جسم وتختلف خصائص هذه الإشعاعات (مثل الطول الموجي) باختلاف درجة حرارة الجسم.
- عند درجة حرارة منخفضة: تكون الأطوال الموجية للإشعاعات الحراري(λ) معظمها تقع ضمن حدود الاشعة تحت الحمراء (غير مرئية).
- عند زيادة درجة الحرارة: يتوهج الجسم ويميل لونه إلى الاحمرار.
- بزيادة درجة الحرارة:يميل لونه إلى اللون الأبيض (كما في حالة فتيلة المصباح).



© 2004 Thomson - Brooks/Cole

The quantum theory of light النظرية الكمية للضوء

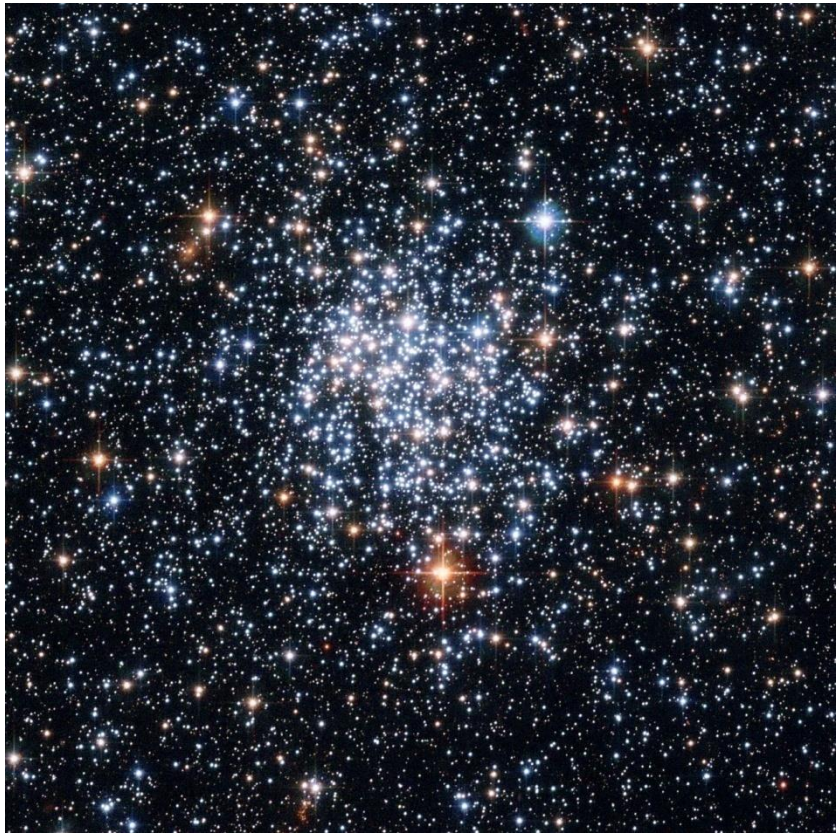
© 2004 Thomson - Brooks/Cole

عند درجات الحرارة المنخفضة يكون الطول الموجي للأشعة المنبعثة في المجال تحت الأحمر.

تتتم قياس حرارة الجسم باستخدام ثرمومتر الأذن وذلك عن طريق الكشف عن الأشعة تحت الحمراء المنبعثة من طبلة الأذن.

The quantum theory of light النظرية الكمية للضوء

طيف أشعة الجسم الأسود



الحشد النجمي NGC 265

اختلاف اللون مؤشر لاختلاف درجة الحرارة. اختلاف ألوان النجوم يعني اختلافها في درجة حرارة سطحها.

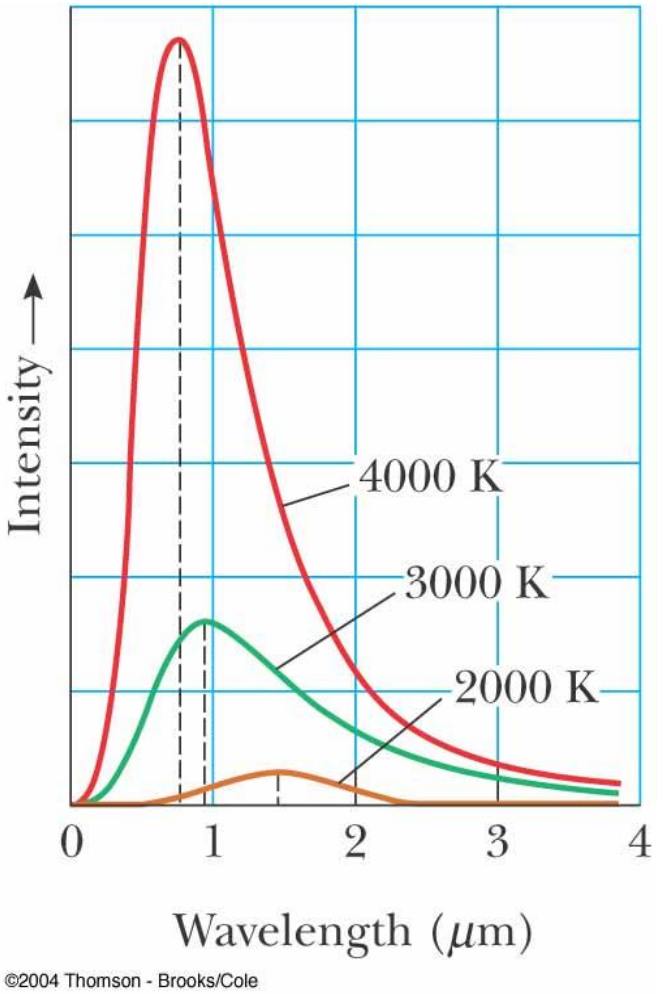
النجوم الزرقاء أسخن (40 ألف كلفن).

النجوم الحمراء أبرد (3 آلاف كلفن).

تعتمد الأشعة المنبعثة من الجسم بالإضافة إلى درجة حرارته على عدة عوامل مثل نوع مادة الجسم ولذلك تم تعريف جسم مثالي عبارة عن جسم اسود قادر على امتصاص كافة الأشعة الساقطة عليه وهذا الجسم عبارة عن تجويف له ثقب صغير فإذا سقط شعاع إلى داخل التجويف من خلال الثقب فإن الشعاع ينعكس على جدران التجويف الداخلي حتى يتم امتصاصه بالكامل

وبدراسة الانبعاث الحراري المنبعث من الجسم الأسود عند درجات حرارة مختلفة وجد عملياً أن الإشعاع المنبعث من الجسم الأسود له طيف متصل يتسم بالملاحظات التالية:

- أن هناك توزيعاً معيناً لشدة الإشعاع المنبعث من الصندوق الأسود كدالة في الطول الموجي (λ).
- أن كمية الإشعاع الكلية المنبعثة $\left(\int_0^\infty I(\lambda)d\lambda\right)$ تزداد مع درجة الحرارة (T) .
- أن موضع الطول الموجي الذي يكون عنده الإشعاع الحراري اكبر ما يمكن (λ_{max}) ينزاح إلى أطوال موجية اقل بزيادة درجة الحرارة كما هو موضح في الشكل



- أي ان طيف الاشعاعات الحرارية؛ هو طيف مستمر من الأطوال الموجية للأشعة تحت الحمراء، الضوء المرئي والموجات فوق البنفسجية وتتغير شدتها بتغير الطول الموجي وكذلك يتغير الطول الموجي المقابل للقيمة العظمى للشدة بتغير درجة الحرارة كما هو موضح بالرسم.
- تتغير شدتها مع الطول الموجي.
- يتغير الطول الموجي المقابل لأعلى شدة (λ_{max}) بتغير درجة الحرارة(T) ، (علاقة فين) بين (T)K & (λ_{max}) ، (وتسمى معادلة الازاحة لفين).

$$\lambda_{\max} \alpha \frac{1}{T} \quad \Rightarrow \lambda_{\max} = \frac{0.2898 X 10^{-2}}{T} \; m$$

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

$$\lambda_1 T_1 = \lambda_2 T_2$$

مثال 1 ص557: درجة حرارة جسم الإنسان الخارجية تكون في حدود35°C ، ما هو طول الموجة التي عندها أعلى شدة لإشعاعات المنبعثة من الجسم؟

$$\lambda_{max} = \frac{0.2898x10^{-2}}{T+273} = \frac{0.2898x10^{-2}}{35+273} = 9.409\times10^{-6}\,m = 940.9nm$$

مثال 2 ص557: أعلى شدة للموجات الضوئية المنبعثة من الشمس هى للون الأصفر-البرتقالي وطوله الموجي 500 nm ، أحسب درجة حرارة الشمس بالدرجات المئوية؟

$$\lambda_{max} = \frac{0.2898x10^{-2}}{T+273} \Rightarrow T = \frac{0.2898x10^{-2}}{\lambda_{max}} - 273$$

$$= \frac{0.2898x10^{-2}}{500\times10^{-9}} - 237 = 5523^{o}c$$

The quantum theory of light النظرية الكمية للضوء

طيف أشعة الجسم الأسود

لقد جرت محاولات عديدة لشرح منحنى الطيف من الوجهة الكلاسيكية ومن اشهر من اهتم بذلك العالم فين **Wien** عام **1896** م الذي حاول ايجاد صيغة كلاسيكية باستخدام قوانين الديناميكية الحرارية المعروفة لوصف شدة الطيف **I(λ, T)** وتوصل الى العلاقة:

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

حيث **A**، **B** ثوابت.

وبالمقارنة مع النتائج التجريبية وجد أن علاقة **Wien** تتطابق معه عند الموجات القصيرة فقط (التي تقل عن $4\times10^{-6}m$) ولكنها تشذ في الموجات الطويلة.

قانون رايلي جينز Rayleigh-Jeans Formula

اعتبر رايلي وجينز أن الجسم الأسود مكون من عدد كبير من المتذبذبات المشحونة التي تتحرك حركة توافقية بسيطة (simple harmonic motion) وهذه المتذبذبات المشحونة تطلق أشعة كهرومغناطيسية أثناء حركتها بحيث تكون كثافة توزيع الطاقة المنبعثة من الجسم الأسود مساوية لكثافة الطاقة للمتذبذبات عند الاتزان الحراري. وأن التوزيع الطيفي لإشعاع الجسم الأسود يكون على الصورة:

$$I(\lambda,T) = \frac{2\pi c k_B T}{\lambda^4}$$

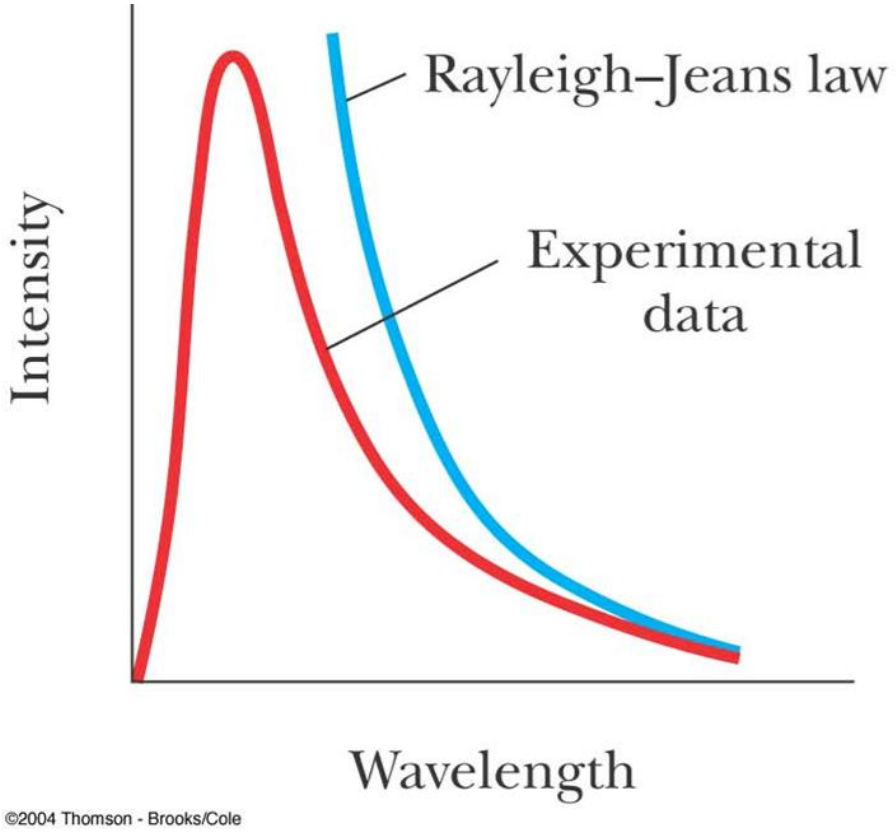
حيث $k_B\ T$ تعطي قيمة متوسط طاقة المتذبذبات و k_B هو ثابت بولتزمان

ولكن هذه الفرضية لرايلي وجينز تتفق تجريبا مع طيف الجسم الأسود للأطوال الموجية الطويلة (الترددات الموجية القصيرة) ولم تتفق في المناطق من الطيف ذو الأطوال الموجية القصيرة وبالتالي فشلت في تفسير طيف الجسم الأسود.

ويطلق على عدم تطابق الفرضية في المناطق من الطيف ذو الأطوال الموجية القصيرة بكارثة الأشعة الفوق بنفسجية ultra-violet catastrophe

The quantum theory of light النظرية الكمية للضوء

طيف أشعة الجسم الأسود



علاقة **Rayleigh-Jeans** كانت تتطابق

معه عند الموجات الطويلة فقط.

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

*تفسير منحنى الاشعاعات الحرارية بناءا على قوانين الفيزياء الكلاسيكية

***فين (باستخدام قوانين الديناميكا الحرارية)**

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

اتفقت نتائج علاقة فين مع النتائج التجريبية للأطوال الموجية أقل من $4x10^{-6}$ m وتشذ عنها للأطوال الموجية الكبيرة

***رايلي وجينز(باستخدام قوانين الاشعاع الحراري)**

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

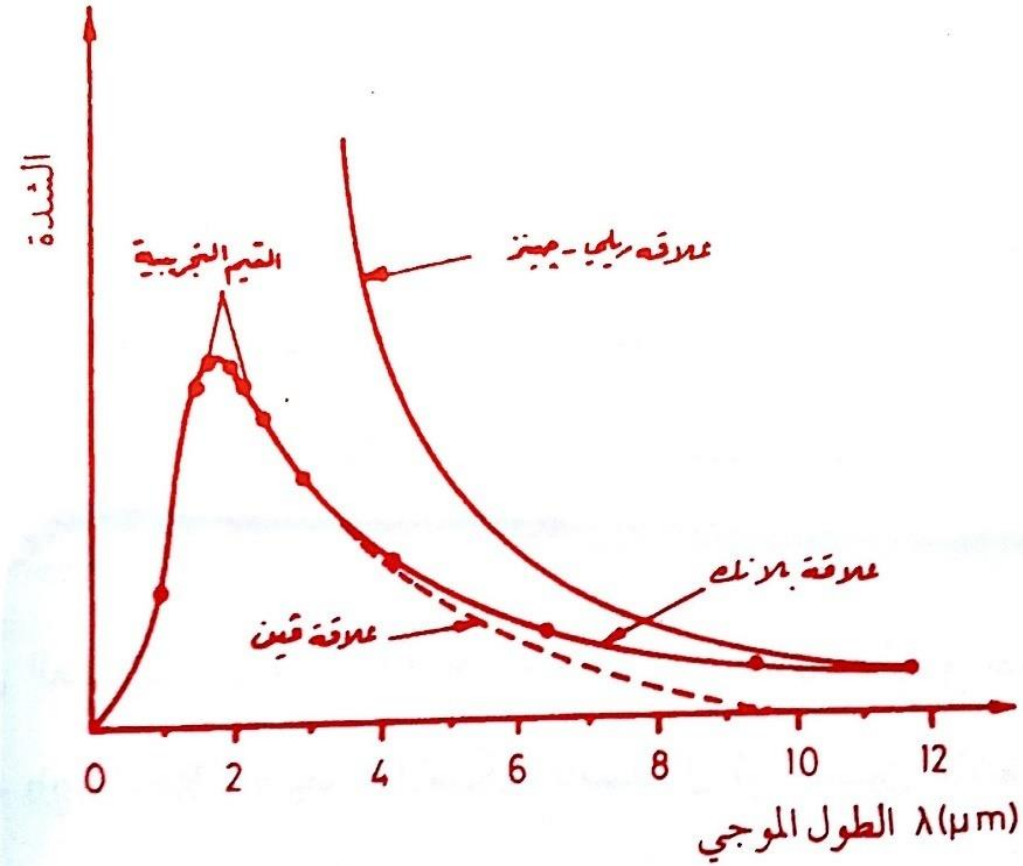
اتفقت نتائج علاقة رايلي وجينز مع النتائج التجريبية للأطوال الموجية الكبيرة وتشذ عنها (أي لا تصلح) للأطوال الموجية اقصيرة،

حيث: عندما تكون $\lambda \to \infty$ I <<<

وسميت بالكارثة فوق البنفسجية

نظرية بلانك الكمية للإشعاع الحراري:

توصل العالم ماكس بلانك (Max Planck) في نهاية 1900 م الى علاقة للإشعاع الصادر من الجسم الأسود تصف بدقة التوزيع الطيفي للإشعاع الحراري وتتطابق مع التجربة عند كافة الاطوال الموجية وهذه العلاقة هي:



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

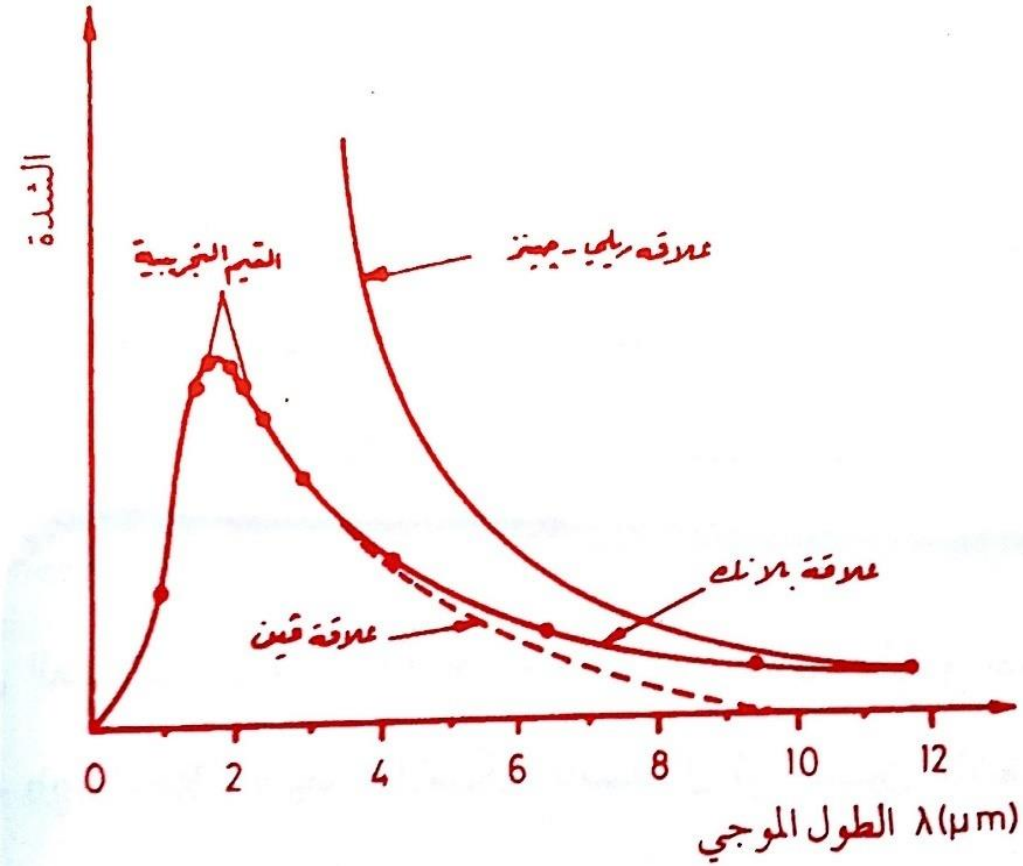
حيث أن A و B ثوابت.

علاقة بلانك:

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

- تؤول علاقة بلانك الى علاقة فين عند الاطوال الموجية القصيرة.
- عند الموجات الطويلة فإن قيمة الحد يمكن كتابتها كالتالي: $e^{B/\lambda T}\approx 1+B/\lambda T+....$

وبالتعويض نلاحظ أن علاقة بلانك تؤول الى علاقة رايلي وجينز عند الموجات الطويلة، حيث أن: C = A/B. ولقد وجد بلانك ان الثابتين A و B يساوييان:

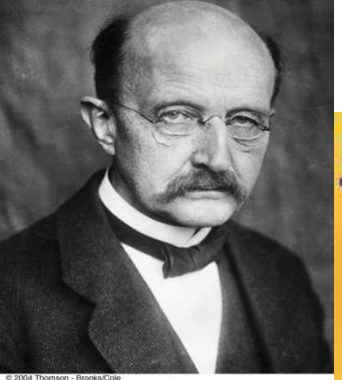


$$A=2\pi hc^2$$

$$B=hc/k$$

حيث أن c هي سرعة الضوء، K ثابت بولتزمان، h ثابت بلانك ويساوي:

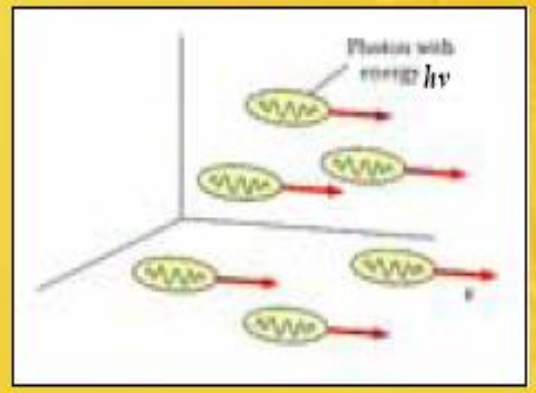
$h = 6.636 \times 10^{-34}$ J.sec


© 2004 Thomson - Brooks/Cole

نظرية بلانك لإشعاع الجسم الأسود Planck's Theory for Black-Body Radiation

وضع بلانك (1900) بعض الافتراضات على أساس النظرية الكمية للإشعاع على النحو التالي:

(1) أن طاقة الإشعاع الكهرومغناطيسي تُبعث أوتُمتص بصورة متقطعة على شكل دفعات من الطاقة ويطلق على دفعات الطاقة هذه بالكمّات (quanta) أو الفوتونات (photons) .
وأن الكمات التابعة لنفس التردد ν للضوء تمتلك نفس الطاقة ، وأن هذه الطاقة E تتناسب مع ν ، أي أن:



$$E=h\nu$$

حيث h مقدار ثابت ($h = 6.6\times10^{-34}$J.s)

(2) أن المهتز أو المتذبذب (الجزيئات) لها مجموعة قيم محددة وممكنة من الطاقة وأن كمية الطاقة المنبعثة أو الممتصة من المتذبذب في الجسم الأسود ترتبط بالإنتقال بين مستويات الطاقة

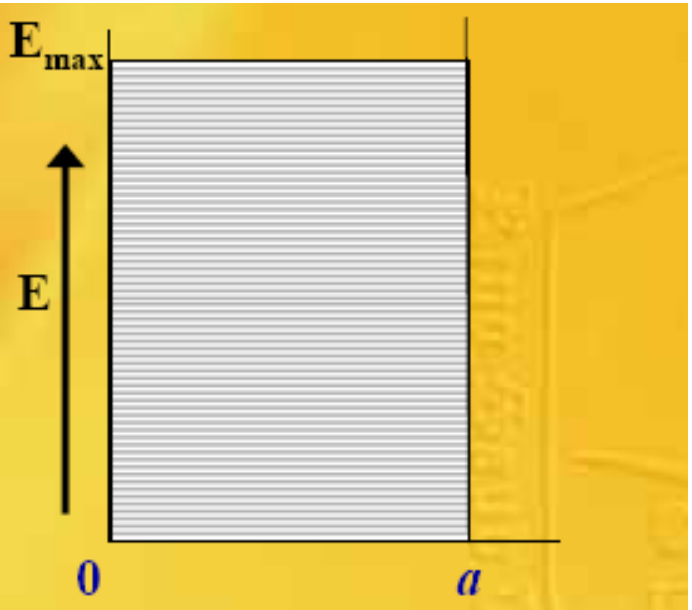
$E_n = nh\nu$

Where *n* is the principle quantum number (n = 0, 1, 2, 3, …….)

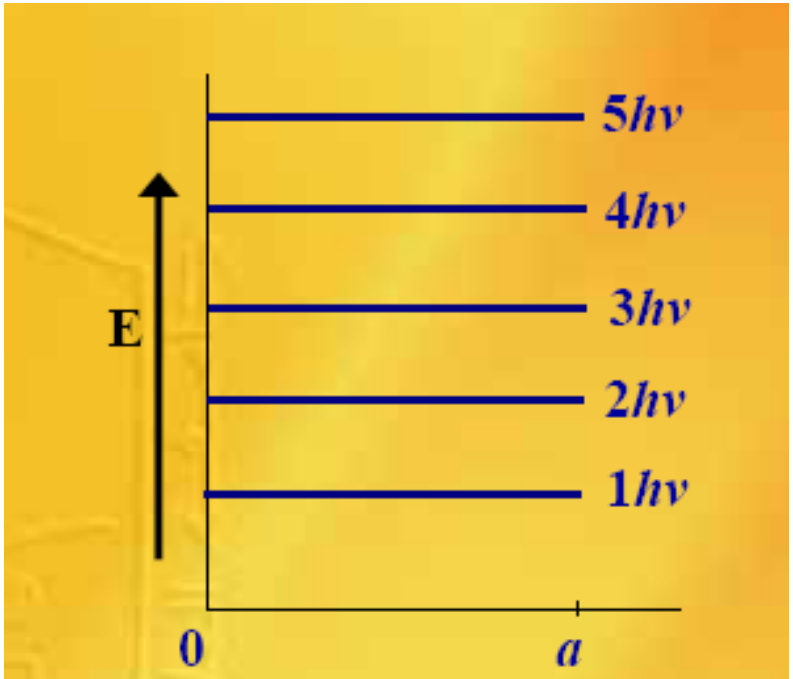
فإذا كانت n=0 يكون المتذبذب في أدنى قيمة له في الطاقة ويسمى *Ground Level* أما إذا كانت n=1 فإن المتذبذب يكون في مستوى طاقة رقم (1) وهكذا ....

يلاحظ أن بلانك ادخل مبدأ التكميم على المتذبذبات في الجسم الأسود وأنها لها طاقات محددة وبقيم محددة بالعدد الكمي n ولا وجود لقيم متصلة للطاقة كما افترض رايلي وجينز.

وعند امتصاص أشعة أو انبعاثها من الجسم الأسود فإن طاقتها تساوي فرق الطاقة بين مستويات الطاقة للمتذبذبات بحيث إن $\Delta E = h\nu$



CLASSICAL THEORY
energy can take any value (continuous range) between 0 and E_{max}

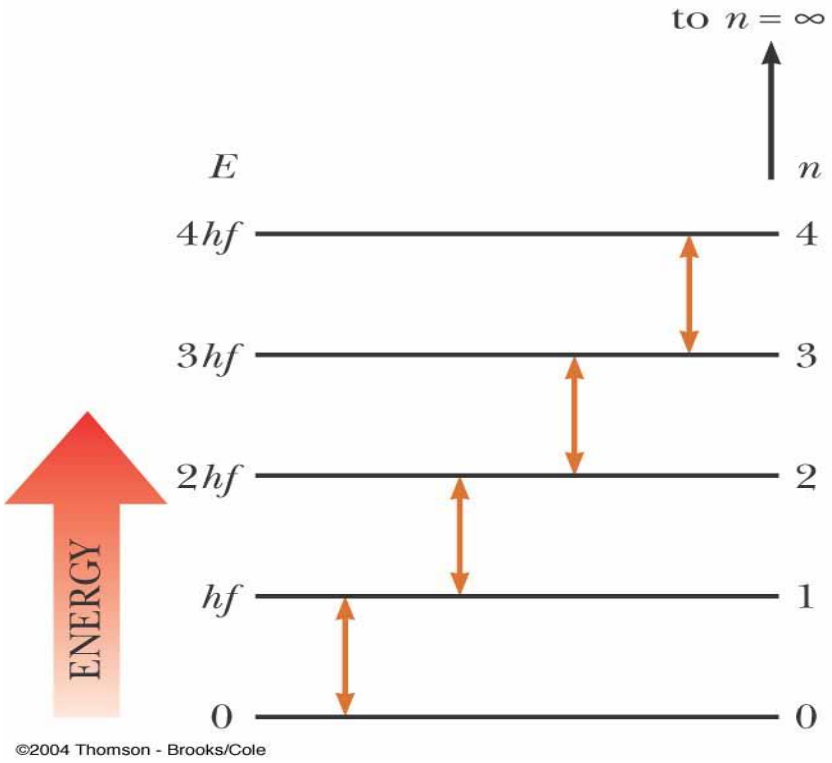


Planck's quantum hypothesis, *E* can take only discrete energy values

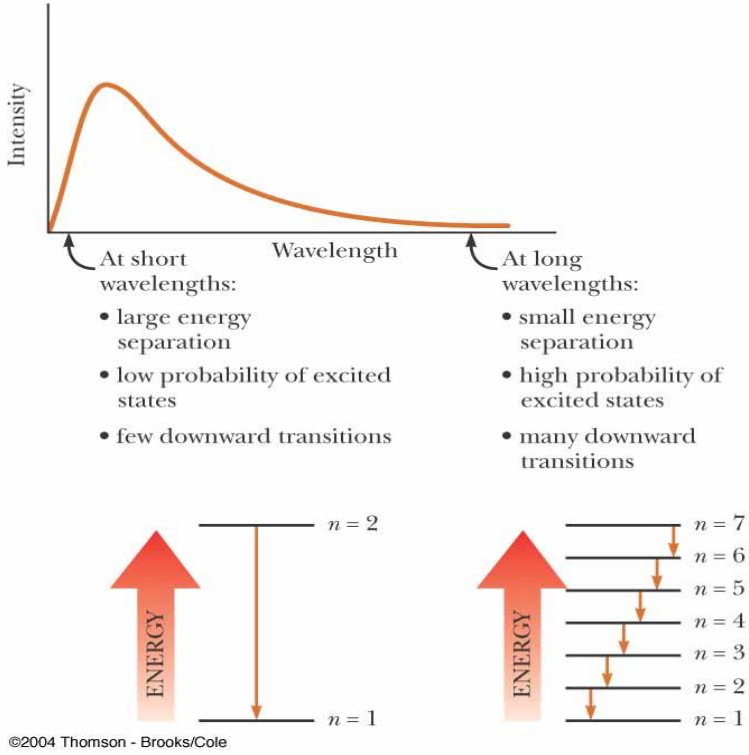
-افترض بلانك ان كل مهتز (الجزيئات والذرات بالمادة) يعمل تذبذبات توافقية بسيطة ويبعث اشعاعات لها طاقات ذات قيم خاصة ومحددة تأخذ القيم (0, hf, 2hf, 3hf,....) أي أن الطاقة النونية E_n للمهتز هي:

$$E_n = nhf \quad , n = 0,1,2,4,....$$

حيث أن n عدد صحيح، و f تردد الجزئ المتذبذب، h ثابت بلانك. والكمية (hf) سميت "كمة" ويقال عندئذ ان طاقة الجزيئات مكممة (quantized)، وتسمى مستويات الطاقة التى يمكن أن يوجد في إحداها النظام الفيزيائي بالمستوى الكمي (Quantum level) ويسمى العدد الصحيح n بالعدد الكمي (quantum number).



©2004 Thomson - Brooks/Cole



©2004 Thomson - Brooks/Cole

مثال 4 ص558: متوسط القدرة المتولدة من الشمس يساوي تقريبا $3.98 \times 10^{26}\ W$ ، وإذا كان متوسط طول الموجات المنبعثة من الشمس $500\ nm$. أحسب عدد الفوتونات المنبعثة في الثانية الواحدة؟

$$\because P(W) = \frac{E(j)}{t(s)} \Rightarrow E = Pt = nhf \Rightarrow n = \frac{Pt}{hf} = \frac{\lambda Pt}{hc}$$

$$\therefore n = \frac{500 \times 10^{-9} \times 3.98 \times 10^{26} \times 1}{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^{8}}$$

$$\therefore n = 1 \times 10^{45}\ photon/\sec$$

مثال 5 ص558: محطة إذاعية تبث برامجها بقدرة **100 kW** وعلى تردد مقداره **150.92 MHz**، كم عدد الفوتونات المنبعثة من برج الإذاعة في الثانية الواحدة؟

$$E = Pt = nhf \Rightarrow n = \frac{Pt}{hf}$$

$$\therefore n = \frac{100 \times 10^{3} \times 1}{6.63 \times 10^{-34} \times 150.92 \times 10^{6}}$$

$$\therefore n = 9.99 \times 10^{29}\ photon/\sec$$

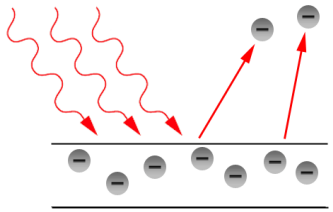
Photo-electric Effect Classical Theory

The **kinetic energy** of the photoelectrons should increase with the light **intensity** and not depend on the light frequency.

Classical theory also predicted that the electrons absorb energy from the beam at a fixed rate. So, for extremely low light intensities, a long time would elapse before any one electron could obtain sufficient energy to escape.

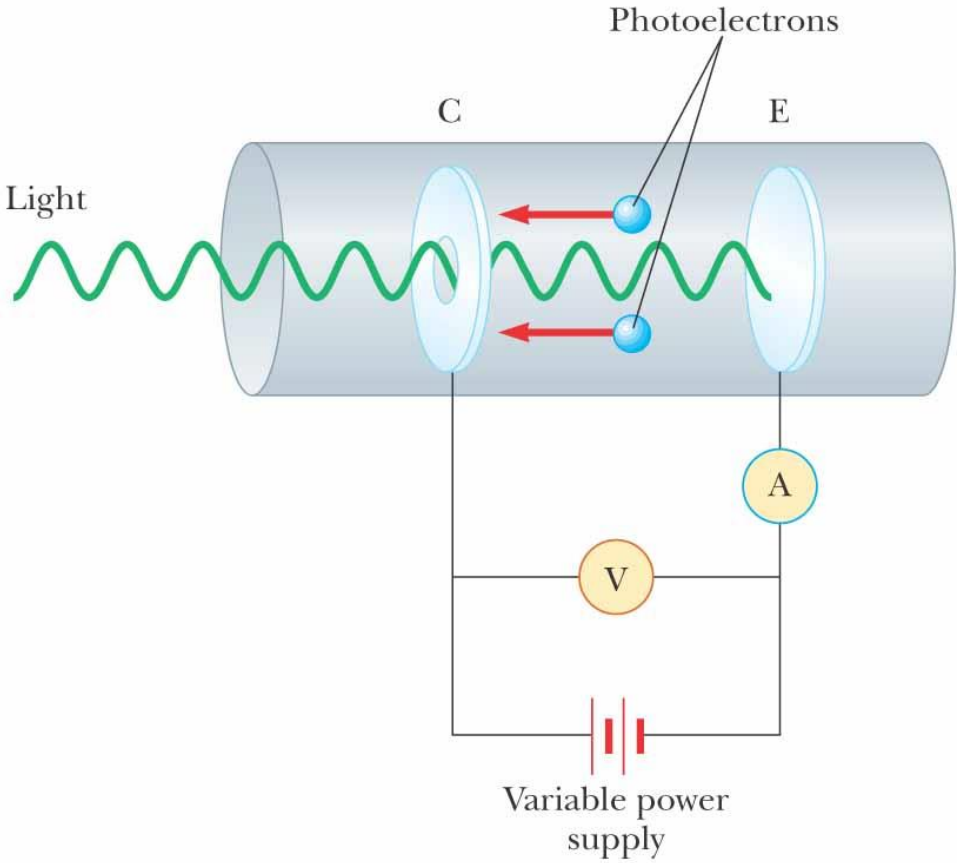
Initial observations by Heinrich Hertz 1887

- اكتشف هيرتز أن سطوع بعض المعادن تبعث جسيمات مشحونة بشحنة كهربائية سالبة اذا اضيئت بضوء ذي لون بنفسجي وسميت هذه الظاهرة بالتأثير الكهروضوئي.
- هذه الجسيمات لم تكن معروفة آنذاك حتى اكتشف تومسون الالكترونات عام 1897 م. لذا فقد عرف لاحقا أن هذه الجسيمات ماهي الا الكترونات سالبة الشحنة، وسميت هذه الالكترونات بالاكترونات الضوئية (Photoelectrons).
- درست هذه الظاهرة بعناية ولم يستطع الفيزيائيون تفسيرها على ضوء الفيزياء الكلاسيكية.



التأثير الكهروضوئي :

- قبل سقوط الضوء على الصفيحة، لا يمر أي تيار كهربي بالدائرة الموضحة بالرسم، عند سقوط الضوء على الصفيحة المعدنية يلاحظ مرور تيار كهربي بالدائرة أي ان هناك شحنات كهربية انتقلت عبر الدائرة.

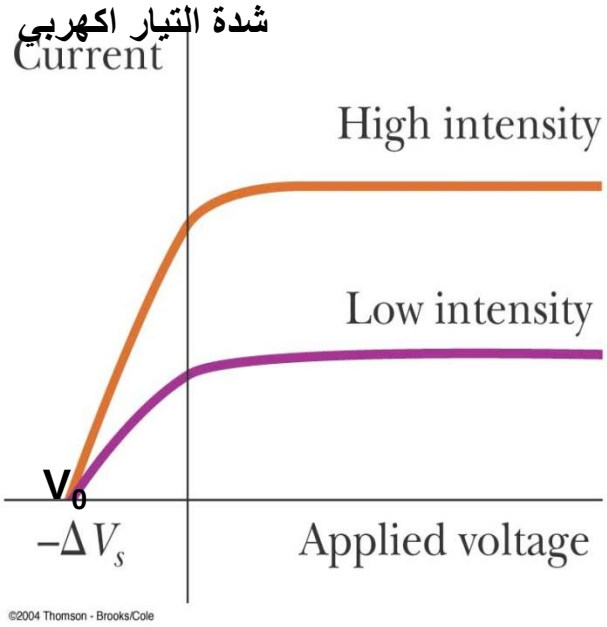


©2004 Thomson - Brooks/Cole

أي أنه؛ عندما سقط ضوء طوله الموجي اكبر من قيمة معينة على سطح صفيحة معدنية فانه يحرر عدد من الالكترونات وتسمى هذه العملية بالظاهرة الكهروضوئية.

- المشاهدات التجريبية:

- عند زيادة شدة الضوء الساقط تزداد شدة التيار الكهربي المار بالدائرة أي يزداد عدد الالكترونات المارة بالدائرة، وكما هو واضح بالشكل فإنه بزيادة فرق الجهد يزداد التيار الكهربي حتى يصل الى قيمة عليا ويعني ذلك ان القطب الموجب قد جمع كل الالكترونات المنبعثة.

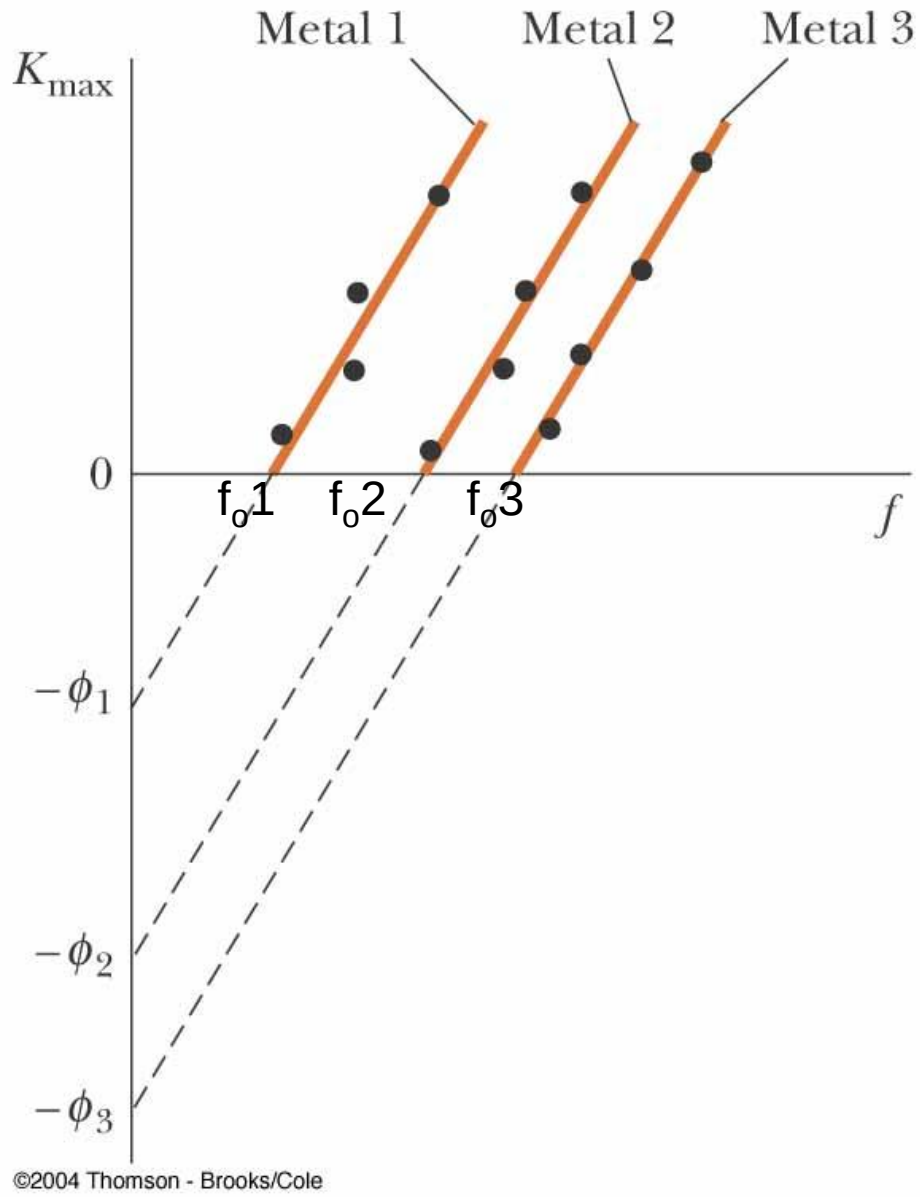


- اذا عكست الاقطاب فإن الالكترونات المنبعثة من E بسبب سقوط الضوء عليها ستتنافر مع الصحيفة C ولن يصل الا تلك الالكترونات التى طاقتها الحركية اكبر من الطاقة الكهربائية (eV). وعندما يكون الجهد على C اقل من او مساوي لقيمة معينة V_o ينقطع التيار تماما ولن يصل الكترونات الى الصحيفة C، ويسمى هذا بجهد الايقاف أو جهد الاعاقة. وتكون القيمة العظمى للطاقة الحركية للالكترونات الضوئية المنبعثة من E هي:

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

- جهد الإيقاف :(V_o) عندما تعكس الأقطاب، هو فرق الجهد الكهربي السالب الذي عنده ينقطع ويتوقف مرور التيار الكهربي تماما بالدائرة ولاتصل أي الكترونات إلى القطب السالب ويكون مساويا أو اقل من جهد معين (V_o) .

- لا يعتمد جهد الإيقاف على شدة الضوء الساقط ولكنه يعتمد على تردد الضوء، حيث انه يزداد بزيادة التردد وذلك يعني انه بزيادة تردد الضوء الساقط تزداد الطاقة الحركية للالكترونات.



©2004 Thomson - Brooks/Cole

-التردد العتبي :(f_o) هو اقل قيمة تردد للضوء، الساقط على سطح الصفيحة المعدنية، اللازمة لانبعاث الكترونات الضوئية. اذا كان تردد الضوء الساقط اقل من التردد العتبي (f_o) لا تنبعث أي الكترونات مهما زادت شدة الضوء. ولكل معدن قيمة للتردد العتبي.

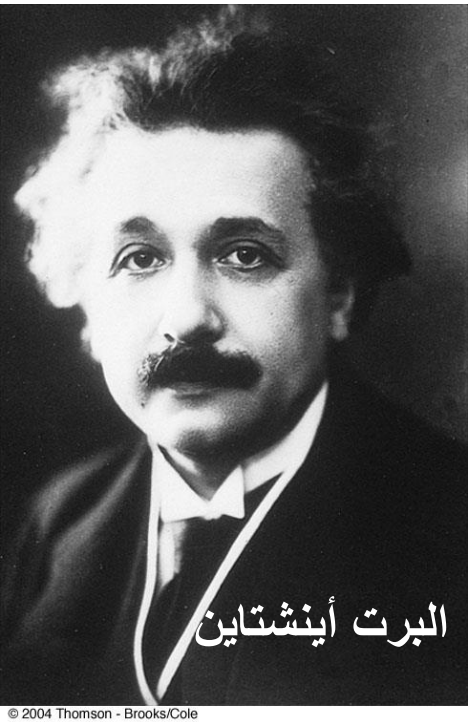
***الخصائص التي حيرت مكتشفيها ولم يتمكنوا من تفسيرها على ضوء قوانين الفيزياء الكلاسيكية:**

-الطاقة القصوى للإلكترونات الضوئية المنبعثة (K_{max}) لا تعتمد على شدة الضوء الساقط،

-لا تنبعث الالكترونات عندما يكون تردد الضوء الساقط اقل من قيمة معينة (f_o) وهي قيمة ثابتة لنوع المعدن المستعمل.

- -طاقة الالكترونات تزداد بزيادة تردد الضوء الساقط.

- -الالكترونات تنبعث تقريبا في نفس اللحظة التي يسقط فيها الضوء على السطح المعدني مهما كانت شدة الضوء.



© 2004 Thomson - Brooks/Cole

النظرية الكمية للضوء والظاهرة الكهروضوئية:

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

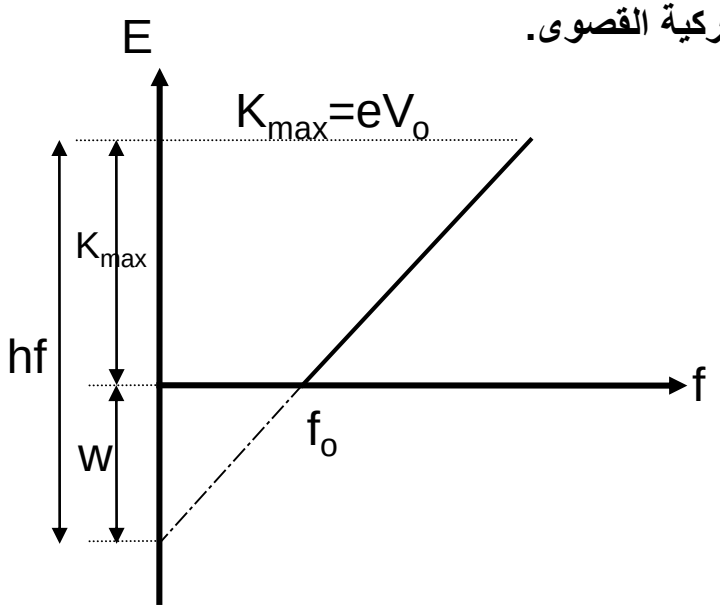
-عند انتقال نظام فيزيائي من مستوى طاقة معين (n) إلى مستوى أدنى (n-1)فانه تنبعث حزمة من الطاقة الكهرومغناطيسية (E) حيث؛

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

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.**

- **في العملية الكهروضوئية تنتقل الطاقة الكلية لفوتون الضوء الساقط الى احد الكترونات المعدن، ويمتص الالكترون طاقة الفوتون ويكتسب طاقة مقدارها hf ويحتاج الالكترون الى طاقة معينة لكي ينفصل عن سطح المعدن مقدارها W وتسمى دالة الشغل للمادة. لذا فإن طاقة الفوتون hf تساوي مجموع دالة الشغل والطاقة الحركية القصوى.**



$$E = hf = W + K_{\max}$$
$$= W + eV_o$$
$$K_{\max} = eV_o = hf - W$$
$$= \frac{1}{2} m_e v^2_{\max}$$

$$V_o = \frac{m_e v^2_{\max}}{2e}$$

حيث:

E طاقة الفوتونات الساقطة

W دالة الشغل للمادة ووحدتها جول أو الكترون-فولت

K_{max} الطاقة الحركية القصوى للالكترونات الضوئية

e شحه الالكترون

V_o جهد الايقاف

v_{max} السرعة القصوى للالكترونات المنبعثة

m_e كتلة الالكترون

W -دالة الشغل للمادة: الطاقة اللازمة لتحرير الكترون من سطح المادة وهى تساوي طاقة الربط للإلكترون

$1\ eV = 1.6 \times 10^{-19}\ j \rightarrow 1.6 \times 10^{-19}\ j/eV$

الكترون-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 اي 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 < W ، ويكون اقل طاقة لتحرير الكترون هى ($hf_o=W$) وحينها تكون الطاقة الحركية للالكترون تساوي صفر (K=0).
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.

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

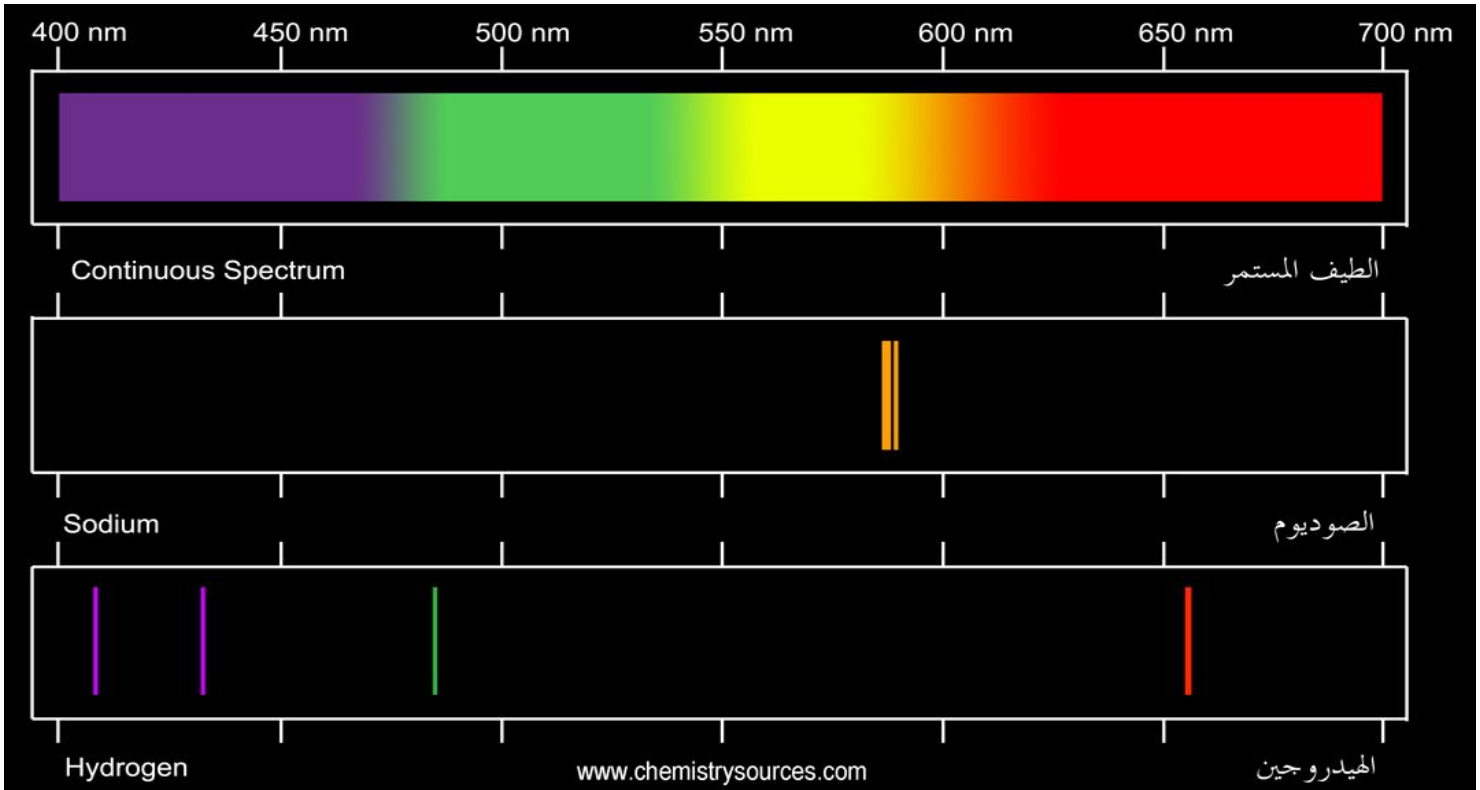
مثال 6 ص558: تيار الالكترونات المنبعثة من خلية كهروضوئية عند سقوط ضوء ذات طول موجي 300 nmينقطع تماما عند جهد ايقاف مقداره0.625 V ، أحسب دالة الشغل (W) لمادة الصفيحة المعدنية بالخلية؟

مثال 7 ص558: دالة الشغل لعنصر البوتاسيوم تساوي 2.24 eV، ا استعمل هذا العنصر في خلية كهروضوئية وأضئ بضوء طول موجته 312.5 nm أحسب الأتى: أ) أعلى طاقة حركية (K_{max}) اللإلكترونات الضوئية المنبعثة. ب) الجهد الكهربي الذي ينقطع عنده التيار. ج) الطول الموجي للضوء الساقط الذي يتوقف عنده انبعاث اللإلكترونات من الخلية.

الاطياف الخطية: Line Spectra

- تمت دراسة أطياف العناصر ووجد أن لها أطياف خطية مميزة لكل عنصر ذات أطوال موجية محددة.

- تركزت معظم الدراسات على غاز الهيدروجين، فعند مرور تيار كهربائي خلال الغاز فإنه ينبعث ضوء، إذا مر هذا الضوء خلال منشور أو محزوز حيود تتكون منه خطوط طيفية مختلفة لكل منها طول موجي محدد، ويميز ذرة الهيدروجين 4 خطوط مرئية ذات اطوال موجية هي: 656.3 nm, 486.1 nm, 434.1 nm, 410.2 nm



الاطياف الخطية: Line Spectra

- ومن هذه الاطوال الموجية استطاع عالم الرياضيات السويسري بالمر (Balmer) وضع معادلته التجريبية لحساب تلك الاطوال الموجية وكانت هذه المعادله هي:

$$\lambda_m = 364.56\frac{m^2}{m^2-4}$$

حيث m عدد صحيح ويساوي: m= 3,4,5,6,.... وتسمى هذه المعادلة بمعادلة بالمر، وخطوط الطيف المرئية لهذه المعادلة تسمى متسلسلات بالمر (Balmer Series).

- كما وضع رايدبرج (Rydberg) معادلة شبيهة ويمكن كتابتها لذرة الهيدروجين كالتالي:

$$\frac{1}{\lambda_m} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2}\right), m = 3,4,5,6,...$$

حيث أن R يسمى ثابت ريدبرج ويساوي: $R=1.09737\times10^7\ m^{-1}$

الاطياف الخطية: Line Spectra

- لقد اكتشفت متسلسلات اخرى للهيدروجين مشابهة لمتسلسلة بالمر ولكنها للاطياف غير المرئية، ومن هذه المتسلسلات:

$$\frac{1}{\lambda_m} = R\left(1 - \frac{1}{m^2}\right), \; m = 2,3,4,\ldots$$ متسلسلة ليمان (Lyman Series)

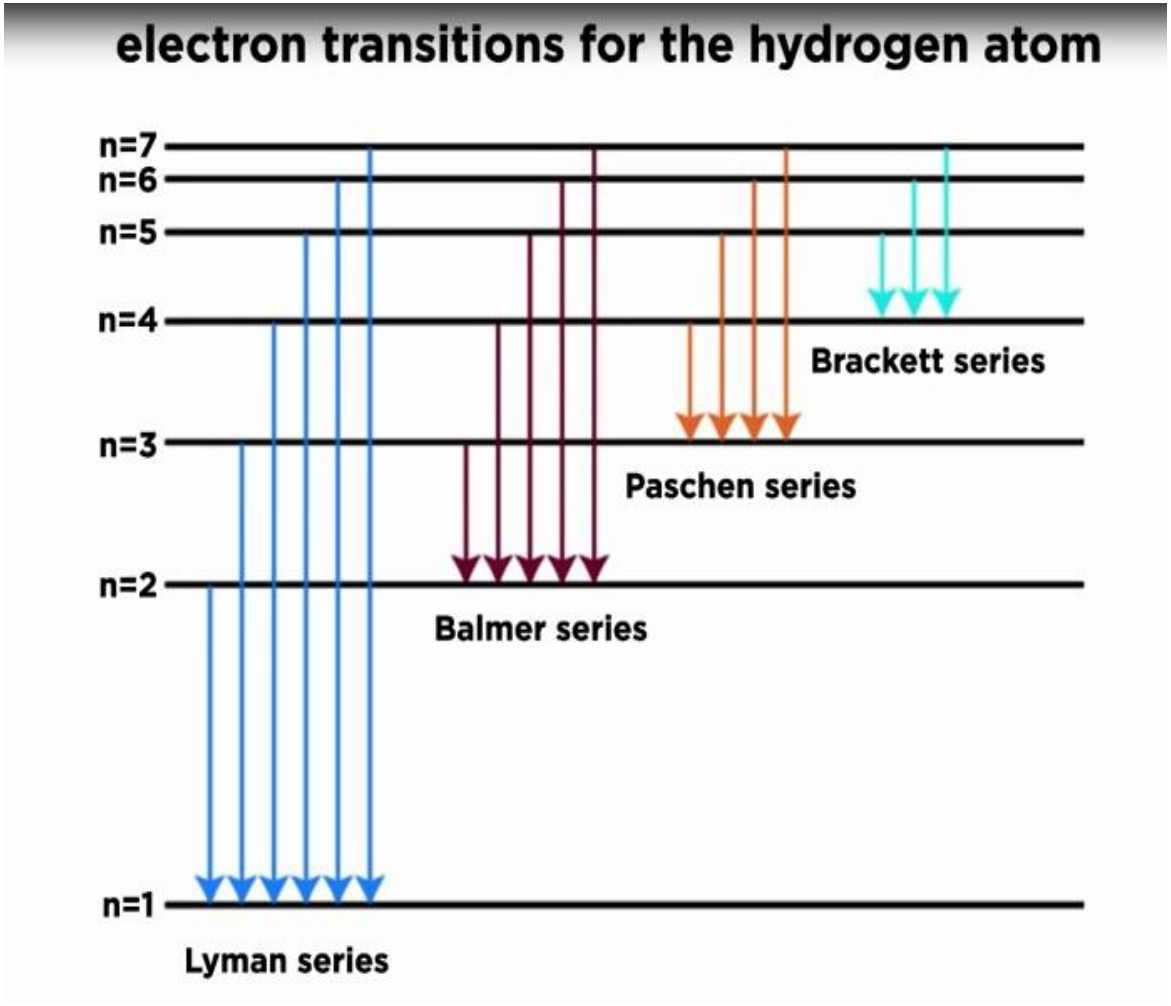
$$\frac{1}{\lambda_m} = R\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{m^2}\right), \; m = 4,5,6,\ldots$$ متسلسلة باشن (Paschen Series)

$$\frac{1}{\lambda_m} = R\left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{m^2}\right), \; m = 5,6,7,\ldots$$ متسلسلة براكت (Brackett Series)

الاطياف الخطية: Line Spectra

حسب نموذج بوهر، فإن المتسلسلات الطيفية لذرة الهيدروجين تنتج عن طريق انتقال الالكترونات من مدارات مختلفة.

فالبنسبة لمتسلسلة ليمان تكون $n_f = 1$ ولمتسلسلة بالمر $n_f = 2$ ومتسلسلة باشن $n_f = 3$.



مثال 10 ص 559: أحسب اقل قيمة للطول الموجي للفوتون المنبعث في متسلسلة بالمر في ذرة الهيدروجين ($n_f = 2$).

مثال 11 ص 559: أحسب اكبر قيمة للطول الموجي للفوتون المنبعث في متسلسلة بالمر في ذرة الهيدروجين.

إنتاج أشعة اكسX-Ray Production

- **في الظاهرة الكهروضوئية كان سقوط فوتون على سطح معدن يؤدي إلى تحرير إلكترون، ولكن في عملية إنتاج أشعة اكس يحدث العكس حيث أن جزء من طاقة حركة الإلكترون تتحول إلى فوتون هو أشعة اكس. ولهذا فإن عملية إنتاج أشعة اكس عكس الظاهرة الكهروضوئية .**

- **اكتشفت هذه الظاهرة بواسطة العالم الالماني رونتجن (Roentgen) عام 1895م أي قبل بداية الفيزياء الكمية واكتشاف قوانين الكم لبلانك بحوالي خمس سنوات.**

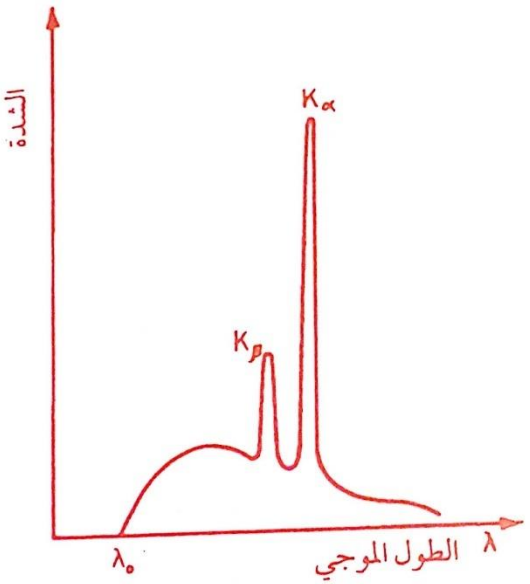
- **لاحظ ان هناك اشعاعات قوية تخترق المواد تنبعث عند تصادم الكترونات سريعة على هدف من مادة معدنية ثقيلة، ولعدم معرفته بطبيعتها وخواصها وسبب انبعاثها فقد أسماها الاشعة السينية (المجهولة) (X-Ray).**

- **عرف بعد ذلك طبيعة هذه الاشعة بأنها موجات كهرومغناطيسية أطوالها الموجية قصيرة في حدود (0.01-10 nm).**

-كيف تتحول طاقة حركة الإلكترون إلى فوتون ؟

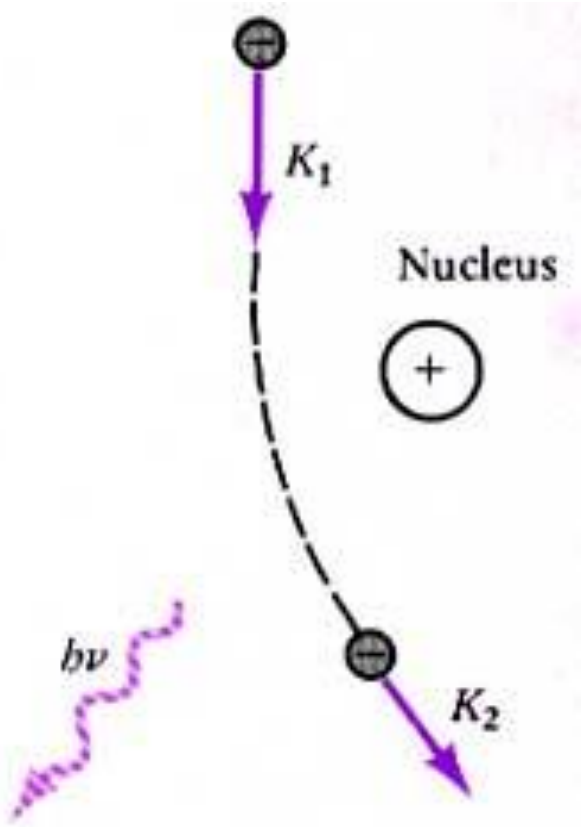
يتكون طيف الاشعة السينية من طيف مستمر وطيف خطي، فالطيف المستمر والذي يبدأ من طول موجي معين (λ_o) يكون سببه (حسب النظرية الكلاسيكية) أن الالكترونات عند تعجيلها الى سرعات عالية تكتسب طاقة حركية K ثم تصتدم بالهدف وتنفذ داخلة، ويغير مسارة نتيجة لقوى الجذب بينها وبين نواة الذرة وقوى تنافر بينها وبين الكترونات الذرة. ونتيجة لذلك فإن الالكترون يعاني من تباطؤ وتقل طاقته الحركية الى K_2 وينتج عن ذلك اشعاعات كهرومغناطيسية لها ترددات مختلفة حسب العلاقة التالية:

$$K = K_2 + X\text{-ray}$$



شكل (١٢-١٣) : 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.

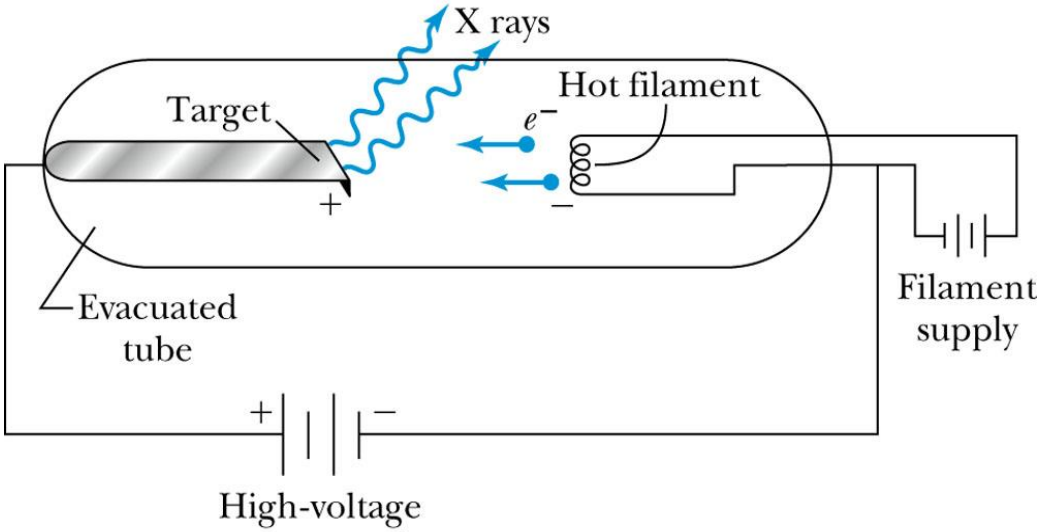
في حين ان التوقف الفجائي للإلكترون المعجل عند اقترابه من النواة ينتج عنه تباطؤ كبير، وتسمى الاشعاعات الناتجة من هذه الظاهرة بإشعاع التوقف أو اشعاع الفرملة.



حيث تكون طاقة حركة الإلكترون في قبل التصادم Ek_1 وبعد التصادم تصبح Ek_2 نتيجة لانطلاق فوتون طاقته hf.

$$Ek_1 - Ek_2 = hf \qquad (1)$$

*إنتاج أشعة اكس



تعتمد فكرة جهاز إنتاج أشعة اكس على توفير مصدر الكتروني ليتم تعجيله بواسطة فرق جهد كبير لتصطدم بالهدف وهو عبارة عن معدن ثقيل مثل النحاس أو المولبدنيم. يمر التيار الكهربي في الفتيلة لتسخن الكاثود(القضب السالب) فتنطلق منه الالكترونات (انبعاث حراري) في اتجاه الهدف (T) Target تحت تأثير فرق جهد يصل إلى 30000 فولت في داخل أنبوبة مفرغة لمنع اصطدام الالكترونات المعجلة في جزيئات الهواء. تصطدم الالكترونات في الهدف T (لأنود) بطاقة حركة تعطى من المعادلة :

$$Ek = eV \quad (2)$$

حيث أن e شحنة الإلكترون و V فرق جهد التعجيل المطبق بين الكاثود والأنود

-بعد عدة تصادمات للإلكترون بسطح الهدف فإنها تتباطئ تدريجياً لتصل في النهاية إلى سرعة صفر وفي كل مرة تحدث فيها تصادم ينتج فوتون بطاقة تساوي الفرق في طاقة حركة الإلكترون قبل وبعد التصادم كما توضحه المعادلة (1). في حالة خاصة قد يحدث أن تفقد كامل طاقة حركة الإلكترون باصطدامه بسطح الهدف فإن من المعادلة (1) يصبح

$$Ek_1 = eV \quad \& \quad Ek_2 = 0$$

وهنا ينتج فوتون بأكبر طاقة ممكنة

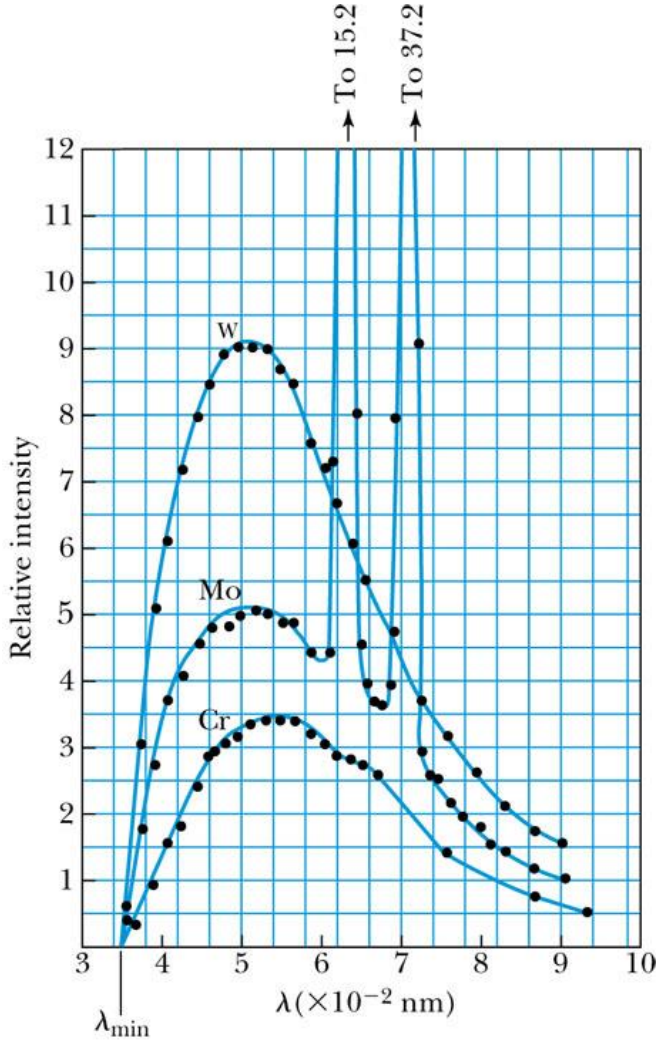
$$eV = Ek = hf_{max} \qquad (3)$$

حيث أن f_{max} هي اكبر تردد لفوتون أشعة اكس الناتج. لاحظ هنا ان المعادلة (3) تعطي أقصى طاقة للفوتون والذي يعتمد على فرق جهد التعجيل وعلى ان يفقد الالكترون المعجل كامل طاقته في تصادم واحد. وتجدر الإشارة إلى أن هناك جزء من طاقة الإلكترون يفقد على شكل طاقة حرارية أو أن الإلكترون يحدث أكثر من تصادم واحد مع الهدف لذا فإن هناك توزيع طيفي للأشعة اكس الناتجة ولكن أقصى تردد يعطى بالعلاقة التالية :

$$Ek = hf_{\max} = \frac{hc}{\lambda_{\min}} = eV$$

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{e}\frac{1}{V_0} = \frac{1.240\times10^{-6}\ \mathrm{V\cdot m}}{V_0}$$

طيف أشعة اكس



- يتكون طيف أشعة اكس من طيف متصل continuous spectrum وطيف خطي Line spectrum
- الطيف المتصل له قيمة عظمى عند nmax وهذه القيمة تعتمد على فرق جهد التعجيل .
- الطيف الخطي والمتمثل في الخطين الموضحين في الشكل لا يعتمدان على فرق جهد التعجيل إنما على مادة الهدف لذا يعتبر الطيف الخطي لأشعة اكس وسيلة للتعرف على نوع مادة الهدف .

- **تفسير الطيف الخطى للأشعة السينية؛**

- **عند تصادم الالكترون المعجل بالإلكترون مداري للذرة فإنة يكتسب الطاقة اللازمة لتحريره من مدارة ليترك فراغا بالمدار وعندها يتحرك الكترون من مدار ذات مستوى طاقة أعلى (E_f) لملئ الفراغ فى المدار الأدنى(E_i) ،**

- **يصاحب انتقال الالكترون من المدار ذات الطاقة الأعلى (Ef) إلى الأدنى (Ei) انبعاث فوتون طاقته ΔE**

$$\Delta E = E_f - E_i = hf = h\frac{C}{\lambda}$$

$$\because E_n\,(eV) = -\frac{13.6}{n^2}\,Z^2$$

$$\therefore \frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right) Z^2$$

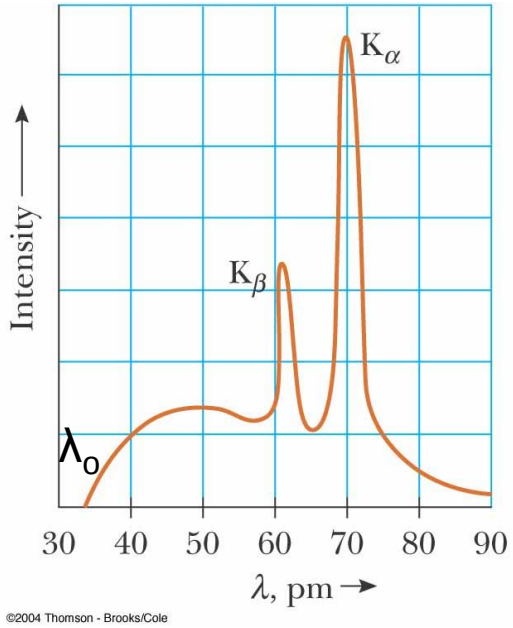
كمثال لذلك العدد الذري Z $\longrightarrow Z = 42 \quad \rightarrow \lambda_{2\rightarrow 1} = 0.069\ \ nm$

في حدود الطول الموجي للأشعة السينية

- عند انتقال الكترون من المدار الثاني L إلى المدار الاول K فانه يعطى الطيف الخطي المميز Kα وعند انتقال الكترون من المدار الثالث M إلى المدار الأول K فانه يعطى الطيف الخطي K_B وعلى ذلك فإن طول موجة (K_B) أصغر من طول موجة (Kα).
- وحيث أن هذه الخطوط تعتمد على العدد الذري Z، فإن كل عنصر له طول موجة خاص به عند تلك الخطوط المميزة.
- ووجد تجريبيا؛

$$\frac{1}{\lambda_\alpha} = \frac{3}{4} R (Z_{eff})^2$$

العدد الذري الفعال $Z_{eff} = Z - 1$ ⟶



مثال 12 ص 559: أحسب أقصر طول موجي لطيف الأشعة السينية المنبعثة عند استعمال جهد كهربي لتعجيل اللالكترونات مقداره **18750 v** ؟

$$\lambda_0 = \frac{1.24X10^{-6}}{V} \quad (m)$$

مثال 13 ص 559: الطول الموجي λα لخط الطيف المميز Kα لعنصر يساوي **0.07228 nm** ، احسب العدد الذري لهذا العنصر؟

$$\frac{1}{\lambda_\alpha} = \frac{3}{4} R (Z_{eff})^2$$

$$Z_{eff} = Z - 1$$