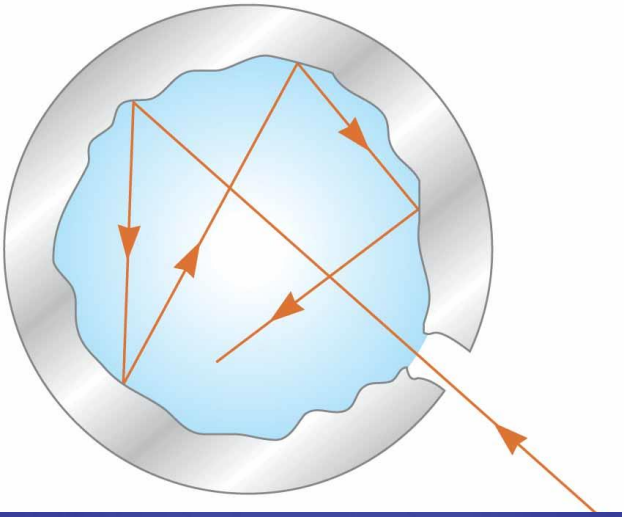
النظرية الكمية للضوء The quantum theory of light

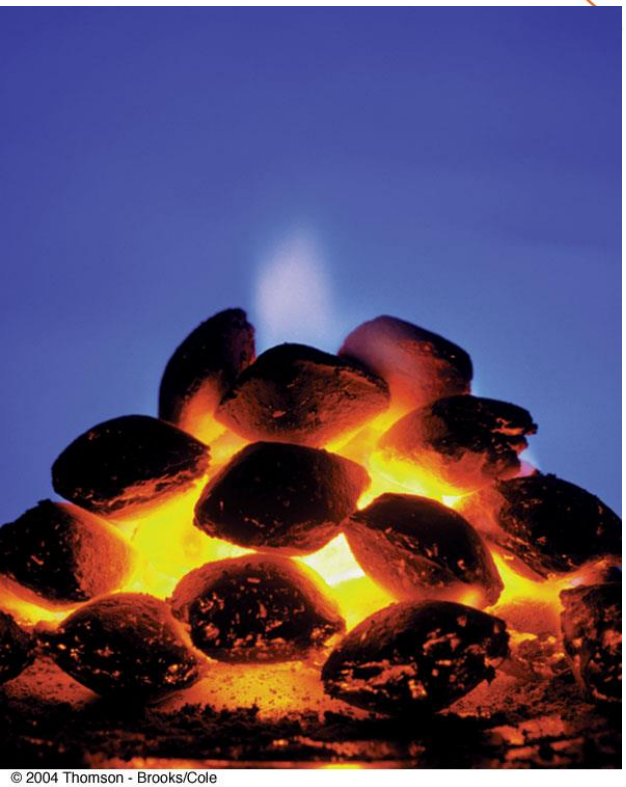
لم تستطع الفيزياء الكلاسيكية ونظرية موجية الضوء تفسير العديد من الظواهر الفيزيائية، وسنتناول منها:

- طيف أشعة الجسم الأسود
- التأثير الكهروضوئي
- طيف أشعة إكس

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

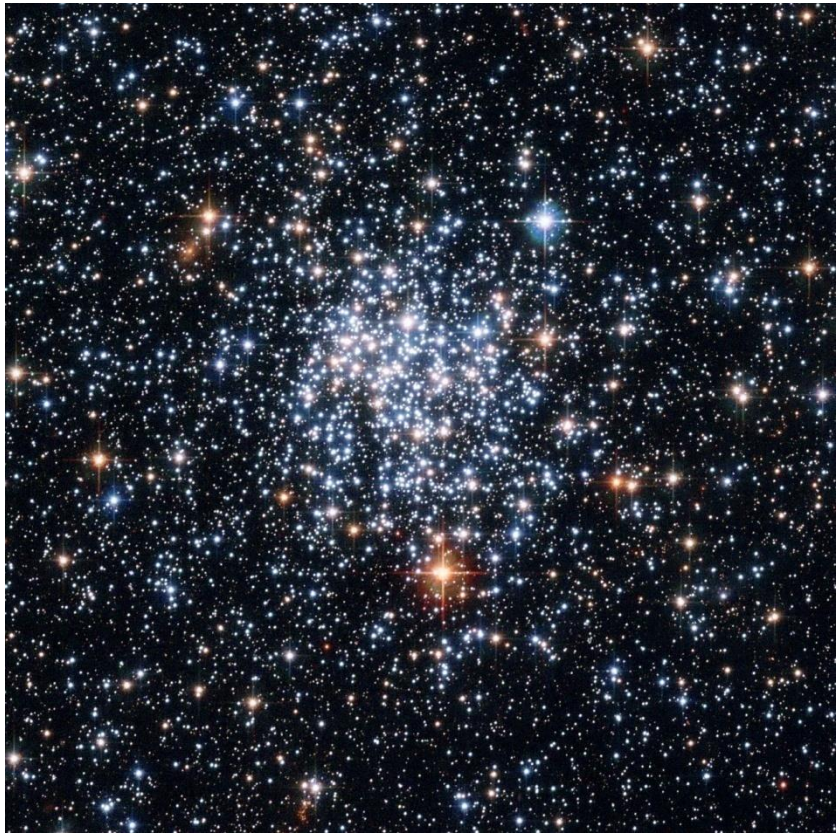
© 2004 Thomson - Brooks/Cole

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.

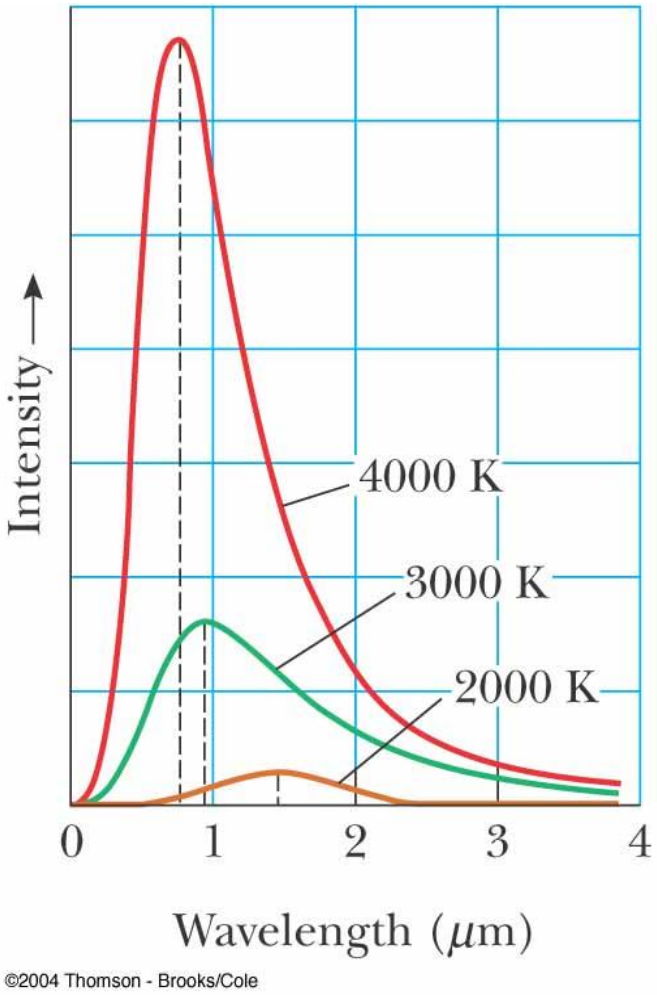
النظرية الكمية للضوء The quantum theory of light

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 (3000 كلفن).



•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).

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

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

$$\lambda_1 T_1 = \lambda_2 T_2$$

النظرية الكمية للضوء The quantum theory of light

طيف أشعة الجسم الأسود

- تعطي معادلة فين Wien للإزاحة الطول الموجي المناظر لأقصى سطوع للضوء:

$$\lambda_{max} = \frac{0.3x10^{-2}}{T} \quad meter$$

- حيث تقاس درجة الحرارة بالكلفن

مثال ١ ص٥٥٧: درجة حرارة جسم الإنسان الخارجية تكون في حدود 35^oC ، 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 ٢ ص٥٥٧: أعلى شدة للموجات الضوئية المنبعثة من الشمس هى للون الأصفر-البرتقالي وطوله الموجي **500 nm** ، أحسب درجة حرارة الشمس بالدرجات المئوية؟

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

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

مثال ٤ ص٥٥٨: متوسط القدرة المتولدة من الشمس يساوي تقريبا 3.98×10^{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 ٥ ص٥٥٨: محطة إذاعية تبث برامجها بقدرة100 kW وعلى تردد مقداره 150.92 MHz، كم عدد الفوتونات المنبعثة من برج الإذاعة في الثانية الواحدة؟

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

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

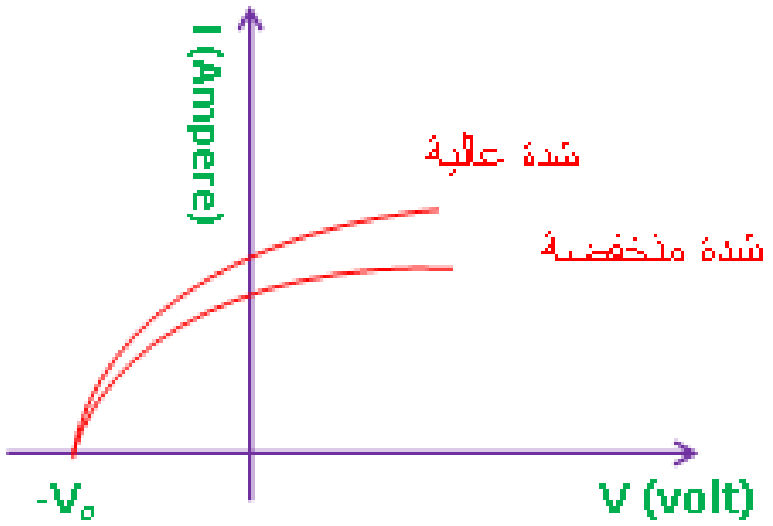
$$\therefore n = 9.99 \times 10^{29}\ photon/\sec$$

The quantum theory of light النظرية الكمية للضوء

الظاهرة الكهروضوئية

اكتشف هيرتز في عام ١٨٨٧م أن سطوح بعض المعادن تبعث جسيمات مشحونة بشحنة كهربية سالبة (سُميت لاحقا باسم **إلكترونات ضوئية**) إذا أُضيئت بضوء بنفسجي.

ولوحظ أن التيار الكهربي الناشئ من الإلكترونات الضوئية يزداد مع زيادة شدة الضوء الساقط على الخلية الكهروضوئية.



The quantum theory of light النظرية الكمية للضوء

الظاهرة الكهروضوئية

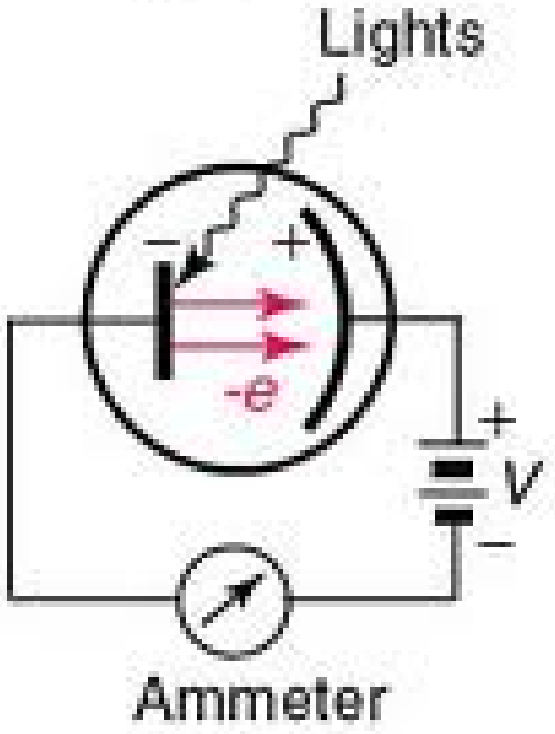
فكرة الخلية الكهروضوئية

كرة زجاجية مفرغة.

يسقط الضوء على المعدن المتصل بالقطب السالب للبطارية.

تنطلق الإلكترونات المتحررة من المعدن باتجاه القطب الموجب

مسجلة تيارا يقاس عن طريق الأميتر.



The quantum theory of light النظرية الكمية للضوء

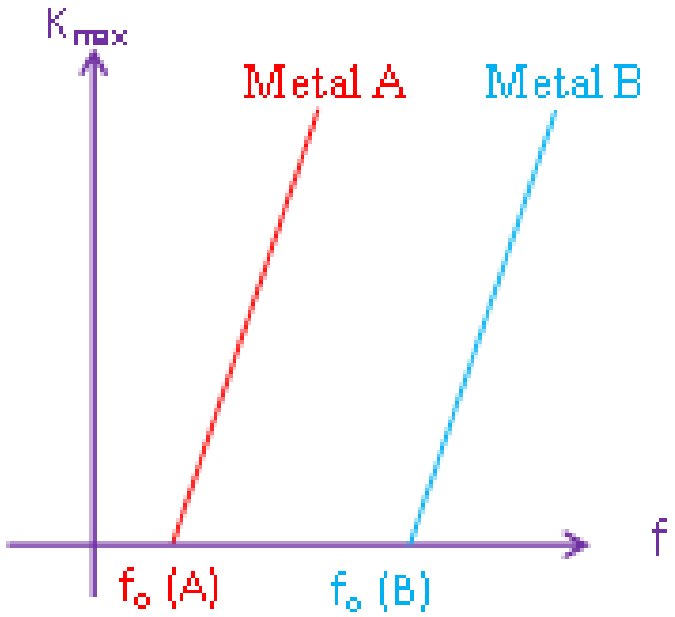
الظاهرة الكهروضوئية

عجزت النظرية الكلاسيكية آنذاك من تفسير بعض خصائص الظاهرة الكهروضوئية وهي:

١. لا تنبعث الإلكترونات الضوئية إلا إذا كان تردد الضوء الساقط لا يقل عن قيمة محددة هي f_o تسمى تردد العتبة. وكل معدن له قيمة محددة لـ f_o حتى تنبعث الإلكترونات منه.

٢. طاقة الإلكترونات لا تعتمد على شدة الضوء الساقط وإنما على تردده فقط، فتزداد مع زيادته.

٣. تنبعث الإلكترونات آنيا بسقوط الضوء على المعدن.



The quantum theory of light النظرية الكمية للضوء

الظاهرة الكهروضوئية

- عندما يكون الجهد على القطب السالب للخلية أقل من قيمة معينة V_o (جهد الإيقاف) ينقطع التيار تماما. وأقصى طاقة حركية للإلكترونات عندها:

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

- جهد الإيقاف V_o لا يعتمد على شدة الضوء الساقط.

The quantum theory of light النظرية الكمية للضوء

الظاهرة الكهروضوئية

- علاقة إينشتاين في تفسير الظاهرة الكهروضوئية:

$$E = hf = W + k_{max}$$

حيث أن الضوء الساقط عبارة عن فوتونات لها طاقة تعتمد على تردد الضوء، h هو ثابت بلانك. ولكي ينطلق الإلكترون من ذرته الأم لابد أن يكتسب من الفوتون طاقتين هما:

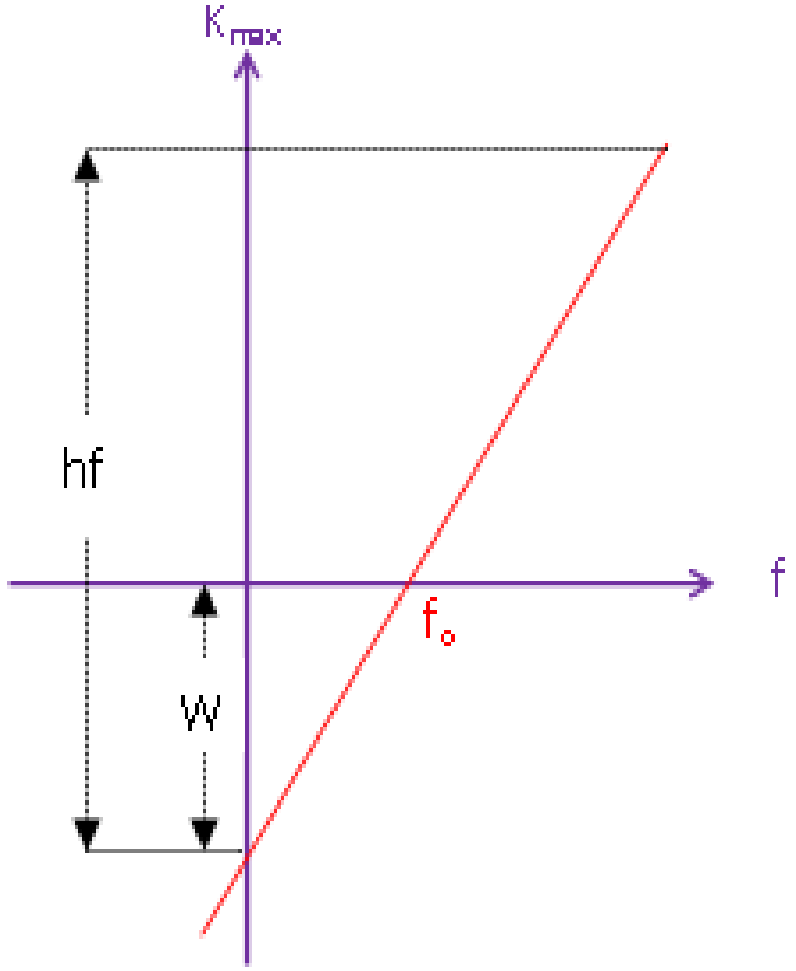
طاقة تنزعه من سطح المعدن تسمى طاقة الشغل **W** و طاقة حركية قصوى K_{max} تمكنه من الإنطلاق.

The quantum theory of light النظرية الكمية للضوء

الظاهرة الكهروضوئية

أقل طاقة لتحرير الإلكترون من المعدن فقط وبدون إعطائه طاقة حركية؛ أي أن K_{max} تساوي صفر تعطى بالعلاقة:

$$hf_o = W + 0$$



مثال ٦ ص٥٥٨: تيار الالكترونات المنبعثة من خلية كهروضوئية عند سقوط ضوء ذات طول موجي 300 nm ينقطع تماما عند جهد ايقاف مقداره 0.625 V ، أحسب دالة الشغل (W) لمادة الصفيحة المعدنية بالخلية؟

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

$$= eV_0 + W$$

$$\therefore W = hf - eV_0$$

$$= \frac{hc}{\lambda} - eV_0$$

$$= \frac{6.626 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^{8}}{300 \times 10^{-9}} \text{ Joul} - 1.6 \times 10^{-19} \times 0.625 \text{ J}$$

$$= 5.626 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$= \frac{5.626 \times 10^{-19} \text{ J}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV}} = 3.51625 \text{ eV}$$

مثال ٧ ص٥٥٨: 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.

a) $W = 2.24\ eV$, $\lambda = 312.5\ nm$

$$K_{max} = \frac{hc}{\lambda} - W = \frac{6.626\times10^{-34}\times3\times10^{8}}{312.5\times10^{-9}\times1.6\times10^{-19}} - 2.24\ eV$$

$$3.9756 - 2.24 = 1.7356\ eV$$

b) $eV_0 = K_{max} = 1.7356\ eV$

$$\therefore V_0 = \frac{1.7356\times1.6\times10^{-19}\ J}{1.6\times10^{-19}\ C} = 1.7356\ Volts$$

c) $hf = K_{max} + W$

$$\therefore hf_0 = 0 + W$$

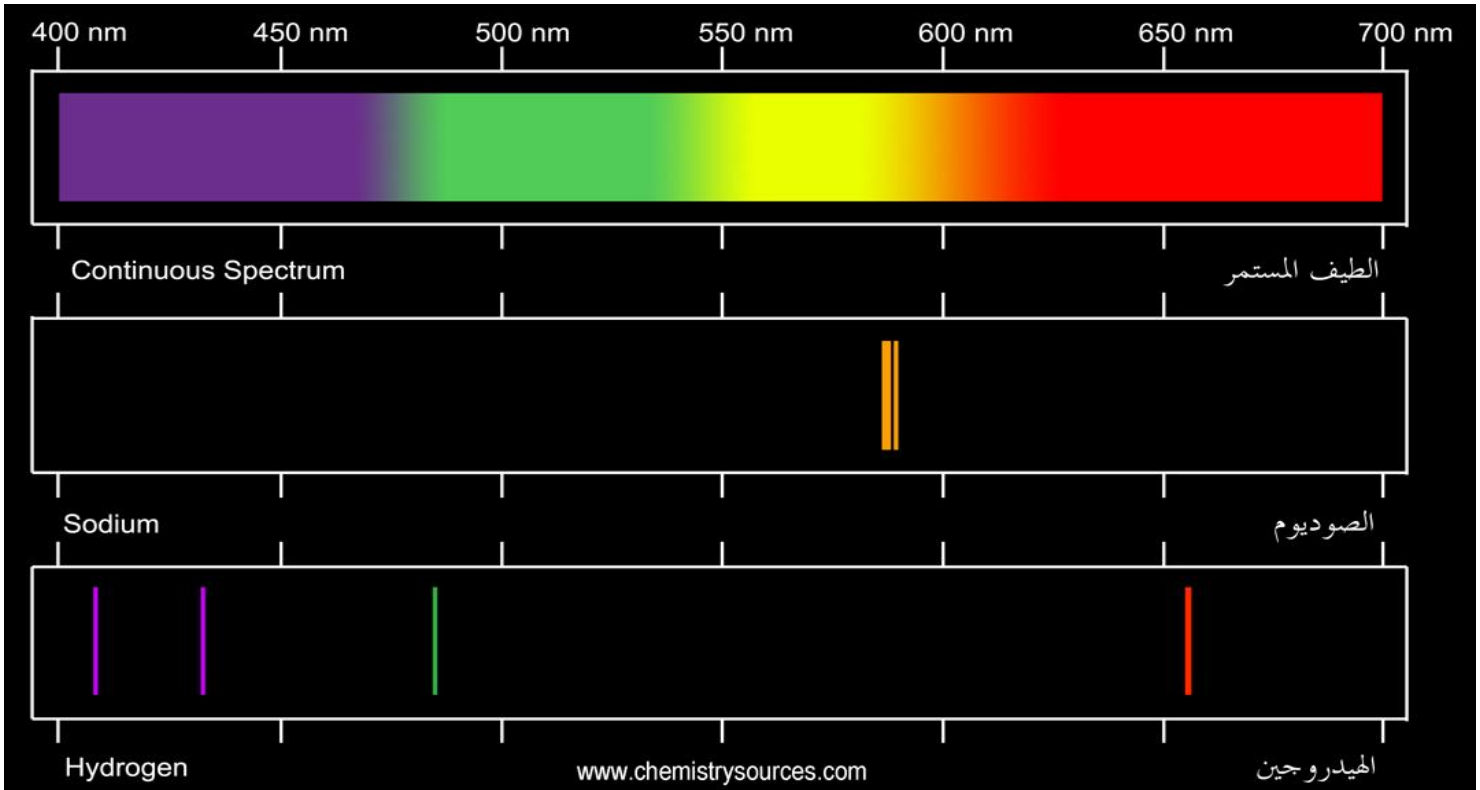
$$\therefore f_0 = \frac{W}{h} = \frac{c}{\lambda_0}$$

$$\therefore \lambda_0 = \frac{hc}{W} = 554.63\ nm = \frac{6.626\times10^{-34}\times3\times10^{8}\ m/s}{2.24\times1.6\times10^{-19}\ J} = 5.5463\times10^{-7}$$

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 ٤ 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)

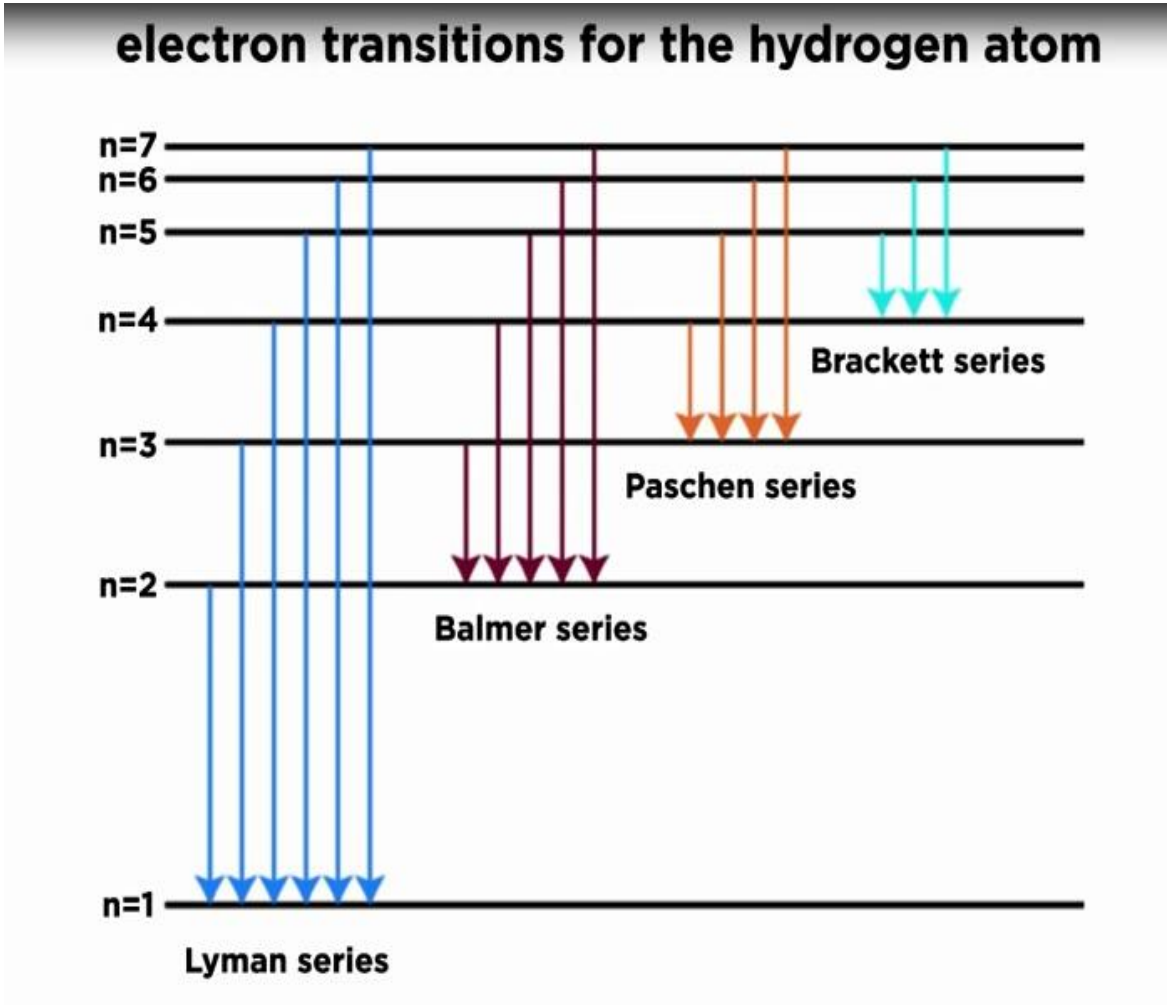
$$\frac{1}{\lambda_m} = R\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{m^2}\right), \; m = 4,5,6,\ldots$$ متسلسلة باشن (Paschen Series)

$$\frac{1}{\lambda_m} = R\left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{m^2}\right), \; m = 5,6,7,\ldots$$ 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 $n_f = 3$ و متسلسلة براكت $n_f = 4$.



مثال ١٠ ص ٥٥٩: أحسب اقل قيمة للطول الموجي للفوتون المنبعث في متسلسلة بالمر في ذرة الهيدروجين ($n_f = 2$).

من معادلة بالمر:

$$\lambda_m = 364.56 \frac{m^2}{m^2-4} \quad (nm) \qquad [m = 3, 4, 5 \ldots, \infty]$$

تكون أقل قيمة للطول الموجي عندما $m \to \infty$ أي عندما:

$$\lambda_\infty = 364.56 \times 1 = 364.56 \quad nm$$

OR

$$\frac{1}{\lambda_m} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2}\right) = 1.09737 \times 10^7 \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{\infty}\right)$$

$$\Rightarrow \lambda_m = 3.645 \times 10^{-7} m = 364.5 nm$$

مثال ١١ ص ٥٥٩: أحسب اكبر قيمة للطول الموجي للفوتون المنبعث في متسلسلة بالمر في ذرة الهيدروجين.

أكبر قيمة للطول الموجي λ_m عندما تكون m أقل قيمة لها وهي: 3 من المعادلة:

$$\lambda_m = 364.56 \frac{m^2}{m^2-4} \quad (nm) \qquad [m = 3, 4, 5, \ldots, \infty]$$

at $m = 3$

$$\lambda_3 = 364.56 \times \frac{3^2}{3^2-4} = 364.56 \times \frac{9}{5}$$

$$= 656.208 \text{ nm}$$

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 ١٨٩٥م أي قبل بداية الفيزياء الكمية واكتشاف قوانين الكم لبلانك بحوالي خمس سنوات.**

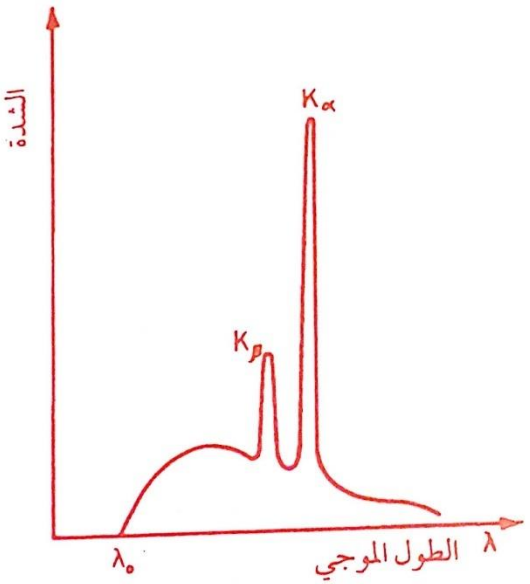
- **لاحظ ان هناك اشعاعات قوية تخترق المواد تنبعث عند تصادم الكترونات سريعة على هدف من مادة معدنية ثقيلة، ولعدم معرفته بطبيعتها وخواصها وسبب انبعاثها فقد أسماها الاشعة السينية (المجهولة) (X-Ray).**

- **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.

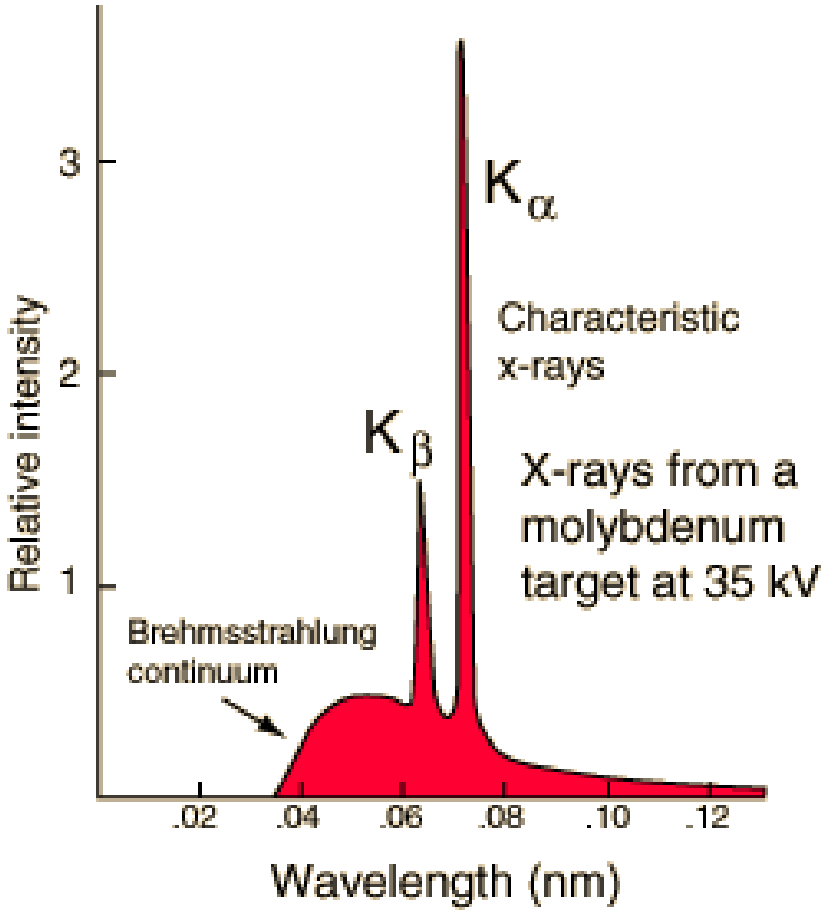
The quantum theory of light النظرية الكمية للضوء

طيف الأشعة السينية

إكتشف Roentgen عام ١٨٩٥ الأشعة السينية وذلك عنداصطدام إلكترونات سريعة بهدف معدني.

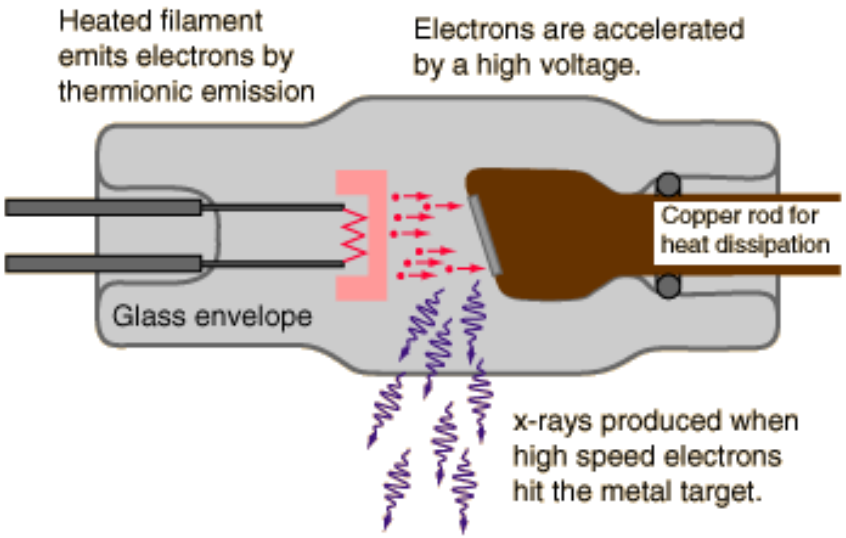
فهي ناتجة عن انبعاث فوتون بسبب إلكترون؛ أي عكس الظاهرة الكهروضوئية.

يتكون طيفها من طيف مستمر يبدأ من طول موجي λ_o وبه طيف خطي تكون عنده الشدة عالية وتسمى الخطوط المميزة.



The quantum theory of light النظرية الكمية للضوء

طيف الأشعة السينية



إنتاج أشعة X

أنبوبة زجاجية مفرغة، ويسخن القطب السالب فتنبعث منه إلكترونات.

تعجل هذه الإلكترونات بواسطة فرق جهد عال، وتصطدم بالهدف.

تكون الطاقة الحركية للإلكترونات المعجلة:

$$K=eV$$

يكون الهدف من مادة معدنية ثقيلة (Z كبيرة) حتى نحصل على طاقة فوتونات عالية؛ أي ذات أطوال موجية قصيرة في حدود الأشعة السينية، كما توضحه العلاقة التي تعطي مستويات الطاقة:

$$E = -\frac{13.6}{n^2} Z^2$$

The quantum theory of light النظرية الكمية للضوء

طيف الأشعة السينية

فيزيائية انبعث أشعة X

- يكتسب الالكترون طاقة حركية K عند تعجيله فيصطدم بالهدف وينفذ داخله.
- يتغير مساره بسبب قوى التنافر والتجاذب داخل الذرة فيتباطء.
- تقل طاقته إلى K′ وينتج عن ذلك أشعة X:

$$K=K'+Xray$$

- التوقف المفاجئ للإلكترون عند اقترابه من النواة يصاحبه تباطؤ كبير والأشعة الناتجة تسمى أشعة التوقف أو الفرملة.

The quantum theory of light النظرية الكمية للضوء

طيف الأشعة السينية

- بداية الطيف المستمر λ_o يعتمد على فرق الجهد فقط المستعمل لتعجيل الالكترونات، كما في العلاقة:

$$\lambda_o = \frac{1.24x10^{-6}}{V} \quad \text{meter}$$

- أما الطيف الخطي فيعتمد على نوع العنصر المستعمل كهدف.

مثال ١٢ ص ٥٥٩: أحسب أقصر طول موجي لطيف الأشعة السينية المنبعثة عند استعمال جهد كهربي لتعجيل اللالكترونات مقداره 18750 v ؟

$$\lambda_o = \frac{1.24\times10^{-6}}{V} = \frac{1.24\times10^{-6}}{18750} = 6.613\times10^{-11}\ m = 0.06613\ nm$$

OR

$$eV = \frac{hc}{\lambda}$$

$$\therefore \lambda_{min} = \frac{hc}{eV} = \frac{6.626\times10^{-34}\times3\times10^{8}}{1.6\times10^{-19}\times18750}$$

$$= 6.626\times10^{-11}\ m$$

$$= 0.06626\ nm$$