

الفيزياء الحديثة

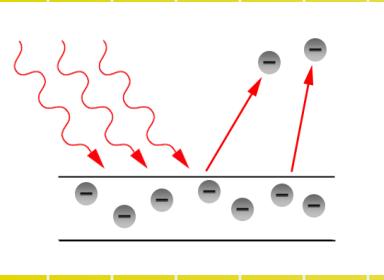
ظاهرة الانبعاث الكهروضوئي (الخلية الكهروضوئية)

نظرية بور الذرية

طيف ذرة الهيدروجين

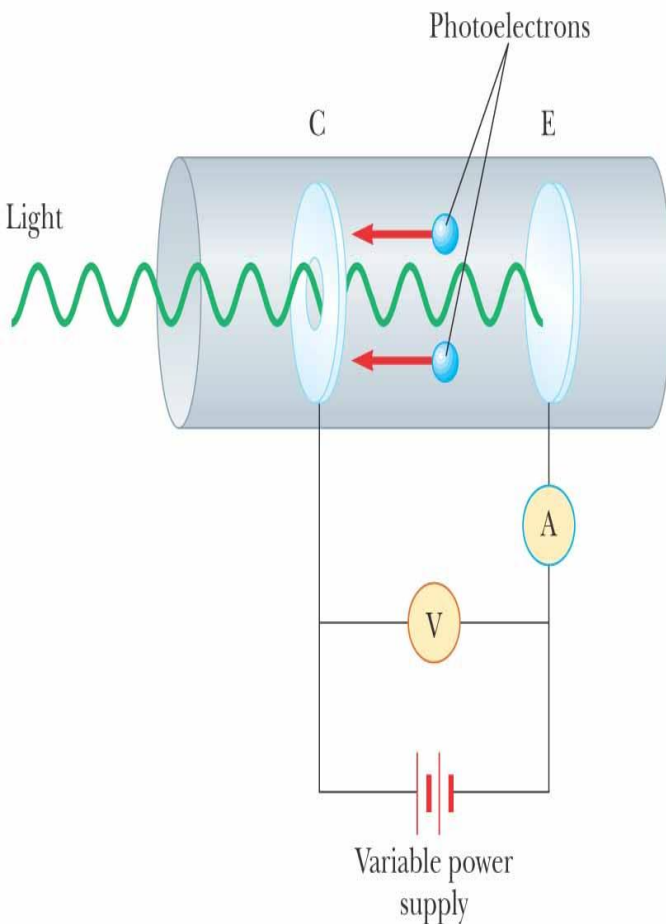
ظاهرة الانبعاث الكهروضوئي

هي ظاهرة انبعاث أو انطلاق الإلكترونات من سطوح الفلزات عندما تسقط عليها الأشعة الكهرومغناطيسية المناسبة .



تركيب الخلية الكهروضوئية

تتألف من أنبوبة من الزجاج أو الكوارتز مفرغة من الهواء بداخلها صفيحة معدنية E وتسمى بالأنود التي يسقط عليها الشعاع الكهرومغناطيسي ، C الكاثود الذي تتجمع عليه الإلكترونات المتحررة من السطح ، ويثبت الجميع على قاعدة عازلة.



ظاهرة الانبعاث الكهروضوئي

هي ظاهرة انبعاث أو انطلاق الكترونات من سطوح الفلزات عندما تسقط عليها الأشعة الكهرومغناطيسية المناسبة .

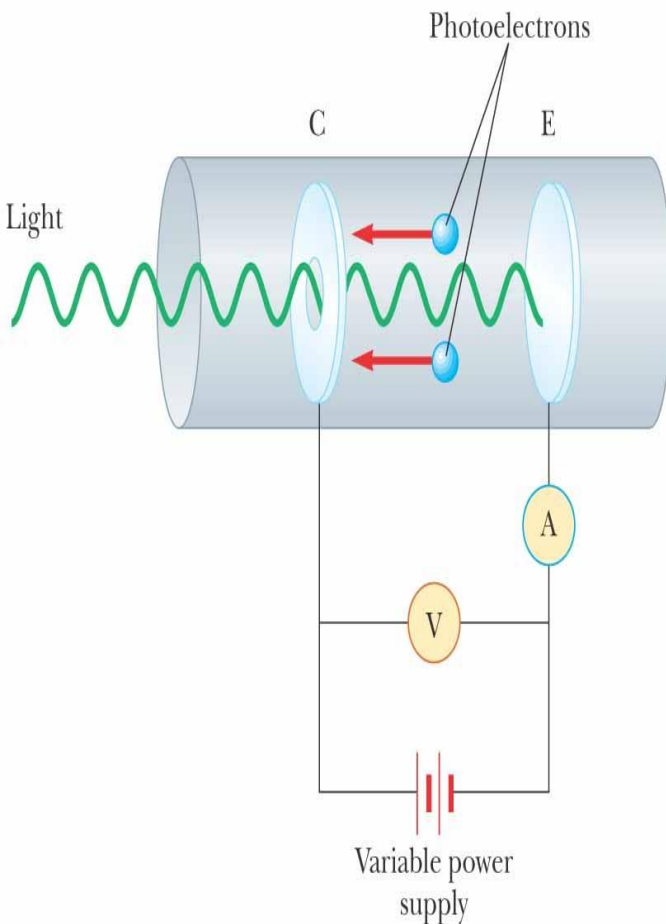
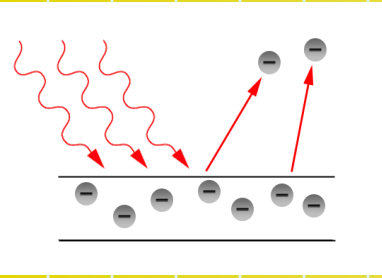
خصائص الظاهرة الكهروضوئية

أولاً : تتحقق الظاهرة الكهروضوئية إذا كان تردد الموجات الساقطة أكبر من تردد معين يسمى تردد العتبة .

ثانياً : تزداد القيمة العظمى لطاقة حركة الالكترونات المنبعثة من سطح الفلز بزيادة تردد الضوء الساقط .

ثالثاً : يعتمد عدد الالكترونات المنبعثة من سطح الكاثود على شدة الضوء الساقط أي تزداد شدة التيار المار في دائرة الخلية الكهروضوئية بزيادة شدة الضوء الساقط .

رابعاً : يحدث الانبعاث الكهروضوئي بمجرد سقوط الموجات الكهرومغناطيسية ذات التردد المناسب على سطح الكاثود مهما كانت شدة هذه الموجات ضعيفة بمعنى أن تحقق الظاهرة لا يحتاج إلى تخزين طاقة .



الخصائص السابقة حيرت العلماء ولم يتمكنوا من تفسيرها على ضوء
قوانين الفيزياء الكلاسيكية

النظرية الكمية للضوء والظاهرة الكهروضوئية:

تمكن اينشتاين من استخدام مبدأ بلانك الكمي على الموجات الكهرومغناطيسية لتفسير ظاهرة
التأثير الكهروضوئي عام 1905م ، وافترض الآتي:

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

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

f التردد ، h ثابت بلانك ويساوي
 $h=6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$

2- افترض اينشتاين أن الضوء عبارة عن كمات من الطاقة أسماها فوتونات إذاً أي موجة
كهرومغناطيسية هي سيل من الفوتونات ، وكل فوتون يمتلك طاقة تحسب من المعادلة

$$E = nhf$$

النظرية الكمية للضوء والظاهرة الكهروضوئية:

3- عند سقوط الضوء على سطح الفلز تتعامل فوتوناته مع الكترونات السطح بشكل فردي ، فكل فوتون من فوتونات الضوء الساقط يتعامل مع الكترون واحد فقط ويمنحه طاقته ويستغل الالكترن هذه الطاقة لأمرين :

الأمر الأول : هو استنفاد جزء من الطاقة لتحرر من سطح الفلز ويسمى هذا الجزء دالة الشغل وهي (أقل طاقة للفوتون تسمح بانبعث الكترون من سطح فلز ما وتعتمد على نوع الفلز) أو هي الطاقة اللازمة لتحرير الكترون من سطح المادة وهي تساوي طاقة الربط للإلكترون). وهي ثابتة للمادة الواحدة .

الأمر الثاني : استنفاد الجزء المتبقي من الطاقة في اكتساب طاقة حركة للخروج من السطح .

$$\begin{aligned} E = hf &= W + K_{\max} \\ &= W + eV_o \end{aligned}$$

النظرية الكمية للضوء والظاهرة الكهروضوئية:

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

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

حيث: E طاقة الفوتونات الساقطة

W دالة الشغل للمادة ووحدتها جول

أو الكترون. فولت

K_{\max} الطاقة الحركية القصوى للالكترونات الضوئية

e شح الإلكترن

V_o جهد الإيقاف

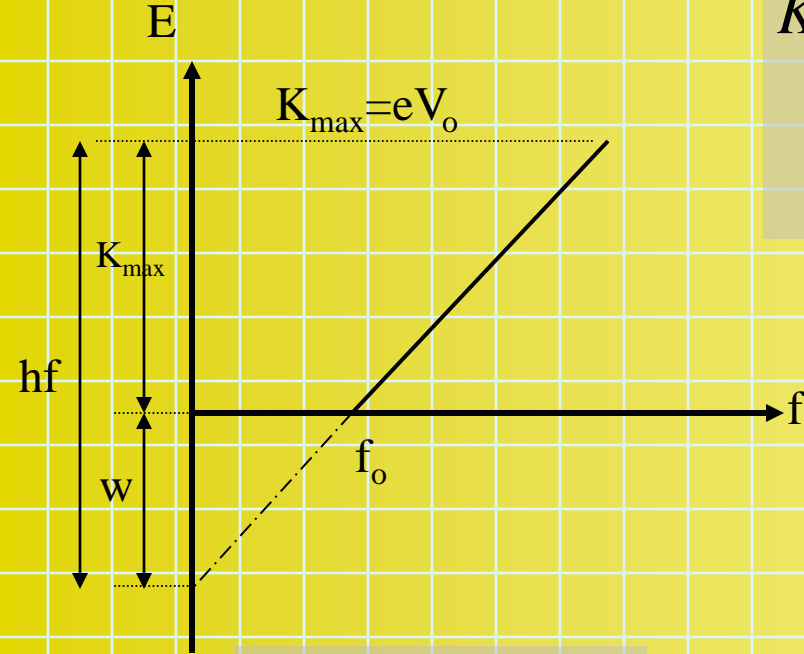
v_{\max} السرعة القصوى للالكترونات المنبعثة

m_e كتلة الإلكترن

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

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

إلكترون. فولت: هي الطاقة اللازمة لنقل إلكترون بين نقطتين فرق الجهد بينهما واحد فولت .



تفسير خصائص الظاهرة الكهروضوئية اعتمادا على النظرية الكمية (نظرية اينشتاين)

1- شدة التيار المار بالدائرة (عدد الالكترونات الضوئية) تزداد بزيادة شدة الضوء أي بزيادة عدد

$$E = nhf \quad \text{حيث } (n) \text{ فوتونات}$$

2- تعتمد الطاقة الحركية للالكترونات على طاقة الضوء الساقط أي أنها تعتمد على تردد الضوء (f) حيث $(E=hf)$ ، علما بان قيمة دالة الشغل لكل مادة ثابتة .

3- لا تنبعث الالكترونات من سطح المعدن إذا كانت $hf < W$ ، وتكون أقل طاقة لتحرير الكترون هي :

$$hf_0 = W \quad \text{وحينها} \quad K = 0 \quad \text{(الطاقة الحركية للإلكترون تساوي صفر)}$$

$$E = hf = W + K_{\max} \Rightarrow \text{if } K_{\max} = 0 \quad \therefore hf_0 = W$$

4- ينبعث الإلكترون الضوئي في نفس اللحظة التي يسقط فيها الضوء على سطح المعدن لأن كل فوتون ساقط يصطدم بالإلكترون ويحدث تبادل للطاقة بينهما ، أي كأنه تصادم جسيم بجسيم آخر.

من التطبيقات العملية التي تعتمد على التأثير الكهروضوئي :

- 1- منبه لإنذار السرقة .
- 2- البوابات الإلكترونية .
- 3- جهاز كاشف الدخان .
- 4- الخلايا الضوئية في الكاميرا ومصابيح إنارة الطريق .

مثال : إذا سقطت فوتونات ضوئية على سطح فلز دالة شغله 6 e.v وحررت منه إلكترونات الطاقة الحركية العظمى لكل منهما 2 e.v فاحسبي طاقة الفوتون ؟

نموذج بور The Bohr Model

فروض نظرية بور

1- يدور الإلكترون في الذرة حول النواة في مسار دائري فتنشأ قوة طاردة مركزية ، تتعادل مع قوة جذب النواة للإلكترون .

2- يدور الإلكترون في مدار ثابت حول النواة ويكون فيها زخمه الزاوي (L) عدداً صحيحاً من ثابت بلانك مقسوماً على 2π أي أن :

$$L = \frac{nh}{2\pi}$$

حيث أن : h ثابت بلانك ، n هو العدد الكمي .

3- تتحرك الإلكترونات حركة سريعة حول النواة دون أن تشع طاقة طالما تدور في مستواها الأصلي للطاقة ، ويظل في هذا المدار ولذلك لا يسقط على النواة .

4- ينبعث الإشعاع الكهرومغناطيسي من الذرة فقط إذا انتقل الإلكترون من مدار ذي طاقة معينة إلى مدار آخر ذي طاقة أقل ويكون تردد الإشعاع المنبعث هو :

$$f = \frac{E_i - E_f}{h}$$

نموذج بور فسر الطيف الخطي للهيدروجين تفسيراً صحيحاً .



آلية الإشعاع الكهرومغناطيسي

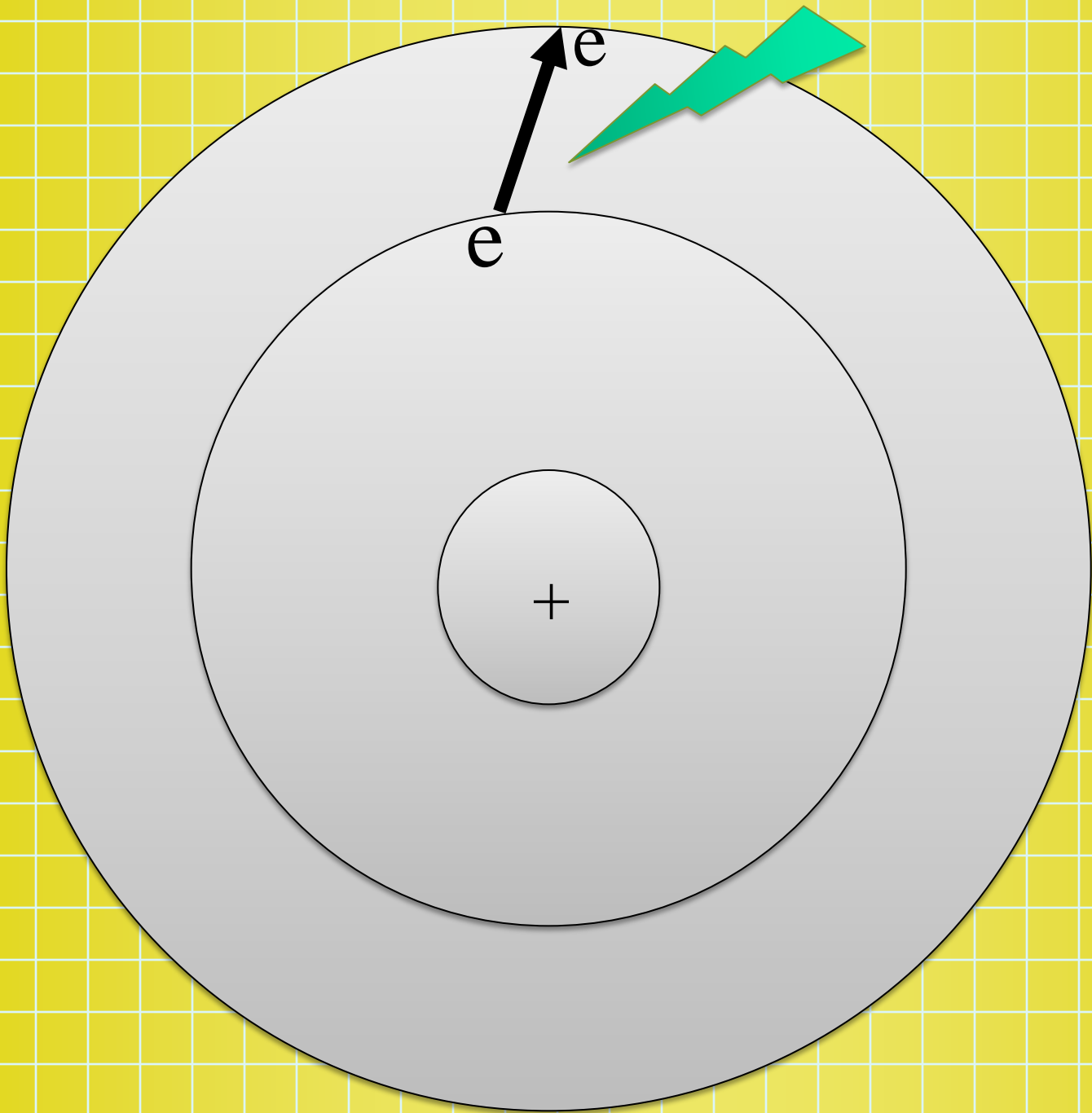
الذرة المستقرة :هى الذرة التي توجد إلكتروناتها في مستوياتها الطبيعية .

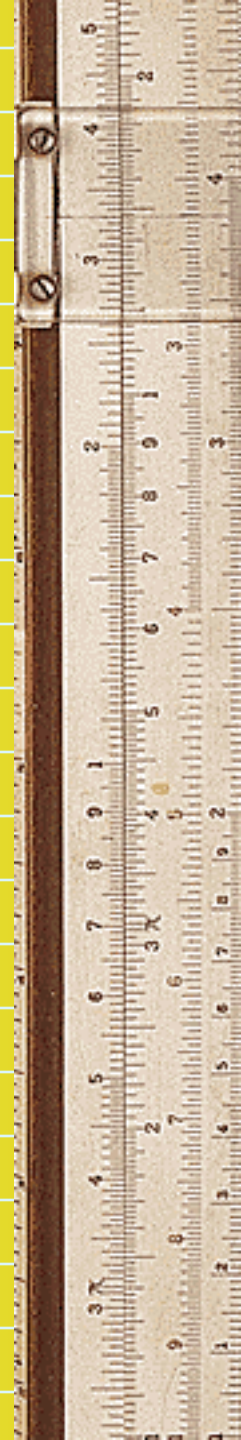
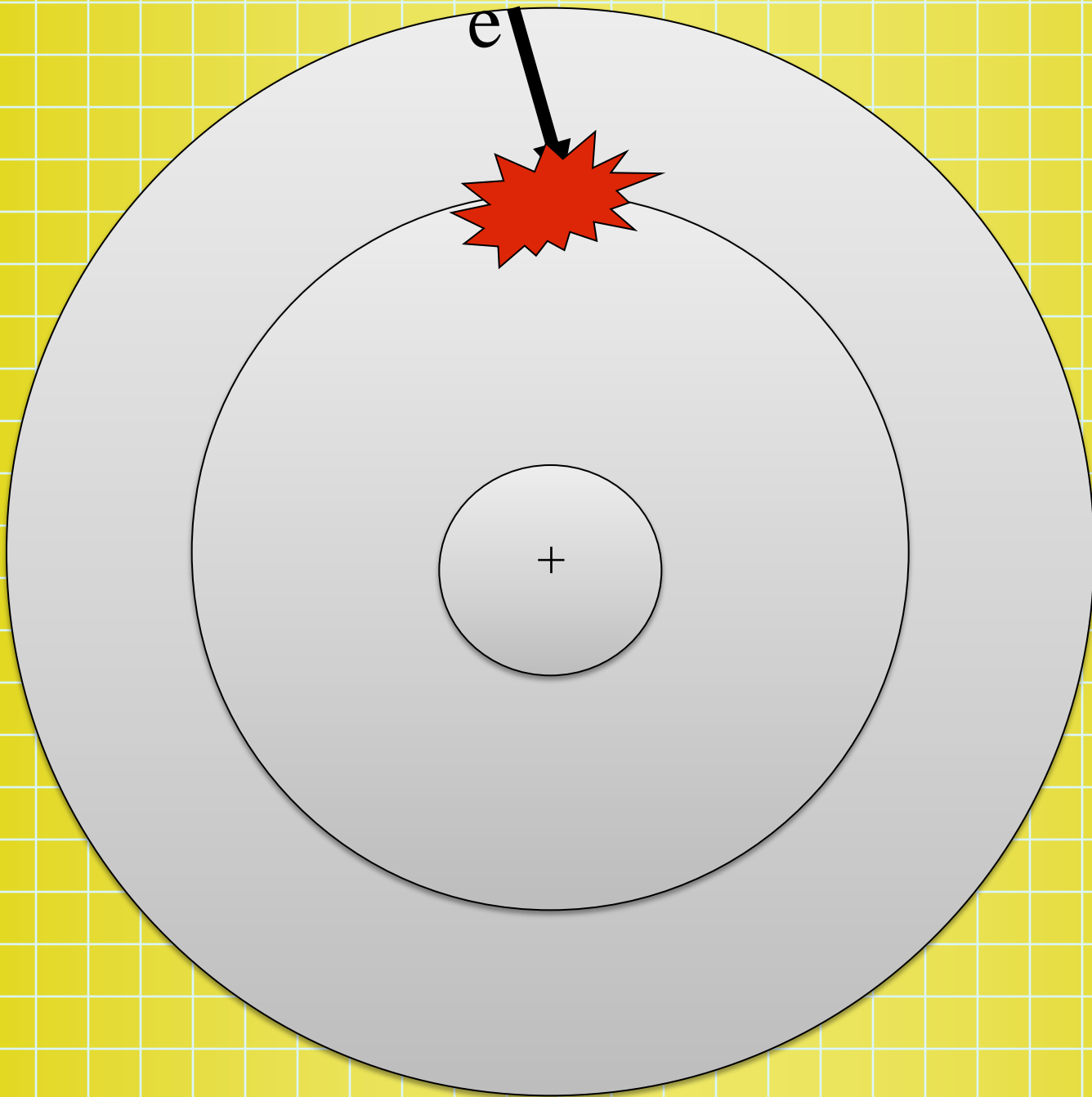
الذرة المثارة :هى الذرة التي ينتقل فيها الإلكترون من مستواه الطبيعي إلى مستوى أعلى في الطاقة بسبب امتصاصه طاقة .

طرق إثارة الذرة : 1-بتعرضها لشعاع ضوئي مناسب .

2- بالتسخين . 3- بالتفريغ الكهربائي .

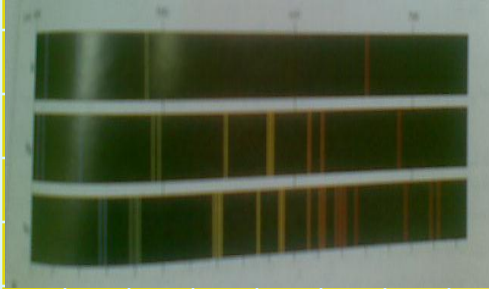
تعود الذرة إلى حالة الاستقرار بعد الإثارة بعد مضي زمن (لايتجاوز 10^{-8} من الثانية) ويرافق عودة الإلكترون إلى مستواه الطبيعي إصدار الذرة لإشعاع كهرومغناطيسي .





الأطياف الخطية

هناك الكثير من الذرات التي تمتص أو تشع كمات من الطاقة فنتج خطوط طيفية تدل على مستويات الطاقة التي انتقلت منها الإلكترونات.



الطيف الخطي للانبعاث

هو عدد محدود من الخطوط الملونة و هو خاصة أساسية ومميزة للعنصر (فلا يوجد عنصران لهما نفس خطوط الطيف) لأن كل طيف خطي له طول موجي وتردد خاصين به وحده ، وينبعث من غاز موضوع تحت ضغط منخفض وذلك عند تعرضه لتفريغ كهربائي.

من أمثلته : تفريغ الغازات في إشارات النيون

طيف ذرة الهيدروجين

خواص ذرة الهيدروجين:

- 1- تمتلك الذرة واحد إلكترون فقط وتكون مستقرة إذا كان الإلكترون في المدار الأول $n=1$.
- 2- إذا امتص هذا الإلكترون طاقة بكميات تكفي لنقله لمدارات أعلى فإن الذرة تصبح مثارة.
- 3- تعود الذرة للاستقرار بعودة الإلكترون من المدار ذي الطاقة الأعلى إلى المدار ذي الطاقة الأقل.
- 4- عند عودة الإلكترون إلى المدار الأقل طاقة فإنه يفقد طاقة تساوي الفرق بين طاقتي المدارين وتظهر هذه الطاقة في شكل إشعاعات ضوئية (فوتونات) ترددها يعتمد على درجة إثارة الذرة .
- 5- عندما تثار الذرة وينتقل الإلكترون من المستوى $n=1$ إلى $n=\infty$ أي أن الإلكترون يترك الذرة وتتحول إلى أيون موجب .

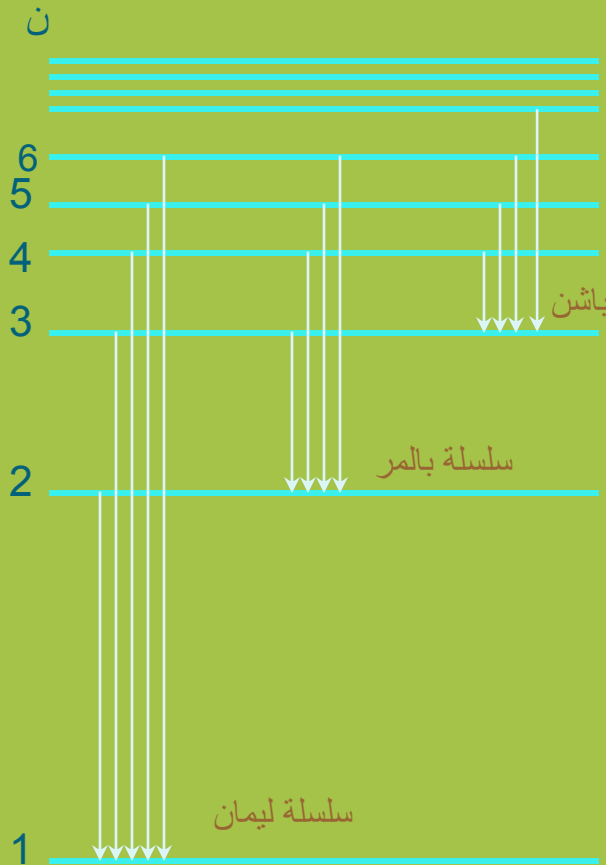
هو سلسلة ترددات تصدر عن ذرة الهيدروجين عند عودة الإلكترون من مستويات الطاقة الأعلى إلى مستويات الطاقة الأقل .

الأطياف التي تصدر عن ذرة الهيدروجين :

1- سلسلة ليمان : هي مجموعة الموجات الضوئية غير المرئية التي تتميز بأطوالها الموجية القصيرة وترددها الأعلى من تردد موجات الضوء المرئي ، وتحدث عند عودة الإلكترون من المستويات : $n=2, 3, 4, 5, 6, \dots$ إلى $n=1$.

2- سلسلة بالمر : هي مجموعة الموجات الضوئية التي تمتاز بترددها وأطوالها الموجية التي تقع في حدود الضوء المرئي ويسهل مشاهدتها وقياسها ، وتحدث عند عودة الإلكترون من المستويات : $n=3, 4, 5, 6, \dots$ إلى $n=2$.

3- سلسلة باشن : هي مجموعة الموجات الضوئية غير المرئية التي تتميز بأطوالها الموجية الطويلة وترددها المنخفض دون تردد موجات الضوء المرئي ، وتحدث عند عودة الإلكترون من المستويات : $n=4, 5, 6, \dots$ إلى $n=3$.

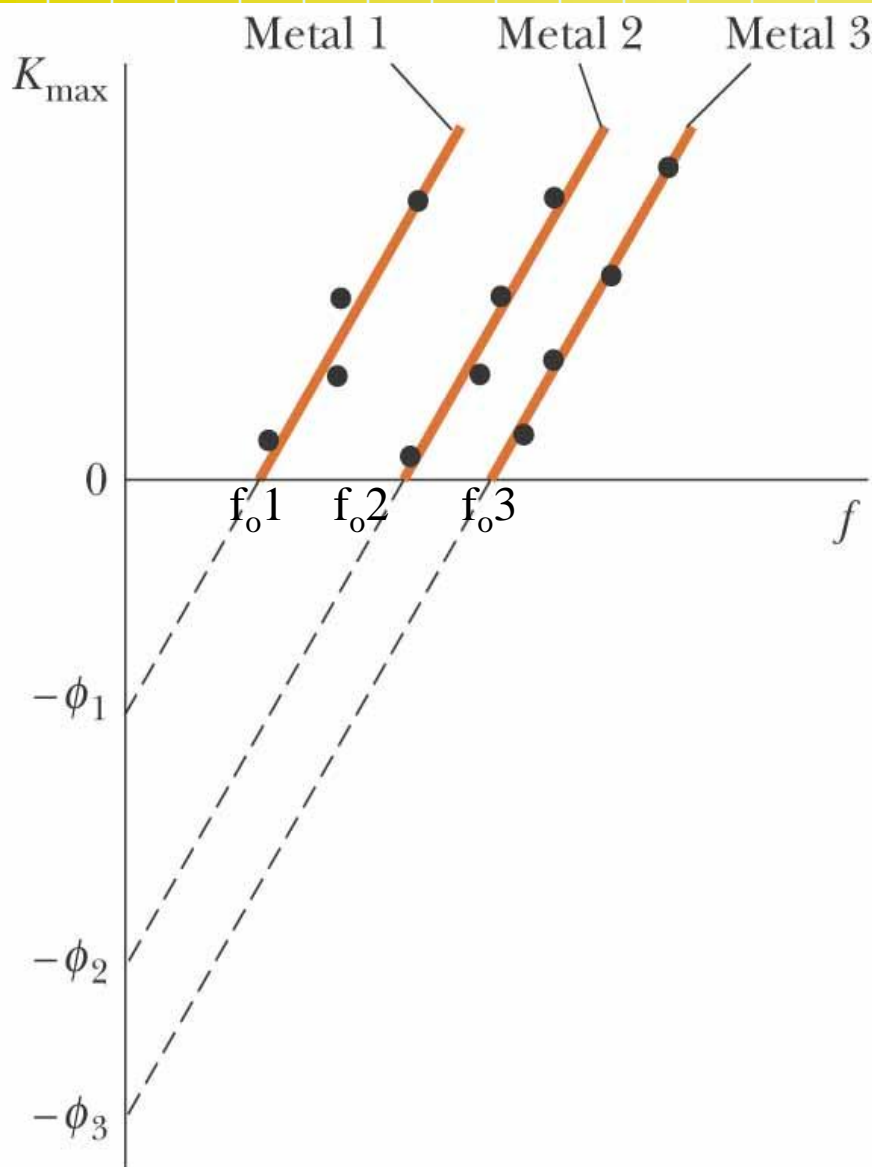


يمكن التعبير عن الأطوال الموجية لهذه الخطوط الطيفية بالمعادلة التالية التي صاغها رايدبرج :

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

حيث R_H : ثابت رايدبرج ويساوي $R_H = 1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$

مثال : ينتقل الإلكترون في ذرة الهيدروجين من حالة $n=2$ ، إلى الحالة $n=1$ ، احسبي الطول الموجي وتردد الفوتون المنبعث نتيجة لذلك ؟

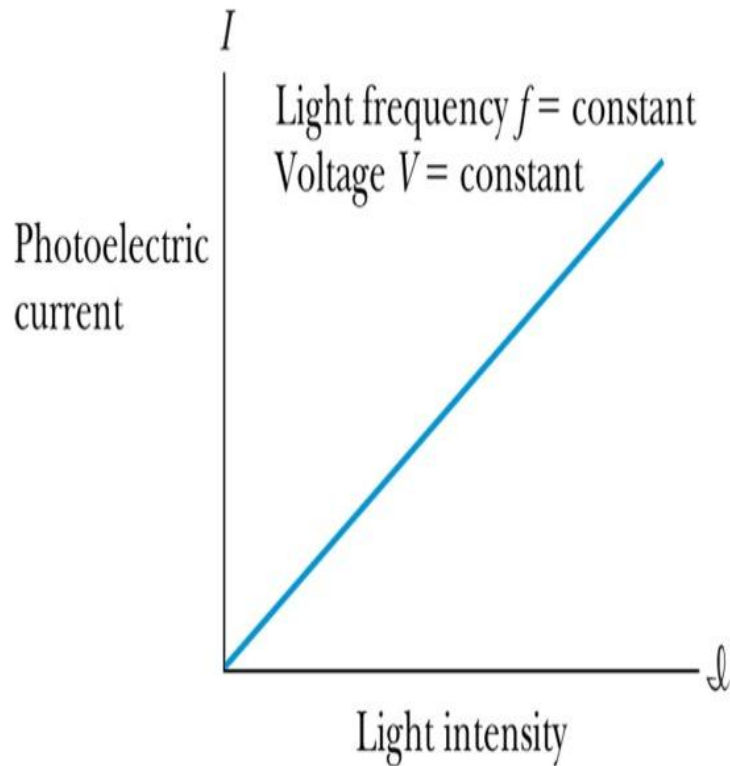


التردد العتبي (f_0): هو أقل قيمة لتردد الضوء الساقط اللازمة لانبعث وتحرير الإلكترونات من سطح الفلز دون إكسابها طاقة حركية ، ولكل معدن قيمة للتردد العتبي.

فإذا كان تردد الضوء الساقط أقل من التردد العتبي (f_0) لا تنبعث أي إلكترونات مهما زادت شدة الضوء.



تزداد القيمة العظمى لطاقة حركة الإلكترونات المنبعثة من سطح الفلز بزيادة تردد الضوء الساقط .



عند زيادة شدة الضوء الساقط تزداد
شدة التيار الكهربائي المار بالدائرة أي
يزداد عدد الالكترونات المارة بالدائرة.



الفيزياء الحديثة

الأشعة السينية وخصائصها

الكتلة والطاقة الكلية

تأثير السرعة على الكتلة

الخاصية الثنائية للجسيمات

الأشعة السينية X-Ray

في الظاهرة الكهروضوئية كان سقوط فوتون على سطح معدن يؤدي إلى تحرير إلكترون ، ولكن في الأشعة السينية يحدث العكس حيث أن جزء من طاقة حركة الإلكترون تتحول إلى فوتون مكونة الأشعة السينية.

ماهية الأشعة السينية

هي موجات كهرومغناطيسية أطوالها الموجية قصيرة جداً في حدود $0.01 \text{ nm} - 10 \text{ nm}$ ، وبالتالي فتردداتها وطاقاتها عالية جداً ، وقد سميت بالسينية أي المجهولة لعدم معرفة سبب انبعاثها حين اكتشافها .

الفيزياء الحديثة

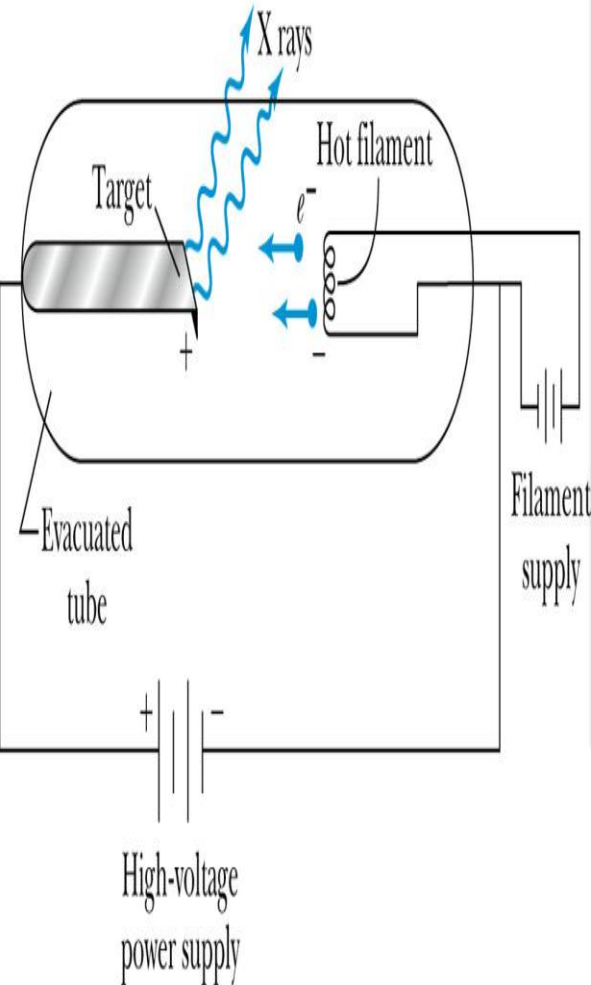
إنتاج الأشعة السينية

تعتمد فكرة جهاز إنتاج الأشعة السينية على انطلاق الكترونات من الكاثود وتوفير (فرق جهد كبير) يقوم بتعجيلها لتصطدم بالهدف (معدن ثقيل).

آلية العمل : يمر التيار الكهربائي في الفتيلة لتسخن الكاثود (القطب السالب) فتنتقل منه الالكترونات (انبعاث حراري) في اتجاه الهدف **Target (T)** تحت تأثير فرق جهد يصل إلى 30000 فولت في داخل أنبوبة مفرغة لمنع اصطدام الالكترونات المعجلة في جزيئات الهواء. تصطدم الالكترونات في الهدف **T** الأنود (القطب الموجب) بطاقة حركة تعطى من المعادلة:

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

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



طيف الأشعة السينية

يتكون طيف الأشعة السينية من :

1- طيف متصل continuous spectrum

2- طيف خطي Line spectrum

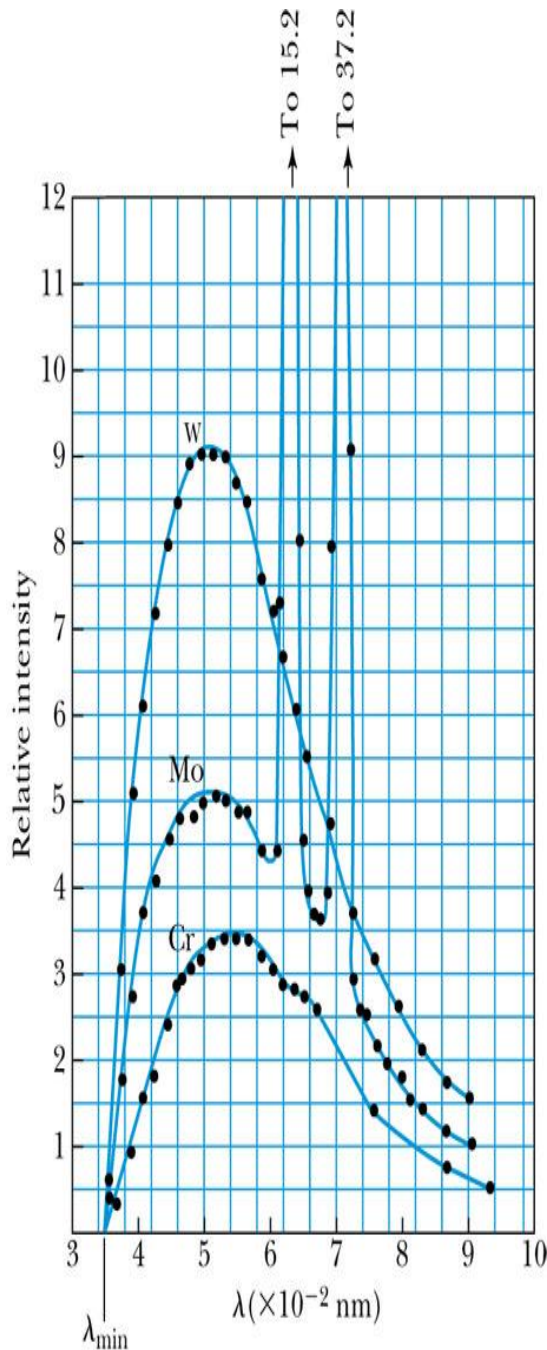
الطيف المتصل: الذي يبدأ من طول موجي صغير ويعتمد على

فرق جهد التعجيل.

الطيف الخطي (قمم حادة): تكون عندها الشدة عالية ولا يعتمد

على فرق جهد التعجيل وإنما على مادة الهدف لذا يعتبر الطيف

الخطي للأشعة السينية وسيلة للتعرف على نوع مادة الهدف.

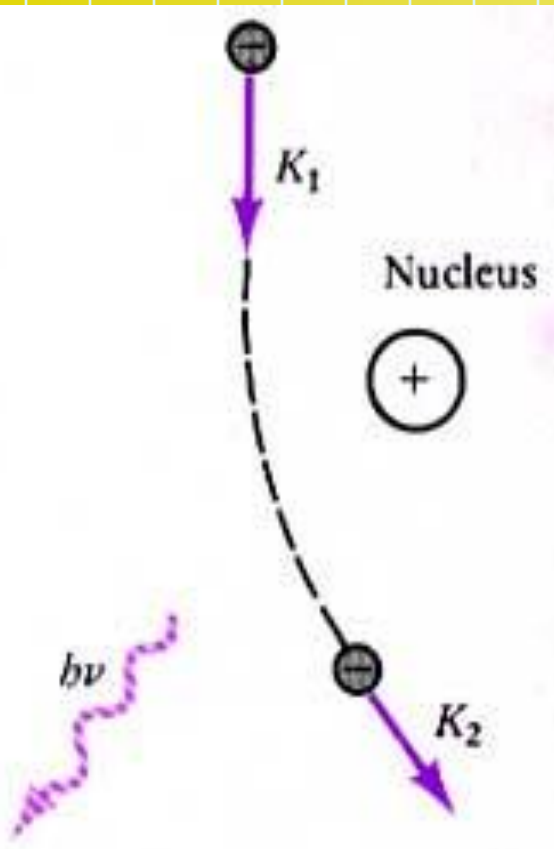


الفيزياء الحديثة

الأشعة السينية X-Ray

تفسير الطيف المتصل continuous spectrum

عندما يتم تعجيل الإلكترون بسرعة كبيرة ثم يصطدم بالهدف وينفذ داخله مقترباً من نواة (موجبة الشحنة) لذرة عنصر ثقيل فإنه ينحرف عن مساره المستقيم ليتحرك في مسار منحني نتيجة قوة تجاذب كولوم. وحيث أن ذلك سيؤدي إلى تغيير عجلة الإلكترون خلال حركته في مسار منحني نتيجة قوى التجاذب وبناء على ذلك فإن الإلكترون المعجل سيتباطئ وتقل طاقته الحركية ويتوقف ويطلق أشعة كهرومغناطيسية تدعى بأشعة الفرملة أو التوقف. وتنطلق في صورة مكثمة على شكل فوتونات.



الفيزياء الحديثة

الأشعة السينية X-Ray

تفسير الطيف المتصل continuous spectrum

تعرف ظاهرة انبعاث الأشعة الكهرومغناطيسية نتيجة لتغير طاقة

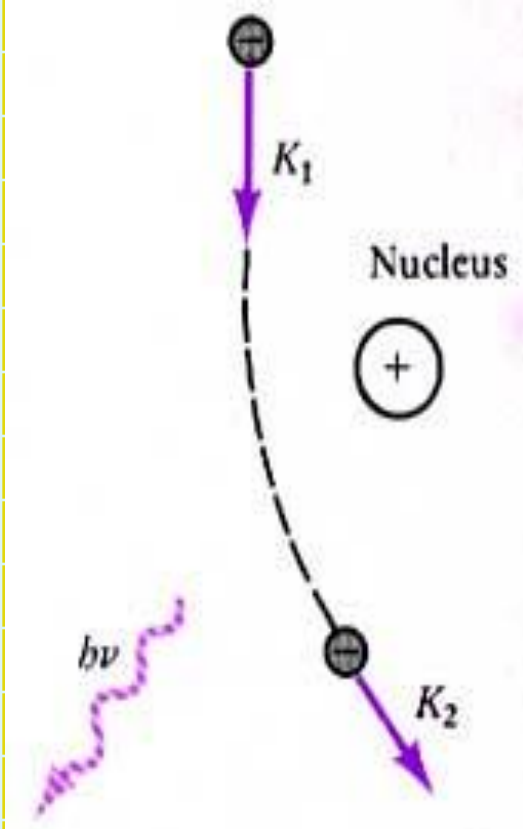
الإلكترون بمروره حول النواة باسم Breking radiation

إشعاع الفرملة وهذه الظاهرة موضحة في الشكل التالي .

حيث تكون طاقة حركة الإلكترون في قبل التصادم k_1 وبعد التصادم

تصبح k_2 نتيجة لانطلاق فوتون طاقته hf .

$$k_1 - k_2 = hf \quad (1)$$



تفسير الطيف المتصل continuous spectrum

نتيجة للتباطؤ التدريجي للإلكترون يصل في بعض الأحيان إلى سرعة صفر وفي كل مرة 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 :

$$k_1 = e.V \quad \& \quad k_2 = 0$$

وهنا ينتج فوتون بأكبر طاقة ممكنة

$$e.V = k = hf_0 \quad (3)$$

حيث أن f_0 هي أكبر تردد لفوتون الأشعة السينية الناتجة.

من المعادلة (3) يلاحظ اعتماد أقصى طاقة للفوتون على فرق جهد التعجيل.

الأشعة السينية X-Ray

تفسير الطيف المتصل continuous spectrum

كيف نعين أقل طول موجي لانبعاث الأشعة السينية

باستخدام قوانين الفيزياء الحديثة

لم يتمكن العلماء باستخدام قوانين الفيزياء التقليدية فهم وتفسير الطول الموجي (λ_0) والطول الموجي (λ) للخطوط المميزة بطيف الأشعة السينية.

f_0 أعلى تردد للفوتونات

λ_0 أقل طول موجي للفوتونات

وبالتعويض عن قيم h, c, e وهي ثوابت فيزيائية نجد أن :

$$\lambda_0 = \frac{1.24 \times 10^{-6}}{V}$$

يلاحظ أن λ_0 لا تعتمد على نوع مادة الهدف ولكنها تعتمد على فرق جهد التعجيل V .

تفسير الطيف الخطي للأشعة السينية

عند تصادم الإلكترون المعجل بالإلكترون المداري للذرة فإنه يكتسب الطاقة اللازمة لتحريره من مداره ليترك فراغاً بالمدار وعندها يتحرك إلكترون من مدار ذو مستوى طاقة أعلى (E_f) لملئ الفراغ في المدار الأدنى (E_i) ، يصاحب انتقال الإلكترون من المدار ذات الطاقة الأعلى (E_f) إلى الأدنى (E_i) انبعاث فوتون طاقته ΔE .

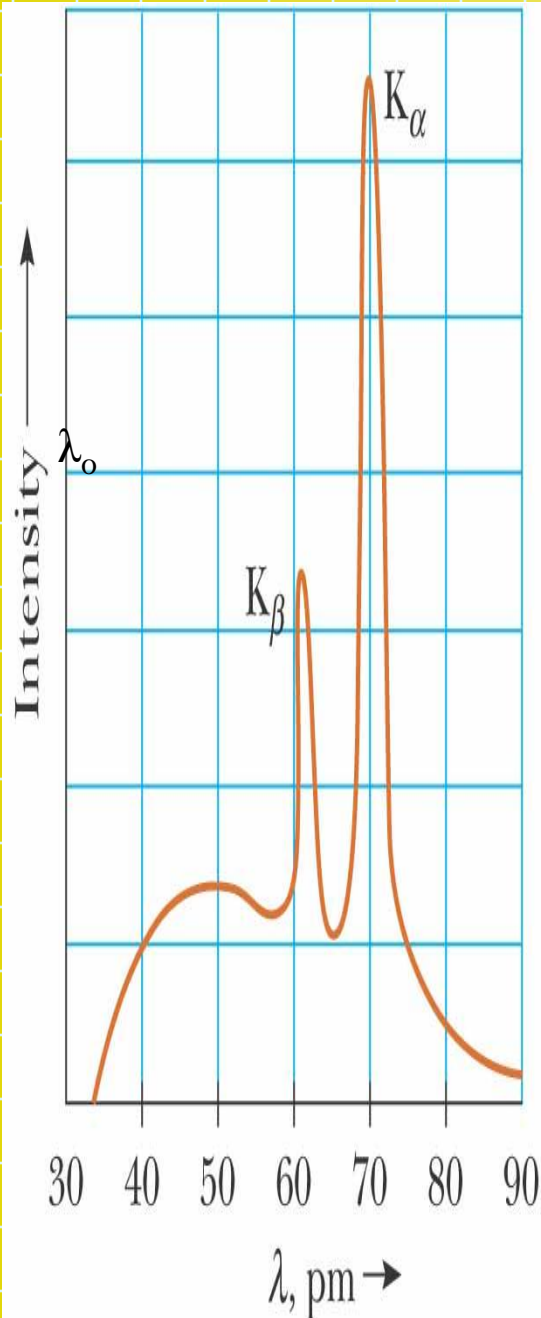
$$\Delta E = E_f - E_i = hf = h \frac{c}{\lambda}$$

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

كمثال لذلك $Z = 42 \rightarrow \lambda_{2 \rightarrow 1} = 0.069 \text{ nm}$

في حدود الطول الموجي
للأشعة السينية

تفسير الطيف الخطي للأشعة السينية



عند انتقال إلكترون من المدار L إلى المدار K فإنه يعطى الطيف الخطي K_{α}

عند انتقال إلكترون من المدار M إلى المدار K فإنه يعطى الطيف الخطي K_{β}

طاقة $K_{\alpha} < K_{\beta}$ & الطول الموجي $K_{\alpha} > K_{\beta}$

ووجد تجريبياً:

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

$$Z_{eff} = Z - 1 \longrightarrow \text{العدد الذري الفعال}$$

مثال 1: احسبي أقصر طول موجي لطيف الأشعة السينية المنبعثة عند استعمال جهد كهربائي لتعجيل الإلكترونات مقداره 18950 V ؟

$$\lambda_0 = \frac{1.24 \times 10^{-6}}{V} \quad (m)$$

مثال 2: الطول الموجي λ_α لخط الطيف المميز $K\alpha$ لعنصر يساوي 0.07228 nm ، احسبي العدد الذري لهذا العنصر ؟

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

النظرية النسبية

وضع العالم آينشتين نظريته في عام 1904 وسماها النظرية النسبية الخاصة وفي العام 1916 نشر آينشتين نظريته النسبية العامة وهنا يجب أن نوضح أن كلا النظريتين هما نظرية واحدة ولكن النظرية النسبية الخاصة تتعامل مع الأجسام المتحركة بسرعة منتظمة (بدون عجلة)، والنظرية النسبية العامة تعالج حركة الأجسام المتسارعة وهي تشمل حركة كافة مكونات الكون من نجوم ومجرات لأنها تتحرك في مسارات وهذا يعني أن تلك الأجسام لها عجلة تغير من اتجاه مسارها .

الأبعاد الأربعة:

نحتاج قبل الدخول إلى مفاهيم النظرية النسبية تعريف مفهوم الأبعاد المكانية والزمنية حيث أن كثيرا ما تعرف النظرية النسبية على إنها نظرية البعد الرابع. فما هي هذا الأبعاد الأربعة وكيف نستخدمها.

تطور مفهوم الأبعاد مع تطور الإنسان (الطول-المساحة-الحجم).

اعتمد اينشتاين على إدخال البعد الرابع في جميع حساباته ، فاستخدمت وحدة الزمن في تقدير المسافات الفلكية بين النجوم والمجرات لأنه لا يمكن بأي حال من الأحوال الاعتماد على وحدة المتر ومضاعفاته ، وفي كتب الفلك نجد إن وحدة قياس المسافة هي السنة الضوئية وهي المسافة التي يقطعها الضوء خلال سنة أي أن الزمن بُعد يضاف إلى الإبعاد الثلاثة X, Y, Z ولهذا سمي بالبعد الرابع. ، كما بين أن الزمن لا يجري في الكون بشكل متساوي بل يقصر ويطول حسب سرعتنا ومكاننا بالنسبة للحدث ، مثال: المقارنة بين شخص على الأرض وآخر يسافر على مركبة فضائية (كلما زادت سرعته كلما قل الزمن).

النظرية النسبية الخاصة

وضع اينشتاين فرضيتين لنظريته النسبية الخاصة :

الفرضية الأولى : أنه لا وجود للمكان أو الزمان المطلق ، وبدلاً عنها فإن هنالك مكاناً وزماناً نسبياً وسرعة نسبية ، فالفراغ أو الحيز الذي يشغله جسم ما يختلف باختلاف موقع الملاحظ أو المشاهد ويرجع ذلك إلى أن أي ملاحظ يستند في قياسه إلى منظومة مرجعية مختلفة عن الآخر.

الفرضية الثانية : أن سرعة الضوء ثابتة في الفراغ مهما تغير مكان المشاهد أو الراصد لسرعة الضوء (أي أن سرعة الضوء في الفراغ مستقلة عن حركة المصدر الضوئي) وأن سرعة الضوء هي الحد الأقصى للسرعات ولا يمكن لجسم مادي أن تزيد سرعته عن سرعة الضوء أو تساويها .

النتيجة النهائية للفرضيتين هي أن قياسات الزمن والمكان تتغير بالحركة.

تأثير السرعة على الكتلة

في النظرية الكلاسيكية اعتبر نيوتن أن الكتلة خاصية للجسم لا تعتمد على حالة الحركة، أما بتطبيق النسبية فقد اعتبر اينشتاين الكتلة دالة في السرعة. فكلما ازدادت السرعة يصبح الجسم أكثر كتلة.

زيادة كتلة الجسم مع زيادة سرعته. إذا افترضنا أن كتلة جسم في حالة السكون هي m_0 . إذا تحرك الجسم بسرعة مقدارها u فإن كتلته الجديدة " m " تعرف بالعلاقة :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}}$$

حيث c هي سرعة الضوء في الفراغ. نلاحظ هنا أن كتلة الجسم تزداد مع زيادة السرعة. وعندما تصل سرعة الجسم إلى سرعة الضوء فإن كتلة الجسم تصبح مالانهاية. ولذلك تتطلب قوة لا نهائية لإكساب جسم سرعة تتساوى مع سرعة الضوء. من هذا نستنتج أنه لا يوجد جسم يتسارع حتى تصل سرعته إلى سرعة الضوء، وتكون سرعة الضوء هي النهاية العظمى للسرعة.

تأثير السرعة على الكتلة

مثال 1: ما هي السرعة التي يجب أن يتحرك وفقها بروتون كي تصبح كتلته ضعف كتلته السكونية
المساوية لـ $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ؟

مثال 2: سيارة كتلتها 2000 kg تتحرك بسرعة قدرها 15 m/s ، ما هي مقدار الزيادة في كتلة السيارة عند
هذه السرعة ؟

الكتلة والطاقة الكلية

من أهم استنتاجات النظرية النسبية لأينشتاين المعادلة المشهورة التي تربط بين الكتلة والطاقة وتجعلهما متكافئتين.

$$(9-1) \quad E_T = \frac{m_0 c^2}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{1/2}} = mc^2$$

حيث أن E_T الطاقة الكلية و m_0 كتلة الجسم الساكن و m كتلة الجسم عند السرعة v و c سرعة الضوء.

من المعادلة يتضح أن الكتلة والطاقة هما شكلان لمفهوم واحد وان الكتلة يمكن أن تتحول إلى طاقة وكذلك الطاقة يمكن أن تتحول إلى كتلة . ومن هنا نجد أن كمية هائلة من الطاقة تتولد من تحويل كمية ضئيلة من المادة.

تفسير ذلك : إذا أثرت قوة على جسم فإنها تكسبه تسارع حسب قانون نيوتن الثاني $E=mg$ ، مما يؤدي إلى زيادة السرعة ، ومع الزمن تزداد أيضاً السرعة . وبحسب النظرية النسبية فإن أقصى حد للسرعة هو سرعة الضوء ، لذلك يبدأ التسارع بالتناقص حتى يصل الصفر ، وبما أن القوة ثابتة فإن الكتلة تزداد بنقصان التسارع ، وبما أن القوة تبذل شغلاً على الجسم أي تضيف طاقة للجسم ، والسرعة ثابتة فإن هذه الطاقة تتحول إلى كتلة.

الكتلة والطاقة الكلية

$$K = \Delta mc^2 = mc^2 - m_0c^2$$

$$mc^2 = m_0c^2 + K$$

$$E = E_0 + K$$

الطاقة النسبية الكلية لجسم
متحرك

الطاقة السكونية للجسم

الطاقة الحركية النسبية

- تبين هذه المعادلة أيضاً مبدأ التكافؤ بين الكتلة والطاقة وإمكانية تحول أحدهما للآخرى ، وهذا مخالف للميكانيكا الكلاسيكية التي تفصل بين الكتلة والطاقة.

الكتلة والطاقة الكلية

مثال 1: يتحرك إلكترون في أنبوبة التليفزيون بسرعة $v=0.25 c$ ، احسبي الطاقة الكلية وطاقة الحركة بالإلكترون فولت . إذا علمت أن طاقة السكون للإلكترون هي 0.511 MeV ؟

مثال 2: إذا كانت الطاقة الكلية للبروتون هي ثلاثة أمثال طاقة السكون له ، ماهي سرعة البروتون ؟

مثال 3: إذا تحول 1 g من المادة بكامله إلى طاقة ، فما مقدار الطاقة التي نحصل عليها ؟

الخاصية الثنائية للجسيمات (دي برولي)

بما أن للأشعة الكهرومغناطيسية خاصية موجية وخاصية جسيمية أي خاصية مزدوجة وعند تفسير الظواهر الضوئية نعتمد على إحدى هاتين الخاصيتين ، فهل للجسيمات المادية خاصية مزدوجة أي يمكن التعامل مثلاً مع الإلكترون على أنه موجة ؟

فرض ديبرولي

في عام 1924م افترض ديبرولي أن الخاصية الثنائية أي الموجية الجسيمية هي خاصية عامة تتميز بها المواد عموماً , ويعني هذا أنه يمكن وصف أي مادة تتحرك بخواص مشتركة بأنها موجة أو جسيم. ويمكن وصف طاقة وكمية التحرك للفوتونات كالتالي :

$$E=hf$$

طاقة الفوتون تعطى بـ :

$$P=E/c$$

وتكون كمية التحرك هي :

$$P=hf/c$$

أي يمكن كتابتها على الصورة :

$$c=f.\lambda$$

ونعلم أن العلاقة بين التردد والطول الموجي تساوي :

$$P=h/\lambda$$

وبذلك تكون كمية الحركة :

$$p=m.v$$

وبما أن كمية التحرك لجسيم له كتلة وسرعة هي :

اذن يمكن الحصول على العلاقة التالية التي تربط بين الخاصيتين : $\lambda = h/m.v$

فرض ديبرولي

وكما يبدو من المعادلات السابقة فإن الكميات m, v تتميز بها الجسيمات في حين أن الكميات f, λ تتميز بها الموجات , والثابت h هو ثابت بلانك هو الرابط بين الكمية الجسيمية والموجية , ومن العلاقة $P = h/\lambda$ استنتج ديبرولي الخاصية الثنائية (الموجية والجسيمية) لكل من الإشعاعات الكهرومغناطيسية والجسيمات مثل الالكترونات والبروتونات والنيوترونات .

والفرق بين هذه الجسيمات والفوتون , أن كتلة الفوتون تساوي صفر وسرعته تعادل سرعة الضوء , في حين أن تلك الجسيمات لها كتلة محسوسة وتعتمد سرعتها على ظروف حالتها .