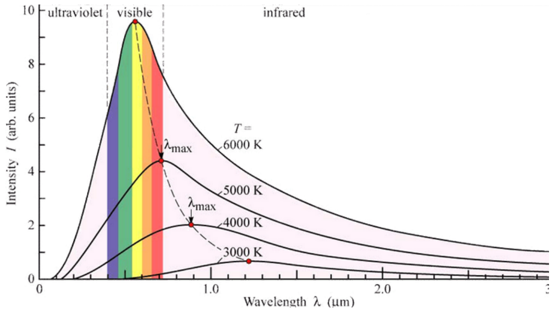
Žiarenie čierneho telesa

- rovnovážne tepelné vyžarovanie:
  - teleso je v rovnováhe s okolím
  - čo absotrbuje, to vyžiari
- model čierneho telesa ... dokonalý absorbér, t.j. čo absorbuje, to vyžiari
- z experimentu vieme ...
  - $\uparrow T = \uparrow u$ $\qquad u = \int_0^\infty \rho(\lambda, T)\, d\lambda$

    $u \rightarrow$ celková intenzita vyžiareného žiarenia

    $\rho(\lambda, T) \rightarrow$ spektrálna hustota intenzity
  - $\uparrow T = \downarrow \lambda_{max}$

    $\lambda_{max} \rightarrow$ vlnová dĺžka, pre ktorú pozorujeme maximum spektrálnej hustoty intenzity žiarenia $\rho_{max}(\lambda_{max}, T)$
  - priebeh spektrálnej hustoty $\rho(\lambda, T)$



https://esfsciencenew.wordpress.com/2013/10/29/black-body-radiation/

- Stefan-Boltzmannov zákon $\boxed{u = \sigma T^4}$

  $[\sigma] = W m^{-2} K^{-4}$ Stefan-Boltzmannova konštanta

- Wienov zákon $\boxed{\lambda_{max} = \frac{konšt.}{T}}$

- Planckov vyžarovací zákon $\rho(f, T) = \frac{8\pi f^2}{c^3} \frac{hf}{\exp\{\frac{hf}{k_B T}\} - 1}$

  $f = \frac{c}{\lambda}$ frekvencia emitovaného žiarenia

  $\rightarrow$ žiarenie je emitované vo forme kvánt !

  energia kvanta je $\boxed{E = hf}$

  $h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}\ J \cdot s$ Planckova konštanta

  $k_B = 1{,}38 \cdot 10^{-23}\ J\, K^{-1}$ Boltzmannova konštanta

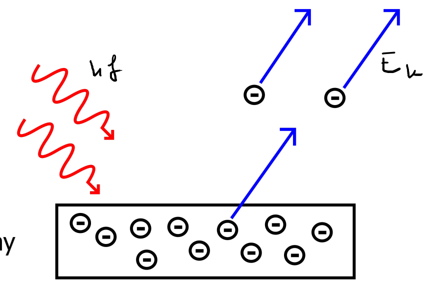
Fotoelektrický jav

- elektróny sú emitované z povrchu kovu po ožiarení elektromagnetickým žiarením
- kinetická energia emitovaných elektrónov je

$$\boxed{E_k = hf - A}$$

hf ... energia kvanta dopadajúceho elmag žiarenia

A ... výstupná práca (akú energiu potrebujú elektróny v kove, aby sa uvoľnili z povrchu)



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Photoelectric_effect.svg

6. Světlo dopadá na povrch sodíku a způsobuje fotoemisi. Brzdné napětí je pro emitované elektrony 5,0 V a výstupní práce sodíku je 2,2 eV. Jaká je vlnová délka dopadajícího světla?

$U_B = 5{,}0\ \mathrm{V}$ ... napätie, ktoré potrebujeme, aby sme zastavili vylietajúci elektrón, t.j. znížili jeho E_k na 0

$A = 2{,}2\ \mathrm{eV} = 3{,}524 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{J}$; $e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C}$; $h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}$; $c = 3 \cdot 10^{8}\ \mathrm{m\,s^{-1}}$

$\lambda = ?$; $f = \frac{c}{\lambda}$

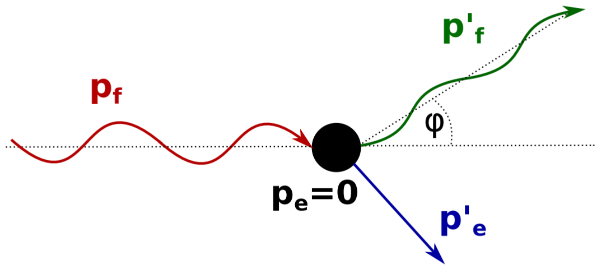
$$E_k = U_B e = \frac{hc}{\lambda} - A \longrightarrow \frac{hc}{\lambda} = U_B e + A$$

$$\lambda = \frac{hc}{U_B e + A} = \frac{6{,}62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^{8}}{5 \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19} + 3{,}524 \cdot 10^{-19}}$$

$$\lambda = 1{,}72 \cdot 10^{-7}\ \mathrm{m} = 172\ \mathrm{nm}$$

Comptonov rozptyl

- nepružný rozptyl rtg žiarenia na voľných elektrónoch
- uvažujeme, že elektrón je pred dopadom žiarenia v pokoji, t.j. $E_{k_e} = 0$ a $\vec{p}_e = 0$
- pre sústavu dopadajúce žiarenie - elektrón - rozpýlené žiarenie platí zákon zachovania energie (ZZE) a zákon zachovania hybnosti (ZZH)



Zbyňkova prezentácia

- zistilo sa, že fotóny s frekvenciou f sa správaju ako častice s hybnosťou $p_f = \frac{hf}{c}$
- $\lambda < \lambda'$
- zo ZZH a ZZE môžeme odvodiť vzťah pre rozdiel vlnových dĺžok dopadajúceho a rozptýleného žiarenia

$$\boxed{\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c}(1 - \cos\varphi)}$$

$\lambda_c = \frac{h}{m_e c} = 2{,}34\,pm$ Comptonova vlnová dĺžka

2. Rentgenové záření o vlnové délce 0,0665 nm se rozptyluje na volných elektronech (Comptonův jev).
   (a) Jakou největší vlnovou délku záření lze pozorovat u rozptýlených fotonů?
   (b) Pod jakým úhlem rozptylu toto záření pozorujeme?

$\lambda = 0{,}0665\,nm = 66{,}5\,pm$

a) $\lambda'_{max} \Leftrightarrow \Delta\lambda$ je maximálna

$$\Delta\lambda = \lambda'_{max} - \lambda = \lambda_c(1 - \underbrace{\cos\varphi}_{max \Leftrightarrow \cos\varphi = -1})$$

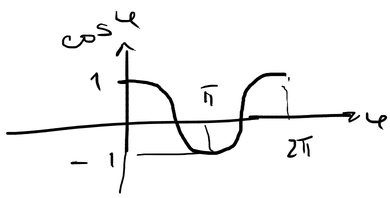
$$\lambda'_{max} - \lambda = 2\lambda_c$$

$$\lambda'_{max} = 2\lambda_c + \lambda$$

$$\lambda'_{max} = 2 \cdot 2{,}34 + 66{,}5$$

$$\lambda'_{max} = 71{,}18\,pm$$

b)



$\varphi_{max} = 180°$

Vlnovo-časticový dualizmus (de Broglieho hypotéza)

- mikročastice majú súčastne vlnové a časticové vlastnosti
- s každou časticou s hybnosťou p je spojená vlna s vlnovou dĺžkou λ

$$\boxed{p = \frac{h}{\lambda_B}} = \frac{h}{2\pi} k = \hbar k \qquad \hbar = \frac{h}{2\pi} \ \dots \text{Comptonova vlnová dĺžka}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_B}$$

- hmotná častica: $E = \frac{p^2}{2m} = \frac{1}{2} m v^2$ $\quad p = mv$
- fotón: $E = hf = \frac{hc}{\lambda}$ $\quad p = \frac{h}{\lambda} = \frac{hf}{c}$

pozn.:
- v tomto kontexte uvažujeme, že hmotná častica je voľná, t.j. nepôsobia na ňu žiadne vonkajšie sily a má teda len kinetickú energiu
- príklady hmotných častích: elektróny, protóny, makroskopické objekty, ...

11. Vlnová délka žluté spektrální emisní čáry sodíku je 590 nm. Pro jakou kinetickou energii má elektron stejnou de Broglieho vlnovou délku?

$\lambda_B = 590\ \text{nm} = 5{,}9 \cdot 10^{-7}\ \text{m}$

$m_e = 9{,}11 \cdot 10^{-31}\ \text{kg}$

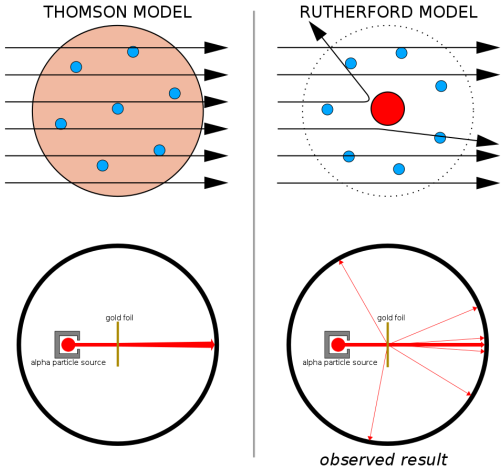
$E_k = ?$

$$E_k = \frac{p^2}{2m_e} \ ; \quad p = \frac{h}{\lambda_B} = \frac{6{,}626 \cdot 10^{-34}}{5{,}9 \cdot 10^{-7}} = 1{,}12 \cdot 10^{-27}\ \text{kg m s}^{-1}$$

$$E_k = \frac{(1{,}12 \cdot 10^{-27})^2}{2 \cdot 9{,}11 \cdot 10^{-31}} = 6{,}93 \cdot 10^{-25}\ \text{J} = 4{,}3 \cdot 10^{-6}\ \text{eV}$$

Rutherfordov rozptylový experiment

- cieľ experimentu: overenie Thomsonovho modelu atómu (pudingový model - kladný náboj rovnomerne rozložený v atóme predstavuje kladné pozadie pre záporne nabité elektróny)
- α - častice dopadajú na zlatú fóliu a rozptylujú sa na atómoch Au
  ↳ He^{2+}
- možné scenáre:
  - rovnomerne rozložený kladný náboj v objeme atómu ... α- častice sa mierne vychýlia
  - kladný náboj je sústredený do malého objemu ... α - častice sa rozptýlia do veľkých uhlov
- výsledok experimentu: kladý náboj sa sústredí do veľmi malej oblasti vnútri atómu



https://en.wikipedia.org/wiki/Geiger-Marsden_experiments

(3.) α-částice je vyslána přímo na jádro atomu zlata. α-částice má 2 protony, jádro zlata má 79 protonů. Jaká je minimální kinetická energie, aby se α-částice přiblížila k jádru Au na vzdálenost $5 \cdot 10^{-14}$ m? Předpokládejte, že jádro Au setrvává po celou dobou srážky v klidu.

$Z_\alpha = 2$; $\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12}\, CV^{-1}m^{-1}$

$Z_{Au} = 79$; $e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\, C$

$R = 5 \cdot 10^{-14}\, m$

α-častica - jadro Au ← platí ZZE

$E = E_k + E_p$

$$E_p(r) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{Z_\alpha Z_{Au} e^2}{r}$$

α-častica

• Au

$E_p = 0$

$E_k = E$

$$E_k = E_p(R) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{Z_\alpha Z_{Au} e^2}{R}$$

$$E_k = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 8{,}854 \cdot 10^{-12}} \frac{2 \cdot 79 \cdot (1{,}602 \cdot 10^{-19})^2}{5 \cdot 10^{-14}}$$

$$E_k = 7{,}29 \cdot 10^{-13}\, J = \underline{\underline{4{,}6\, MeV}}$$

• α-častic. Au

R

$E_k = 0$

$E_p = E$

α-č. Au

R

$E_k = 0$

$E_p = E$