

Kvantová, atómová a subatómová fyzika

1. Kvantové vlastnosti EM poľa a vlnové prejavy častíc

Veličiny a jednotky

Energiu budeme často merať v elektrónvoltoch (eV, keV, MeV...)

$$1 \text{ eV} = 1,602 \, 176 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1 \text{ V} = 1,602 \, 176 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Hmotnosť sa dá premeniť na energetické jednotky, pretože

$$E = mc^2$$

takže hmotnosť sa dá merať v eV/c^2

Typické čísla:

$$N_A = 6,022 \, 140 \, 76 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} \text{ (presne!)}$$

$$u = 1,660 \, 565 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 931,508 \text{ MeV}/c^2$$

$$c = 299 \, 792 \, 458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \text{ (presne!)}$$

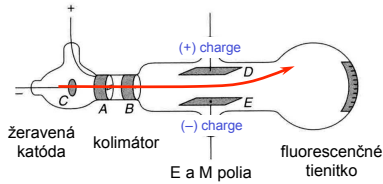
$$\text{veľkosť atómu: } 10^{-9} \text{ m}$$

Objav elektrónu

Joseph John Thompson,
1897 (NC 1906)



Katódová trubica použitá na výrobu katódového žiarenia (elektrónov), ich vychýlenie v E a M poli a meranie e/m

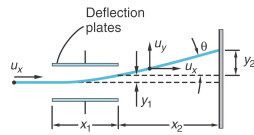


Napred nastaviť polia tak, aby nebola odchýlka

$$cvB = eE \quad v = \frac{E}{B}$$

Potom vypnúť mg pole a zmerať odchýlku

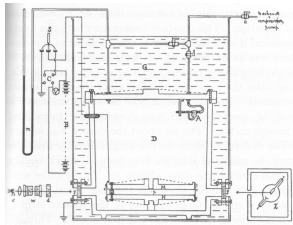
$$y_1 + y_2 = \frac{e}{m} \frac{B^2}{E} \left(\frac{x_1^2}{2} + x_1 x_2 \right)$$



3

Meranie náboja elektrónu

R.A. Millikan, 1911



Olejové kvapky padajú stálou rýchlosťou

$$G = R + A$$

Po ožiarení RTG pôsobí na kvapky E pole, kvapky padajú inou rýchlosťou.

$$G = R + A + F$$

$$G = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g$$

$$R = 6\pi \eta r u$$

$$A = \frac{4}{3} \pi r^3 \sigma g$$

$$F = Eq$$

Napred treba vyjadriť polomer kvapky r a potom môžeme vyjadriť náboj q .

$$q = \frac{18\pi\eta}{E} \sqrt{\frac{\eta v}{2g(\rho - \sigma)}} (v - u)$$

4

Žiarenie čierneho telesa

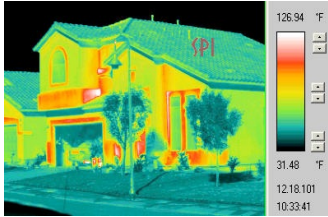
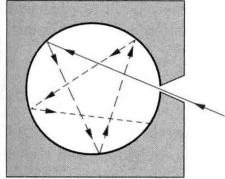
Vyžarovanie alebo absorpcia žiarenia, pomocou ktorého teleso s teplotou T udržiava rovnováhu s prostredím.

Pri izbových teplotách v infračervenej oblasti.

Pri vyšších teplotách ho možno pozorovať.

Využitie: termokamery, nočné videnie, teplomery

Ideálne čierne teleso



5

Žiarenie čierneho telesa: Stefanov-Boltzmannov zákon a Wienov zákon

Intenzita vyžarovania:
výkon z jednotkovej plochy
Stefanov-Boltzmannov zákon

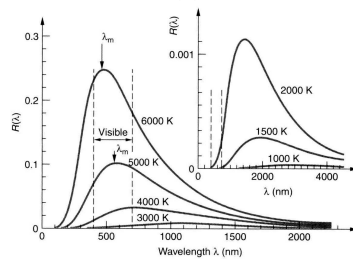
$$R = \sigma T^4$$

Stefanova konštanta

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{T}^{-4}$$

Poloha maxima spektra:
Wienov posunovací zákon

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2,9 \times 10^{-3} \text{ (m} \cdot \text{K)}}{T \text{ (K)}}$$



Slnko: $T=6000 \text{ K}$, $\lambda_{\text{max}} = 480 \text{ nm}$

6

Žiarenie čierneho telesa: Planckov vyžarovací zákon

Spektrálna hustota hustoty energie:
hustota energie v dutine pripadajúca na jednotkový interval vlnových dĺžok

$$u_\lambda = \frac{8\pi hc\lambda^{-5}}{\exp(hc/\lambda kT) - 1}$$



Spektrálna hustota intenzity vyžarovania:
vyžarovaný výkon z jednotkovej plochy pripadajúci na jednotkový interval vlnových dĺžok

$$\frac{d\phi}{dS d\lambda} = \frac{c}{4} u_\lambda = \frac{2\pi hc^2 \lambda^{-5}}{\exp(hc/\lambda kT) - 1}$$

Vzťah napred navrhovaný (Max Planck, 1900), potom argumenty:
elektromagnetická vlna s vlnovou dĺžkou λ môže mať energiu len v násobkoch

$$E = \frac{hc}{\lambda} = h\nu$$

Planckova konštanta $h=6,626\ 070\ 15 \cdot 10^{-34}$ J.s (presne)

oscilátory v stenách môžu vyžarovať energiu len po kvantách (Einstein)

7

Fotoelektrický jav

Jav náhodne objavený **Heinrichom Hertzom** v roku 1887

Pozorovanie: ak je záporne nabité teleso ožiarené UV žiarením, jeho náboj klesá

Presné pozorovanie a zmeranie e/m : **Joseph John Thompson** (Nobelova cena 1906) a **Philipp Lenard** (Nobelova cena 1905)

Teoretické vysvetlenie podal **Albert Einstein** v roku 1905 (Nobelova cena 1921): elektróny sú vyrážané z materiálu čiastočkami svetla

Presné merania a potvrdenie Einsteinovej teórie vykonal **Robert A. Millikan** (Nobelova cena 1923)



Hertz



Thompson



Lenard



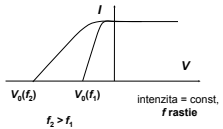
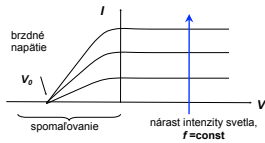
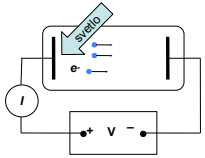
Einstein



Millikan

8

Fotoelektrický jav: pozorovanie



Pozorujeme:

1. V danom materiáli nezávisí **brzdné napätie** od intenzity dopadajúceho svetla.
2. Pri $f = \text{const}$ je saturovaný prúd úmerný intenzite svetla.
3. Pre každý materiál existuje jeho hraničná frekvencia: nulový fotoprúd pri $f < f_0$.
4. Okamžitá reakcia: pri ožiarení máme hneď prúd (táto vlastnosť je využívaná v aplikáciách).

9

Fotoelektrický jav: interpretácia

Vysvetlenie pomocou klasickej fyziky zlyháva!

Energia elektrónu by závisela od *intenzity* dopadajúceho žiarenia, **ale ona nezávisí.**

Nie je dôvod, prečo by mala existovať *hraničná frekvencia*.

Absorpcia energie potrebnej na uvoľnenie jedného elektrónu z *elektromagnetických vln* by trvala mnoho minút (pozri HRW príklad 39.2), **ale efekt je okamžitý.**

Kvantová interpretácia

Jedno kvantum svetla (fotón) vyrazí elektrón z kovu. Energia fotónu sa pritom spotrebuje na vytrhnutie elektrónu z materiálu a na kinetickú energiu elektrónu.

$$h\nu = E_k + A$$

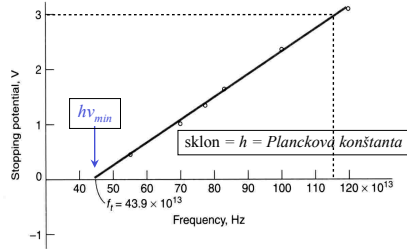
10

Fotoelektrický jav: meranie h

$$h\nu = E_k + A$$

$$E_k = U_b e$$

$$U_b e = h\nu - A$$

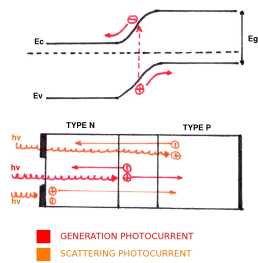


$$h = \frac{3\text{eV}}{(116 - 44) \times 10^{13}\text{Hz}} = 4,1 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s} = 6,6 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

11

Fotoelektrický jav: a načo je to dobré?

Vnútrotný fotoelektrický jav je základom fungovania fotovoltických panelov



Fotóny svojou energiou excitujú elektróny na prechode medzi p a n polovodičom. Tie sa stávajú vodivostnými a sú vďaka napätiu na prechode transportované.

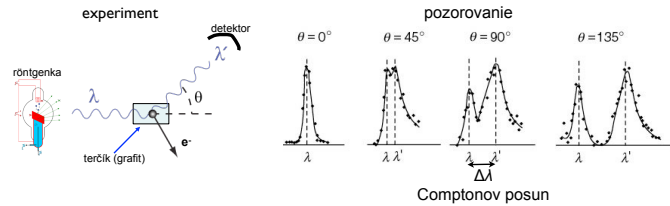
12

Comptonov jav



Arthur Compton, 1923 (Nobelova cena 1927)

Ostrefoval uhlíkový terč röntgenovými lúčmi
 $\lambda = 71,1 \text{ pm}$



Výsledky sa nedajú interpretovať klasicky

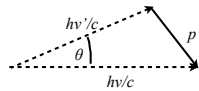
Svetlo by rozkmitalo nabitú časticu a tie by následne vyžarovali s rovnakou frekvenciou, ako je frekvencia dopadajúceho svetla.

13

Comptonov jav: interpretácia

Nepružný rozptyl fotónu na slabo viazanom elektróne

Výpočet: zákon zachovania energie a zákon zachovania hybnosti



$$h\nu = h\nu' + E_k' = h\nu' + \sqrt{p'^2 c^2 + m^2 c^4} - mc^2$$

$$p' = \left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 + \left(\frac{h\nu'}{c}\right)^2 - 2\frac{h^2}{c^2}\nu\nu' \cos \theta$$

Z prvej rovnice vyjadríme p' a dosadíme do druhej. Dostaneme

$$(\nu - \nu') = \frac{h}{mc^2} \nu \nu' (1 - \cos \theta)$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad \nu' = \frac{c}{\lambda'}$$

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \theta)$$

$$\frac{h}{mc} = \lambda_c \quad \text{Comptonova vlnová dĺžka}$$

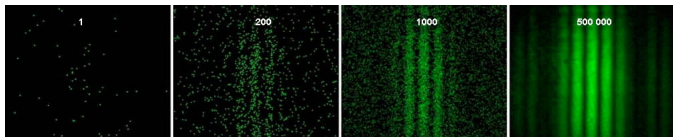
Pík pri pôvodnej vlnovej dĺžke: rozptyl na elektróne blízko jadra sa chová ako rozptyl na celom atóme s veľmi veľkou hmotnosťou.

14

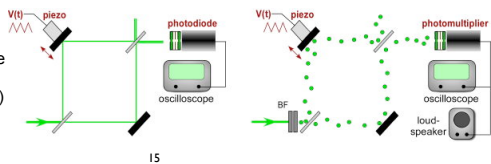
Svetlo ako vlna pravdepodobnosti

Aj jeden fotón interferuje!!!!

Dvojštrbinový experiment s veľmi slabým zdrojom svetla - len jeden fotón v aparátúre (G.I. Taylor, 1909)
tento výsledok: A. Weis a R. Wynands, 2003

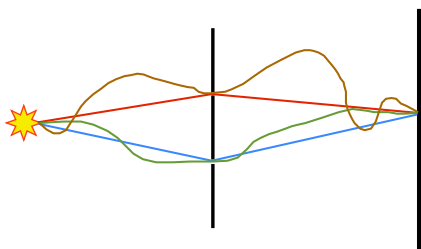
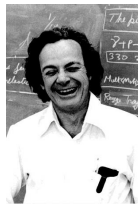


Alternatívna verzia: rôzne optické dráhy (tu: T. Dimitrova, A. Weis)



Šírenie fotónov všetkými dráhami

R.P. Feynman:
Častica sa šíri z A do B všetkými možnými dráhami, pričom amplitúdy pre rôzne dráhy interferujú.



Elektróny (a iné častice) ako vlny

Louis de Broglie (1924, Nobelova cena 1929):
častice sa správajú ako vlny s vlnovou dĺžkou a
frekvenciou danými hybnosťou a energiou



Louis-Victor 7e duc de Broglie

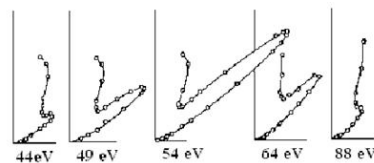
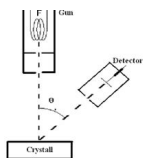
$$\lambda = \frac{h}{p}$$

$$\nu = \frac{E}{h}$$

17

Davissonov a Germerov experiment

(Clinton Joseph Davisson & Lester Halbert Germer, 1927)
Ostreľovanie kryštálu Ni elektrónmi urýchlenými napätím U .
Pozoruje sa maximum odrazenej intenzity pri $U=54$ V pod uhlom 50 stupňov.



Podmienka interferencie:
dráhový rozdiel násobkom vlnovej dĺžky

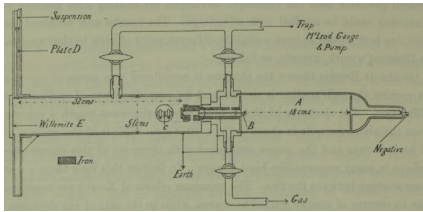
$$n\lambda = d \sin \theta$$
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2meU}}$$



18

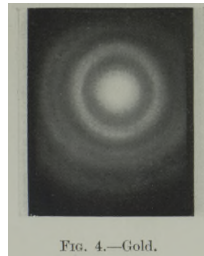
Difrakcia elektrónov

(George Paget Thompson, 1927)



Vzorka: tenký film v polohe C
Podľa Braggovej formuly je polomer obrazca na tienitku E

$$D = 2n \frac{\lambda}{d} L$$



19

Dvojštrbinový experiment s elektrónmi

Pozoruje sa aj pre elektróny individuálne prechádzajúce dvojštrbinou.

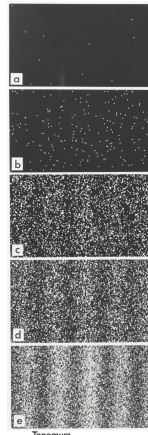
pozoruje sa aj pre ťažšie častice:
molekuly I₂ (1994), C₆₀ a C₇₀ (1999)

Využitie interferencie častíc:

RTG žiarenie na výskum elektrónovej štruktúry materiálu

Elektróny na výskum vlastností povrchu, pretože prenikajú len do malej hĺbky.

Neutróny interagujú len s jadrom a preto sú vhodné na štúdium rozloženia jadier atómov. Vďaka veľkej hmotosti majú malú vlnovú dĺžku a dobré rozlíšenie.



20