

KVANTOVÁ FYZIKA

Opíšte podstatu fotoelektrického javu, vyslovte jeho zákonitosti a napíšte Einsteinovu rovnicu fotoelektrického javu.

Fotoelektrický jav (fotoefekt) je experimentálne pozorovaný jav, kedy svetlo vhodnej vlnovej dĺžky pri dopade na kov alebo polovodič vyráža z atómov látky elektróny, ktoré sa potom voľne pohybujú v látke a zvyšujú jej vodivosť (to je vnútorný fotoelektrický jav) alebo opustia látku (to je vonkajší fotoelektrický jav). Tento jav sa využíva napríklad pri konštrukcii fotodiódy alebo fototranzistora.

Vonkajší fotoelektrický jav objavil v roku 1887 nemecký fyzik Heinrich Rudolf Hertz, a došiel k nasledujúcim záverom:

- Kinetická energia vyletujúcich elektrónov nezávisí od intenzity žiarenia, ktoré na povrch kovu dopadá.
- Zväčšenie intenzity žiarenia vedie k zväčšeniu počtu elektrónov vyletujúcich z kovu.
- Kinetická energia týchto elektrónov je závislá od frekvencie dopadajúceho žiarenia.
- Táto závislosť je lineárna, pričom smernica priamky, ktorá ju vyjadruje, sa rovná Planckovej konštante.
- Túto závislosť nebolo možné vysvetliť z hľadiska klasickej elektromagnetickej teórie.

Albert Einstein našiel pre fotoefekt jednoduché vysvetlenie. Predpokladal, že fotoefekt je proces, pri ktorom platí zákon zachovania energie a že pri tomto jave ide o premenu energie elektromagnetického žiarenia na kinetickú energiu elektrónov. Je to premena, ktorá má v podstate opačný charakter, ako žiarenie absolútne čierneho telesa. Keďže vyžarovanie absolútne čierneho telesa prebieha skokom, Einstein predpokladal, že aj opačný proces musí prebiehať skokom. Takto hypoteticky odvodil existenciu fotónov. Fotónu prisúdil energiu $E = h \cdot f$ kde h je Planckova konštanta a f je frekvencia žiarenia.

Pri fotoefekte sa elektróny z kovu uvoľňujú, keď fotóny žiarenia majú dostatok energie, potrebnej na to, aby po jej odovzdaní elektróny prekonali sily, ktoré ich držia v látke. Tú časť energie, ktorá sa spotrebuje na uvoľnenie elektrónu z kovu označme W_v , a nazývame ju výstupná práca. Zostávajúca energia sa premení na kinetickú energiu vyletujúceho elektrónu, potom zo zákona zachovania energie platí (Einsteinova rovnica fotoelektrického javu):

$$E = h \cdot f = W_v + W_k = W_v + \frac{1}{2} m_e \cdot v^2 \qquad h \cdot f = W_v + \frac{1}{2} m_e \cdot v^2$$

Je kuriozitou, že Albertovi Einsteinovi bola udelená Nobelova cena za fyziku práve za objasnenie fotoelektrického javu, a nie za objav teórie relativity, ktorou sa preslávil.

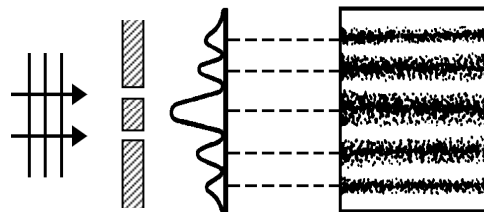
Vonkajší fotoelektrický jav má dnes len malé praktické využitie vo fotonásobičoch (použitých v špeciálnych vedeckých zariadeniach). Vnútorný fotoelektrický jav je základom väčšiny moderných fotosenzorov v optoelektronike, ako sú fotodióda alebo fototranzistor, ako aj plošné snímače na snímanie obrazu použité v kamerách (obvykle typu CCD).

Vysvetlite pojmy: svetelné kvantum, fotón, opíšte korpuskulárno-vlnový dualizmus žiarenia a častíc.

Svetelné kvantum: Einstein používal vo svojich prácach pojem svetelné kvantum. Pri fotoelektrickom jave sa svetlo správa ako súbor svetelných kvánt. Svetlo je vlnenie, ale účinky, ktoré pri fotoefekte vyvoláva jasne naznačujú, že svetlo musí byť kvantované. Svetelné kvantum má u Einsteina rovnaký fyzikálny význam ako fotón.

Fotón je objekt mikrosвета, ktorý má aj časticové, aj vlnové vlastnosti, ale nie je ani vlnou, ani časticou v zmysle klasickej fyziky.

Korpuskulárno-vlnový dualizmus: Pri skúmaní interferenčných javov bol pozorovaný dualizmus, kedy sa svetlo správalo ako vlnenie pretože dochádzalo k interferencii a to aj v prípade svetla s minimálnou intenzitou a zároveň na fotoplatni vyvolávalo „bodové“ sčernanie čo zasa bol prejav jeho časticového charakteru.



Opíšte elektrónový obal atómu so zvýraznením kvantovania energie atómov.

J.J.Thompson na konci 19. storočia predstavil pudingo-hrozienkový model atómu. V roku 1906 bol objavený elektrón. E. Rutherford ostreľoval časticami alfa tenkú zlatú fóliu a rozptyl, ktorý zaznamenal viedol k objavu jadra atómu. Jadro atómu predstavuje jednu milióntinu objemu a 99,99 % hmotnosti atómu. Tento objav viedol k planetárnemu modelu atómu, čo by však viedlo k jeho nestabilite.

N. Bohr priniesol teóriu v ktorej rieši nedostatky predchádzajúcich modelov tromi postulátmi:

- Atóm sa môže nachádzať len v istých „kvantových stavoch“. Každý z týchto stavov má presne určenú hodnotu energie E_n $n = 1, 2, 3, \dots$
- Pri prechode atómu zo stavu s energiou E_n do stavu s nižšou energiou E_m vysiela atóm žiarenie s frekvenciou f_{nm} danou vzťahom $E_n - E_m = h \cdot f_{nm}$

Aj keď sa táto teória ukázala aplikovateľná len na atóm vodíka znamenala veľký posun smerom ku kvantovej fyzike. Bohr v podstate použil pri opise energie atómu hlavné kvantové číslo n . Súčasný kvantovo-mechanický model atómu pozná ďalej orbitálne kvantové číslo l , magnetické kvantové číslo m a spinové kvantové číslo s .

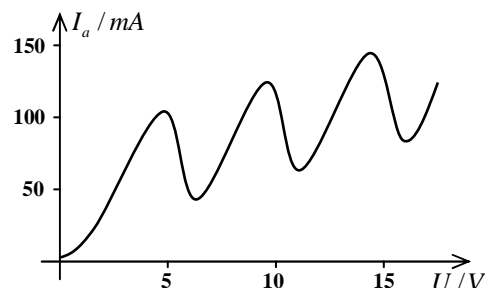
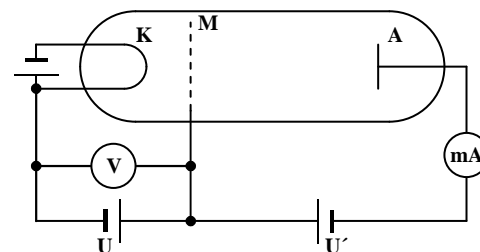
Kvantovanie energie atómov bolo experimentálne overené v roku 1914 fyzikmi J. Franck a G. Hertz. Pripravili pokus podľa nasledujúcej schémy, pričom v trubici boli zriedené pary ortuti.

K – katóda; **A** – anóda; **M** – mriežka; **V** – voltmeter; **mA** – ampérmeter (anódový rúd); **U** – urýchľovacie napätie; **U'** - brzdiace napätie

Franck a Hertz pozorovali závislosť urýchľovacieho napätia a anódového prúdu. Graf tejto závislosti ukázal, že do hodnoty $U = 4,89$ V sa zvyšuje kinetická energia atómov. Keď je táto hodnota prekročená, atóm prejde zo základného stavu do excitovaného, čo v súlade so ZZE znamená náhly pokles jeho E_k . Preto sa vďaka brzdiacemu napätiu medzi mriežkou a anódou nedostane na anódu v dôsledku čoho sa zníži anódový prúd. Tento dej sa opakuje vždy vtedy, keď je urýchľovacie napätie dostatočné na to aby atóm prešiel do vyššieho excitovaného stavu.

($U_2 = 2 \cdot U = 9,78$ V ; $U_3 = 3 \cdot U = 14,67$ V ; ...)

Franckov – Hertzov pokus bol významný aj preto, že ukázal, že kvantovanie energie je vlastnosťou atómov aj vtedy, keď sa na tomto procese nezúčastňujú fotóny.

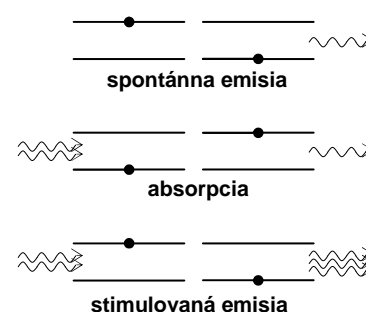


Porovnajte spontánnu a stimulovanú emisiu, princíp lasera a jeho využitie.

Spontánnu emisiu: keď je atóm v excitovanom stave „2“ s energiou E_2 , prechádza spontánnou (samovolnou) emisiou do základného stavu „1“ s energiou E_1 a vyžiari pritom fotón s energiou $E_2 - E_1$, pričom frekvenciu a vlnovú dĺžku, ktorú bude mať fotón je určená vzťahmi:

$$E_2 - E_1 = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad \Rightarrow \quad f = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad ; \quad \lambda = h \cdot \frac{c}{E_2 - E_1}$$

Absorpcia: keď je atóm v základnom stave „1“ s energiou E_1 a dopadá naň žiarenie spĺňajúce predchádzajúcu podmienku, atóm môže „pohltnúť“ fotón a preskočiť do excitovaného stavu „2“ s energiou E_2 . Hovoríme o absorpcii žiarenia.



Stimulovaná emisia: keď je atóm v excitovanom stave „2“ s energiou E_2 a dopadá naň žiarenie spĺňajúce predchádzajúcu podmienku, potom môže nastať situácia, kedy atóm emituje (vyžiari) fotón s rovnakou frekvenciou ako je frekvencia dopadajúceho žiarenia. Pretože tieto žiarenia sú koherentné, dochádza k zosilneniu žiarenia.

Laser: princípom činnosti laseru je práve stimulovaná emisia.

Zosilnenie svetla vzniká vďaka stimulovanej emisii. Ide vlastne o druh luminescencie, pričom elektróny z vybudovaných stavov prechádzajú na základné stavy za sprievodu vyžiareného fotónu vplyvom interakcie s iným fotónom zodpovedajúcej vlnovej dĺžky. Takto vyžiarený „nový“ fotón má rovnakú frekvenciu aj fázú ako „pôvodný“ fotón.

Súčasťou laseru je (najčastejšie Fabry - Perotov, t.j. dve rovnobežné zrkadlá) rezonátor. Spontánne vyžiarený fotón v rezonátore opakovane prechádza materiálom, vyvoláva stimulovanú emisiu a takto vznikajúce fotóny vyvolávajú ďalšiu stimulovanú emisiu - dochádza k lavínovému efektu.

Podľa aktívnej látky delíme Lasere na polovodičové, plynové a kvapalinové. Najčastejšie sa v praxi dá stretnúť s laserom rubínovým, xenónovým, laserovou diódou, röntgenovým, ...

Pre pochopenie činnosti laseru odporúčam:

<http://www.gcm.sk/external/predmety/fyzika/dokumenty/animacie/Laser.jar>

Príklad: Akému druhu monofrekvenčného elektromagnetického žiarenia prislúchajú elektróny o energii $1,92 \cdot 10^{-19}$ J, ak viete, že Planckova konštanta ja $6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s a rýchlosť svetla vo vákuu $3 \cdot 10^8$ m.s⁻¹.

$$\left. \begin{array}{l} E = 1,92 \cdot 10^{-19} \text{ J} \\ h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s} \\ c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1} \end{array} \right\} \begin{array}{l} E = h \cdot f \\ f = \frac{c}{\lambda} \end{array} \Rightarrow E = h \cdot \frac{c}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{h \cdot c}{E}$$

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}}{1,92 \cdot 10^{-19} \text{ J}} = 1,036 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 1036 \text{ nm}$$

Viditeľné svetlo je z intervalu vlnových dĺžok $\lambda \in \langle 390 ; 790 \rangle$ nm ($\lambda_{\text{fialová}} = 390$ nm ; $\lambda_{\text{červená}} = 790$ nm). Keďže $\lambda > \lambda_{\text{červená}}$ potom sa jedná o infračervené žiarenie.