

6.2.3 Pokusy vedoucí ke kvantové mechanice II

Předpoklady: 060202

Př. 1: Jakým způsobem probíhá vybíjení nabitých předmětů ve třídě? Jak je možné, že se vybíjejí kladně i záporně nabitě předměty. Proč je vybíjení urychlováno ionizací vzduchu (například plamenem)?

Nabitý předmět přitahuje opačně nabitě částice \Rightarrow vychytává ionty a elektrony, které neustále vznikají a zanikají ve vzduchu \Rightarrow každý přitažený opačný náboj zmenší náboj předmětu \Rightarrow předmět se postupně vybije.

Ionizace vzduchu \Rightarrow zvětší se počet přitáhnutelných iontů \Rightarrow nabitý předmět přitahuje větší množství částí \Rightarrow rychleji se vybije.

Fyzikálně nejzajímavějším způsobem uvolňování elektronů z kovu se ukázalo uvolňování dopadem elektromagnetického záření - **vnější fotoefekt**.

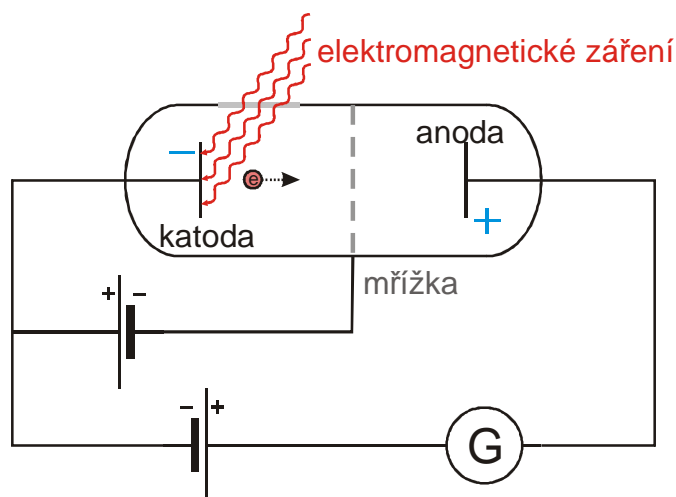
Př. 2: Navrhni pokus, kterým by bylo možno sledovat vnější fotoefekt (uvolňování elektronů z kovu vlivem elektromagnetického záření).

Musíme zajistit:

- nepřítomnost iontů i elektronů, které se neuvolnily z kovu \Rightarrow pokus probíhá ve vzduchoprázdnu \Rightarrow umístíme sledovaný kov do (skleněné) baňky s vakuem,
- nepřítomnost záření, které zrovna nesledujeme \Rightarrow baňka musí být začerněná, s "okénkem", kterým dovnitř pouštíme záření o požadované vlnové délce,
- měření počtu uvolněných elektronů \Rightarrow do baňky musíme umístit elektrody, které připojíme do obvodu, kterým budou procházet uvolněné elektrony. Kov, ze kterého budeme elektrony uvolňovat bude katodou, elektrony budou přecházet ke kladné anodě na druhé straně baňky.

Zajímavé podrobnosti můžeme zjistit, pokud budeme schopni změřit energii uvolněných elektronů \Rightarrow do baňky umístíme mezi kov a anodu (která uvolněné elektrony přitahuje) ještě vůči kovu záporně nabitou mřížku. Elektrony budou muset překonat toto záporné napětí ("vyjet do kopce") a to se jim podaří pouze v případě, že budou mít dostatečnou kinetickou energii. Změnou napětí mřížky můžeme regulovat výšku bariéry a tak zjistit, jaké je rozložení energií uvolněných elektronů.

Schéma pokusu na měření fotoefektu



Dopadající světlo dodává elektronům energii potřebnou k uvolnění z kovu.

- Při nulovém napětí mřížky odpovídá počet uvolněných elektronů proudu naměřenému galvanometrem.
- Při nenulovém napětí mřížky odpovídá proud naměřený galvanometrem počtu elektronů, které mají po uvolnění z kovu energii dostatečnou k překonání napěťové bariéry.

Př. 3: Jaké závislosti počtu a energie uvolněných elektronů můžeme na aparatuře měřit? Vypiš je a odhadni výsledky pokusu. Jak se budou lišit energie uvolněných elektronů.

Můžeme zkoumat počet uvolněných elektronů v závislosti na

- intenzitě dopadajícího záření
Při stejné vlnové délce záření měníme intenzitu dopadajícího záření \Rightarrow větší intenzita záření \Rightarrow dodáváme více energie \Rightarrow uvolníme více elektronů.
Energie uvolněných elektronů by se měly lišit (podobně jako se liší kinetické energie náhodně se pohybujících částic vzduchu).
- vlnové délce dopadajícího záření
Při stejné intenzitě záření měníme vlnovou délku \Rightarrow dodáváme stále stejné množství energie \Rightarrow uvolníme stále stejné množství elektronů.
Energie uvolněných elektronů by se měly lišit (podobně jako se liší energie náhodně se pohybujících částic vzduchu).

Dodatek: Že byla zkoumána závislost na intenzitě je samozřejmé, ale nápad testovat vlnovou délku záření určitě není samozřejmý. Na přelomu letopočtu se ještě nikdo nemohl setkat s dnes naprosto běžným konstatováním, že energie světla závisí na vlnové délce. V tehdejší době by bylo zcela přirozené měřit pouze závislost na intenzitě dopadajícího bílého světla.

Naměřené výsledky neodpovídají předpokladům.

- Pro každý kov existuje určitá mezní frekvence f_0 dopadajícího záření, která je nutná k tomu, aby se elektrony začaly uvolňovat. Při frekvencích nižších než f_0 se elektrony z kovu neuvolňují.
- Je-li frekvence dopadajícího záření vyšší než f_0 závisí množství uvolněných elektronů na intenzitě osvětlení.

- Energie uvolněných elektronů se podstatně neliší, roste lineárně s frekvencí dopadajícího záření.

1905: A. Einstein (inspirace Planckem): Světlo se při interakci s hmotou projevuje jako proud částic (světelných kvant, **fotonů**), které se pohybují rychlostí světla a které nemohou existovat v klidu. Při interakci z kovem předá foton svou energii vždy jednomu elektronu. Pro fotony

$$\text{platí: } E = hf, \quad p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

Dodatek: Za vysvětlení fotoefektu obdržel A. Einstein v roce 1921 svou jedinou Nobelovu cenu. Teorie relativity byla v té době považována za příliš kontroverzní. Vysvětlení fotoefektu bylo přijímáno obecněji.

Př. 4: Vysvětli pomocí fotonů výsledky fotoefektu. Sestav rovnici, která umožňuje vypočítat energii uvolněných elektronů.

Energie fotonů roste s frekvencí záření ($E = hf$).

- Při frekvencích $f < f_0$ nemá foton dost energie, aby se elektron mohl uvolnit.
- Pokud je frekvence záření větší než f_0 elektrony se mohou uvolňovat. Větší intenzita záření znamená větší počet dopadajících fotonů, které mohou uvolnit svou energii elektrony.
- Všechny elektrony získávají od fotonů stejné množství energie a stejné množství energie spotřebují na únik z kovu \Rightarrow stejné množství energie jim zbude. Větší frekvence dopadajícího záření \Rightarrow větší energie fotonů \Rightarrow elektronům zbude více energie po úniku z kovu.

$$E_e = E_f - W = hf - W$$

Rovnici pro energii elektronu psal Einstein takto: $hf = W_v + E_k$, kde W_v je výstupní práce (pro únik z kovu) a E_k kinetická energie elektronu po opuštění kovu.

Př. 5: Mezní frekvence stříbra je 1136 THz . Urči výstupní práci pro tento kov. Jakou energii bude mít elektron, který se ze stříbra uvolní po ozáření UV zářením 200 nm ? Jaké nejmenší napětí na mřížce tyto elektrony zastaví? Všechny hodnoty energií uveď také v eV.

Mezní frekvence - celá energie fotonu se spotřebuje na uvolnění elektronu $\Rightarrow hf_0 = W_v$.

$$f_0 = 1136 \text{ THz} = 1,136 \cdot 10^{15} \text{ Hz}, \quad h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}, \quad W_v = ?$$

$$W_v = hf_0 = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 1,136 \cdot 10^{15} \text{ J} = 7,5 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 4,7 \text{ eV}$$

Výstupní práce stříbra je 4,7 eV.

Dopadající záření 200 nm: $\lambda = 200 \text{ nm} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ m}$

$$hf = W_v + E_k$$

$$E_k = hf - W_v \quad \text{vyjádříme si frekvenci z vlnové délky: } \lambda = \frac{c}{f} \Rightarrow f = \frac{c}{\lambda}$$

$$E_k = \frac{hc}{\lambda} - W_v = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{2 \cdot 10^{-7}} - 7,5 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 2,4 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1,5 \text{ eV}$$

1 eV je energie, kterou získá elektron při průchodu elektrickým polem o napětí 1 V \Rightarrow energii 1,5 eV by ztratil při průchodu polem o napětí 1,5 V.

Einsteinova rovnice sice přesně popisovala výsledky naměřené při vnějším fotoefektu, ale dlouho nebyla bezvýhradně přijímána, protože byla v rozporu s obecně přijímanou představou o světle jako elektromagnetickém vlnění (Maxwellovy rovnice žádná kvanta nepředpovídaly).

Vnitřní fotoefekt

Uvolňování elektronů z krystalové mřížky polovodiče, vznik vodivostních párů a zvyšování vodivosti (známe z loňského roku).

Mnohostranné využití:

- fotorezistor,
- fotodioda (v hradlové režimu zdroj elektrického napětí - fotočlánek),
- snímače, ovladače, xerox, čidla, ...

Náboj elektronu

1910: R. Millikan

Zkoumal pohyb malých olejových kapiček ve svislém elektrostatickém poli. Kapičky oleje na sobě sbírají náboj, který vzniká ionizací vzduchu rentgenovými paprsky.

- Při vypnutém elektrickém poli kapičky kvůli odporu vzduchu klesají \Rightarrow můžeme určit jejich poloměr.
- Po zapnutí elektrického pole se projeví nasbíraný náboj a kapičky začnou stoupat \Rightarrow z rozměru a rychlosti pohybu můžeme spočítat jejich náboj.

Překvapivé výsledky: Náboj kapiček nemůže nabývat libovolných hodnot, všechny hodnoty náboje jsou násobky hodnoty $(1,5924 \pm 0,0017) \cdot 10^{-19}$ C (přibližně o 1% méně než hodnota uznávaná dnes).

Dva významy:

- změření náboje elektronu vedlo k určení dalších konstant (hmotnost elektronu, hmotnost protonu, ...),
- přímo změřené kvantování elektrického náboje pomohlo přijetí kvantování i v jiných oblastech.

Dodatek: Millikanův pokus je zřejmě příkladem menšího vědeckého podvodu. Millikan prý vynechal některé naměřené hodnoty, aby jeho výsledek získal větší přesnost (doufal, že jeho výsledky se tak snadněji dočkají všeobecného uznání). Historie měření náboje je pak hezkým příkladem psychologie ve vědě, protože od nižší hodnoty naměřené Millikanem se k dnešní hodnotě vědci dostávali postupným zvyšováním naměřených hodnot. Nikdo zřejmě nechtěl riskovat tak velký posun proti tradiční hodnotě získané Millikanem.

Dodatek: V cizojazyčné literatuře se chyba měření většinou označuje závorkou $1,5924(17) \cdot 10^{-19}$ C.

Shrnutí: EM záření přenáší energii v kvantech o velikosti $E = hf$.