

6.2.2 Pokusy vedoucí ke kvantové mechanice I

Předpoklady:

Pedagogická poznámka: V kapitole o kvantové fyzice jsem zvolil jiný postup než používá klasická gymnazijní řada. Po úvodní opakovací hodině, následující čtyři hodiny historického přehledu pokusů, které vedly k pozdějšímu zformulování klasické mechaniky. Pokusy jsou rozebírány poměrně podrobně a vedu žáky k tomu, aby si vždy dělali představu o tom, jaké by měly být podle jejich (klasických) fyzikálních představ výsledky. Výsledky pokusů (zcela jiné než jejich odhady i původní odhady vědců) by je pak měly připravit na zcela šokující chování elektronů při dvojštěrbinovém pokusu.

Dalším cílem je snaha o to, aby žáci pochopili jak obtížně a dlouho se vědci smiřovali s tím, že na mikroskopické úrovni svět funguje úplně jinak než byli zvyklí. Proto uvádím u pokusů i letopočty a rozebírám i názory, o kterých už v době jejich vzniku bylo jasné, že jsou nesprávné, přesto byly tím nejlepším, co měla věda v té době k dispozici.

Záření černého tělesa

Všechna tělesa vyzařují v závislosti na své teplotě, množství energie roste s teplotou a zkracuje se vlnová délka, na které se vyzařuje nejvíce energie. Závislost množství energie na vlnové délce byla experimentálně naměřena pro různé teploty \Rightarrow snaha najít vzorec, který by křivky popsal matematicky.



Na vodorovné ose je f frekvence záření (v 10^{14} Hz), na svislé ose je vynesena hustota záření E (množství energie vyzařované na této konkrétní frekvenci). Křivky jsou zakresleny pro teploty černého tělesa $T_1 = 3000$ K, $T_2 = 4000$ K, $T_3 = 5000$ K.

1900: Lord Rayleigh: Korektní odvození, ve kterém nebyla (v rámci klasické mechaniky)

nikdy nalezena chyba \Rightarrow vzorec $E(f) = \frac{2f^2 kT}{c^2}$.

Př. 1: Zdůvodni, proč je Rayleighův zákon $E(f) = \frac{2f^2kT}{c^2}$ zjevně nesprávný a proč se mu říkalo „ultrafialová katastrofa“.

Kromě teploty T a frekvence f obsahuje vztah pouze konstanty \Rightarrow při určité teplotě T závisí množství vyzařované energie pouze na frekvenci a roste s její druhou mocninou (jako funkce $y = kx^2$) \Rightarrow při libovolné nenulové teplotě bude černé těleso vyzařovat obrovské množství záření o velmi vysokých frekvencích (rentgenové a gama záření), množství vyzářené energie s frekvencí roste do nekonečna \Rightarrow

- rozpor ze skutečnosti (stěny třídy při teplotě 20°C nevyzařují rentgenové záření),
- rozpor ze zdravým rozumem (nic nemůže vyzařovat nekonečné množství energie).

\Rightarrow Pro nízké frekvence se zákon dobře shodoval s naměřenými závislostmi \Rightarrow fyzikové začali hledat "omezovací faktor" (výraz, který by se přidal do Rayleighova zákona a který by křivku zalomil zpět k nule).

1900: Max Planck: nový vzorec $E(f) = \frac{4hf^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1} \Rightarrow$ zrod kvantové fyziky.

- Shoduje se s experimentem, pro velké hodnoty frekvence nabývá jmenovatel (díky exponenciální funkci) tak velkých hodnot, že se hodnota zlomku velmi rychle opět blíží k nule.
- Vzorec je odvozen za záhadného předpokladu, že energie se předává pouze v kouskách (**kvantech**) o velikosti $E = hf$, kde **h je Planckova konstanta**
 $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ (**kvantování energie**).

Př. 2: Uveď, jaké množství energie je možné předávat zářením o frekvenci 10^{14} Hz . Jaké množství energie zářením o této frekvenci předat nelze?

$E = hf = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 10^{14} \text{ J} = 6,63 \cdot 10^{-20} \text{ J} \Rightarrow$ můžeme předat energii $6,63 \cdot 10^{-20} \text{ J}$ a její násobky. Nelze předat například energii 10^{-20} J .

Př. 3: Proč se kvantování energie neprojevuje tak výrazně při nižších frekvencích. Jakým způsobem může kvantování bránit vyzařování záření s velmi vysokými frekvencemi?

Nižší frekvence \Rightarrow menší velikost kvanta \Rightarrow kousky, po kterých musíme předávat energii jsou tak malé, že se jejich velikost neprojeví.

Vyšší frekvence \Rightarrow větší velikost kvanta \Rightarrow částice látky nemají dostatečně velkou energii, aby dokázali "vytvořit" potřebný nejmenší kus energie.

Přestože kvantování dokázalo vyřešit problémy se zářením černého tělesa nebylo přijato jednoznačně, protože bylo klasickým představám zcela cizí (kromě frekvencí stojatého vlnění na strunách všechno vždy mohlo nabývat libovolných hodnot).

Měrná tepelná kapacita plynů

Polovina 19. století: studium plynů (\Rightarrow tepelné stroje), kinetická teorie: plyny tvoří neuspořádaně se pohybující částice, vnitřní energie je schována v neuspořádaném pohybu částic.

Myšlenka: Pokud víme, z jakých částic se plyn skládá (jaké ho tvoří molekuly), měli bychom umět vypočítat měrnou tepelnou kapacitu plynů.

Př. 4: Jakými druhy neuspořádaného pohybu se mohou pohybovat atomy:

- a) jednoatomového plynu (hélium, ...),
- b) dvouatomového plynu (kyslík, dusík, vodík ...).

a) jednoatomového plynu (hélium, ...)

Jediná možnost: neuspořádaný pohyb molekul = atomů).

b) dvouatomového plynu (kyslík, dusík, vodík ...)

Neuspořádaný pohyb molekul = dvojic atomů.

Dva atomy tvořící molekulu jsou vázány pružně (silou, která není nekonečná, chová se jako pružina) \Rightarrow další dva možné druhy pohybu:

- kmitavý pohyb částic molekuly k sobě od sebe,
- rotační pohyb částic molekuly.

Vypočtená měrná tepelná kapacita plynů:

- je větší u víceatomových plynů než u jednoatomových,
- nemění se s teplotou.

Problém: Vypočtené hodnoty odpovídají naměřeným pouze u jednoatomových plynů. U více atomových molekul hodnoty odpovídají pouze při vyšších teplotách. Při nižších teplotách měrná tepelná kapacita plynů klesá, teplota, u které shoda končí je vyšší u molekul z lehčích atomů.

\Rightarrow Desítky let nevyřešený problém, zdá se jakoby další druhy pohybu v molekulách (kmitavý a rotační) při nižších teplotách neexistovaly („zamrzaly“). Není jasné proč a jakým způsobem.

Planckovo řešení problému černého tělesa \Rightarrow možná se energie kvantuje i při kmitání a otáčení atomů v molekulách.

Předpoklad: Energie kmitajících molekul může dosahovat pouze násobky $E = hf$, kde f je frekvence kmitů atomů \Rightarrow s klesající teplotou klesá množství energie připadající na kmitání molekuly, jakmile je menší než $E = hf$, molekula nemůže kmitat, protože nemá dostatek energie na nejmenší kmitání \Rightarrow kmitavý pohyb zmizí („zamrzne“).

Př. 5: Vysvětli, proč se u molekul s těžšími atomy „zamrzání“ pohybu projeví až při nižších teplotách.

Těžší atom \Rightarrow kmitá větší hmotnost \Rightarrow kmitání probíhá pomaleji s menší frekvencí

$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}}$ \Rightarrow povolené kousky energie $E = hf$ mají menší velikost \Rightarrow zamrzání se projeví později (při nižších teplotách).

Kvantování energie dobře vysvětluje změny měrné tepelné kapacity plynů, ale otázka „proč je třeba ho zavádět“ zůstává nezodpovězena.

Objev elektronu

Výboje v plynech: ionizace molekul, vznikají dva druhy částic, dopadem kladných iontů na katodu vzniká katodové záření:

- směřuje ke kladné anodě,
- je možné ho vychylovat elektrickým i magnetickým polem,
- má hybnost,

⇒ proud nabitých (velmi lehkých) částic (atomy elektriny, dnes elektrony).

Další zdroje elektronů:

- záporně nabitá osvětlená zinková destička,
- rozžhavené drátky,
- radioaktivní látky.

⇒ Elektrony se v kovech nacházejí v „díře“ a je třeba jim dodat energii, aby z ní mohli uniknout. Proč není možné stejným způsobem uvolnit kladné částice látky?

Hmotnost vodíkových iontu (nejlehčí kladné částice) je vzhledem k jejich náboji asi 2000 větší než poměr hmotnosti a náboje u elektronu.

1904: J. Thomson: **Pudinkový model atomu**

Hmota je tvořena kladným těžkým pudinkem, ve kterém se pohybují záporné kuličky - elektrony.

Shrnutí: Některé klasicky nevysvětlitelné jevy je možné objasnit tím, že se energie předává pouze v kvantech o velikosti $E = hf$.