

## 4. cvičení ATOM

„Atoms are completely impossible from the classical point of view.”

Richard Feynman

- Elektronová struktura atomů
- Kvantování momentu hybnosti
- Spin
- Atomy a magnetismus
- Pauliho vylučovací princip
- Periodická soustava prvků
- Charakteristické rtg záření
- Lasery

Prostudujte: HRW- kap. 41 *Vše o atomech* a zodpovězte otázky této kapitole

### Z historie

- ⇒ 1860–1885 spektroskopická měření (*G. R. Kirchhoff, R. W. von Bunsen*)
- ⇒ 1862 *A. J. Ångström*: přesné měření spektrálních čar  $H_{\alpha}$ ,  $H_{\beta}$ ,  $H_{\gamma}$ ,  $H_{\delta}$
- ⇒ 1885 *J. J. Balmer* odvodil empirickou formuli, která přesně dávala vlnové délky čtyř čar  $H_{\alpha}$ ,  $H_{\beta}$ ,  $H_{\gamma}$ ,  $H_{\delta}$  (Balmerova formule), a předpověděl, že mohou existovat další serie
- ⇒ 1896 *P. Zeeman*: štěpení spektrálních čar v magnetickém poli (Zeemanův jev)
- ⇒ 1897 *J. J. Thomson*: objev elektronu
- ⇒ 1911 *E. Rutherford*: objev jádra
- ⇒ 1913 *N. Bohr*: model atomu vodíku
- ⇒ 1913 *H. G. J. Moseley*: zařazení prvků podle charakteristického rtg záření
- ⇒ 1922 *O. Stern, W. Gerlach*: prostorové kvantování
- ⇒ 1925 *G. Uhlenbeck, S. Goudsmit*: spin
- ⇒ 1925 *W. Pauli*: vylučovací princip
- ⇒ 1926 výpočet energiového spektra atomu vodíku pomocí maticové (*W. Pauli*) a vlnové (*E. Schrödinger*) mechaniky
- ⇒ 1926 *W. Heisenberg*: energiové spektrum atomu helia
- ⇒ 1929 vysvětlení jemné struktury – výsledek Diracovy rovnice
- ⇒ 1928–1930 Hartreeho-Fockova metoda autokonzistentního pole – nástroj pro mnohaelektronové atomy
- ⇒ 1952 Lambův posuv ve spektru atomu vodíku – důsledek interakce s elektromagnetickým vakuem (vysvětlení v rámci kvantové elektrodynamiky)

### Problém č. 1 Atom a magnetické pole

- a) Sternův-Gerlachův experiment: HRW - kap. 41: 18 Ú
- b) Hyperjemná struktura základního stavu atomu vodíku: HRW - kap. 41: 20 C
- c) Spin-orbitální interakce: HRW - kap. 41: 22 Ú
- d) Paramagnetismus: HRW - kap. 32: 27 Ú

### Problém č. 2 Jemná struktura

Konstanta jemné struktury je definována vztahem  $\alpha = e^2 / (2\epsilon_0 h c)$ . Tato konstanta se poprvé objevila v teorii Arnalda Sommerfelda, který se snažil vysvětlit jemnou strukturu spektrálních čar (několik blízkých čar místo jedné čáry) na základě předpokladu, že v Bohrově modelu jsou možné nejen kruhové, ale i eliptické orbity. Sommerfeldův přístup založený na klasické představě dráhy elektronu se nepotvrdil, ale konstanta  $\alpha$  se stala užitečnou konstantou v atomové fyzice (vybudované později na základě relativistické kvantové mechaniky).

- (a) Ukažte, že  $\alpha = v_1/c$ , kde  $v_1$  je rychlost elektronu v základním stavu v Bohrově modelu atomu vodíku, a že hodnota konstanty  $\alpha$  je přibližně rovna 1/137.

V roce 1928 našel Dirac relativistickou vlnovou rovnici pro elektron. Její řešení pro atom vodíku dává energetické hladiny, které závisí nejen na hlavním kvantovém čísle  $n$ , ale i na kvantovém čísle  $j = l \pm \frac{1}{2}$  vyjadřujícím celkový moment hybnosti elektronu  $\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}$ :

$$E_{n,j} = E_n + \frac{E_n \alpha^2}{n} \left( \frac{1}{j + \frac{1}{2}} - \frac{3}{4n} \right).$$

Zde  $E_n$  jsou energie, které plynou z řešení (nerelativistické) Schrödingerovy rovnice, a druhý člen vyjadřuje korekce jemné struktury, dané relativistickou změnou hmotnosti a spin-orbitální interakcí.

- (b) Určete rozdíl energií hladin  $2p_{3/2}$  a  $2p_{1/2}$  v atomu vodíku. Srovnajte toto rozštěpení s rozdílem energií mezi hladinami  $3p_{3/2}$  a  $3p_{1/2}$  v atomu sodíku (viz bod c v problému 1).

### Problém č. 3 Pasti s více elektrony

- a) HRW - kap. 41: 27 Ú
- b) HRW - kap. 41: 28 Ú

### Problém č. 4 Periodická struktura prvků

- a) HRW - kap. 41: 29 Ú
- b) HRW - kap. 41: 35 Ú

### Problém č. 5 Alkalické kovy

Valenční elektron v atomu alkalického kovu se nachází v poli, které vytváří jádro atomu se  $Z$  protony a  $Z - 1$  elektronů z vnitřních slupek atomu, které stíní jádro. Působení jádra a elektronů z vnitřních slupek na valenční elektron lze popsat efektivním potenciálem

$$U_{ef} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{(Z_{ef}e)(-e)}{r},$$

kde  $1 < Z_{ef} < Z$ .  $Z_{ef} = Z$  by znamenalo žádné stínění, naproti tomu dokonalé stínění  $Z - 1$  elektrony z vnitřních slupek atomu by dalo  $Z_{ef} = Z - (Z - 1) = 1$ . Hodnotu  $Z_{ef}$  lze určit z měření ionizační energie atomu. *Určete  $Z_{ef}$  pro 3s elektron v atomu sodíku, je-li ionizační energie tohoto elektronu 5,14 eV.*

### Problém č. 6 Rentgenové záření

- a) Brzdné rtg záření: HRW - kap. 41: 39 Ú
- b) Záření volného elektronu: HRW - kap. 41: 41 Ú
- c) Moseleyho zákon: HRW - kap. 41: 47 Ú
- d) Rentgenová difrakce: HRW - kap. 41: 50 Ú

### Problém č. 7 Lasery

- a) Záporná absolutní teplota: HRW – kap. 41: 58 C
- b) Energie laserového pulsu: HRW – kap. 41: 66 Ú
- c) CO<sub>2</sub> laser na Marsu: HRW – kap. 41: 69

**Dodatek k 4. cvičení** Více o spinu