

**23. ročník, úloha VI. 3 ... atomový kondenzátor** (4 body; průměr 3,50; řešili 4 studenti)

Lukáš si koupil uranový atom a nenapadlo jej nic lepšího, než z něj postupně odebírat elektrony. Když odebral  $n$ -tý, s údivem zjistil, že se hmotnost atomu zvětšila. Co způsobilo tento jev? Jaké bylo ono  $n$ ?

Poslali jsme Lukáše nakoupit.

Zamysleme se nejprve nad tím, jak vypadá atom. První teorie, která smysluplně popisovala elektrony obíhající kolem jádra, byla Bohrova. Bohr předpokládal, že elektron obíhá kolem jádra po kružnici, a pro jeho moment hybnosti platí kvantovací podmínka  $L = n\hbar$ . Vypočteme-li možné energie takto se pohybujícího elektronu, zjistíme, že platí

$$E = Z^2 \frac{R}{n^2}. \quad (1)$$

kde  $Z$  je protonové číslo tohoto prvku,  $R$  je tzv. Rydbergova konstanta, která má velikost 13,6 eV.

Tento popis je vhodný především pro atomy, které mají malý počet elektronů v obalu. Uvažujeme-li však těžší atomy, které jsou jen slabě ionizované, na vytrhávání elektron nepůsobí elektrostaticky pouze kladně nabitě jádro, které je přitahuje, ale také ostatní přítomné elektrony, které je odpuzují. Proto celková energie potřebná k odtržení elektronu od atomu je menší, než vypočtená dle vztahu (1). Zavádí se proto tzv. konstanty stínění  $s$ . Pro energii potřebnou k odtržení elektronu na  $n$ -té slupce platí vztah

$$E = (Z - s)^2 \frac{R}{n^2}.$$

Zamysleme se nyní ještě nad tím, co považujeme za hmotnost atomu. Celková hmotnost atomu je rovna součtu jeho klidové hmotnosti a hmotnosti elektrostatického pole v jeho okolí. Hmotnost tohoto pole určíme ze známého Einsteinova vztahu  $E = mc^2$ . Energie tohoto pole je však rovna práci, kterou jsme vykonali při odtrhávání elektronu od atomu. Budeme-li nyní působit silou na atom, tento se začne pohybovat konkrétním směrem, ale spolu s ním musíme též urychlit elektrostatické pole, jež se nachází v jeho okolí. Použijeme-li ještě všeobecně uznávanou rovnost setrvačné a gravitační hmotnosti, máme všechny podklady pro vyřčení výše uvedené myšlenky o celkové hmotnosti ionizovaného atomu.

Vraťme se nyní k našemu problému. Atom uranu má protonové číslo  $Z = 92$ . Pokud bychom užili vztah (1) a odtrhli elektron ze slupky 1s, elektrostatické pole v okolí tohoto atomu bude mít energii 115 keV, což je asi pětina klidové hmotnosti elektronu. Je sice možné vytrhnout elektron z této slupky, ale ostatní elektrony v atomu toto volné místo zaplní v řádu femtosekund, popřípadě dojde ještě k vyzáření tzv. Augerových elektronů. Tyto elektrony se původně nacházely na vyšších elektronových hladinách, ale vlivem velkého množství energie jsou od atomu nakonec odtrženy. Z tohoto je vidět, že odtrhneme-li libovolný elektron tohoto atomu, jeho celková hmotnost se sníží. Odtrhneme-li další elektron, konstanta stínění se sice zmenší, ale není to postačující vliv ani v případě odtržení posledního elektronu, kdy je konstanta stínění rovna 0.

Zamysleme se ještě nad tím, kolik protonů v jádře by musel mít atom, aby při hypotetickém odtržení elektronu s nejnižší energií došlo ke zvýšení jeho hmotnosti. K tomuto výsledku se dostaneme nejjednodušeji použitím vztahu (1), kde položíme  $n = 1$ , což odpovídá slupce nejbližší k jádru. Za energii  $E$  budeme dosazovat klidovou energii elektronu, tj. 511 keV. Konstantu stínění budeme pro jednoduchost uvažovat nulovou, i když konkrétně pro případ mědi

$Z = 32$  je konstanta stínění rovna přibližně 6. Z této úvahy dostáváme pro protonové číslo  $Z$  podmínku

$$Z \geq \sqrt{\frac{E}{R}} = \sqrt{\frac{511 \cdot 10^3}{13,6}} \doteq 194,$$

které však nepřísluší žádnému známému prvku.

Dorazila pouze čtyři pěkná řešení. Naprosto perfektní řešení poslal *Petr Ryšavý*, a proto dostal zaslouženě bonusový bod.

*Lukáš Ledvina*

[lukasl@fykos.mff.cuni.cz](mailto:lukasl@fykos.mff.cuni.cz)

---

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty UK MFF. Je zastřešen Oddělením pro vnější vztahy a propagaci UK MFF a podporován Ústavem teoretické fyziky

UK MFF, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.

Pro zobrazení kopie této licence, navštivte <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.