

23. ročník, úloha II. P ... telekineze (4 body; průměr 1,55; řešilo 11 studentů)

Odkud bere magnet energii na zvedání věcí, když magnetická síla nemůže konat práci? Lorentzův vzorec $\mathbf{F} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ říká, že magnetická síla je kolmá na rychlost pohybujícího se náboje, a tedy pouze mění jeho směr hybnosti. *Lámalo hlavu Honzovi Humplíkovi.*

Z uvedeného Lorentzova vzorce vyplývá, že homogenní magnetické pole působící na pohybující se bodový náboj nekoná práci. Avšak umístíme-li hmotný testovací magnetický dipól do nehomogenního vnějšího magnetického pole (například vytvářeného jiným magnetickým dipólem), kinetická energie testovacího dipólu už se může měnit, zjevně tedy magnetická síla koná práci.

Abychom si ujasnili, proč tomu tak je, představme si dipól jako kruhovou proudovou smyčku o malém poloměru r na ose osově souměrného magnetického pole (tedy např. na ose vytvářejícího dipólu). Pokud se po obvodu smyčky rozbíhá magnetické pole o úhel α od osy, pak podle zadaného vzorce bude na elementární náboj e pohybující se po obvodu smyčky působit ve směru osy síla o velikosti

$$F_{ze} = evB \sin \alpha.$$

Pohyb daného elementárního náboje je však vázán na vodivou smyčku, na niž se přenesou uvedené síly.

Pokud se podél smyčky pohybuje rovnoměrně rozložený náboj o celkové velikosti Q , dostáváme celkovou sílu působící na náboje ve smyčce podél osy

$$F_z = QvB \sin \alpha = 2\pi rIB \sin \alpha,$$

kde I je proud tekoucí smyčkou. Tvrzení, že „magnetická síla“ nemůže konat práci, je tedy chybné. Pokud na náboje působí nějaké další (vazebné) síly, zjevně ji přes tvar Lorentzova vzorce konat může. Zejména koná práci tehdy, pokud působí proti gradientu skalárního potenciálu (zde elektrostatického, vytvářeného atomovými jádry).

Často se uvádí¹ vztah silového působení na magnetický dipól

$$\mathbf{F} = \text{grad}(\mathbf{B} \cdot \mathbf{m}).$$

Zde \mathbf{m} je *magnetický moment* dipólu. V případě proudové smyčky ztotožňujeme $\mathbf{m} = I\mathbf{S}$, kde \mathbf{S} udává plochu smyčky (orientovanou ke kolmici). Magnetické pole je pole vírové, a tedy siločáry magnetického pole jsou uzavřené křivky, hustota siločar pak vypovídá o velikosti intenzity pole. Není pak těžké dokázat, že pro dostatečně malou proudovou smyčku opravdu v našem případě opravdu platí $r|\text{grad}B| = 2B \sin \alpha$, a tedy námi odvozené silové působení na smyčku odpovídá uváděnému vztahu pro dipól.

V úvaze jsme se dopustili několika zjednodušení. Například samotná jednoduchá proudová smyčka, kde elektrony samovolně obíhají dokola a nezastaví se, se realizuje špatně, pokud nemáme k dispozici supravodič. Navíc dráha elektronu běžně nebude vázána na kruh, protože jakákoliv reálná proudová smyčka uskutečněná pomocí (supra)vodiče bude mít konečné rozměry. To nám však nevádí, protože pohyby elektronů v jiných směrech se vystředují, a spolu s nimi i silové účinky magnetického pole.

¹⁾ Zájemcům o hlubší pochopení problematiky lze doporučit například studijní texty dr. Ledvinky, jež jsou poměrně vyčerpávajícím úvodem do klasické elektrodynamiky a jsou k dispozici na <http://utf.mff.cuni.cz/~ledvinka/?278656>.

Zkušenosti z každodenního života navíc ukazují, že jakýkoliv (i permanentní) magnet přitahuje také věci, které se jinak samy o sobě magnety býti nezdají, jejich celkový magnetický moment je nulový. Jedná se o *ferromagnetika*, tedy látky, jež po vystavení vnějšímu magnetickému poli získají vlastní magnetický moment a vytvoří kolem sebe vlastní magnetické pole. Atomy, resp. částice, z nichž se atomy skládají, mají svůj vlastní magnetický moment (což klasická fyzika nedovede vysvětlit; jedná se o důsledek symetrií a kvantové teorie, což poněkud přesahuje rámec našeho semináře). Magnetické momenty jsou však u spousty látek náhodně orientovány a po vystředování je výsledný magnetický moment nulový.

Ferromagnetika (kam patří mj. železo s většinou druhů ocelí, kobalt, nikl, ...) mají tu vlastnost, že sousedící atomy mají tendenci orientovat své magnetické momenty stejně a po vystavení vnějšímu magnetickému poli se snaží svůj dipólový moment orientovat ve shodě s vnějším polem a výsledný moment již není nulový. Některá ferromagnetika si magnetický moment zachovávají i po vypnutí vnějšího magnetického pole – a mohou tedy sloužit jako permanentní magnety.

Marek Nečada

marekn@fykos.mff.cuni.cz