

# Magická magnetická síla – možnost jejího měření

## Magic magnetic force – possibility of its measurement

Petr Sládek - Lukáš Pawera

### Abstrakt

*Měření magnetické síly bývá ve školské fyzice jen velmi zřídka prezentováno. Pro nadané studenty se objevuje možnost jak změřit její průběh pomocí digitálních vah. V příspěvku jsou stručně uvedeny základní charakteristiky možného fyzikálního experimentu, který umožňuje měření průběhu magnetické síly jednak permanentního magnetu, jednak elektromagnetu při různých hodnotách proudu v závislosti na vzdálenosti od magnetu. Tato zajímavá výzkumná úloha může být pro nadané studenty motivačním prostředkem tematického celku magnetismus.*

### Abstract

*Measurement of magnetic force is in school physics rarely presented. For gifted students appears the possibility to measure its behavior using digital scales. The paper briefly describes the basic characteristics of the school physical experiment, which allows measurements of magnetic forces both permanent magnets, an electromagnet at different current values depending on the distance from the magnet. This interesting research task can serve as a motivational tool for gifted students in thematic unit magnetism.*

### Klíčová slova

*Magnetická síla, školní experiment, motivace.*

### Key words

*Magnetic force; school experiments; motivation.*

## 1. Úvod

Většina z nás se setkala v dětství s magnetickým autíčkem (obr. 1). Při přibližování tyčky s magnetem k magnetickému rezervnímu kolu na zádi autíčka se dlouhou dobu nic moc neděje, poté se najednou magnetická síla výrazně zvýší a navíc má tendenci se vyhnout tyčku z osy přibližování. K magnetickému autíčku se nám ještě několikrát dostaneme do rukou v průběhu žákovských let. Ve škole (na základní ani na střední) se však k tématu velikosti vzájemného působení magnetů nikdy nedostaneme. Je to škoda, protože se zde naskýtá velký



Obr. 1 Magnetické autíčko

motivační potenciál, zejména pro nadané žáky. Měření magnetické síly bývá ve školské fyzice jen velmi zřídka prezentováno. Když už se ve škole experimentuje s magnety – tak je to vždy jen otázka magnetických pólů, indukčních čar nebo elektromagnetů.

V příspěvku jsou stručně uvedeny základní charakteristiky fyzikálního experimentu využívajícího digitálních vah, který umožňuje měření průběhu magnetické síly jednak permanentního magnetu, jednak elektromagnetu při různých hodnotách proudu v závislosti na vzdálenosti od magnetu.

## 2. Magnetické vlastnosti látek

### 2.1 Školské poznatky

Ve fyzice 6. třídy se dozvíme, že v přírodě se vyskytuje nerost – magnetovec, který má *zvláštní vlastnost* – přitahuje drobné ocelové předměty. V praxi se pak zhotovují např. z oceli nebo feritů magnety umělé. Síla, kterou na sebe navzájem působí póly magnetů a kterou magnety přitahují ocelové předměty, se nazývá *magnetická síla*. Dále se naučíme, že nesouhlasné póly dvou magnetů se navzájem přitahují, souhlasné odpuzují. A že v okolí magnetu je magnetické pole, které můžeme znázornit indukčními čarami (1). Na střední škole se pak ještě dozvíme, že existují magneticky měkké a magneticky tvrdé materiály, a že vysvětlení magnetických látek podala až kvantová fyzika (2). V učebnici (2) se na str. 126 dále dozvíme:

*„Zjednodušeně můžeme říci, že elektrony v atomech vytvářejí jakási elementární magnetická pole, která se navzájem skládají, a vzniká výsledné magnetické pole.“*

A pak už jenom o natáčení magnetických atomů a doménách ve vnějším magnetickém poli, popř. o Curiově teplotě, která je dána přechodem mezi feromagnetickým a paramagnetickým stavem pevné látky.

Jenom kvalitativní popis, žádný kvantitativní vztah pro magnetickou sílu. O poznání lépe jsou na tom elektromagnety a elektromagnetické pole, kde se to najednou vztahy hemží.

Je tedy vidět, že magnetické síly permanentních magnetů pro žáka zůstávají zahaleny tajemstvím mikrosvěta.

### 2.2 Magnetický moment

Ve většině případů jsou magnetické vlastnosti látek určeny charakterem elektronového obalu a samotnými elektrony. Elementární částice s magnetickým momentem v jádře – proton a neutron mají na rozdíl od elektronu přibližně 2000x větší hmotnost a jejich příspěvek do výsledného magnetického momentu můžeme většinou zanedbat. Elektronu připisujeme dva magnetické momenty – orbitální a spinový. Popis orbitálního magnetického momentu můžeme založit na představě elektronu obíhajícího kolem jádra po dráze kolem orientované plochy  $\vec{S}$ . Pak pohyb elektronu, jako nabitě částice s nábojem  $-e$ , můžeme nahradit proudovou smyčkou s proudem  $I$  a magnetický moment je pak dán  $\vec{m}=I\vec{S}$ . Spinový moment elektronu je jeho základní vlastností a není možné na něj použít předchozí postup, i když původní představa z analogie otáčení kolem vlastní osy vycházela – viz název *spin*.

Magnetický moment se v magnetickém poli chová stejně jako elektrický dipól v elektrickém poli. V minulosti byl tedy ze snahy o analogii zaveden pojem virtuálního *magnetického náboje*  $Q_m$  a pojem magnetický dipól, jako soustava dvou magnetických nábojů opačného znaménka, jejichž vzdálenost je dána vektorem  $\vec{l}$  vycházejícího ze záporného magnetického náboje. Magnetický moment pak je možné zapsat také jako  $\vec{m}=Q_m\vec{l}$ . Výsledný magnetický

moment je dán vektorovým součtem všech magnetických momentů elektronů – orbitálních i spinových – v atomu.

V případě diamagnetických látek je bez přítomnosti vnějšího magnetického pole výsledný magnetický moment nulový, za přítomnosti vnějšího magnetického pole se paralelně orientované magnetické momenty zmenší a antiparalelně orientované momenty zvětší o stejnou hodnotu. Výsledné magnetické pole v diamagnetické látce se tedy mírně zmenší, typicky o  $10^{-3} - 10^{-4}\%$ .

U paramagnetických látek nejsou magnetické momenty v jednotlivých atomech (molekulách) vykompenzované. Nicméně jejich orientace je náhodná a vzájemná interakce je nulová nebo je velmi slabá. Proto je díky velkému množství atomů (molekul) v látce je výsledná magnetizace nulová. Při působení vnějšího magnetického pole se snaží jednotlivé magnetické momenty natočit po směru přiloženého pole. Jedná se o působení dvojice sil na magnetický dipól v magnetickém poli. Je to analogie působení dvojice sil na elektrický dipól v elektrickém poli. Kolmé složky se vzájemně v látce kompenzují a magnetické pole se v látce mírně zvětší ( $10^{-2} - 10^{-3}\%$ ).

U feromagnetik jsou na rozdíl od paramagnetik magnetické momenty vzájemně silně interagující a jsou v určitém objemu - doméně orientované do stejného směru. U antiferomagnetických a ferimagnetických látek jsou sousední interagující magnetické momenty orientované antiparalelně. Vzájemná interakce připomíná Coulombův zákon

$$F = \frac{\mu}{4\pi} \frac{Q_{m1}Q_{m2}}{r^2}$$

Přesněji je vzájemná interakce popsána kvantovou mechanikou jako tzv. výměnný integrál, u feromagnetik je kladný, u antiferomagnetik a ferimagnetik záporný.

Celkový výsledek, jak se bude látka chovat jako celek, tedy záleží na magnetizaci, která popisuje výsledný souhrn magnetických momentů v magnetu včetně jejich vzájemného působení. Celkový výsledek magnetizace není znám, musí se vytvářet různé modely, na jejichž základě se pak vypočítá průběh magnetického pole a následně vypočítá magnetická síla.

### 2.3 Silové působení magnetů

Již koncem 19. století byly činěny pokusy jak využít odpudivé i přitažlivé magnetické síly, které jsou bezkontaktní, při konstrukci strojů. K permanentním magnetům záhy přibyly elektromagnety, které mají větší praktický význam. Na základě různých modelů vypočítané teoretické vztahy pro konkrétní geometrii magnetů, musí být ověřeny experimentem. Mezi základní modely umožňující výpočet magnetické síly mezi dvěma magnety patří model magnetických dipólů, model využívající magnetických nábojů a model vázaných proudů. Nejprve se vypočte magnetické pole jednoho magnetu a to působí na vázané proudy, které reprezentují druhý magnet.

Pro popis magnetického pole buzeného permanentním magnetem využijeme Biotův-Savartův-Laplaceův zákon. Bodový náboj  $q$ , který se v místě  $\vec{r}_q$  pohybuje rychlostí  $\vec{v}$ , přispívá do místa s polohovým vektorem  $\vec{r}$  magnetickou indukcí  $d\vec{B}(\vec{r})$ , což lze vyjádřit vztahem:

$$d\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0 q \vec{v} \times (\vec{r} - \vec{r}_q)}{4\pi |\vec{r} - \vec{r}_q|^3}$$

Po integraci a zavedení proudové hustoty  $\vec{j}(\vec{r}_q)$ , pak pro celý magnet dostáváme

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint_V \vec{j}(\vec{r}_q) \times \frac{(\vec{r} - \vec{r}_q)}{|\vec{r} - \vec{r}_q|^3} dV$$

Pro vztah pro Lorentzovu sílu u proudové smyčky platí:

$$\vec{F} = I \int d\vec{l} \times \vec{B}$$

V případě nehomogenního magnetického pole  $\vec{B}_1$  vytvořeného prvním magnetem, což je náš případ, a magnetického momentu  $\vec{m}_2$  příslušejícímu druhému magnetu, je příspěvek do síly pak dán vztahem:

$$d\vec{F} = \overrightarrow{grad} (\vec{m}_2 \cdot \vec{B}_1)$$

Síla mezi dvěma magnety závisí na geometrii magnetů a vyžaduje dvojí integraci, což vede ke složitým vztahům.

Pro dva válcové magnety o poloměru  $R$  a délce  $h$  působící na sebe podél vzájemné osy ve vzdálenosti  $x$  mezi válcovými magnety o magnetizaci  $M$  může být pro aproximována vztahem

$$F(x) = \frac{\pi\mu_0}{4} M^2 R^4 \left[ \frac{1}{x^2} + \frac{1}{(x+2h)^2} - \frac{2}{(x+h)^2} \right],$$

kde mezi efektivním magnetickým dipólem  $m$  a magnetizací  $M$  platí  $m=MV$ ,  $V=\pi R^2 h$ .

Pro  $x \ll h$  pak vztahem:

$$F(x) = \frac{3\mu_0}{2\pi} m_1 m_2 x^{-4}$$

Poslední dva vztahy můžeme experimentálně ověřit.

### 3. Experiment

Pro žákovský experiment můžeme s výhodou využít digitálních vah.

### 5. Závěr

### 6. Literatura

1. JANOVIČ, Jozef a kol. (1994) *FYZIKA pro 6. ročník základní školy, 6A*. Praha: Prometheus, ISBN 80-85849-35-6
2. LEPIL, Oldřich a kol. (2000) *II FYZIKA pro střední školy*. Praha: Prometheus, (třetí přepracované vydání), ISBN 80-7196-185-X
3. KOLLÁR, Peter (2013) *Magnetické vlastnosti látek*. Čs. čas. fyz. 63 (2013), str. 87, ISSN 0009-0700.

4. MIKOLANDA, Tomáš (2009), Disertační práce, TU Liberec.

5. VOKOUN, David a kol. (2009) *Magnetostatic interactions and forces between cylindrical permanent magnets*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Volume 321, Issue 22, November 2009, pp 3758-3763.

doc. RNDr. Petr Sládek, CSc.  
KFChOV PdF MU  
Poříčí 7, 603 00 Brno, ČR  
e-mail: [sladek@ped.muni.cz](mailto:sladek@ped.muni.cz)  
telefon: 549496841

Mgr. Lukáš Pawera  
KFChOV PdF MU  
Poříčí 7, 603 00 Brno, ČR  
e-mail: [pawera@mail.muni.cz](mailto:pawera@mail.muni.cz)  
telefon: 549496033