



Výfučtení: Magické magnety

Magnetická síla je snad nejzvláštnější silou v klasické fyzice. Závisí nejen na pozici elektrického náboje, ale i na rychlosti a směru, kterým se pohybuje. Pohyb náboje je totiž pro vznik magnetického pole klíčový. V tomto Výfučtení se budeme zabývat tím, co si ve spojitosti s magnetickým polem nejčastěji představíme – magnety.

Jak magnety magnetují?

Jak jsme již zmínili, magnetické pole vytvářejí pohybující se elektrické náboje. Se znatelným pohybem nábojů se nejčastěji setkáváme při průtoku elektrického proudu vodičem. Ve vodiči se kvůli přítomnosti elektrického napětí dávají do pohybu volné elektrony, které tvoří elektrický proud. A právě i kolem vodičů s proudem (tedy s pohybujícím se nábojem) se tvoří magnetické pole.

Co má ale toto společného s magnety? I když to tak na první pohled nevypadá, magnetické pole, které vytvářejí magnety, vzniká také díky pohybu elektrického náboje. Ten zde však není zdaleka tak zřejmý jako v případě elektrického proudu ve vodičích. Elektrický náboj se v magnetech totiž pohybuje pouze uvnitř atomů. Dobrou představu o vytváření magnetického pole v atomu získáme, když si atom představíme tak, jak byl popsán v minulém Výfučtení. V tomto modelu atomu obíhají elektrony po kruhových drahách v přesně určených vzdálenostech od jádra. A tento pohyb elektrického náboje je důvodem, proč atomy vytvářejí magnetické pole.

Obíhání elektronu kolem jádra můžeme přibližně popsat, jako by kolem jádra tekla v kruhové smyčce proud. Tato představa samozřejmě není v našem modelu zcela přesná. Elektron se vždy nachází pouze v jednom místě kružnice, zatímco takto budeme v podstatě uvažovat, že jeho náboj je rozmístěn po celé kružnici. Není ovšem ani příliš daleko od pravdy!¹ Kruhová smyčka, kterou teče proud, se často označuje jako *proudová smyčka*.

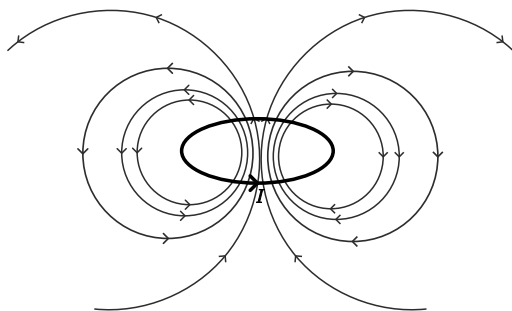
Síločáry magnetického pole², které vytváří proudová smyčka, obtékají drát jako na obrázku 1. Všechny tyto síločáry se zároveň vinou stejným směrem. Těto konfiguraci se říká *magnetický dipól*, neboť síločáry mají stejný tvar jako elektrické síločáry soustavy dvou elektrických nábojů s opačným nábojem tzv. *elektrického dipólu*.

Magnetické pole proudové smyčky bychom si tedy mohli představit jako pole vytvořené dvěma *magnetickými náboji* s opačným znaménkem, které jsou velmi blízko sebe. (Magnetické náboje jsme si zde tedy zavedli tak, že mají stejné vlastnosti jako náboje elektrické.) Tato představa nám umožňuje lépe si představit magnetické pole. Její drobná nevýhoda však spočívá v tom, že magnetické náboje ve skutečnosti (alespoň dle současných teorií) neexistují. To sice neznamená, že jimi při představách a výpočtech nemůžeme proudové smyčky nahrazovat (můžeme o tom přemýšlet jako o jakémsi matematickém triku), je však dobré mít na paměti, že ve skutečnosti tam nejsou.

Magnetický dipól je velmi podobný tomu, co si běžně představíme jako magnet. Má severní pól (v místě, kde si můžeme představit kladný magnetický náboj) a jižní pól (tam, kde by se nacházel záporný magnetický náboj). Náš magnetek je však velmi malý, jelikož jsou oba

¹Ukazuje se, že pro model atomu uvažující kvantovou mechaniku je toto až překvapivě dobrým přiblížením skutečnosti.

²Síločára magnetického pole je pomyslná čára udávající směr, kterým by působila magnetická síla na hypotetický "magnetický náboj" umístěný do daného místa. Více o magnetických nábojích se dozvíte dále v textu.



Obrázek 1: Magnetické siločáry v okolí proudové smyčky.

póly magnetu velmi blízko sebe. Elektron obíhající kolem jádra atomu si představujeme jako proudovou smyčku a tu si zase můžeme představit jako magnetický dipól ("malý magnetek"), proto můžeme i celý atom, kolem něhož vytvářejí obíhající elektrony magnetické pole, chápat jako "malý magnetek".

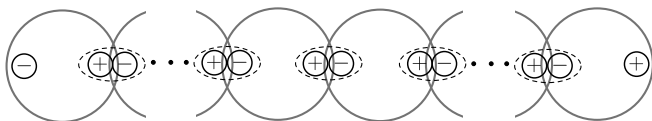
V obyčejném materiálu je atomů („malých magnetků“) spousta.³ Jelikož jsou ovšem směry, kterými tyto magnetky míří, náhodné, jejich magnetická pole se navzájem téměř vyruší, nic zvláštního tak nepozorujeme. Existuje však speciální druh látek, jsou to tzv. *feromagnetické látky*. Jednotlivé dipóly⁴ se v nich mohou volně otáčet a zároveň jsou schopné se navzájem hodně ovlivňovat. Pokud takovouto látku vložíme do vnějšího magnetického pole, dipóly se natočí tak, aby s ním byly rovnoběžné. V tomto tzv. *zmagnetovaném* stavu látka zůstane i po odstranění vnějšího magnetického pole. Nyní, když jsou všechny dipóly natočené stejným směrem, se již jejich pole nevyruší, ale naopak se zesílí, čímž právě vzniká magnet.

Jak ale zjistíme, jak bude výsledné pole vypadat? K tomu nám právě pomůže představa s magnetickými náboji. Představme si atom uvnitř látky. Tedy takový, který je ze všech stran obklopen dalšími atomy. Pokud je látka zmagnetovaná, jsou všechny dipóly natočené stejným směrem, řekněme doprava. To znamená, že když si je představíme jako dvojice kladného a záporného magnetického náboje, bude kladný náboj v atomu vždy více vpravo a záporný více vlevo. Představíme-li si nyní druhý atom látky, který je vpravo od prvního atomu (viz obrázek 2), vidíme, že kladný magnetický náboj prvního atomu se vyruší se záporným nábojem toho druhého. Toto se stane u všech atomů uvnitř látky. Jediné magnetické náboje, které se nevyruší, zbudou na okraji zmagnetované látky. V našem příkladu úplně vpravo kladné a úplně vlevo záporné. Celkem je tak pole magnetu stejné jako pole, které by vzniklo, kdybychom na jeden okraj magnetu umístili jeden kladný bodový magnetický náboj a na druhý záporný bodový magnetický náboj.⁵

³Existují i materiály, ve kterých se magnetické pole od obíhajících elektronů navzájem vyruší už uvnitř atomu, tyto materiály se nazývají *diamagnetické*.

⁴Ve feromagnetických látkách jsou dipóly tvořeny tzv. doménami, což jsou shluky atomů, jež jsou stejně orientovány.

⁵Toto ale platí pouze, pokud se zabýváme polem magnetu v dostatečné vzdálenosti na to, abychom mohli jeho okraje s magnetickým nábojem považovat za body.



Obrázek 2: Uspořádání magnetických dipólů v látce.

Jak popsat magnetické pole?

Jak jsme si zatím ukázali, magnety je obvykle možné poměrně dobře popsat jako soustavu dvou magnetických monopolů umístěných na okraji magnetu, neboli magnetický dipól. Otázkou, kterou se tedy budeme zabývat ve zbytku tohoto Výfučení, je, jak lze tyto dipóly matematicky popsat a jak vyřešit základní fyzikální úlohy, v nichž figurují.

Zásadním poznatkem, který při výpočtech nezbytně potřebujeme, je tzv. *princip superpozice*. Tento princip nám v kontextu magnetického pole říká, že magnetické pole vzniklé působením několika monopolů je stejné jako, kdybychom pole od každého monopolu vypočetli zvlášť a následně je všechny sečetli. Nezapomínejme však, že magnetické monopóly dle žádné z ověřených teorií neexistují, počítat s nimi zvlášť je tak již velká abstrakce. (Vzhledem k tomu, že veličiny charakterizující magnetické pole mají směr, tak slovem "sečetli" zde myslíme vektorový součet. V následujícím textu jsou tyto vektorové veličiny značeny tlustým písmenem.)

Princip superpozice nám umožňuje zabývat se jen tím nejjednodušším případem – polem jednoho monopolu – a dává nám návod, jak využít řešení této jednoduché situace ke spočítání magnetického pole v libovolně složité situaci – stačí nám jen sečíst příspěvky od všech monopolů.⁶ Pojdme si tedy ukázat, jak lze vůbec magnetické pole popsat a jak bude vypadat v okolí magnetického monopolu.

Magnetické pole má spoustu analogických vlastností jako pole elektrické, a tak zde narážíme na mnohé podobnosti. Stejně jako lze elektrické pole popsat elektrickou intenzitou $\mathbf{E}$, popisujeme magnetické pole vektorem magnetické indukce $\mathbf{B}$. Elektrická intenzita i magnetická indukce vyjadřují sílu, která působí na jednotkový náboj (elektrický nebo magnetický). (Jelikož je síla vektor, tak jsou vektory i tyto veličiny pole.) Pro elektrické pole platí poměrně známý vztah

$$\mathbf{F} = \mathbf{E}Q,$$

kde Q je běžný elektrický náboj. Analogicky pro magnetické pole získáme

$$\mathbf{F} = \mathbf{B}\varphi, \quad (1)$$

kde jsme tzv. magnetický náboj označili jako φ .

Důvodem, proč se se vztahem (1) téměř nepotkáme, je již mnohokrát zmiňovaný fakt, že magnetické náboje ve skutečnosti neexistují. Jediný způsob, jakým může podle současných teorií magnetické pole vzniknout, je pohybem elektrického náboje. To ovšem ještě neznamená, že tento vztah není užitečný. Jak jsme si ukázali, magnety lze často popsat jako dipól, soustavu dvou monopolů (magnetických nábojů). Zajímá-li nás například síla, která působí mezi dvěma magnety, můžeme ji vypočítat jako součet silových působení mezi dvojicemi magnetických nábojů – i přesto, že ve skutečnosti dává smysl tyto náboje uvažovat pouze jako součásti dipólu. A na tento výpočet právě potřebujeme vztah (1).

⁶ Ač to zní velmi jednoduše, při velkém počtu magnetických monopolů (či jejich spojitém rozložení) může začít být situace poměrně rychle početně velmi náročná.

Nyní nám již pro to, abychom mohli začít počítat síly mezi magnety, stačí jen zjistit, jak vypadá vztah pro magnetickou indukci $\mathbf{B}$ vytvářenou magnetickým nábojem. Ten je opět velmi podobný jako pro elektrické pole. Elektrické pole tvořené elektrickým nábojem o velikosti Q můžeme vypočítat pomocí *Coulombova zákona*

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon r^2}$$

kde r je vzdálenost od náboje a ϵ je konstanta nazývaná permitivita, která nás v tomto textu nemusí trápit. Magnetickou indukci $\mathbf{B}$ vytvořenou magnetickým nábojem φ ve vzdálenosti r od tohoto náboje můžeme analogicky vypočítat jako ⁷

$$B = \mu \frac{\varphi}{4\pi r^2}. \quad (2)$$

Konstanta μ vyskytující se ve vztahu se nazývá *permeabilita* a udává, jak rychle slábne magnetické pole. Její hodnota pro vakuum se označuje μ_0 a je rovna $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{N} \cdot \text{A}^{-2}$. Pro jiné prostředí musíme za μ dosadit jinou konstantu. Aby byly tyto konstanty lépe představitelné, obvykle se pro jejich vyjádření používá tzv. relativní permeabilita, která udává, kolikrát má daný materiál vyšší permeabilitu než vakuum. Poté tedy platí, že permeabilitu materiálu μ lze pomocí jeho relativní permeability μ_r určit jako $\mu = \mu_r \mu_0$. Většinou ovšem budeme počítat, že magnety se nacházejí ve vzduchu, jehož relativní permeabilita je velmi blízká jedné, a tak můžeme výpočty provádět stejně jako pro vakuum.

Můžeme si všimnout, že vztahy pro elektrickou intenzitu a magnetickou indukci jsou totožné až na typ náboje a polohu materiálové konstanty (μ_0 a ϵ_0). Toho, že se většinou tyto konstanty vyskytují v opačných polohách, si můžeme všimnout i na ostatních vztazích v elektromagnetismu. Je to dáno tím, že mezi μ_0 a ϵ_0 platí vztah $\mu_0 = 1/\epsilon_0 \cdot c^2$, kde c je rychlost světla ve vakuu.

Jak se popisují magnety?

Ač nám již toto skutečně stačí k řešení úloh, stále narážíme na to, že se v zadání úloh obvykle nesetkáme s magnetickými náboji (což je opět způsobeno tím, že se jedná o velkou abstrakci, jelikož ve skutečnosti neexistují). Mnohem častěji se setkáme s tím, že je magnet popsán tzv. *dipólovým momentem*. Jak název napovídá, jedná se o veličinu, která dokáže dipól – dvojici magnetických nábojů – charakterizovat jako celek. Pomocí magnetických nábojů ji můžeme definovat jako

$$\mathbf{m} = \varphi \mathbf{l},$$

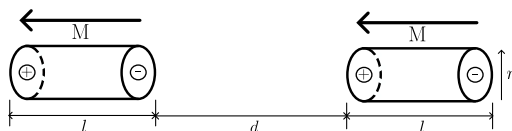
kde $\mathbf{m}$ je právě dipólový moment, $\mathbf{l}$ je vektor délky směřující od záporného náboje ke kladnému a φ je velikost magnetického náboje. (Oba náboje mají stejnou velikost a opačné znaménko, aby byl celkový magnetický náboj nulový.) Všimněme si, že směr dipólového momentu nám říká, kam umístit kladný a kam záporný náboj. Dozvíme-li se ze zadání rozměry magnetu a jeho dipólový moment $\mathbf{m}$, dokážeme si odtud již jednoduše dopočítat velikost magnetických nábojů.

Při počítání přitažlivosti mezi magnety se můžeme také poměrně často setkat s objemovou hustotou dipólového momentu, neboli magnetizací $\mathbf{M}$, která odpovídá dipólovému momentu vztaženému na jednotku objemu. Její výhoda spočívá v tom, že je při daných podmínkách (magnetizace záleží na vnějším poli) charakteristikou materiálu. Známe-li hustotu dipólového momentu $\mathbf{M}$ a objem magnetu V , dipólový moment poté snadno určíme jako $\mathbf{m} = \mathbf{M}V$ (pokud je magnetizace v daném objemu konstantní).

⁷Směr magnetické indukce je pro kladný magnetický náboj od náboje a pro záporný náboj k náboji.

Jak se vypořádat s úlohou?

Zkusme si na závěr vyřešit jednoduchou úlohu, abychom si ukázali, jak můžeme naše poznatky využít pro výpočty. Spočítejme sílu, která působí mezi dvěma stejnými tenkými tyčovými magnety o délce l , poloměru r a hustotou dipólového momentu $\mathbf{M}$, ve vzdálenosti d umístěnými ve vakuu jako na obrázku 3. (Na obrázku jsou již rovnou také zakresleny magnetické náboje.)



Obrázek 3: Obrázek k úloze.

Nejprve vypočteme velikost magnetických nábojů φ . Celkový dipólový moment můžeme vypočítat jako

$$m = MV = M\pi r^2 l,$$

velikost magnetických nábojů tedy je

$$\varphi = \frac{m}{l} = M\pi r^2.$$

Počítejme nyní, jakou silou působí magnet vlevo na ten vpravo. Síla působící na bližší náboj je součtem sil od obou pólů magnetu, přičemž ta od bližšího pólu je přitažlivá a ta od vzdálenějšího odpuzivá. Kombinací vztahů 1 a 2 tedy pro celkovou sílu na tento náboj dostáváme

$$F_1 = \mu_0 \frac{\varphi^2}{4\pi d^2} - \mu_0 \frac{\varphi^2}{4\pi (d+l)^2} = \frac{\mu_0 M^2 \pi r^4}{4} \left(\frac{1}{d^2} - \frac{1}{(d+l)^2} \right).$$

Obdobně můžeme vypočítat sílu působící na vzdálenější magnetický náboj, čímž získáme

$$F_2 = \frac{\mu_0 M^2 \pi r^4}{4} \left(\frac{1}{(d+l)^2} - \frac{1}{(d+2l)^2} \right).$$

Z toho, že náboje s rozdílným znaménkem se přitahují a ty se stejným se odpuzují, můžeme určit, že síla F_1 je přitažlivá a síla F_2 je odpuzivá, výsledná působící síla je tedy $F_1 - F_2$. Také vidíme, že $F_1 > F_2$, což nám říká, že se ve výsledku magnety přitahují (to bychom přesně od dvou takto natočených magnetů ze zkušeností ze života čekali).

Jaké jsou problémy tohoto popisu?

To, že magnetické náboje ve skutečnosti neexistují, není jediný problém této představy. Již výše jsme zmiňovali, že naše výsledky pro pole vytvářené magnetem platí, pouze pokud pole počítáme v dostatečné vzdálenosti od magnetu. Tomu je tak proto, že pokud se nacházíme blízko u magnetu, tak stěny, na něž umístujeme magnetické náboje, nemůžeme aproximovat jako body, ale musíme počítat s tím, že magnetické náboje by byly rozmístěné po celé stěně. Správně bychom tedy poté měli využít princip superpozice a sečíst příspěvky k magnetickému poli od každé části náboje, což je početně velmi náročné.

Teoretický popis magnetů je ve skutečnosti velmi náročný nakonec především kvůli tomu, že většina zvláštních jevů, které lze u magnetů pozorovat, je důsledkem částicové povahy látky, a tedy je popsána kvantovou mechanikou, a zároveň samotná existence magnetického pole je důsledkem teorie relativity. Obě dvě teorie jsou velmi složité, z čehož plyne i to, že pochopit chování obyčejného magnetu není vůbec jednoduché. Popis magnetů pomocí magnetických nábojů obchází tyto složitosti tím, že nezkoumá samotný způsob vzniku pole, ale pouze na základě jistých předpokladů vyvozuje, jak bude pole vypadat na makroskopické úrovni. Díky němu tedy nakonec získáváme jednoduchý model, který nám poskytuje poměrně přesné předpovědi pro spoustu situací a umožňuje nám vypořádat se s většinou úloh o magnetech, se kterými se můžeme potkat.

Aleš Opl
ales@vyfuk.org

Hynek Jakeš
hynek@vyfuk.org

Korespondenční seminář Výfuk je organizován studenty a přáteli MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Katedrou didaktiky fyziky MFF UK, jejími zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků. Realizace projektu byla podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.
Pro zobrazení kopie této licence navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.