

Motivační úlohy k LŠAF 2019

Tyto úlohy jsou dobrovolné, ale v případě velkého zájmu o účast na LŠAF budou mít přednost ti z přihlášených, kteří se je (nebo alespoň některou z nich) pokusili vyřešit, až druhým kritériem bude pořadí registrace.

Jak sami vidíte, nejde o typicky středoškolské úlohy, ale pokud se nebojíte přemýšlet, s naší nápovědou byste si s nimi měli poradit. Samozřejmě můžete využít různé informace, které si dohledáte na internetu, dostupné nástroje (např. pro zpracování dat a kreslení grafů), radit se se spolužáky, učiteli či rodiči. Zašlete nám pak stručné řešení, které podle vás vystihuje fyzikální podstatu problému (třeba i jen jedné z úloh, ale samozřejmě čím více, tím lépe). Na LŠAF pak daná témata probereme detailněji.

Vaše řešení očekáváme **elektronicky** do **2. června 2019** na adrese jana.trojкова@vsb.cz, do předmětu zprávy napište **Úlohy LŠAF 2019**. Stačí dodat přílohu s řešením v jakékoli čitelné podobě (třeba rukou psaným a naskenovaným či ofoceným).

V případně zaslání klasickou poštou (nejpozději do konce května) uveďte adresu: Letní škola AF, Katedra fyziky 480, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 17. listopadu 15, 708 00 Ostrava-Poruba.

Nejpozději do 7. června vám účast definitivně potvrdíme.

Úvodní pojmy

Jak už asi víte ze školy, magnetické pole můžeme charakterizovat jeho intenzitou \vec{H} (jednotkou je $A \cdot m^{-1}$) a magnetickou indukcí \vec{B} (jednotkou je T). Ve vakuu platí $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$, kde $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H \cdot m^{-1}$ je tzv. permeabilita vakua. Látkové prostředí je tvořeno částicemi (atomy, jádry, elektrony...), které mohou nést nenulové magnetické momenty – ty se ale většinou z makroskopického pohledu vyruší. V magnetickém poli se ovšem jejich uspořádání mění a látka získává nenulový výsledný magnetický moment (\vec{m} , jeho jednotka je $A \cdot m^2$). Magnetický moment na jednotku objemu látky nazýváme magnetizací (\vec{M} , je měřen v $A \cdot m^{-1}$ stejně jako intenzita magnetického pole). V nejjednodušších případech platí $\vec{M} = \chi \vec{H}$, kde χ je skalární bezrozměrná charakteristika materiálu, nazývaná magnetická susceptibilita. Pro magnetickou indukcii v takovém materiálu platí $\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0(1 + \chi)\vec{H} = \mu_0\mu_r \vec{H}$, μ_r je tzv. relativní permeabilita. Různé materiály se v magnetickém poli chovají různě – některé je mírně zeslabují (diamagnetika), jiné mírně zesilují (paramagnetika), některé výrazně zesilují (feromagnetika), speciálním případem jsou magneticky tvrdé materiály – ferrimagnetika, které jsou trvale magnetické (mají nenulový vlastní magnetický moment i bez přítomnosti vnějšího pole). Proč tomu tak je, proč je odezva u různých materiálů různá a jaké to má důsledky, se můžete dozvědět na jedné z přednášek naší letní školy.

Úloha 1: Magnetické pole Země

Tvrzení, že střílka kompasu ukazuje na sever, je poněkud zjednodušené. Severní pól Země a její severní (nebo vlastně jižní?) magnetický pól spolu nesplývají; poloha druhého z nich se navíc neustále mění, viz např. populární článek [1].

a) Vysvětlete, co tyto pojmy označují, a také, co je to inklinace a deklinace magnetického pole v určitém místě.

b) Pomocí odkazu [2] či jiného důvěryhodného zdroje zjistěte, jak silné je magnetické pole Země v Ostravě a jaký zde má vektor magnetického pole směr (sklon vůči vodorovné rovině a odchylku od roviny, v níž leží poledník procházející tímto městem).

c) Jaký proud by musel téci kruhovým závitem o průměru 10 cm, aby v jeho středu vyvolal stejně silné magnetické pole?

Doporučené zdroje

[1] Matouš Lázňovský: Severní magnetický pól se vydal na cesty. Co když doputuje až na jih? iDNES.cz, on-line: https://www.idnes.cz/technet/veda/az-se-otoci-prepoluje-magneticke-pole-zeme.A190212_110721_veda_mla

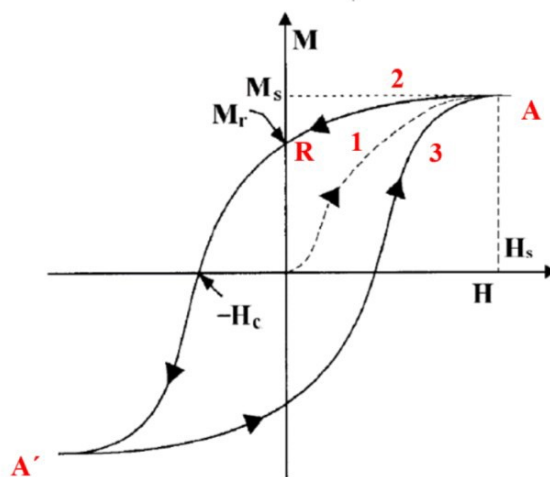
[2] NOAA, NCEI Geomagnetic Calculators - Magnetic field calculators: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml#igrfwmm>

Úloha 2: Feromagnetikum v magnetickém poli

Feromagnetické materiály jsou v současné době široce využívány v mnoha praktických odvětvích, jako jsou sensorika, spintronika, elektronika, paměťová média, magnetooptika a další. Tyto materiály vykazují větší či menší setrvačnost magnetizace při změně intenzity vnějšího pole – jednoduchá závislost $\vec{M} = \chi\vec{H}$ už pro ně neplatí. Podívejte se na obrázek, na němž je zachycena magnetizační křivka, tj. závislost magnetizace na intenzitě vnějšího pole.

Magnetizační křivka obsahuje několik významných bodů.

Pokud je látka odmagnetována a následně vložena do rostoucího magnetického pole, závislost M na H je popsána křivkou prvotní magnetizace (křivka 1). V bodě A se látka dostala do stavu nasycení, v němž jsou už všechny magnetické momenty v látce natočeny do směru vnějšího magnetického pole, a hodnota M_s označuje tzv. magnetizaci v nasycení (saturaci). Pokud chceme látku přemagnetovat z bodu A do bodu A', magnetické pole budeme nejprve snižovat směrem k nule a poté převrátíme jeho polaritu, zjistíme, že závislost probíhá podle křivky 2. Při nulovém vnějším poli H má látka stále nenulovou magnetizaci M_r , označovanou jako zbytkovou



(remanentní). Koercitivní síla (pole) H_c odpovídá magnetickému poli s převrácenou polaritou, při němž magnetizace zcela vymizí. Poté cyklus pokračuje dále v záporných magnetických polích podle křivky 2, při návratu zpět by závislost kopírovala křivku 3.

Základním kritériem pro rozdělení materiálů na magneticky měkké a magneticky tvrdé jsou právě hodnoty koercitivní síly (koercitivního pole) H_c . Tvrdá feromagnetika jako ferity, permanentní magnety či chromové oceli vykazují vysoké koercitivní pole, zatímco magneticky měkké materiály jako transformátorové oceli mají malá H_c . Chceme-li příslušnou hodnotu H_c najít, musíme změřit magnetizační křivku daného materiálu popisující jeho chování v přiloženém vnějším magnetickém poli popsaném intenzitou H .

a) V přiloženém textovém souboru máte k dispozici reálně naměřenou závislost magnetického momentu m (v jednotkách $A \cdot m^2$) permanentního magnetu NdFeB na přiloženém vnějším magnetickém poli H (v jednotkách $kA \cdot m^{-1}$). Rozměry magnetu jsou $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$. Vykreslete (ve vhodném programu) závislost magnetizace M (v jednotkách $A \cdot m^{-1}$) na vnějším magnetickém poli H (tzv. M - H křivku) a stanovte hodnoty koercitivní síly, magnetizace v nasycení a remanentní magnetizace.

b) Kromě M - H křivky je někdy vykreslována také B - H křivka, přičemž magnetická indukce B (v jednotce T) v příslušném směru je dána vztahem $B = \mu_0 (H + M)$. Nakreslete také tuto křivku a stanovte hodnoty koerzivní síly a remanentní magnetické indukce.

Úloha 3: Levitace diamagnetika

Magnetická levitace, tj. efekt, kdy dosáhneme levitace tělesa díky magnetickým silám, má mnoho praktických uplatnění – vysokorychlostní vlaky, bezkontaktní tavení, ložiska i různé levitující hračky. Lze ji realizovat různě. Docílit stabilní levitace s využitím pouze paramagnetických či feromagnetických látek je ovšem obtížné (jen zkuste donutit volně levitovat jeden magnet nad druhým!), ve statickém uspořádání nemožné (Earnshawovo pravidlo). Naopak diamagnetické látky a supravodiče (které se chovají jako extrémně silná diamagnetika) se v nehomogenním magnetickém poli přirozeně stabilizují. Lze tak např. nechat levitovat pyrolytický grafit nad několika vhodně uspořádanými neodymovými magnety, magnetem tvaru prstence či soustavou elektromagnetů, a to i za pokojové teploty. Magnetickou sílu vztaženou na jednotku objemu (tj. v jednotkách $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$), jakou působí vnější pole v každém bodě diamagnetické látky, lze vyjádřit jako:

$$f = \frac{\chi}{2\mu_0} \text{grad } B^2,$$

kde χ značí magnetickou susceptibilitu diamagnetika, μ_0 permeabilitu vakua a B velikost magnetické indukce vnějšího pole, v němž se nachází. Toto pole není homogenní – vektor magnetického pole je funkcí souřadnic, $\vec{B} = \vec{B}(x, y, z)$.

Poznámka: Výpočet rozložení pole $\vec{B}(x, y, z)$ je obecně velmi složitý. I pokud bychom závislost $\vec{B}(x, y, z)$ už znali, výpočet výrazu ($\text{grad } B^2$) zahrnující operaci gradientu o dost předbíhá to, co se v matematice na SŠ běžně učí. Pro řešení následující úlohy jej ale nepotřebujete znát. Stačí vám vědět, že je to určitá funkce souřadnic daná funkcí $\vec{B}(x, y, z)$ a její hodnota v každém bodě roste (při jinak stejném rozložení) přímo úměrně kvadrátu pole. Pokud bychom např. pole budili soustavou cívek procházených proudem I , bude magnetické pole v každém bodě dáno vektorem $\vec{B}(x, y, z)$. Když proud cívkami zdvojnásobíme, pole v každém bodě bude dvakrát větší a výraz ($\text{grad } B^2$) čtyřikrát větší.

Když v určitém místě v tomto poli (označme jeho výchozí stav $\vec{B}_1(x, y, z)$) stabilně levituje malý plátek pyrolytického grafitu, jehož magnetická susceptibilita je $\chi = -410 \cdot 10^{-6}$ a hustota $\rho = 2200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, určete:

- kolikrát silnější pole $\vec{B}_2(x, y, z) = k \cdot \vec{B}_1(x, y, z)$ (tj. při jinak stejném průběhu) bychom museli vytvořit, aby zde levitoval stejně velký plátek bismutu ($\chi = -166 \cdot 10^{-6}$, $\rho = 9800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$),
- kolikrát silnější pole $\vec{B}_3(x, y, z) = l \cdot \vec{B}_1(x, y, z)$ bychom potřebovali pro levitaci kapky vody ($\chi = -9,1 \cdot 10^{-6}$, $\rho = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$).

Použité zdroje

[1] Iida, Keisuke & Narisawa, Yoshinori & Ishino, Yuji & Takasaki, Masaya & Mizuno, Takeshi. (2015). Realization of diamagnetic levitation of column-shaped graphite. Mechanical Engineering Journal. DOI: 10.1299/mej.14-00559