

### 3.10. Magnetické vlastnosti látek

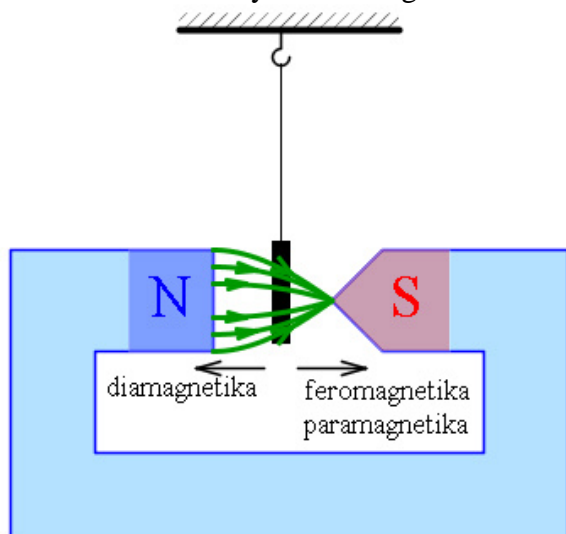


1. Seznámit se s klasifikací látek podle charakteru interakce s magnetickým polem.
2. Nastudovat zdroje magnetického pole atomu, které souvisí s pohybem elektronu v elektronovém obalu atomu.
3. Vysvětlit podstatu diamagnetismu, paramagnetismu a feromagnetismu.
4. Umět popsat hysterezní smyčku. Vědět, jak se liší magneticky tvrdá a měkká feromagnetika.



Interakci různých látek s magnetickým polem nelze vysvětlit, jestliže budeme vycházet z klasické fyziky, neboť má výlučně kvantově mechanickou povahu. V této kapitole pouze probereme velmi stručně výsledky studia chování různých materiálů v magnetickém poli. Výzkum v této oblasti má velmi široké praktické využití (elektromagnety, videopásky, CD disky, paměti v počítači, vyšetřovací metody ve zdravotnictví na principu jaderné magnetické rezonance apod.) a zajímavou perspektivu.

Již v podkapitole 3.7.1 byla zavedena materiálová konstanta relativní permeabilita  $\mu_r$  vztahem (3.7.-5). Látky slabě magnetické (**paramagnetika**, **diamagnetika**) charakterizuje, pokud jde o magnetické vlastnosti, bezrozměrná veličina  $\chi_m$ , zvaná magnetická susceptibilita, kterou zavedeme takto: Výsledná magnetická indukce uvnitř homogenního para(dia)magnetika je



Obr. 3.10.-1

určena vektorovým součtem indukce  $B_0$ , která by příslušela danému bodu v prostoru, kdybychom odstranili látkové prostředí a ponechali zdroj vnějšího magnetického pole v původním stavu, a magnetické indukce  $B_i$ , která je uvnitř látkového pole vyvolaná přítomností vnějšího zdroje magnetického pole:

$$B = B_i + B_0. \quad 3.10.-1$$

Magnetická susceptibilita vyjadřuje konstantu úměrnosti mezi  $B_i$  a  $B_0$ . Tedy

$$B_i = \chi_m B_0. \quad 3.10.-2$$

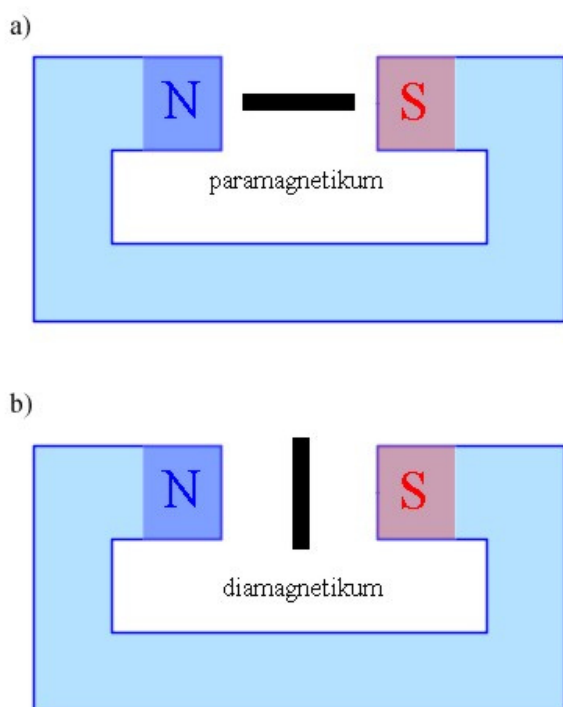
Pravou stranu (3.10.-2) spolu se vztahem (3.7.-5) dosadíme do (3.10.-1). Po krátké úpravě obdržíme rovnost:

$$\mu_r = 1 + \chi_m. \quad 3.10.-3$$

Umístíme vzorek látky do nehomogenního magnetického pole (Obr. 3.10.-1). Podle velikosti a orientace magnetické síly klasifikuje všechny látky na tři hlavní skupiny – **feromagnetické (feromagnetika)**, **paramagnetické (paramagnetika)** a **diamagnetické (diamagnetika)**. Mezi feromagnetické látky patří také **ferity** (látka **ferimagnetická**). Jejich relativní permeabilita dosahuje hodnot  $10^2$  až  $10^3$ . Od kovových feromagnetik se liší zejména mnohem větším elektrickým odporem a tím, že jsou spontánně zmagnetovány. Patří k nim například sloučeniny oxidu železa s oxidy jiných kovů ( $MnFe_2O_4$ ,  $BaFe_{12}O_4$ ) a **magnetovec** ( $Fe_3O_4$ ). Neměli bychom opomenout existenci zvláštních magnetických látek (antiferomagnetika,

granáty), jimiž se však zabývat nebudeme. Rovněž vyloučíme z našich úvah látky v supravodivém stavu.

Látky feromagnetické jsou silně přitahovány k oblasti s vyšší hustotou magnetických



indukčních čar – v Obr. 3.10.-1 k jižnímu zaostřenému pólu. K těmto pólu jsou přitahovány látky paramagnetické. Na diamagnetika působí velmi slabě opačně orientovaná magnetická síla. Vložíme-li vzorek látky ve tvaru kvádrů do homogenního magnetického pole a bude-li volně otáčivý kolem, pro jednoduchost vodorovné osy, zaujme tuto stabilní polohu: feromagnetika a paramagnetika ve směru pole (Obr. 3.10.-2a), diamagnetika napříč (Obr. 3.10.-2b).

V Tab. (3.10-1) jsou hodnoty magnetické susceptibility některých paramagnetik a diamagnetik. Diamagnetické látky vykazují relativní permeabilitu malou, zápornou a teplotně nezávislou,

Obr. 3.10.-2

kdežto látky paramagnetické v širokém rozsahu a s teplotní závislostí

$$\mu_r = 1 + \frac{C}{T}, \quad 3.10.-4$$

v níž  $C$  je **Curieova teplota** a  $T$  termodynamická teplota látky. Přestože jsou alkalické kovy diamagnetika, jejich permeabilita není teplotou ovlivněna. Relativní permeabilita feromagnetik závisí na vnějším magnetickém poli a silně na teplotě. Při dosažení Curieovy teploty jejich permeabilita poklesne z vysokých hodnot ( $10^3$ - $10^4$ ) na hodnoty typické pro paramagnetika. Nejznámější látky, které projevují feromagnetismus za pokojové teploty, jsou prvky železo, kobalt, nikl, gadolinium, dále pak značné množství slitin i sloučenin nekovových.

Tab. 3.10.-1 Vybraní reprezentanti a) diamagnetik, b) paramagnetik a jejich magnetické susceptibility.

a)

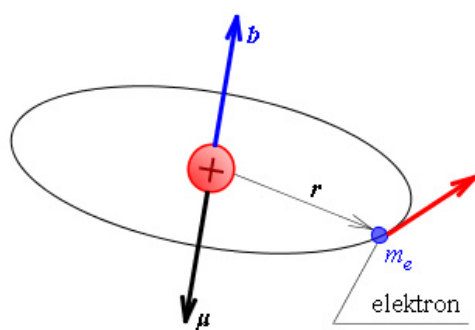
Látka	$\chi_m \cdot 10^6$
bismut	-176
etanol	-7,9
měď	-10,3
NaCl	-12,6
sklo	-12,6
stříbro	-26
voda	-8,8

vodík	-0,063
uhlík	-0,22

b)

Látka	$\chi_m \cdot 10^6$
dusík	0,013
hliník	23
kyslík	1,9
platina	350
tekutý kyslík	3400
wolfram	176

**Charakter pohybu elektronů v elektronovém obalu atomu určuje magnetické vlastnosti látky.** Můžeme si představit, že každý elektron tvoří proudovou smyčku. Následující



odvození vztahu mezi magnetickým momentem orbitálního elektronu a jeho momentu hybnosti, které vychází z klasické fyziky, poskytuje vztah, který kupodivu platí i v kvantové mechanice. Přestože tomu tak ve skutečnosti není, představme si, že se elektron pohybuje po kruhové trajektorii poloměru  $r$  kolem jádra atomu (Obr. 3.10.-3). Elektronu přísluší **orbitální moment hybnosti  $b$** , **orbitální magnetický dipólový moment  $\mu_{\text{orb}}$** , hmotnost  $m_e$  a rychlost  $v$ . Velikost momentu hybnosti za našich podmínek je:

$$b = m_e v r. \quad (3.10.-5)$$

Obr. 3.10.-3

K tomu, abychom vypočítali orbitální magnetický moment, který existuje díky pohybu elektronu, použijeme definiční vztah magnetického dipólového momentu (3.6.-15). Proto nejprve vyjádříme proud:

$$I = \frac{|e|}{t} = \frac{|e|v}{2\pi r}.$$

Proudová smyčka, kterou tvoří obíhající elektron, uzavírá kruh o poloměru  $r$  s obsahem  $\pi r^2$ . Je tedy zřejmé, že pro velikost orbitálního magnetického dipólového momentu platí:

$$\mu_{\text{orb}} = \frac{|e|vr}{2}. \quad 3.10.-6$$

S přihlédnutím k (3.10.-5) obdržíme vztah mezi orbitálním momentem hybnosti a orbitálním magnetickým dipólovým momentem

$$\mu_{\text{orb}} = \frac{|e|}{2m} b, \quad 3.10.-7$$

který přepíšeme do vektorového tvaru:

$$\mu_{\text{orb}} = \frac{e}{2m} \mathbf{b}. \quad 3.10.-8$$

Poněvadž je náboj elektronu záporný, mají vektory  $\mu_{\text{orb}}$  a  $\mathbf{b}$  **opačnou** orientaci (Obr. 3.10.-3).

Dalším zdrojem magnetického pole atomu je samotný elektron. Má totiž **vlastní**, říkáme též **vnitřní** moment hybnosti (tzv. **spin**), který odpovídá spinové rotaci elektronu kolem vlastní osy a má značku  $S$ . Spinu přísluší **spinový magnetický dipólový moment  $\mu_S$** . Obě veličiny  $S$

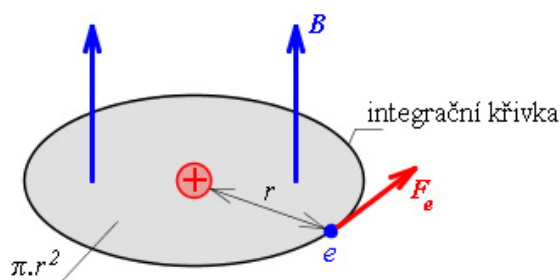
a  $\mu_s$  charakterizují elektron podobně jako hmotnost a náboj elektronu (viz podkapitola 4.3.3). Tentokrát v analogii s klasickou představou pohybu nelze dospět ke vztahu, který veličiny  $S$  a  $\mu_s$  spojuje:

$$\mu_s = \frac{e}{m} S. \quad 3.10.-9$$

I částice v jádře atomu (protony, neutrony) mají spin a rovněž se v jádře pohybují, jenže příspěvek výsledného dipólového magnetického momentu jádra k celkovému magnetickému momentu atomu je asi tisíckrát menší. Je zajímavé, že i neutron má spin. Chová se jako malý magnet a jeho magnetický moment se podobá magnetickému momentu rotujícího záporného náboje.

Výsledný magnetický moment atomu nebo molekuly se skládá s magnetickými momenty všech ostatních částic látky. **Látka je zmagnetovaná, pokud látka vytváří sama o sobě magnetické pole makroskopické povahy.** Nyní se zabývejme třemi základními jevy, které nastávají při interakci látky s vnějším magnetickým polem: diamagnetismus, paramagnetismus a feromagnetismus.

### Diamagnetismus



Obr. 3.10.-4

Nechť se v blízkosti atomu pomalu zapíná magnetické pole. V důsledku elektromagnetické indukce vzniká i pole elektrické, neboť indukované elektromotorické napětí můžeme vyjádřit jako křivkový integrál vektoru intenzity elektrického pole podél uzavřené křivky. Vezměme matematickou formulaci Faradayova zákona elektromagnetické indukce (3.8.-6) a

nahradíme v ní levou stranu zmíněným integrálem. Zároveň předpokládejme, že integrační křivka obepíná plochu o obsahu  $\pi r^2$  a magnetické indukční čáry vnějšího magnetického pole jsou kolmé k rovině, ve které elektron obíhá (Obr. 3.10.-4):

$$\oint \mathbf{E} d\mathbf{l} = \oint \mathbf{E} dl = E 2\pi r = -\frac{d}{dt} (B \pi r^2).$$

Po úpravě je

$$E = -\frac{r}{2} \frac{dB}{dt}.$$

Indukované elektrické pole působí na elektron silou  $F_e$  a ta vyvolává silový moment o velikosti  $|e|Er$ . Moment síly je však také roven derivaci momentu hybnosti podle času

$$\frac{db}{dt} = |e|rE = \frac{|e|r^2}{2} \frac{dB}{dt}$$

a po zkrácení  $dt$  dostaneme vztah:

$$db = \frac{|e|r^2}{2} dB. \quad 3.10.-10$$

Abychom získali změnu momentu hybnosti, která nastane v důsledku přírůstku magnetické indukce vnějšího magnetického pole z 0 na hodnotu  $B$ , integrujme (3.10.-10):

$$\Delta b = \frac{|e|\hbar^2}{2m} B.$$

3.10.-11

Přírůstku z (3.10.-11) odpovídá změna orbitálního magnetického dipólového momentu (viz. vzorec (3.10.-8))

$$\Delta\mu_{\text{orb}} = \frac{|e|\hbar}{2m} \Delta b = \frac{e^2\hbar^2}{4m} B,$$

kteřá má podle Lenzova zákona opačnou orientaci než vnější magnetické pole.

Použili jsme klasickou úvahu, která sice pomůže pochopit podstatu diamagnetismu, není však fyzikálně správná! V souladu se skutečností je tvrzení, že indukovaný magnetický moment atomu je úměrný magnetické indukci vnějším zdrojem vyvolaného magnetického pole a má k této indukci opačnou orientaci, což je podstata diamagnetismu. Po zániku vnějšího magnetického pole vymizí indukovaný magnetický moment. Protože je Faradayův zákon elektromagnetické indukce všeobecný, vyskytuje se diamagnetismus u **všech** látek v magnetickém poli. Diamagnetismus je jev **velmi slabý** a u látek paramagnetických resp. feromagnetických bývá paramagnetismem resp. feromagnetismem překryt.

### Paramagnetismus

Pokud atomy látky mají permanentní magnetické momenty (atomy s lichým počtem elektronů, atomy přechodových prvků – např. chrom, mangan, železo, nikl, kobalt, paladium a platina) a látka se bude nacházet ve vnějším magnetickém poli, nebudou již magnetické momenty atomů orientovány v prostoru nahodile, nýbrž se budou natáčet do směru vnějšího magnetického pole. Bude to znamenat, že více atomů bude mít magnetické momenty orientovány shodně s vektorem magnetické indukce vnějšího pole než ve směru opačném. Látka se tímto magnetizuje a pole v látce bude silnější, než v jejím okolí. Mírou zmagnetování látky je vektor **magnetizace M**, jenž udává objemovou hustotu magnetického momentu:

$$\mathbf{M} = \frac{d\mu}{dV}$$

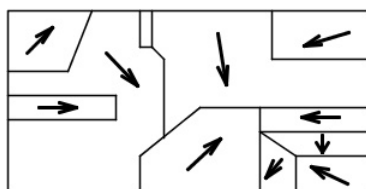
$$[M] = \text{A} \cdot \text{m}^{-1}$$

3.10.-12

Náhodné srážky atomů v důsledku neuspořádaného pohybu narušují uspořádání magnetických momentů pole, proto s rostoucí teplotou klesá velikost výsledného magnetického momentu látky. Připomeňte si vztah (3.10.-4).

### Feromagnetismus

Je-li relativní účinek magnetických momentů mnohem silnější než v případě paramagnetismu nebo diamagnetismu, hovoříme o jevu feromagnetickém. Účinky indukovaných magnetických momentů v látce feromagnetické dokonce často v pozorovaných výsledných polích převládají.



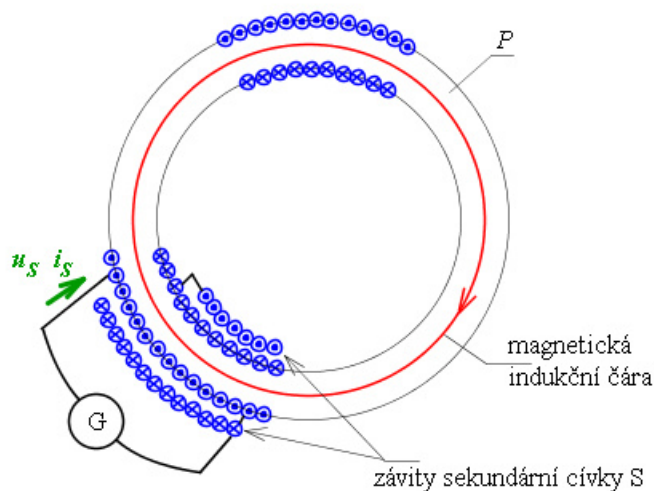
Feromagnetismus je důsledkem čistě kvantového jevu, nazývaného **výměnná interakce**. Spiny velmi blízkých atomů se souhlasně orientují i přes rušivý vliv tepelného pohybu. Při chladnutí roztaveného feromagnetika se vytvářejí **Weissovy oblasti spontánní magnetizace**, které

Obr. 3.10.-5

se často označují termínem **domény**. V doménách jsou atomové magnetické momenty uspořádány do souhlasných směrů. Jednotlivé domény jsou však orientovány chaoticky a

navenek se proto neprojevují (Obr. 3.10.-5). Vložíme-li látku do vnějšího magnetického pole, porostou domény s magnetickými dipólovými momenty ve směru pole na úkor ostatních, případně se budou orientovat do směru pole. Tyto dva jevy magnetické pole v látce podstatně zesilují a jejich průběh silně závisí na charakteru izotropie látky.

K výzkumu magnetizace se např. používá Rowlandův prstenec. Zkoumaný materiál je stočený tak, aby tvořil jádro toroidu (Obr. 3.10.-6). S magnetickou indukcí  $B_0$ , která by se uvnitř



Obr. 3.10.-6 Rowlandův prstenec ke studiu magnetizace feromagnetických materiálů. Zkoumaný vzorek tvoří jádro toroidu. Jestliže prudce zvýšíme proud v primární cívce P z nuly na určitou hodnotu, indukuje se v sekundární cívce proudový pulz, který projde

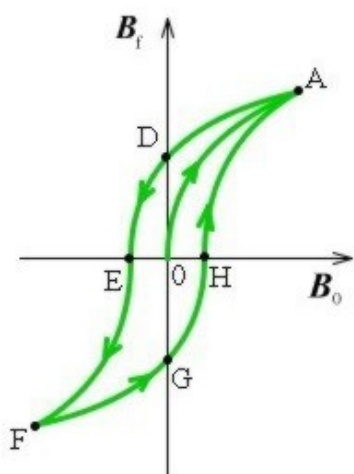
galvanometrem. Pulzu odpovídá celkový náboj  $Q_{\text{celk}} = \int_0^{t_{\text{celk}}} i_S dt$  ( $t_{\text{celk}}$  – doba trvání pulzu,  $i_S$  – proud sekundární cívky jako funkce času), jenž je úměrný nárůstu velikosti magnetické indukce. Místo galvanometru lze připojit elektronický integrátor napětí pro přímé měření magnetické indukce.

toroidu vyskytovala bez přítomnosti feromagnetického jádra jako důsledek existence proudu v závitěch toroidu, se skládá  $B_f$  – příspěvek od feromagnetického jádra. Pro velikosti indukci s ohledem na skutečnost, že feromagnetikum zesiluje magnetické pole, platí:

$$B = B_0 + B_f. \quad 3.10.-13$$

K tomu, abychom stanovili  $B_0$ , stačí změřit proud v závitěch, rozměry toroidu a dosadit do vztahu (3.7.-12). Výslednou indukci  $B$  v jádře toroidu je možné změřit.

Obr. 3.10.-7 prezentuje historii magnetování feromagnetického vzorku. Budiž jádro na počátku nezmagnetované (vzorek se zahřeje nad Curieovu teplotu a ochladí se za nepřítomnosti magnetického pole) a postupně zvyšujeme proud v závitěch toroidu a tedy i magnetickou indukci  $B_0$  podle vztahu (3.7.-12). Křivka OA se nazývá **magnetizační (křivka prvotní magnetizace, panenská křivka)** a její nelineární průběh dokládá, že magnetická susceptibilita feromagnetika závisí na hodnotě  $B_0$ . V bodě A dosahuje vzorek magnetického nasycení (domény jsou prakticky zcela natočeny ve směru pole  $B_0$ ) a při dalším zvyšování proudu v závitěch roste  $B_f$  již jen nepatrně. Hodnota  $B_f$  v bodě A je jednou ze základních charakteristik feromagnetika a závisí na teplotě. Na magnetizační křivce ještě rozlišujeme v bodě 0 začínající vratnou část, kdy se ve slabém poli vratně natáčejí magnetické



Obr. 3.10.-7

dipólové momenty ve směru vnějšího magnetického pole, a nevratnou, která po ni následuje při dalším růstu  $B_0$ . Nevratnost magnetování je projevem paměti magnetických látek a využívá se k uchování informace v paměťových médiích (kazety, diskety, pevný disk v počítači apod.).

Nyní postupně snižujeme hodnotu proudu v solenoidu ze stavu A. Objeví se nová křivka AD. I když pole  $B_0$  zanikne, uvnitř feromagnetika zůstane pole s indukcí  $B_r$ , kterou nazýváme **remanentní magnetická indukce**. Jestliže bychom jádro z toroidu v této chvíli vyňali, získáme permanentní magnet.

Nyní opět zvyšujeme proud v toroidu, avšak tak, aby procházel závity v opačném směru než původně. Dospějeme do stavu E, kdy vymizí  $B_f$  a tedy bude platit:  $B = B_0 = B_k$ , kde  $B_k$  je **koercitivní magnetická indukce**. Při dalším zvyšování proudu se opět dosáhne stav nasycení (F). Uzavřená křivka ADEFGHA se nazývá **hysterezní**. Plocha vymezená hysterezní smyčkou respektive koercitivní indukce magnetického pole je úměrná energii, která musí být na zmagnetování materiálu vynaložena. Materiál se touto energií zahřívá. Vznikají hysterezní ztráty.

Podle hodnot  $B_k$  dělíme feromagnetika na magneticky **měkké** (např. železo  $10^{-4}$  T, ocel Armco  $2 \cdot 10^{-5}$  T) a magneticky **tvrdé** ( $B_k \geq 4\pi \cdot 10^{-4}$  T). Při konstrukci trvalých magnetů je žádoucí, aby byl magnetický stav látky pokud možno stálý a byl co nejméně ovlivnitelný vnějšími poli. Tomuto požadavku odpovídají magneticky tvrdé látky. K nim patří například uhlíková ocel (98,1% Fe, 1% Mn, 0,9% C), kobaltová ocel (52,6% Fe, 36% Co, 7% W, 3,5% Cr, 0,9% C), barnatý ferit. Také je důležité, aby byla co největší hodnota remanentní magnetické indukce. V generátorech, elektromotorech, transformátorech a jiných zařízeních s proměnným magnetickým polem je výhodné používat materiály s nízkou koercitivní magnetickou indukcí a vysokou hodnotou permeability. Uvedme transformátorovou ocel (96% Fe, 4% Si), čisté železo (99,95% Fe), supermalloy (15,7% Fe, 79% Ni, 5% Mo, 0,3% Mn) a manganatozinečnatý ferit ( $Mn_{0,5}Zn_{0,5}Fe_2O_4$ ). Umožňují získat při daném proudu mnohem silnější magnetické pole, než u jiných látek, a bez velkých hysterezních ztrát.



**KO 3.10.-1** Definujte magnetickou susceptibilitu.

**KO 3.10.-2** Klasifikujte látky podle velikosti a orientace magnetické síly, která na ně působí.

**KO 3.10.-3** Popište závislost relativní permeability paramagnetika na teplotě.

**KO 3.10.-4** Co se stane, dosáhne-li při zahřívání feromagnetikum Curierovu teplotu?

**KO 3.10.-5** Je relativní permeabilita diamagnetika kladná nebo záporná? Interpretujte fyzikální význam znaménka relativní permeability.

**KO 3.10.-6** Co určuje magnetické vlastnosti látek?

**KO 3.10.-7** Vysvětlete vznik magnetického pole atomu v souvislosti s pohybem elektronu v elektronovém obalu atomu.

**KO 3.10.-8** Co je příčinou zmagnetování látky?

**KO 3.10.-9** Pokuste se vysvětlit podstatu diamagnetismu, paramagnetismu a feromagnetismu.

**KO 3.10.-10** Definujte veličinu magnetizace.

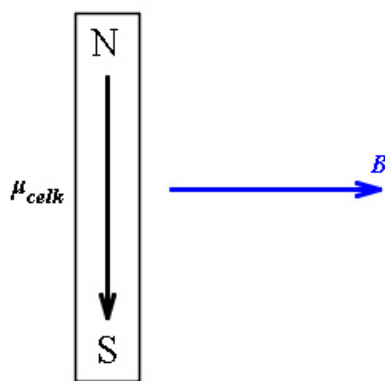
**KO 3.10.-11** Nakreslete a popište hysterezní smyčku.

**KO 3.10.-12** Jak se od sebe liší magneticky tvrdé a magneticky měkké materiály – pro vysvětlení použijte hysterezní smyčku.



Železná tyč délky 6 cm a obsahu průřezu 2 cm<sup>2</sup> je složena z atomů, kterým přísluší magnetický dipólový moment 2,1·10<sup>-23</sup> A·m<sup>2</sup>. Necht' mají dipólové momenty všech atomů stejný směr a orientaci. Určete dipólový moment tyče. Jak velký moment síly musí na tyč působit, aby se udržela v poloze kolmé k vnějšímu magnetickému poli o indukci 1,5 T? Počítejte s hustotou železa 7900 kg·m<sup>-3</sup>.

$\mu = 2,1 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{T}^{-1}$ ;  $l = 6 \text{ cm} = 0,06 \text{ m}$ ;  $S = 2 \text{ cm}^2 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ ;  $B = 1,5 \text{ T}$ ;  $\rho = 7900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $M_m = 0,055847 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ ;  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ;  $\mu_{\text{celk}} = ?$ ;  $M = ?$



Protože se v zadání předpokládá saturace vzorku, tj. úplné seřazení magnetických dipólových momentů atomů, získáme velikost výsledného dipólového momentu prostým součtem velikostí příspěvků od jednotlivých atomů (vektory příspěvků jsou rovnoběžné s toutéž orientací). Odtud:

$$\mu_{\text{celk}} = N\mu. \quad (1)$$

Vodítkem k výpočtu počtu atomů  $N$  je známá hustota železa:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{Nm_{\text{at}}}{V}. \quad (2)$$

S přihlédnutím k definici molární hmotnosti  $M_m$  a látkového

Obr. 3.10.-8

množství  $n$  vyjádříme hmotnost atomu  $m_{\text{at}}$ :

$$M_m = \frac{m}{n} = \frac{mN_A}{N} = \frac{Nm_{\text{at}}N_A}{N} = m_{\text{at}}N_A$$

$$m_{\text{at}} = \frac{M_m}{N_A}. \quad (3)$$

Nyní osamostatněme  $N$  z (2) a postupně dosadíme hmotnost atomu podle (3), objem nahradíme součinem obsahu průřezu a délky tyče:

$$N = \frac{V\rho}{m_{\text{at}}} = \frac{V\rho N_A}{M_m} = \frac{Sl\rho N_A}{M_m}. \quad (4)$$

K obecnému řešení dospějeme dosazením (4) do (1):

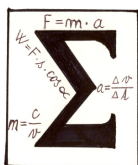
$$\mu_{\text{celk}} = \frac{\mu Sl\rho N_A}{M_m}.$$

$$\mu_{\text{celk}} = 21,47 \text{ J} \cdot \text{T}^{-1}$$

Moment síly, který působí vnější magnetické pole na magnet (viz poznámka v podkapitole 3.6.3), jsme vyjádřili vztahem (3.6.-17). Neboť jsou vektory magnetické indukce vnějšího magnetického pole a celkového dipólového magnetického momentu na sebe kolmé (Obr. 3.10.-8), platí pro velikost silového momentu:

$$M = \mu_{\text{celk}}B = 32,2 \text{ N} \cdot \text{m}.$$





### Chování látek v magnetickém poli

Látky slabě magnetické (paramagnetika, diamagnetika) charakterizuje, pokud jde o magnetické vlastnosti, bezrozměrná veličina  $\chi_m$  zvaná **magnetická susceptibilita**, která souvisí s relativní permeabilitou takto:

$$\mu_r = 1 + \chi_m. \quad 3.10.-3$$

Podle velikosti a orientace magnetické síly klasifikuje všechny látky na tři hlavní skupiny – **feromagnetické (feromagnetika)**, **paramagnetické (paramagnetika)** a **diamagnetické (diamagnetika)**. Mezi feromagnetické látky patří také **ferity** (látka **ferimagnetická**). Látky feromagnetické jsou silně přitahovány k oblasti s vyšší hustotou magnetických indukčních čar – v Obr. 3.10.-1 k jižnímu zaostřenému pólu. K těmž pólu jsou přitahovány látky paramagnetické. Na diamagnetika působí velmi slabě opačně orientovaná magnetická síla. Diamagnetické látky vykazují relativní permeabilitu malou, zápornou a teplotně nezávislou, kdežto látky paramagnetické v širokém rozsahu a s teplotní závislostí

$$\mu_r = 1 + \frac{C}{T}, \quad 3.10.-4$$

v níž  $C$  je **Curieova teplota** a  $T$  termodynamická teplota látky. Přestože jsou alkalické kovy diamagnetika, jejich permeabilita není teplotou ovlivněna. Relativní permeabilita feromagnetik závisí na vnějším magnetickém poli a silně na teplotě. Při dosažení Curieovy teploty jejich permeabilita poklesne z vysokých hodnot ( $10^3$ - $10^4$ ) na hodnoty typické pro paramagnetika. Nejznámější látky, které projevují feromagnetismus za pokojové teploty, jsou prvky železo, kobalt, nikl, gadolinium, dále pak značné množství slitin i sloučenin nekovových.

### Zdroje magnetického pole atomu

Charakter pohybu elektronů v elektronovém obalu atomu určuje magnetické vlastnosti látky. Vztah mezi **orbitálním momentem hybnosti** a **orbitálním magnetickým dipólovým momentem** elektronu

$$\mu_{orb} = \frac{|e|}{2m} b \quad 3.10.-7$$

přepíšme do vektorového tvaru:

$$\mu_{orb} = \frac{e}{2m} b. \quad 3.10.-8$$

Poněvadž je náboj elektronu záporný, mají vektory  $\mu_{orb}$  a  $b$  opačnou orientaci (Obr. 3.10.-3). Elektron má **vlastní**, říkáme též vnitřní moment hybnosti (tzv. **spin**, značka  $S$ ). Spinu přísluší **spinový magnetický dipólový moment**  $\mu_s$ . Platí:

$$\mu_s = \frac{e}{m} S. \quad 3.10.-9$$

Výsledný magnetický moment atomu nebo molekuly se skládá s magnetickými momenty všech ostatních částic látky. **Látka je zmagnetovaná, pokud látka vytváří sama o sobě magnetické pole makroskopické povahy.**

### Diamagnetismus

Indukovaný magnetický moment atomu je úměrný magnetické indukci vnějším zdrojem vyvolaného magnetického pole a má k této indukci opačnou orientaci, což je podstata diamagnetismu. Po zániku vnějšního magnetického pole vymizí indukovaný magnetický

moment. Protože je Faradayův zákon elektromagnetické indukce všeobecný, vyskytuje se diamagnetismus u všech látek v magnetickém poli. Diamagnetismus je jev velmi slabý a u látek paramagnetických resp. feromagnetických bývá paramagnetismem resp. feromagnetismem překryt.

### *Paramagnetismus*

Pokud atomy látky mají permanentní magnetické momenty (atomy s lichým počtem elektronů, atomy přechodových prvků – např. chrom, mangan, železo, nikl, kobalt, paladium a platina) a látka se bude nacházet ve vnějším magnetickém poli, nebudou již magnetické momenty atomů orientovány v prostoru nahodile, nýbrž se budou natáčet do směru vnějšího magnetického pole. Látka se tímto magnetizuje a pole v látce bude silnější, než v jejím okolí. Mírou zmagnetování látky je vektor **magnetizace  $M$** , jenž udává objemovou hustotu magnetického momentu:

$$M = \frac{d\mu}{dV} \quad 3.10.-12$$
$$[M] = A \cdot m^{-1}$$

Náhodné srážky atomů v důsledku neuspořádaného pohybu narušují uspořádání magnetických momentů pole, proto s rostoucí teplotou klesá velikost výsledného magnetického momentu látky.

### *Feromagnetismus*

Je-li relativní účinek magnetických momentů mnohem silnější než v případě paramagnetismu nebo diamagnetismu, hovoříme o jevu feromagnetickém. Feromagnetismus je důsledkem čistě kvantového jevu, nazývaného výměnná interakce. Při chladnutí roztaveného feromagnetika se vytvářejí **Weissovy oblasti spontánní magnetizace**, které se často označují termínem **domény**. V doménách jsou atomové magnetické momenty uspořádány do souhlasných směrů. Jednotlivé domény jsou však orientovány chaoticky a navenek se proto neprojevují (Obr. 3.10.-5). Vložíme-li látku do vnějšího magnetického pole, porostou domény s magnetickými dipólovými momenty ve směru pole na úkor ostatních, případně se budou orientovat do směru pole. Tyto dva jevy magnetické pole v látce podstatně zesilují. Cyklické magnetování feromagnetické látky charakterizuje **hysterezní smyčka**.