

Fyzika pre chémiu XIV

Magnetické pole

Peter Markoš

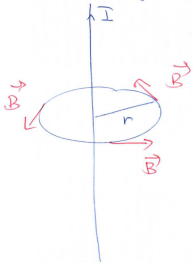
Katedra experimentálnej fyziky F2-253

Letný semester 2020/2021

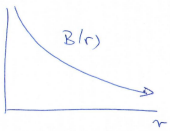
- ▶ Opakovanie: Magnetické pole, magnetická indukcia \vec{B}
- ▶ Zdroje magnetického poľa: elektrické prúdy
- ▶ Magnetický dipól, magnety
- ▶ Magnetické pole Zeme
- ▶ Magnetický moment elementárnych častíc, atómov a molekúl
- ▶ Cievka
- ▶ Dipól v magnetickom poli
- ▶ Feromagnetizmus

Opakovanie : magnetické pole

→ táto notica s prídavom
vzruša magnetické pole



$$B = \frac{\mu_0}{2r} \frac{I}{r}$$

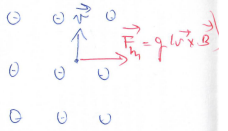
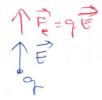


Ampereov zákon:

$$\int_L d\vec{\ell} \cdot \vec{B} = \mu_0 \int_S d\vec{S} \cdot \vec{j} \rightarrow \text{prúdová hustota}$$

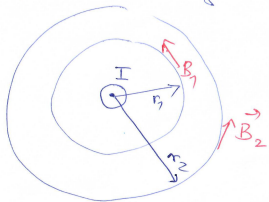
→ Lorentzova síla:

$$\vec{F} = q[\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}]$$



L ... diaľka, ktorá obopína
plochu S

Indukcia magnetického pola



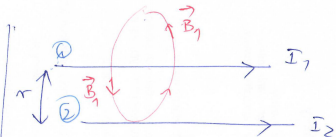
\vec{B} ... dotyčnice k indukčným čiaram

Ampereov zákon:

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{r}$$

Směr \vec{B} : pravidlo pravej ruky

[B] ... 1 Tesla 1 T



→ podľa rovnice magn. pole B_1

• B_1 pôsobí na prvú tyčičku
na vzdialenosti r od vodiča 2

a pôsobí tiež i na

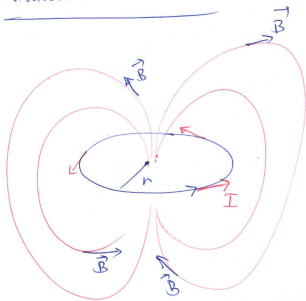
$$\left[\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B} \right]$$

• sila na ~~obidvoch~~ vodičoch s pomorom: dĺžka

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{r} l = B_1 \cdot I_2 \cdot l$$

↓
magn. pole od
vodiča 1

Průřez slučky

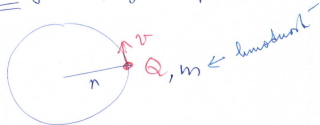


! Průřez slučky vytváří magnetický dipól

$$m = IS$$

$$S = \pi r^2$$

Kružný pohyb po kružnici:



o) moment hybnosti: $L = mvr$

o) elektrický proud:

$$I = \frac{Q}{T} = \frac{Q\omega}{2\pi} \quad T = \frac{2\pi}{\omega} \quad \omega = \frac{v}{r}$$

o) magnetický moment

$$m = IS = \frac{Q}{2\pi} \frac{v}{r} \cdot \pi r^2 = \frac{Q}{2} vr$$

$$m = \frac{Q}{2m} L$$

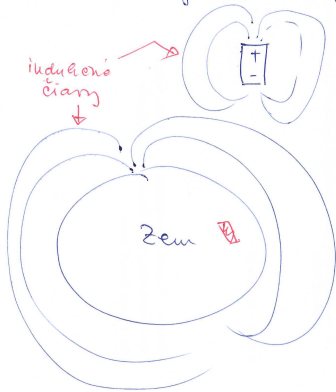
$$\vec{m} = \frac{Q}{2m} \vec{L}$$

← moment hybnosti

magnetický moment

Magnetické póly.

1) existujú materiály, ktoré sú magnetické "sami o sebe"



← magnet "vyzra" podľa jeho elektrický dipól



Zem má magnetické póly
koupať ukazuje na rovný magnetický
pól

- Otázka:
-) pôrod magn. póla
 -) jeho tvis s elektrickým prúdom
 -) vlastnosti magn. póla

Elektrický a magnetický dipól

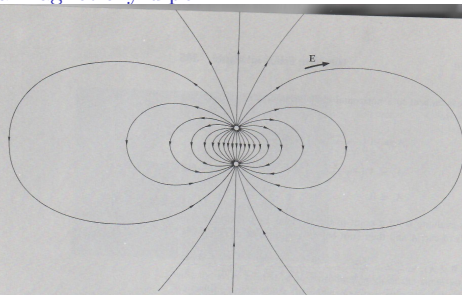
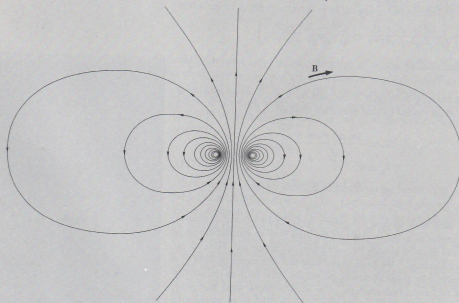


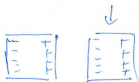
Fig. 10.8 (a) The electric field of a pair of equal and opposite charges. Far away it becomes the field of an electric dipole.



(b) The magnetic field of a current ring. Far away it becomes the field of a magnetic dipole.

Zdroje magnetického pole

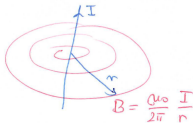
magnetické dipóly



nepodání se
separovat \oplus a \ominus

Zdroje:

① Elektrické proudy



$$B = \frac{\mu_0}{2r} \frac{I}{r}$$

▷ neexistují magnetický ▷

o náboj =

na rozdíl od elektrického pole,
letně má $+Q$ a $-Q$

② SPIN elementární částice

Elektron:



$$\vec{m} = g \frac{e}{2m} \vec{S}$$

↑ Spin

g... gyromagnetický poměr

$$g \approx 2 \left[1 + \frac{\alpha}{2\pi} + \dots \right]$$

(kvantová elektrodynamika
 $\alpha \approx \frac{1}{137}$... konstanta jemné
struktury)

Magn. veličný moment částic a jader

proton $m_p = 5.58 \cdot \frac{e}{2m_p} S$

neutron $m_n = -3.82 \cdot \frac{e}{2m_n} S$ ← elektrický neutrálný, ale má magn. veličný moment!

$$(S = \hbar \sqrt{\frac{1}{2}(\frac{1}{2} + 1)})$$

↑ spin - rotačný moment
hybnosti

elektron: $m_e = 2.002 \cdot \frac{e}{2m_e} S$

proton + ~~e~~ neutron si v jáře
⇒ magn. veličný moment jadra

← magn. veličný moment elektron

NMR - jaderná magn. veličná rezonance

Elektrony a atomy

•) n, l, m

↑ \leftarrow $L_z = m \hbar$
 moment hybnosti

$$L = \hbar \sqrt{l(l+1)}$$

$$m_z = \frac{e}{2m} L_z$$

$$= \frac{e}{2m} \hbar$$

maget

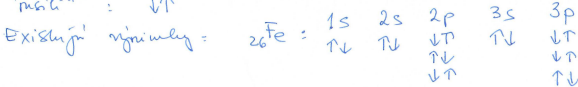
•) Spin elektronu

$$S = \hbar \sqrt{s(s+1)} \quad s = 1/2$$

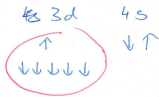
$$S_z = \pm \frac{1}{2} \hbar$$

$$m_z = \left(2 \cdot \frac{e}{2m} \right) \left(\frac{\hbar}{2} \right)$$

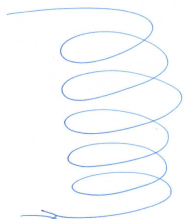
Elektrony sa usporadávajú tak, aby sa ich spiny "máčkujú": $\downarrow \uparrow$



(Hundova pravidla)
 Feromagnetizmus
 ↑



Cievka ako zdroj magn. pola



I

Príklad:

$$N = N_L \text{ závitov}$$

N závitov na jednotku dĺžky

N skeďe cievky:

$$B = \mu_0 N I$$

Príklad:

$$L = 40 \text{ cm},$$

$$I = ?$$

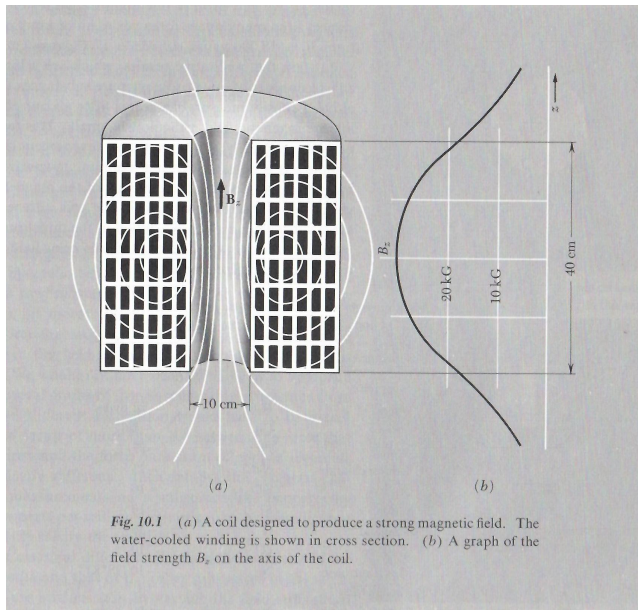
$$\text{Príkon: } P = 400 \text{ kW}$$

Chladienie: 120 l vody / minútu

$B \approx 3,0 \text{ T}$ (okolo na mest. strane)

⇓

je výhodne' generovať magn. pole zo superovodnej cievky, ktorá nemá elektrický odpor (teplota: $T \sim 10 - 20 \text{ K}$)



Sila na magnetický dipól

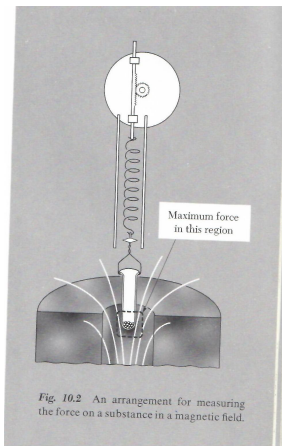


TABLE OF THE FORCE DIRECTION.

Force on 1-gm sample in magnetic field, with
 $B_z = 18,000$ gauss, $dB_z/dz = 1700$ gauss/cm

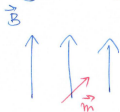
Substance	Formula	Force†
<i>Diamagnetic</i>		
Water	H ₂ O	-22 dynes
Copper	Cu	-2.6
Lead	Pb	-37
Sodium chloride	NaCl	-15
Quartz	SiO ₂	-16
Sulfur	S	-16
Diamond	C	-16
Graphite	C	-110
Liquid nitrogen	N ₂	-10 (78°K)
<i>Paramagnetic</i>		
Sodium	Na	+20 dynes
Aluminum	Al	+17
Copper chloride	CuCl ₂	+280
Nickel sulfate	NiSO ₄	+830
Liquid oxygen	O ₂	+7,500 (90°K)
<i>Ferromagnetic</i>		
Iron	Fe	+400,000 dynes
Magnetite	Fe ₃ O ₄	+120,000

† Direction of force: downward +, upward -. All measurements made at temperature of 20° C except as noted.

Staršia jednotka sily: $1 \text{ dyn} = \text{cm g/s}^2 = 10^{-5} \text{ N}$; Sila je úmerná $\vec{m} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial z}$

(v homogénnom magnetickom poli sila nepôsobí). Magnetický moment sa indukuje pólom, potom ho pole "natočí" do smeru, v ktorom sa pole najrýchlejšie mení, a sila ho pritiahne do oblasti s väčším poľom. Spomeňte si na prilahovanie elektricky neutrálnych papierikov v nehomogénnom elektrickom poli.

Magnetický dipól v magnetickom poli



① stacionárne

② pohyb

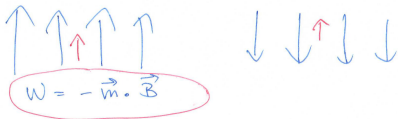
$$\vec{M} = \vec{m} \times \vec{B}$$

moment síly



Magr. stacionárny dipól do "srdca" smerom

Energia: $W_1 < W_2$



$$\vec{F} = m_z \frac{\partial B}{\partial z}$$

len v nehomogenom magnetickom poli

látky:

- diamagnetické H_2O, Cu, Pb
- paramagnetické Na, Al, O_2
- feromagnetické Fe, Fe_3O_4

vyprudenie z pola!

↓
vťahovanie do magr. póla
vťahovanie silou

Feromagnetismus:



↑
magnetische Momente
aligniert

At $T < T_c$ (Curie Temp.)
falls



magn. Momente ta usporiadaju'
→ vznikne magnet

$T_c \approx 1000 K$ (Fe)

→ dôvod usporiadania = kvantová mechanika
(interakcia susedných spinov)
momentov

- antiferomagnetismus



Usporiadanie magn. momentov
môže závisieť aj od veľkosti
pole:



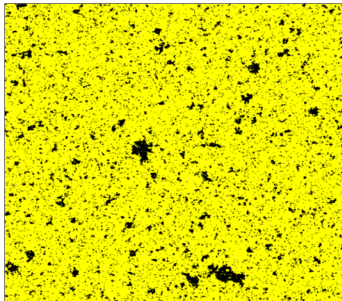
$B=0$



Feromagnetizmus

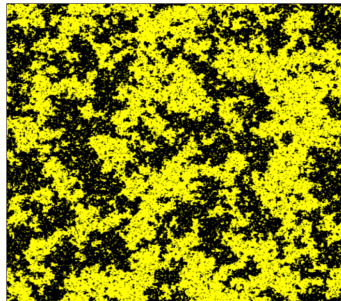
Magnetizácia v dvojrozmernej mriežke v závislosti od teploty T . Kritická teplota je $T_C = 2.269$.

$t = 50 \quad T = 2.20$



$T < T_C$ (feromagnetický stav)

$t = 50 \quad T = 2.30$



$T > T_C$ (paramagnetický stav)

Vľavo: pod Curieho teplotou sa magnetické momenty atómov usporiadajú a látka sa stane magnetickou (prevažujú spiny orientované jedným smerom). Vpravo: nad Curieho teplotou T_C sa spiny neusporiadajú, vznikajú domény rovnako orientovaných spinov, ale počet spinov orientovaných v dvoch opačných smeroch je rovnaký - magnet nevznikne.

Magnetická permeabilita:

\vec{B} ... indukce magn. pole

\vec{M} ... magnetizace

\vec{H} ... intenzita magn. pole

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$$

↑
relativní permeabilita

$$\vec{M} = (\mu_r - 1) \vec{H}$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$

$\mu_r =$

$\mu_r < 1$ diamagnetismus
pole v látce se
ztlumí

$\mu_r > 1$ paramagnetismus

$\mu_r \gg 1$ feromagnetismus

no vacuum: $\mu_r = 1$ $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$

fyzikální význam intenzity \vec{H} :

je generovaná LER rovnými proudy,
stejnými v látce

Dodatok: Magnetické pole Zeme

