

**MAGNETNE OSOBINE**

# Magnetne osobine

---

- Magnetna svojstva sistema
- Dijamagnetizam
- Paramagnetizam
- Fero, feri i antiferomagnetizam
- Poređenje električnih i magnetnih svojstava

# Magnetizam – istorijat

Reč **magnetizam** potiče od grčke reči za izvestan mineral koji sadrži oksid gvožđa  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , **magnetit**, koji je pronađen u Magneziji (Grčka) pre više od 2000 godina.



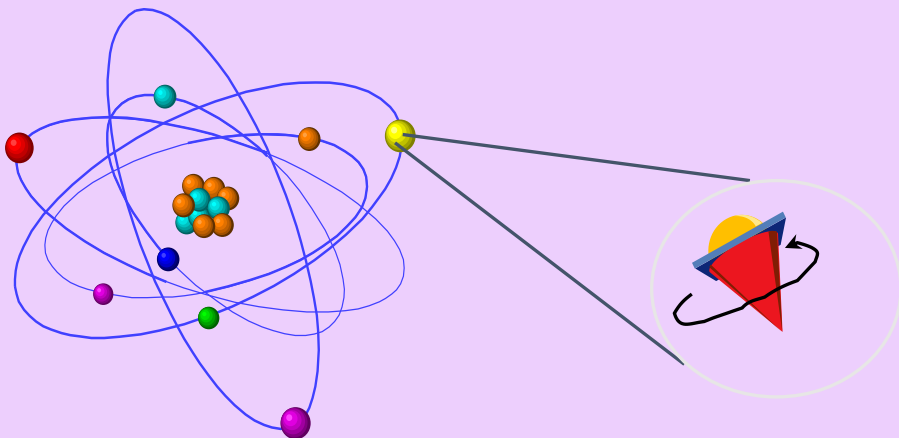
Svojstva ovog minerala: deluje silom na slične materijale i može preneti to svojstvo na komad gvožđa dodirrom.

# Magnetizam – istorijat

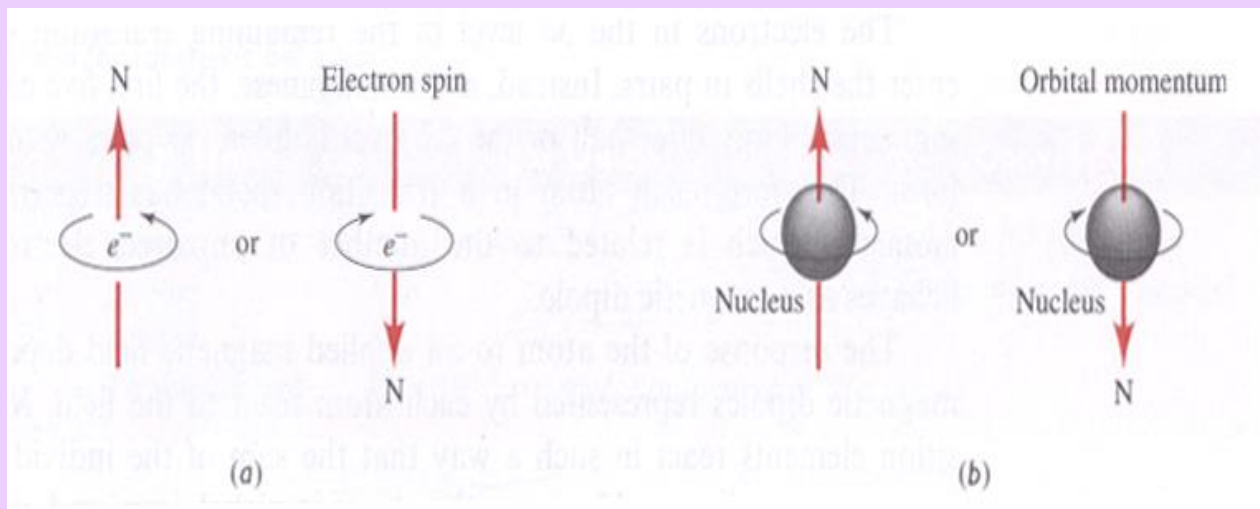
---

- Prva naučna studija magnetizma potiče od Vilijema Gilberta, koji je 1600. publikovao knjigu “O magnetu.”
- 1820. Hans Kristian Ersted zapazio da električna struja proizvodi magnetno polje.
- 1825. napravljen prvi elektromagnet.
- 1831. Majkl Faradej i Džozef Henric su nezavisno pokazali da promenljivo magnetno polje proizvodi električnu struju u žici koja se nalazi u tom polju (otkriće elektromagnetne indukcije).

# Izvor magnetnog polja je naelektrisanje u kretanju



Magnetna svojstva izazvana su naelektrisanjem u kretanju, a električna svojstva deformacijom naelektrisanja.



**Izvori magnetnih momenata atoma:**

- elektronski spinski i orbitni moment (paramagnetizam)
- promena magnetnog momenta, indukovana primenjenim magnetnim poljem (dijamagnetizam)

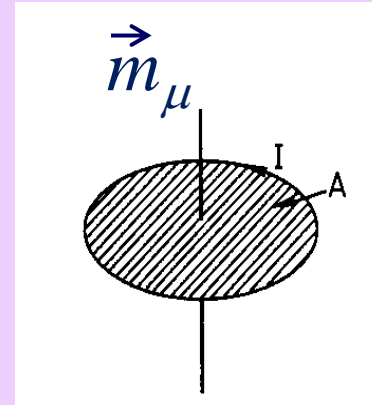
# Magnetni momenti i magnetna sila

---

Magnetni moment atoma ( $m_\mu$ )

$$m_\mu = I \cdot A \quad [\text{Am}^2]$$

$$F = \frac{1}{4\pi\mu} \frac{m_{\mu_1} m_{\mu_2}}{r^2} = \frac{1}{4\pi\mu_0\mu_r} \frac{m_{\mu_1} m_{\mu_2}}{r^2}$$



**Relativna magnetna propustljivost** (permeabilnost)

pokazuje težnju magnetnih linija sile da prođu kroz datu sredinu u odnosu na vakuum:  $\mu_r = \mu / \mu_0$ .

**permeabilnost vakuuma:**

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am} = 1,2566 \cdot 10^{-6} \text{ N/A}^2$$

dijamagnetici:  $\mu_r < 1$

paramagnetici:  $\mu_r > 1$

# Magnetna susceptibilnost i magnetizacija

---

Magnetna susceptibilnost  $\chi$ :

$$\chi = \mu_r - 1 \quad \text{analogno} \quad \chi_e = \varepsilon_r - 1$$

- zapreminska susceptibilnost,  $\chi$  [bezdime.]
- molarna susceptibilnost,  $\chi_m = \chi \cdot V_m$  [cm<sup>3</sup>/mol]

Magnetizacija uzorka  $M$ :

$$\vec{M} = \frac{\sum_i \vec{m}_{\mu i}}{V} \quad \left[ \frac{Am^2}{m^3} = \frac{A}{m} \right]$$
$$\vec{M} = \chi \vec{H}$$

# Magnetna susceptibilnost na 298 K

---

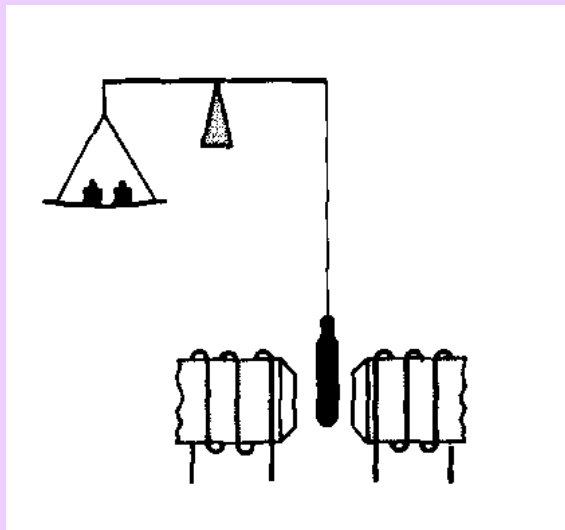
Supstancija	$\chi / (10^{-6})$	$\chi_m / (10^{-4} \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1})$
H <sub>2</sub> O	-90,0	-16,0
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	-7,2	-6,4
NaCl(č)	-13,9	-3,8
Cu(č)	-96,0	-6,8
Hg(t)	-28,5	-4,2
CuSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O(č)	+176,0	+192,0
Al(č)	+22,0	+2,2
Pt(č)	+262,0	+22,8
Na(č)	+7,3	+1,7



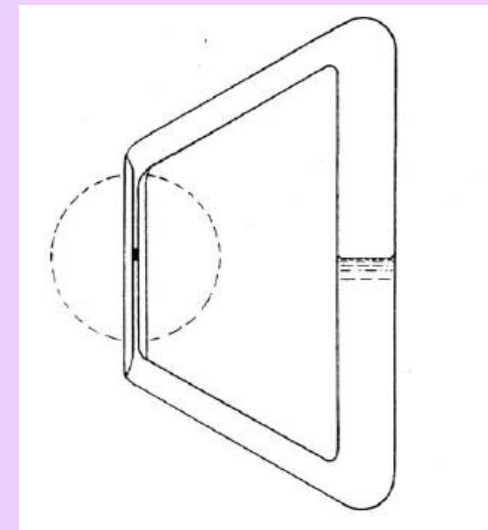
# Eksperimentalno određivanje magnetne susceptibilnosti

---

Gujovala vaga



Kvinkeov metod



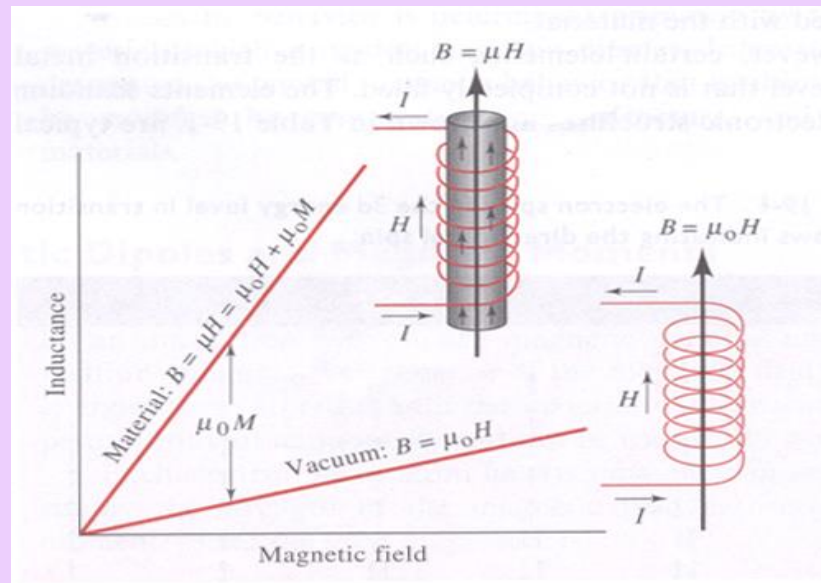
# Magnetna indukcija

## Magnetna idnukcija

$$B = \mu H \left[ T = \frac{N}{Am} \right]$$

$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu_0 (1 + \chi) H = \mu_0 (H + \chi H) = \mu_0 (H + M)$$

U vakuumu  $M=0$ .  $H$  – uzrok, a  $M$  – posledica u sredini.



# Magnetna svojstva sistema – klasifikacija materijala

---

## Dijamagnetici ( $\mu_r < 1$ , $\chi_m < 0$ )

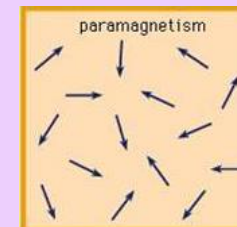
$$-1 \cdot 10^{-4} < \chi_m < -1 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^3/\text{mol}$$

- atomi/joni/molekuli sa popunjenim ljuskama
- spoljašnje polje je oslabljeno

## Paramagnetici ( $\mu_r > 1$ , $\chi_m > 0$ )

$$+1 \cdot 10^{-4} < \chi_m < +1 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^3/\text{mol}$$

- atomi/joni/molekuli sa nepopunjenim ljuskama (nesparenim elektronima)
- spoljašnje polje je pojačano

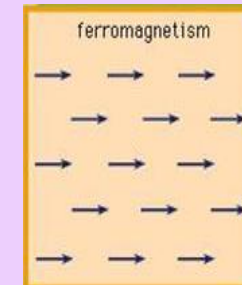


# Magnetna svojstva sistema – klasifikacija materijala

## Feromagnetici ( $\mu_r \gg 1$ , $\chi_m \gg 0$ )

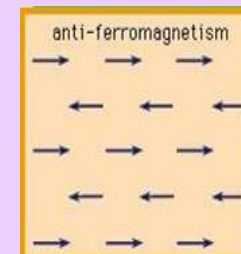
$\chi_m$  do  $+1 \cdot 10^6$  cm<sup>3</sup>/mol

- Magnetni momenti paralelni
- Fe, Co, Ni, Cd, Dy



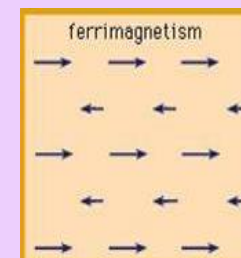
## Antiferromagnetici

- Periodično paralelne i antiparalelne raspodele (susedni magnetni momenti identični po apsolutnoj vrednosti)
- Cr, FeO, MnO



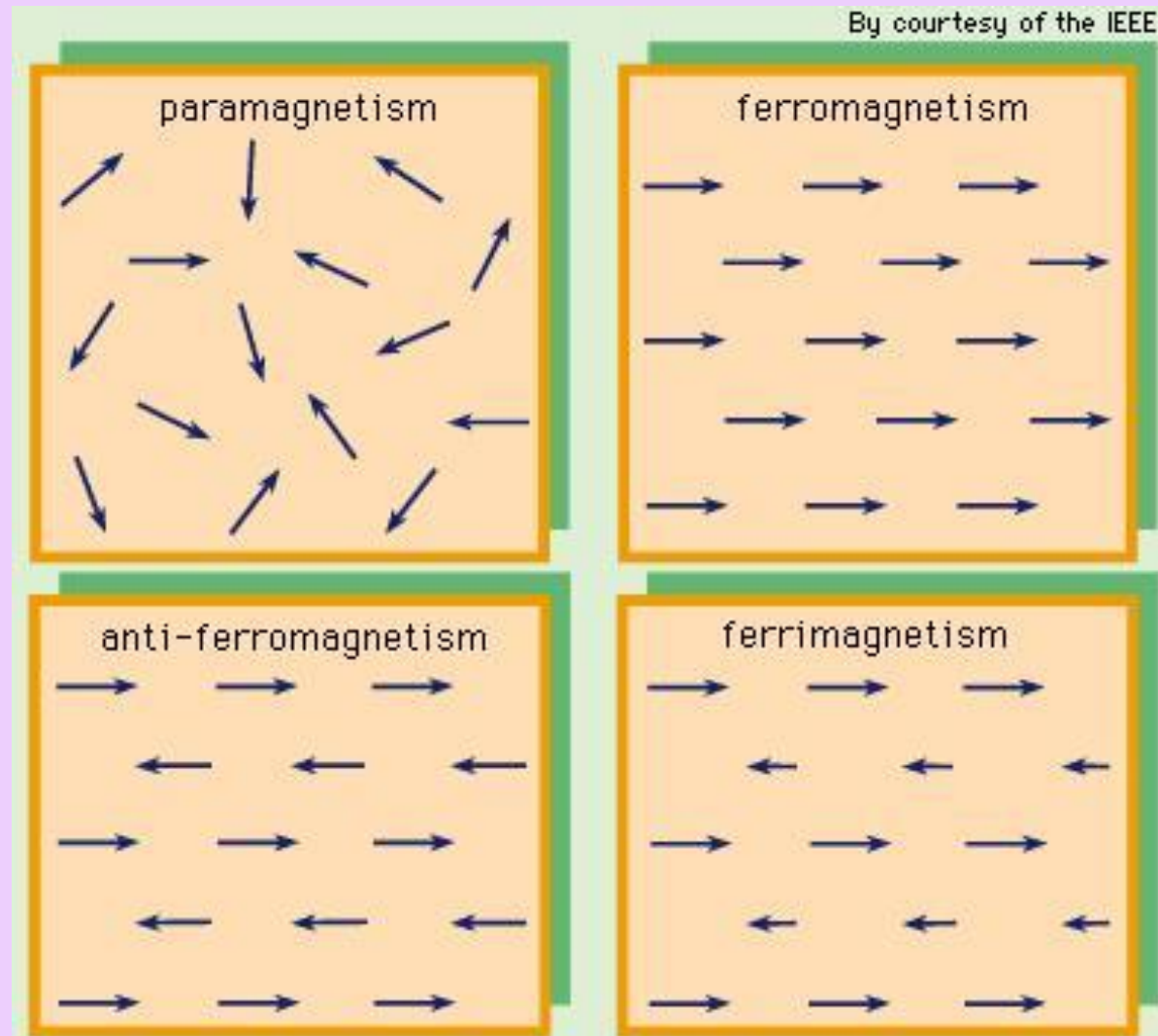
## Ferimagnetici

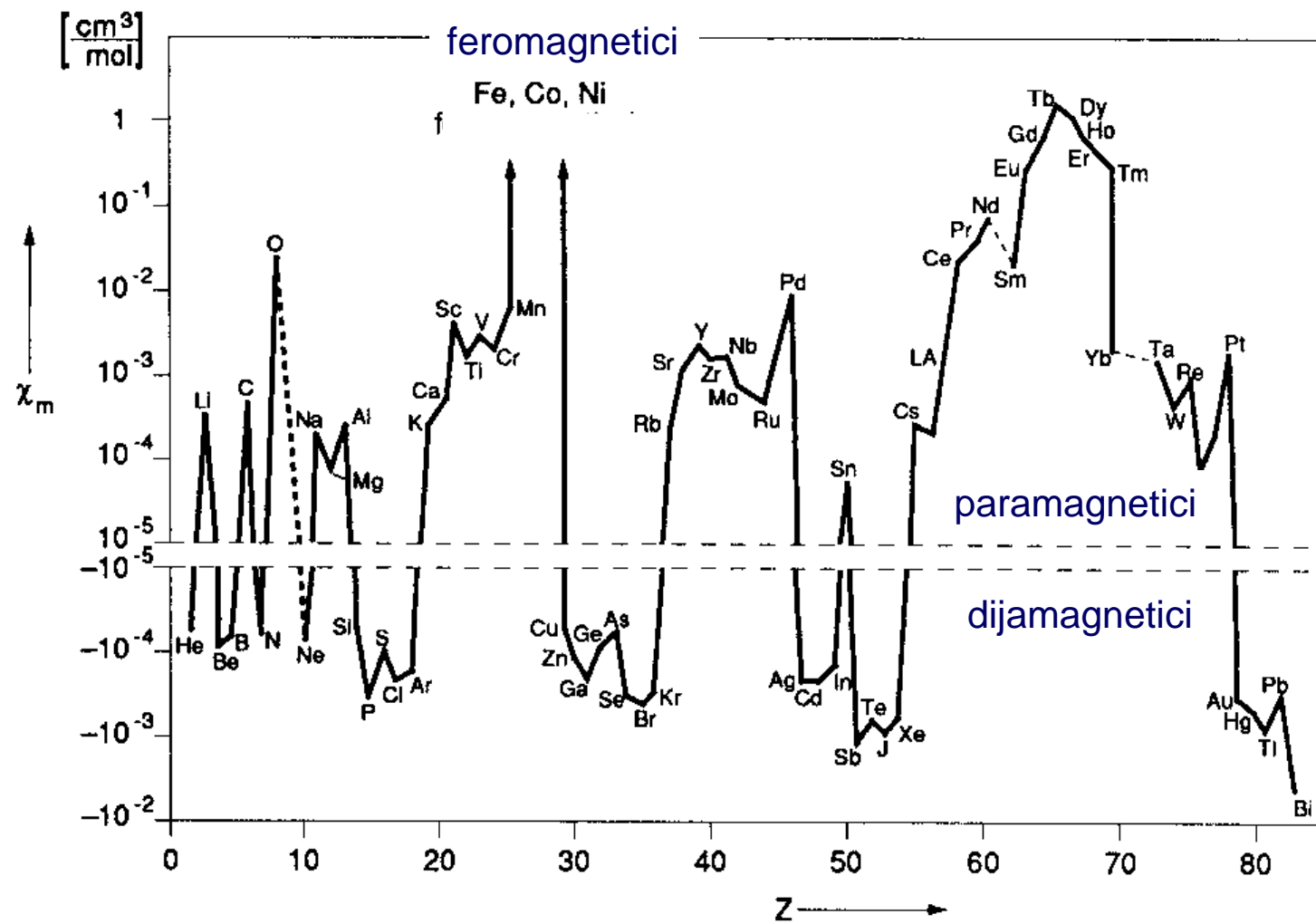
- Periodično paralelne i antiparalelne raspodele (susedni magnetni momenti nisu identični po apsolutnoj vrednosti)
- Magnetit Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, gvožđe(II,III) oksid



# Tipovi kolektivnog magnetizma u čvrstom stanju

---



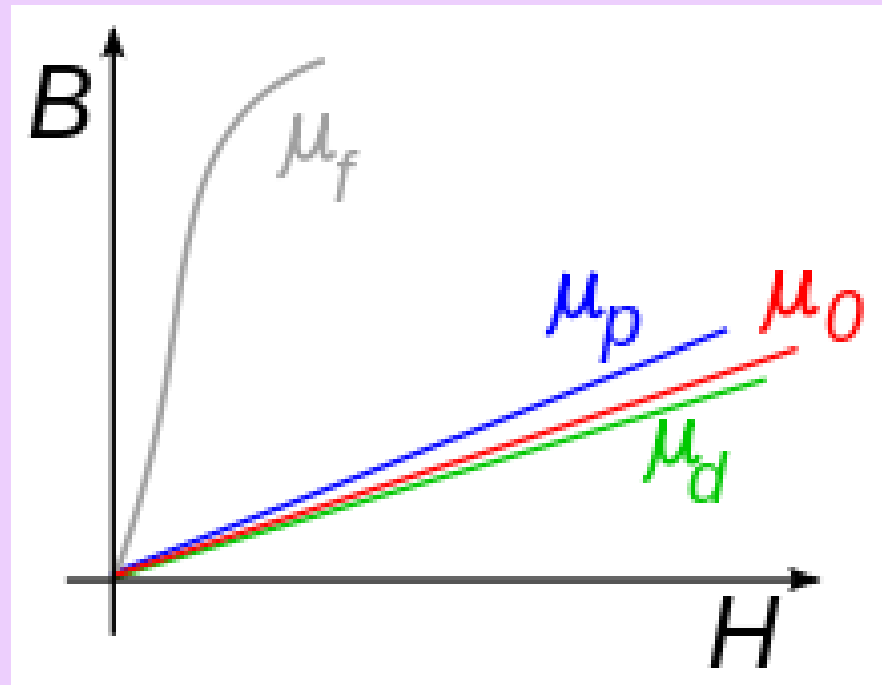


Molarna susceptibilnost elemenata

# Magnetna indukcija dija-, para- i feromagnetika

---

$$B = \mu_0(1 + \chi)H$$



# Magnetne osobine

---

- Magnetna svojstva sistema
- **Dijamagnetizam**
- Paramagnetizam
- Fero, feri i antiferomagnetizam
- Poređenje električnih i magnetnih svojstava

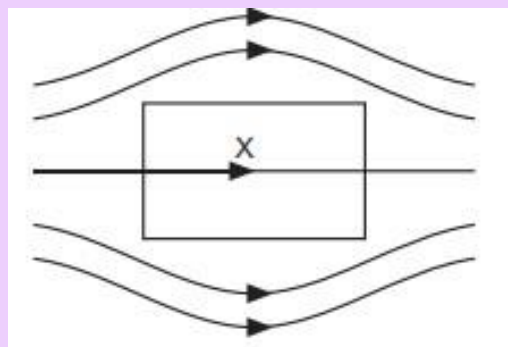


# Dijamagnetne supstancije

---

popunjene elektronske ljuske → magnetni moment nula

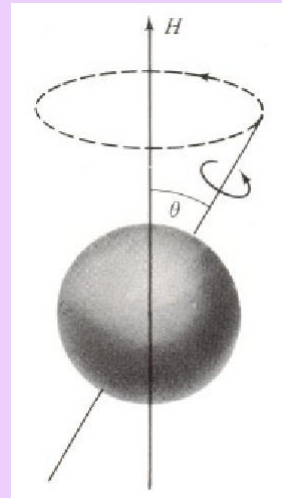
- inertni gasovi (He, Ne, Ar)
- poliatomski gasovi ( $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ )
- jonski kristali ( $\text{NaCl}$ :  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ )
- materijali sa kovalentnom vezom (C-dijamant, Si, Ge)
- skoro sva organska jedinjenja



# Precesija

---

Kada se primeni magnetno polje, magnetni momenti elektrona **precesuju** oko pravca polja, usled čega se u atomu indukuje magnetni moment  $m_{\mu i}$ :



# Klasična Lanževenova teorija dijamagnetizma

---

$$\vec{M} = \chi \vec{H}$$

$$\chi_m = \chi V_m = \frac{\vec{M}}{\vec{H}} V_m = -\frac{M}{H} V_m$$

$$\chi_m = -\frac{N m_{\mu i}}{H} V_m = -\frac{N_{tot} m_{\mu i}}{V} V_m = -\frac{n N_A m_{\mu i}}{V} V_m = -N_A \frac{m_{\mu i}}{H}$$

$$\chi_m = -\mu_0 N_A \frac{m_{\mu i}}{B}$$

$$\vec{m}_{\mu i} = I \cdot \vec{A} = \int I d\vec{A} = \int \frac{dq}{dt} \frac{\vec{r} \times d\vec{l}}{2} = \int \vec{r} \times \frac{dq}{2} \frac{d\vec{l}}{dt} = \int \frac{\vec{r} \times \vec{v}}{2} dq$$

$$\vec{m}_{\mu i} = \frac{\vec{r} \times \vec{v}}{2} q$$

$$\vec{L} = m_e \cdot \vec{r} \times \vec{v}$$

$$\vec{m}_{\mu i} = \frac{\vec{L} q}{2m_e}$$

# Klasična Lanževenova teorija dijamagnetizma

---

$$m_{\mu i} = \frac{Lq}{2m_e}$$

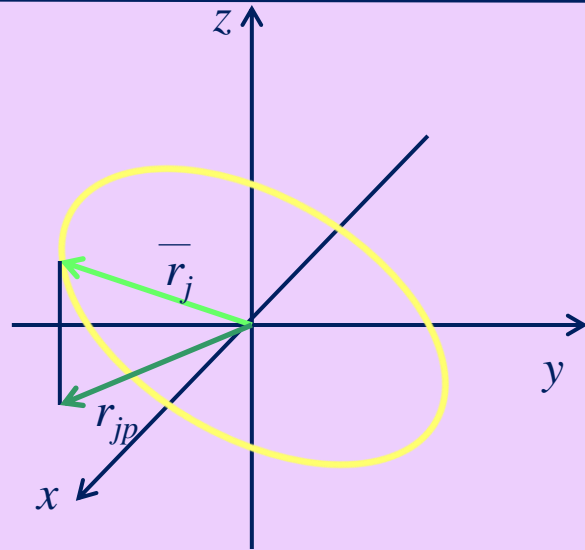
$$L = m_e v r = m_e \omega r^2 \quad \rightarrow \quad L_L = m_e \omega_L r^2$$

$$\omega_L = \frac{qB}{2m_e} \quad q = -e$$

$$m_{\mu i} = \frac{m_e \omega_L \sum_j r_{jp}^2 q}{2m_e} = \frac{\omega_L \sum_j r_{jp}^2 q}{2} = \frac{\frac{q^2 B}{2m_e} \sum_j r_{jp}^2}{2} = \frac{\frac{e^2 B}{2m_e} \sum_j r_{jp}^2}{2}$$

$$m_{\mu i} = \frac{e^2 B \sum_j r_{jp}^2}{4m_e} \quad r_{jp}^2 = \frac{2}{3} \bar{r}_j^2 \quad m_{\mu i} = \frac{e^2 B \sum_j \bar{r}_j^2}{6m_e}$$

# Klasična Lanževenova teorija dijamagnetizma



$$\bar{r}_j^2 = x_j^2 + y_j^2 + z_j^2$$

$$r_{jp}^2 = x_j^2 + y_j^2 = \frac{2}{3} \bar{r}_j^2$$

$$m_{\mu i} = \frac{e^2 B \sum_j \bar{r}_j^2}{4m_e} = \frac{e^2 B \sum_j \bar{r}_j^2}{6m_e}$$

$$\chi_m = -\mu_0 N_A \frac{m_{\mu i}}{B}$$

$$m_{\mu i} = \frac{e^2 B \sum_j \bar{r}_j^2}{6m_e}$$

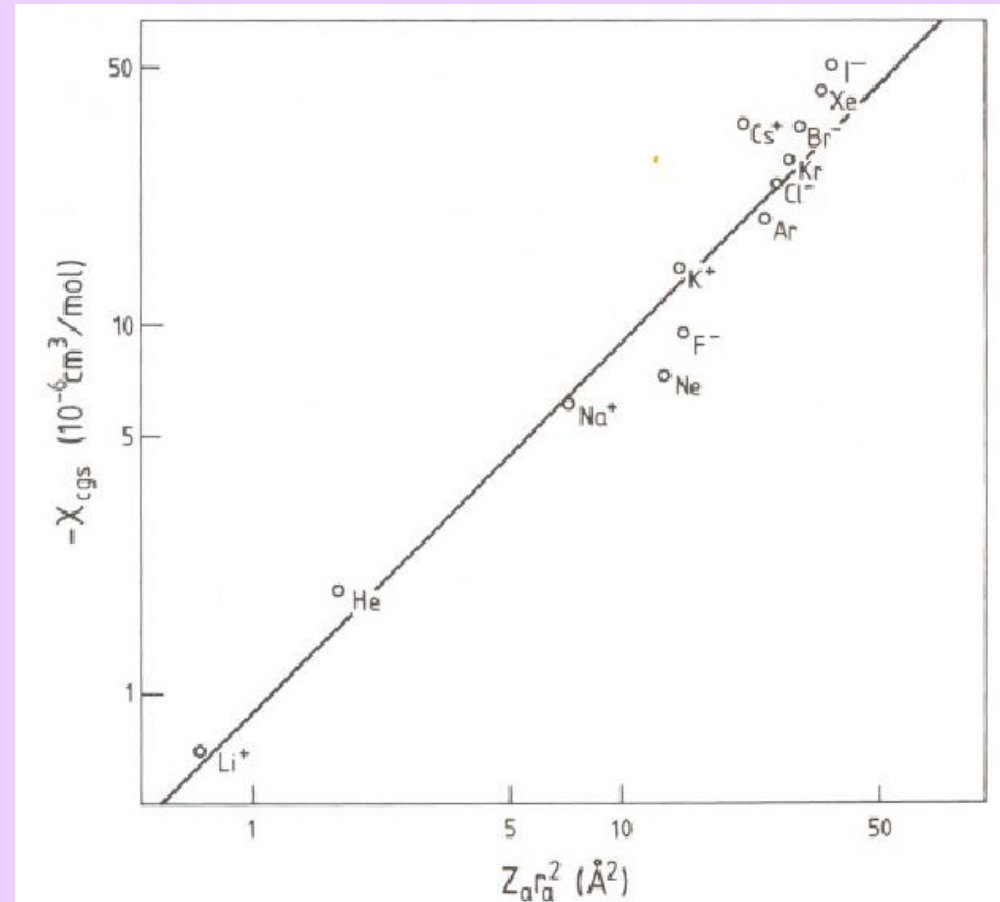
$$\chi_m = -\frac{\mu_0 N_A e^2 \sum_j \bar{r}_j^2}{6m_e}$$

# Teorija dijamagnetizma

Slaganje izračunatih i izmerenih vrednosti nije idealno, ali su vrednosti istog reda veličine.

$$\chi \neq f(T)$$

Klasična Lanževinova i kvantna teorija dijamagnetizma daju isti rezultat.



# Magnetne osobine

---

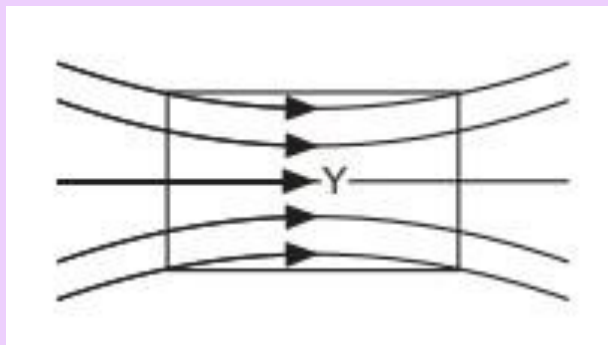
- Magnetna svojstva sistema
- Dijamagnetizam
- Paramagnetizam
- Fero, feri i antiferomagnetizam
- Poređenje električnih i magnetnih svojstava

# Paramagnetne supstancije

---

nepopunjene ljuske / nespareni elektroni →  
magnetni moment ima konačnu vrednost

- soli prelaznih elemenata
- elementi retkih zemalja
- soli i oksidi retkih zemalja
- metali (Al, Cr)



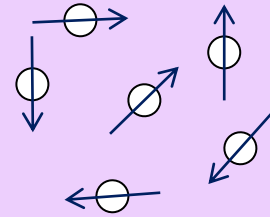


# Teorija paramagnetizma

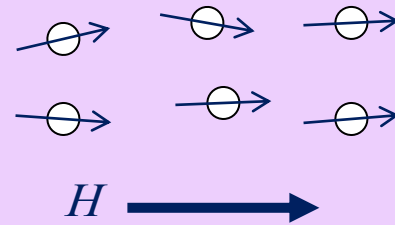
---

## Klasična Lanževenova teorija – kao kod polarnih materijala

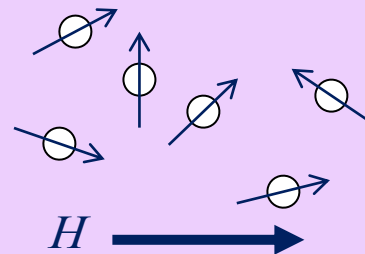
- nema polja,  
 $M=0$



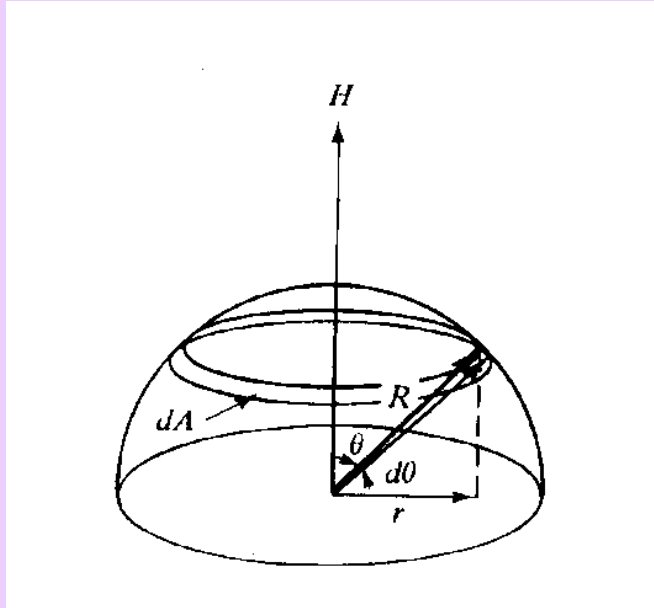
- primenjeno polje,  
niska temperatura



- primenjeno polje,  
visoka temperatura



# Teorija paramagnetizma



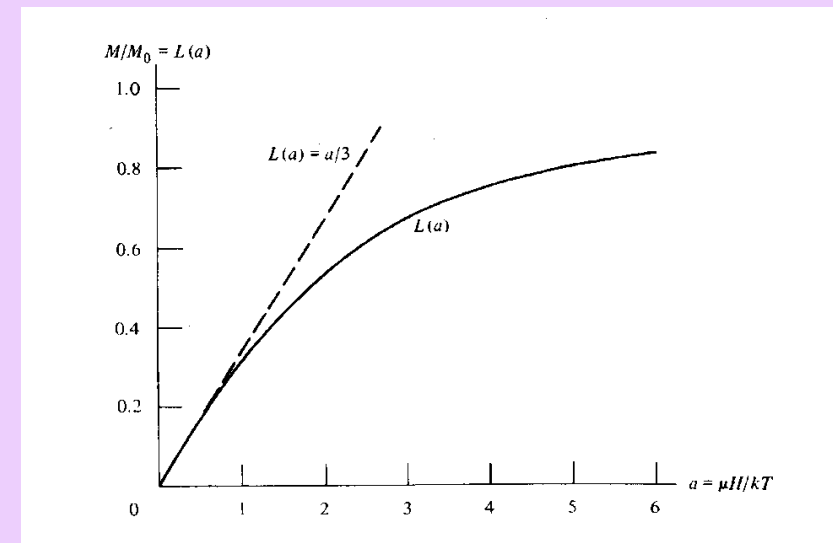
$$U = -\vec{m}_\mu \cdot \vec{B} = -m_\mu B \cos \theta$$

$$\bar{m}_\mu = \frac{\int (m_\mu \cos \theta) e^{-U/(kT)} d\Omega}{\int e^{-U/(kT)} d\Omega}$$

$$\frac{m_\mu B}{kT} = a \quad \cos \theta = x$$

$$\bar{m}_\mu = \frac{m_\mu \int_{-1}^{+1} x e^{ax} dx}{\int_{-1}^{+1} e^{ax} dx}$$

$$\frac{\bar{m}_\mu}{m_\mu} = \frac{e^a + e^{-a}}{e^a - e^{-a}} - \frac{1}{a} = L(a)$$



# Teorija paramagnetizma

---

Klasična teorija:

$m_\mu$  – magnetni momenat materijala

$$\bar{m}_\mu = \frac{m_\mu^2 B}{3kT}$$

$$\chi_m = \chi V_m = \frac{M}{H} V_m = \frac{\mu_0 M}{B} V_m = \frac{\mu_0 N_A \bar{m}_\mu}{B}$$

$$\chi_m = \frac{\mu_0 N_A m_\mu^2}{3kT}$$

$$m_\mu = \sqrt{\frac{3kT \chi_m}{\mu_0 N_A}}$$

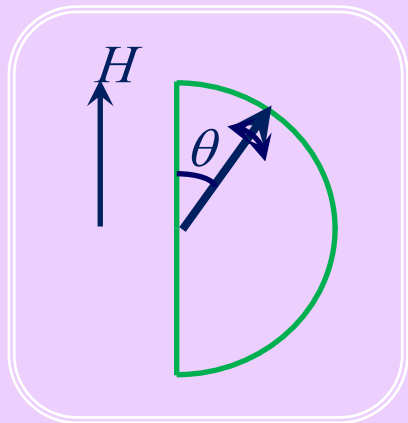
Magnetni moment po molu:

$$M_\mu = N_A m_\mu = \sqrt{\frac{3kT N_A \chi_m}{\mu_0}} = \sqrt{\frac{3RT \chi_m}{\mu_0}}$$

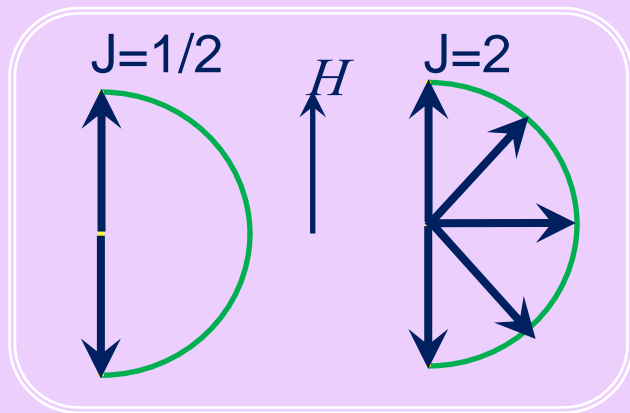
# Paramagnetizam – kvantna teorija

Centralni postulat: energija sistema je diskretna.

klasični slučaj



kvantiranost



spinski ugaoni moment

$$\vec{S}; \quad |\vec{S}| = \sqrt{S(S+1)} \frac{h}{2\pi}$$

orbitni ugaoni moment

$$\vec{L}; \quad |\vec{L}| = \sqrt{L(L+1)} \frac{h}{2\pi}$$

ukupni ugaoni moment

$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}; \quad |\vec{J}| = \sqrt{J(J+1)} \frac{h}{2\pi}$$

$$\bar{m}_\mu = J(J+1)g^2 \frac{m_\mu^2 B}{3kT}$$

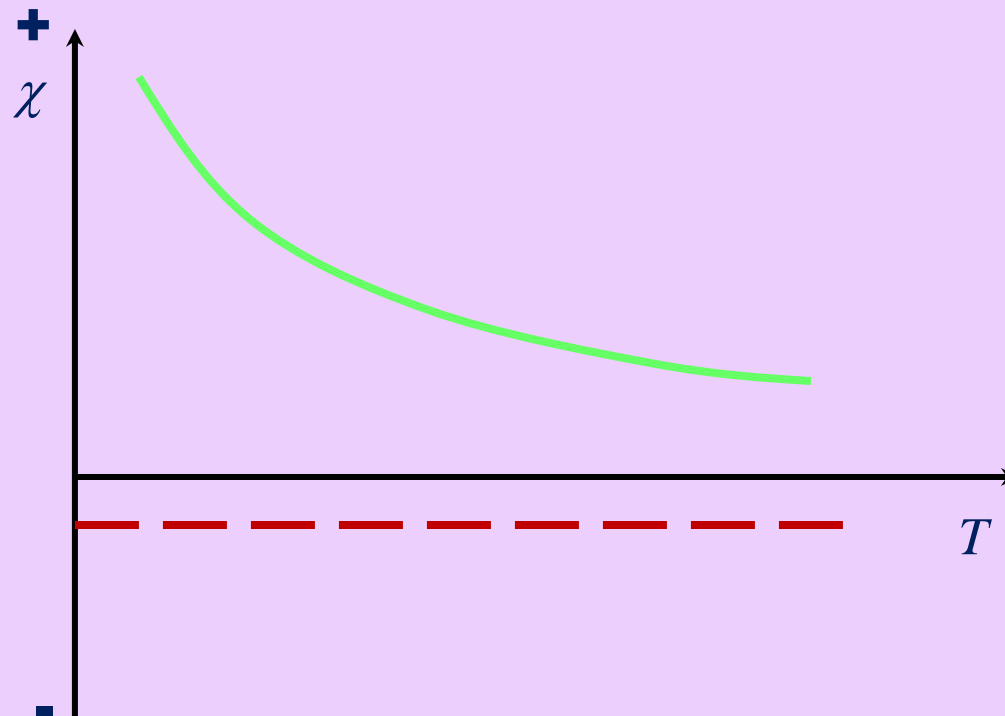
$$\chi_m = J(J+1)g^2 \frac{\mu_0 m_\mu^2 N_A}{3kT}$$

# Temperaturna zavisnosti $\chi$

---

dijamagnetizam:  $\chi \neq f(T)$

paramagnetizam:  $\chi = \frac{C}{T}$  (Kirijev zakon)



# Magnetne osobine

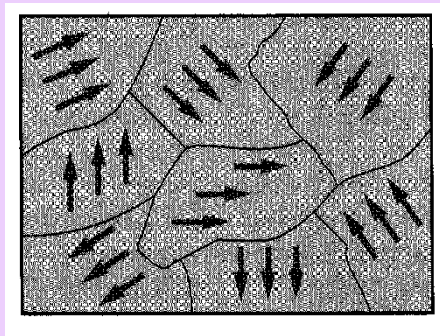
---

- Magnetna svojstva sistema
- Dijamagnetizam
- Paramagnetizam
- **Fero, feri i antiferomagnetizam**
- Poređenje električnih i magnetnih svojstava

# Feromagnetizam

---

I u odsustvu primenjenog polja magnetni dipoli teže da se usmere u malim oblasitma, domenima. Primenom spoljašnjeg polja domeni se usmeravaju.



magnetni  
domeni

- “meki” feromagnetizam – domeni se ponovo haotizuju kada se polje isključi
- “tvrđi” feromagnetizam

# Feromagnetizam i temperatura

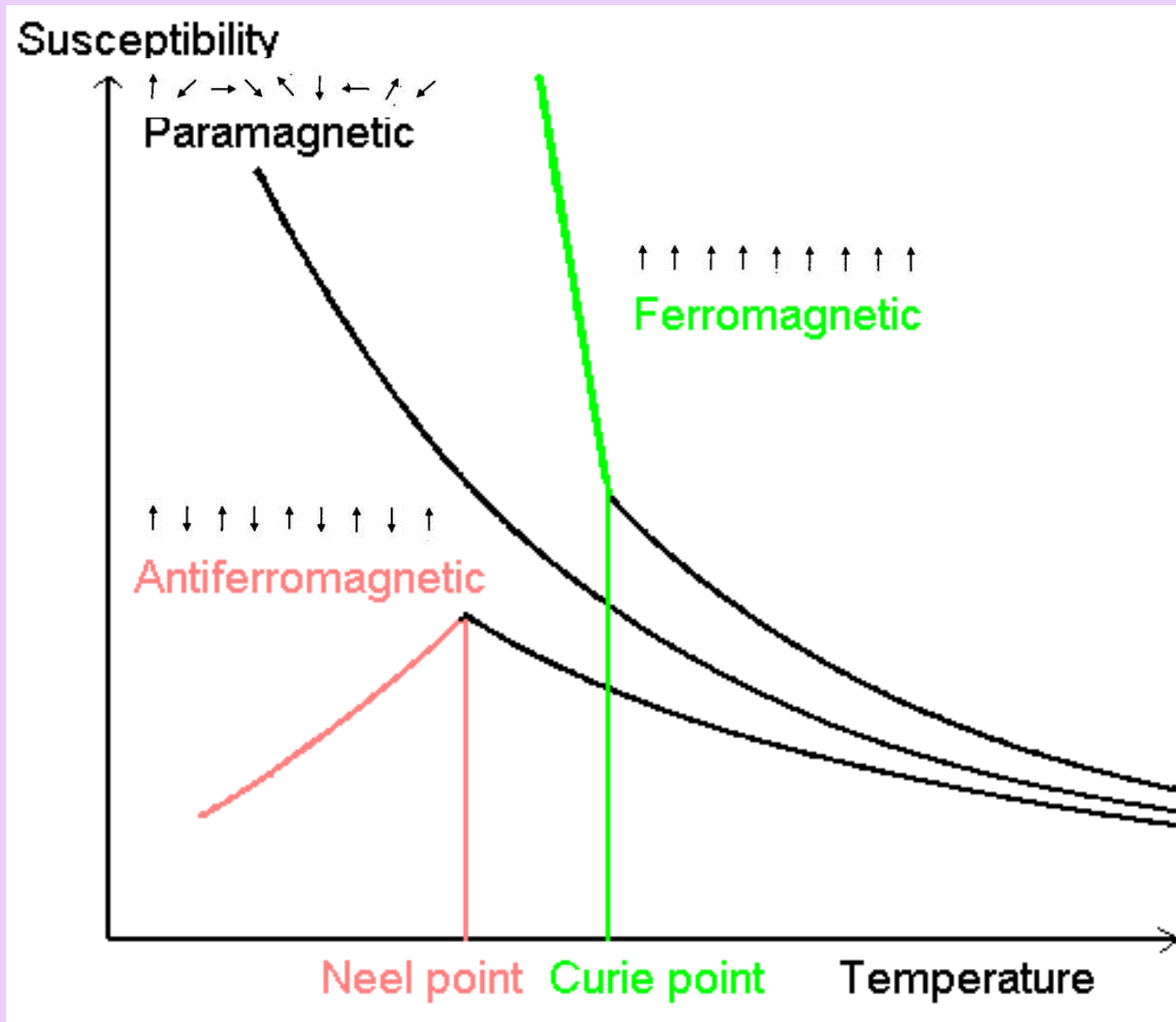
---

Povišenje temperature dovodi do transformacije feromagnetnih u paramagnetne materijale. Ovaj prelaz se odvija na Kirijevoj temperaturi,  $T_C$ .

supstanca	$T_C / K$
Co	1395
Fe	1033
Ni	627
CrO2	390
Gd	289
Dy	85
EuO	70
Ho	20



# Tipovi kolektivnog magnetizma u čvrstom stanju



# Magnetno ponašanje materijala

---

Magnetno ponašanje slobodnih atoma, jona i materijala u celini se mogu razlikovati.

- atomi Ag i Cu imaju rezultujući magnetni moment i ponašaju se kao paramagnetici, dok se u masi ponašaju kao dijamagnetici
- $\text{Fe}^{2+}$  i  $\text{Fe}^{3+}$  kao i kompleksni joni nisu feromagnetni, a Fe kao metal jeste
- metalni Cu i  $\text{Cu}^+$  joni su dijamagnetici, a  $\text{Cu}^{2+}$  joni su paramagnetici

# Strukturna određivanja

---

$\chi$  je aditivna i konstitutivna veličina:

$$\chi_m = \sum \chi_A + \sum \chi_i$$

$\chi_A$  – atomska susceptibilnost

$\chi_i$  – susceptibilnost konstitutivnih komponenti

Ispitivanje strukture molekula.

# Magnetne osobine

---

- Magnetna svojstva sistema
- Dijamagnetizam
- Paramagnetizam
- Fero, feri i antiferomagnetizam
- Poređenje električnih i magnetnih svojstava

# Poređenje električnih i magnetnih svojstava

---

## Električna svojstva

### nepolarne supstancije

- indukovanje električnih dipola
- ne utiče T

### polarne supstancije

- paraelektrična polarizacija za tri reda veličine veća od paramagnetne
- snižavanjem T paraelektrik očvršćava i nema orijentacije dipola

### feroelektrik

## Magnetna svojstva

### dijamagnetik

- indukovanje magnetnih momenata
- ne utiče T

### paramagnetik

- za obe važi Lanževenova funkcija
- efekti se pojačavaju snižavanjem T, pošto se samo orbitni i spinski momenti orijentišu

### feromagnetik