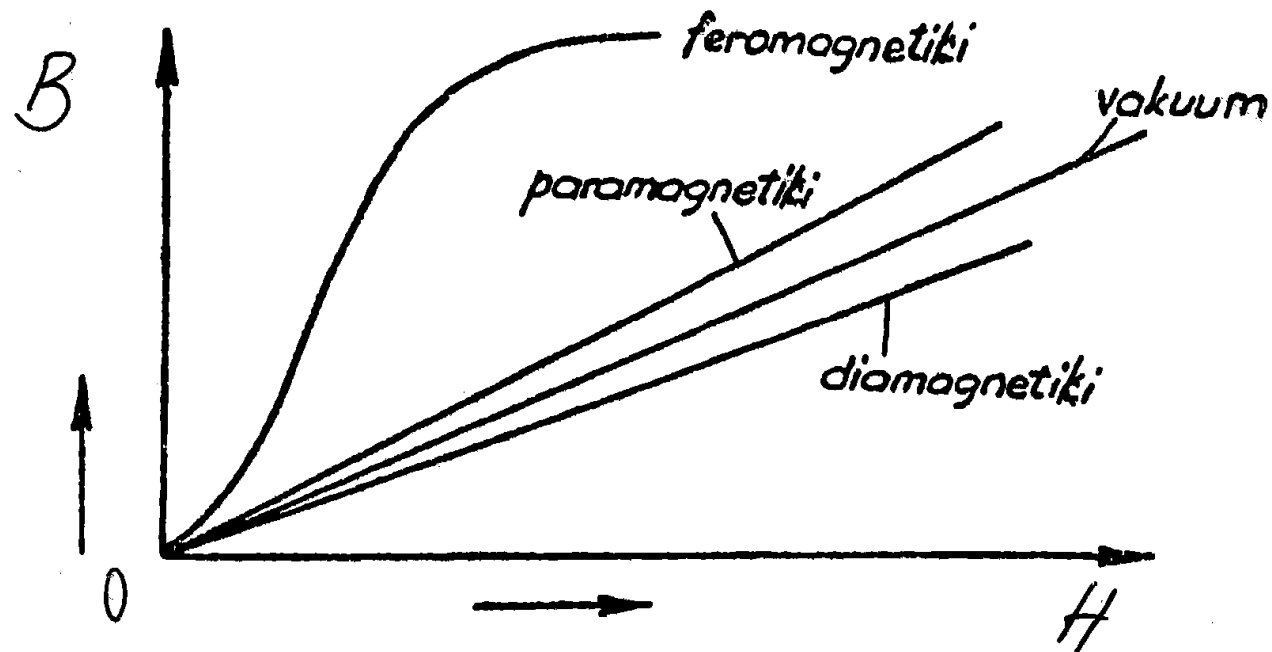


# MAGNETNI MATERIALI

1. Mehkomagnetni materiali
2. Trdomagnetni materiali

# Magnetni materiali in njihove lastnosti



Slika 5.1 Magnetenje različnih vrst snovi

# *Magnetne lastnosti snovi*

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$$

Permeabilnost praznega prostora:  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \quad [\text{Vs} / \text{Am}]$

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H} \qquad \mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

$$\frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} = c$$

S pomočjo Maxwellove teorije lahko določimo tudi vpliv snovi:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} + \vec{J}$$

$\vec{J}$  je vektor magnetne polarizacije [Vs/m<sup>2</sup>]

$$\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H} = \mu_0 \cdot \vec{H} + \vec{J}$$

$$\vec{J} = \mu_0 \cdot (\mu_r - 1) \cdot \vec{H} = \mu_0 \cdot \kappa \cdot \vec{H}$$

$$\kappa = (\mu_r - 1) \quad \kappa \text{ je magnetna susceptibilnost}$$

$$\vec{J} = \mu_0 \cdot (\mu_r - 1) \cdot \vec{H} = \mu_0 \cdot \underbrace{\kappa \cdot \vec{H}}$$

$$\kappa = (\mu_r - 1)$$

$$\kappa \cdot \vec{H} = \vec{M} \quad [\text{A} / \text{m}]$$

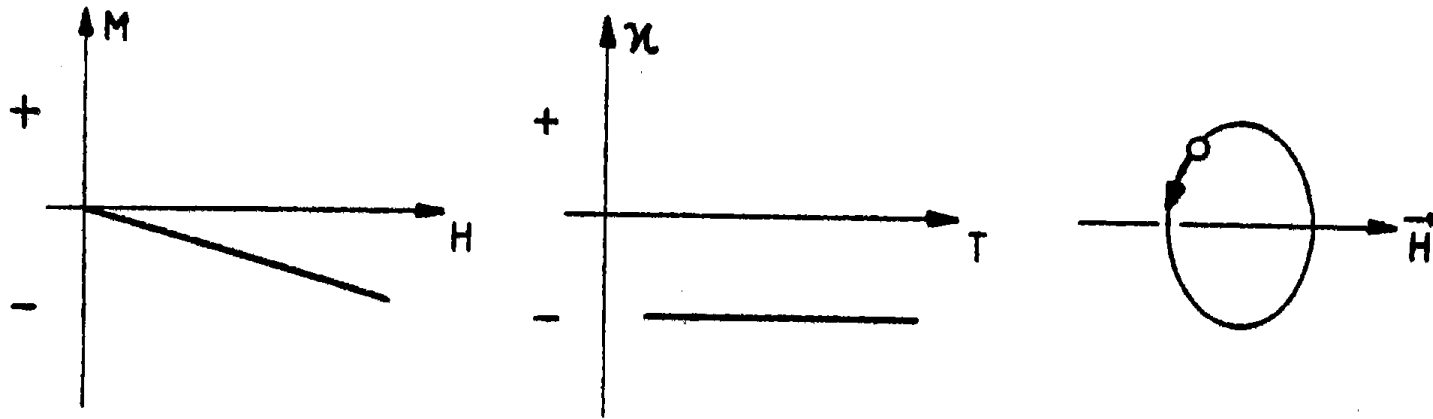
↓  
Vektor magnetizacije

↓  
 **$\kappa$  je magnetna susceptibilnost.**

*Njena vrednost nam pove za koliko se relativna permeabilnost snovi razlikuje od relativne permeabilnosti praznega prostora.*

$$\vec{J} = \mu_0 \cdot \vec{M}$$

# Diamagnetizem



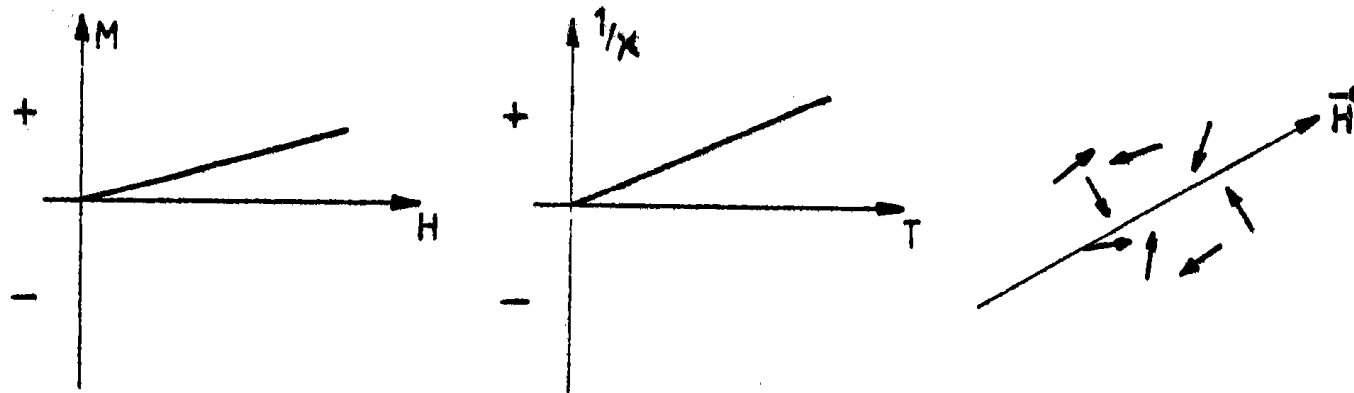
Slika 5.2 Diamagnetizem

*Susceptibilnost je reda:*

$$K \cong - 10^{-5}$$

Primeri: žlahtni plini, soli in organske kisline

# Paramagnetizem

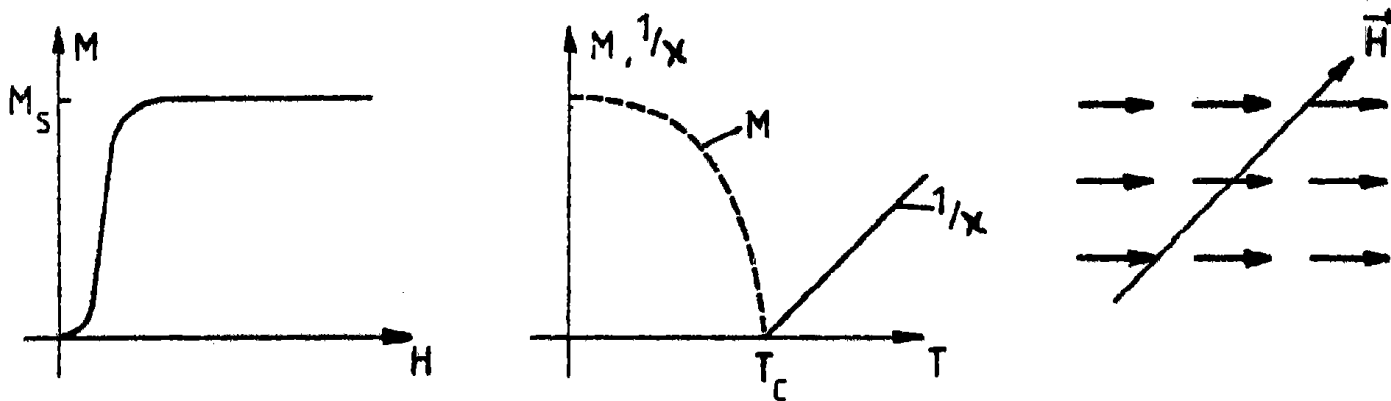


Slika 5.3 Paramagnetizem

*Susceptibilnost je reda:*

$$K \cong 10^{-3} \text{ do } 10^{-5}$$

# Feromagnetizem



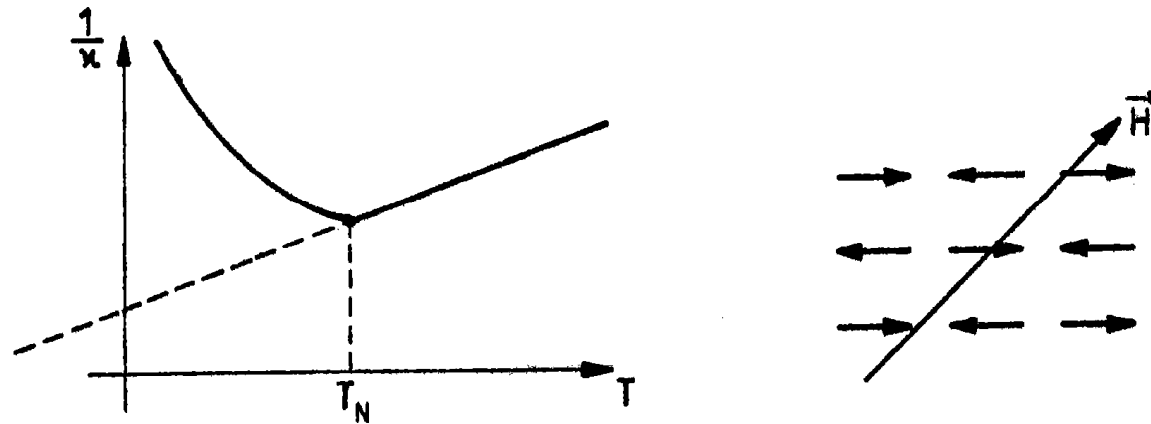
*Susceptibilnost je reda:*

$K$  do  $10^5$

Primeri: železo, nikelj, kobalt, gadolinij in njihove zlitine (tudi z neferomagnetnimi elementi)



# Antiferomagnetizem

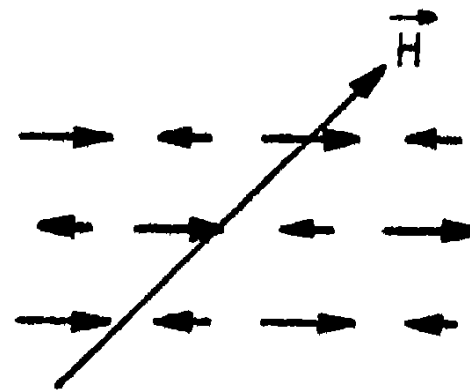
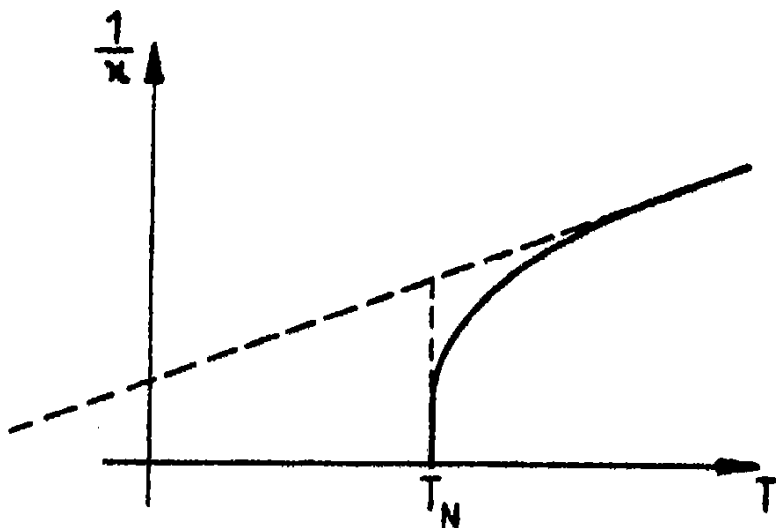


*Susceptibilnost je majhna in pozitivna*

$$K \cong 10^{-5}$$

Primeri: MnO, FeO CoO, NiO, itd.

# Ferimagnetizem

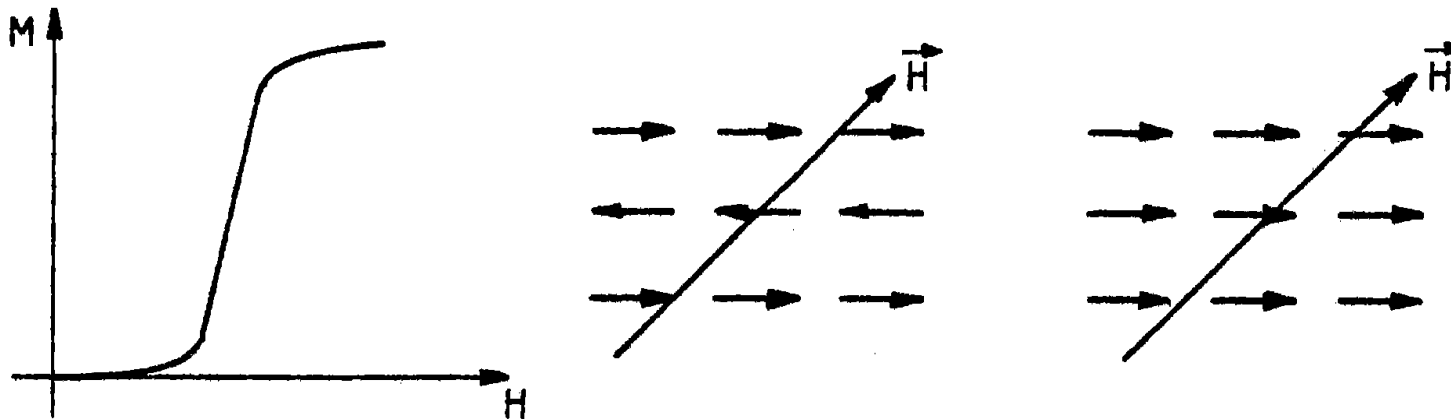


*Susceptibilnost je reda:*

$K$  do  $10^4$

Primeri: nekateri oksidi, feriti

# Metamagnetizem



Pri majhnih  $H$  je anti feromagnetik, pri večjih  $H$  pa dobi lastnosti feromagnetika

Primeri:  $\text{FeCl}_2$ ,  $\text{CoCl}_2$ ,  $\text{NiCl}_2$ ,  $\text{CuCl}_2$

# Magnetni moment

- Magnetne lastnosti atomov

Vzroki za magnetne lastnosti:

- tirno gibanje elektronov,
- spin elektronov

- Magnetni moment zaradi krožnega toka

Magnetni moment:  $m = I \cdot A$

Tok, ki ga povzroča en elektron  $I = e \cdot \frac{\omega_0}{2 \cdot \pi}$

Če izraz za  $I$  vstavimo v zgornjo enačbo:

$$m = I \cdot A = e \cdot \frac{\omega_0}{2 \cdot \pi} \cdot r^2 \cdot \pi = \frac{1}{2} \cdot e \cdot \omega_0 \cdot r^2$$

Tirna vrtilna količina elektrona:

$$L = m_e \cdot \omega_0 \cdot r^2$$

$m_e$  – masa elektrona

Magnetni moment zaradi kroženja elektrona::

$$m = \frac{1}{2} \cdot e \cdot \omega_0 \cdot r^2$$

Vektor magnetnega momenta ima nasprotno smer kot vektor tirne vrtilne količine:

$$\vec{m} = -\frac{e}{2 \cdot m_e} \cdot \vec{L}$$

Med magnetnim momentom in tirno vrtilno količino je le faktor  $-e / 2m_e$ , ki ga imenujemo gyromagnetna vrednost.

Vrednosti tirne vrtilne količine so kvantizirane v korakih po  $h / (2 \cdot \pi)$ .  
Enoto tirne vrtilne količine imenujemo tudi Bohrov magneton  $\mu_B$ .

$$\mu_B = \frac{e}{2 \cdot m_e} \cdot \frac{h}{2 \cdot \pi} = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2$$

$h$  – Planck-ova konstanta ( $6,6256 \times 10^{-34}$  Js)

Kvantizacija tirnih vrtilnih količin je določena s kvantnimi števili  $l_{ks}$ .

Tako lahko zapišemo vrednost vrtilne količine v obliki:

$$L = \sqrt{l_{ks}(l_{ks} + 1)} \cdot \frac{h}{2 \cdot \pi} \quad l_{ks} = 0, 1, 2, \dots, (n - 1)$$

Komponenta tirne vrtilne količine v smeri osi z, ki sovpada s smerjo magnetnega polja je:

$$L_Z = m_{ks} \cdot \frac{h}{2 \cdot \pi} \quad m_{ks} = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l_{ks}$$

Iz obeh enačb (5.16) in (5.17) je razvidno, da je za določeno vrednost števila  $n$ , možnih točno določeno število stanj tirne vrtilne količine.

Če povežemo izraze 5.14, 5.16 in 5.17, dobimo vrednosti magnetnega momenta:

$$m = -\frac{e}{2 \cdot m_e} \cdot \frac{h}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{l_{ks} \cdot (l_{ks} + 1)}$$

komponente magnetnega momenta v z osi pa so:

$$m_z = -\frac{e}{2 \cdot m_e} \cdot \frac{h}{2 \cdot \pi} \cdot m_{ks}$$



## Magnetni moment zaradi spina

Poleg magnetnega momenta zaradi kroženja elektrona okrog jedra, dobimo še magnetni moment zaradi vrtenja elektrona okrog lastne osi - spina.

$$m_{Z,Spin} = 2 \left( -\frac{e}{2 \cdot m_e} \cdot L_{Z,Spin} \right) = -\frac{e}{m_e} \cdot \frac{h}{2 \cdot \pi} \cdot s_{ks}$$

## Magnetni moment zaradi kroženja okrog jedra

Komponenta magnetnega momenta v z osi je:

$$m_Z = -\frac{e}{2 \cdot m_e} \cdot \frac{h}{2 \cdot \pi} \cdot m_{ks}$$

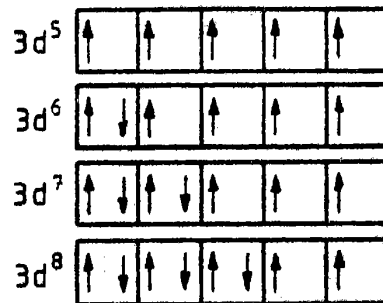
Spinsko magnetno kvantno število  $s_{ks}$  zavzema vrednosti  $\pm 1/2$

# Kako pa je pri atomih z več elektroni?

Dve značilnosti, ki vplivata na magnetne lastnosti snovi:

- zapolnjene elektronske lupine nimajo magnetnega momenta. (primer: žlahtni plini)
- spinski momenti maksimirajo svoje prispevke v skladu s Paulijevim principom.

Neuparjeni spini imajo trajne magnetne momente.



# Elementarni magneti in spontano magnetenje

Pri feromagnetnih materialih obstajajo stalni magnetni momenti – ti. elementarni magnetni momenti, ki se zaradi medsebojnih vplivov v kristalni strukturi orientirajo paralelno.

Magnetni moment je lahko posledica **tirnega magnetnega momenta** ali pa je posledica **magnetnega momenta zaradi spina**.

V obeh primerih gre za momenta, ki sta posledica gibanja elektrona z električnim nabojem  $e$  in maso  $m$ .

Kako praktično preveriti vzrok nastanka magnetnega momenta feromagnetne snovi?

Ali je feromagnetizem snovi posledica tirnega magnetnega momenta ali je posledica magnetnega momenta zaradi spina.

Če je posledica tirnega magnetnega momenta, potem velja:

$$\frac{m_{Tirni}}{L_{Tirni}} = 1 \cdot \left( -\frac{e}{2 \cdot m_e} \right)$$

če pa je posledica magnetnega momenta zaradi spina, velja:

$$\frac{m_{Spin}}{L_{Spin}} = 2 \cdot \left( -\frac{e}{2 \cdot m_e} \right)$$

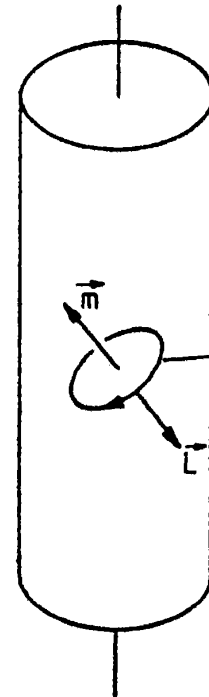
## Poskus z vrtavko:

Če se vrtavka nahaja na nekem rotirajočem telesu, sta os vrtenja in os vrtavke med seboj paralelni.

Železno palico zavrtimo okrog osi, pri čemer se poskušajo »elektronske vrtavke« postaviti paralelno k osi rotirajoče palice. Ker sta vrtilna količina  $L$  in magnetni moment med seboj povezana, dobimo magnetenje v smeri osi.

V drugem primeru, ko pa se začne vrtavka vrteti, se os vrtavke in rotirajočega sistema postavita pravokotno ena na drugo. Ta pojav pa je osnova Einstein-de Haasovega poskusa.

Paralelno z osjo železne palice vzbudimo magnetno polje tako, da deluje na "elektronske vrtavke" vrtilni moment, ki povzroči, da se vrtavke postavijo pravokotno na os palice in tako povzročijo vrtenje palice okrog svoje osi. Vrtenje je v tem primeru posledica zunanjega magnetenja.



### ***Rezultati meritev:***

$g$  je zelo blizu vrednosti 2, kar pomeni, da je magnetenje pri feromagnetnih snoveh posledica magnetnih momentov zaradi spina, ki se lahko preusmerijo.

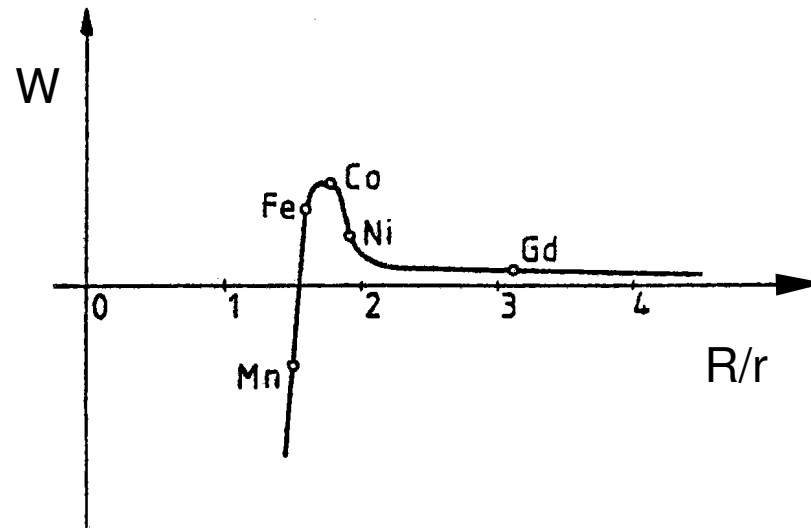
Prispevek tirnih magnetnih momentov pa je zaradi medsebojne kompenzacije v kristalni mreži zelo majhen.

### ***Drugi poskus:***

Heisenberg je s pomočjo kvantne mehanike pojasnil delovanje sil v atomski mreži.

#### *Metoda:*

Meritev energije za vzpostavitev paralelnih spinov v odvisnosti od razmerja med polovico medatomske razdalje  $R$  v mreži in polmerom  $r$  nezapolnjenih elektronskih lupin (npr. 3d).

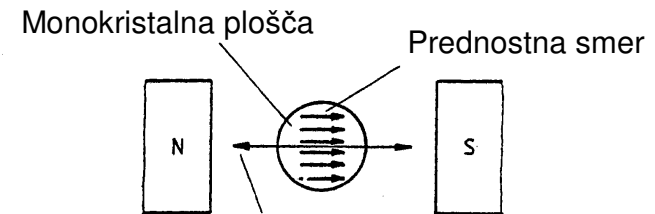


Kem. element	Nezapolnjene lupine	R/r	Curie-jeva temperatura [°C]
Mn	3d	1,47	ni feromagn.
Fe	3d	1,63	770
Co	3d	1,82	1121
Ni	3d	1,97	358
Gd	4f	3,1	16

# Magnetna anizotropija

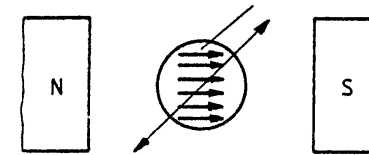
Feromagnetni material se ne magneti v vseh kristalografskih smereh smereh enako

Merjenje magnetne anizotropije

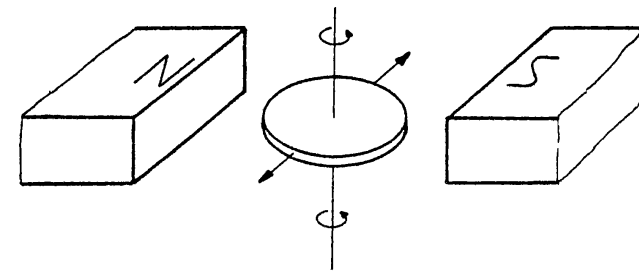


Torzijski magnetometer

$$L = - \frac{dW}{d\varphi}$$



**Razlika v energijah med dvema smerema je enaka delu, ki ga moramo vložiti, da spremenimo smer spontane magnetizacije**





## Magnetno ekvivalentne kristalne smeri

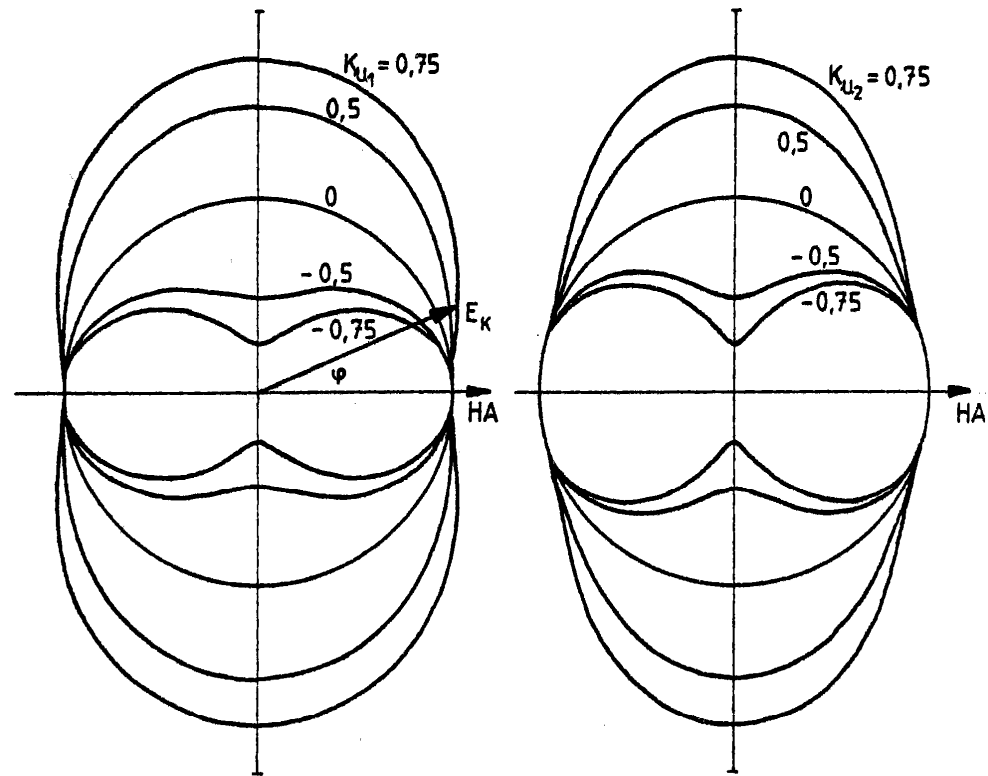
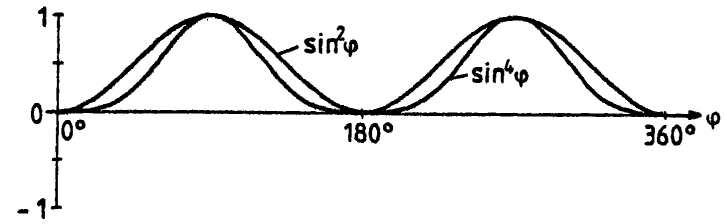
- uniaksialna magnetna anizotropija
- pri heksagonalni kristalni strukturi **kobalta** (Co) sovpada prednostna smer s kristalografsko glavno osjo, ki je pravokotna na heksagonalne ravnine.
- enakovredne smeri so tiste, ki s prednostno smerjo oklepajo enake kote. Uniaksialno anizotropno energijo lahko razvijemo v potenčno vrsto  $\sin^2\varphi$  in jo zapišemo:

$$W_K = K_{u0} + K_{u1} \sin^2 \varphi + K_{u2} \sin^4 \varphi + \dots$$

Pri sobni temperaturi so anizotropne konstante kobalta:

$$K_{u1} = 4,1 \times 10^5 \text{ J/m}^3$$

$$K_{u2} = 1,0 \times 10^5 \text{ J/m}^3$$



$$E_K = K_{u0} + K_{u1} \sin^2\varphi$$

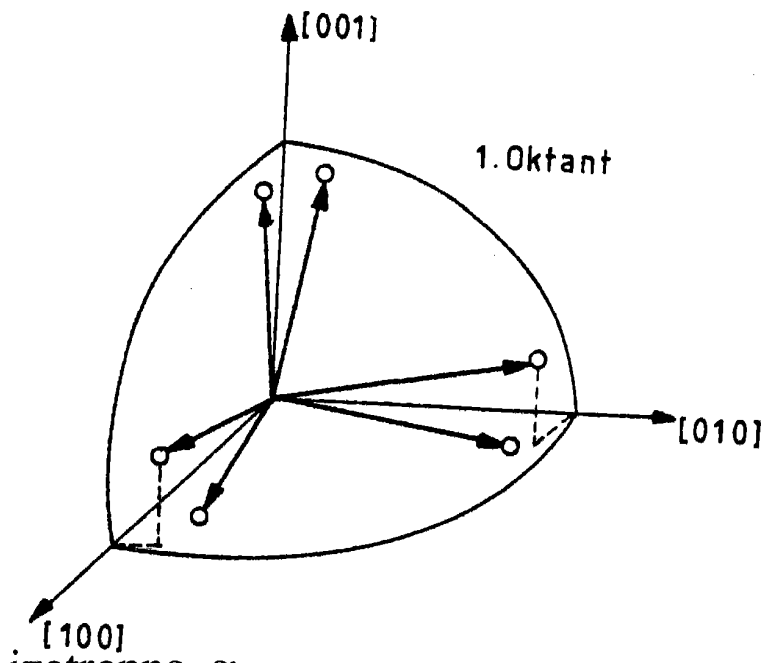
$$K_{u0} = 1$$

$$E_K = K_{u0} + K_{u2} \sin^4\varphi$$

$$K_{u0} = 1$$

Pri kubičnih kristalih železa in niklja imamo nekoliko bolj zapleteno obliko kristalne anizotropne energije. Potenčna vrsta ima v splošnem naslednjo obliko:

$$W_K = \sum K_{lmn} \cdot \alpha_i^l \cdot \alpha_j^m \cdot \alpha_k^n$$



Če predpostavimo, da so kombinacije smeri [100], [010] in [001] fizikalno enakovredne, potem imamo v že v enem "oktantu" v splošnem 6 ekvivalentnih smeri.

V celotnem prostoru imamo torej za določeno kombinacijo kar 47 ekvivalentnih smeri.

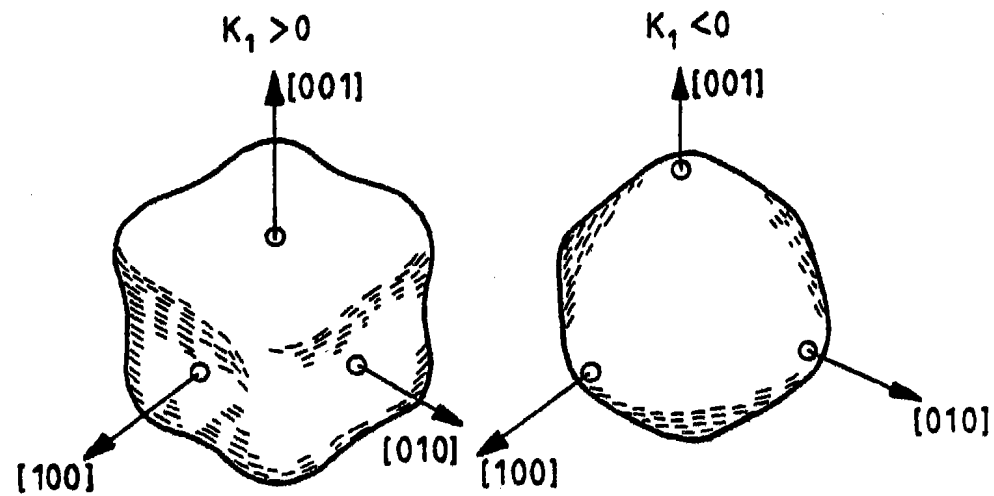
Pri izračunu anizotropne energije kristala izhajamo iz kotov  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ , med smerjo spontane magnetizacije in pozitivnimi smermi koordinatnih osi. Smerni kosinusi spontanega magnetenja so torej določeni:

$$\alpha_1 = \cos \varphi_1$$

$$\alpha_2 = \cos \varphi_2$$

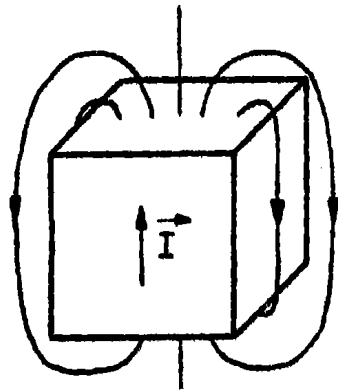
$$W_K = \sum K_{lmn} \cdot \alpha_i^l \cdot \alpha_j^m \cdot \alpha_k^n$$

# Praktična primera anizotropij Fe in Ni

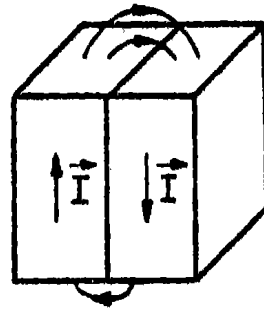


# Struktura domen

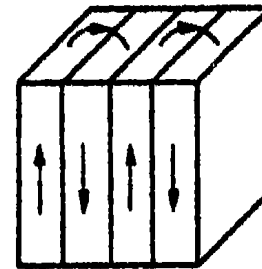
- Spontano magnetenje – problem nasičenja
- Nastanek domen – Weissova območja



$$W_{str} = k \cdot J^2$$



$$W_{str} = \frac{1}{2} k \cdot J^2$$



$$W_{str} = \frac{1}{4} k \cdot J^2$$

Vzpostavitev mejnih ploskev je povezana s potrebo po energiji.

Za 1 cm<sup>2</sup> rabimo 10<sup>-7</sup> Ws energije.

Z naraščanjem števila plošč se energija stresanega magnetnega polja zmanjšuje:

$$W_{str} = \frac{1}{n} \cdot k \cdot J^2$$

Potrebna energija za postavitev pregrad je:

$$W_{st} = (n - 1) \cdot k' \cdot w$$

Za postavitev določenega števila pregrad je torej potrebna energija:

Za postavitev določenega števila pregrad je torej potrebna energija:

$$W = W_{str} + W_{st} = \frac{1}{n} \cdot k \cdot J^2 + (n - 1) \cdot k' \cdot w$$

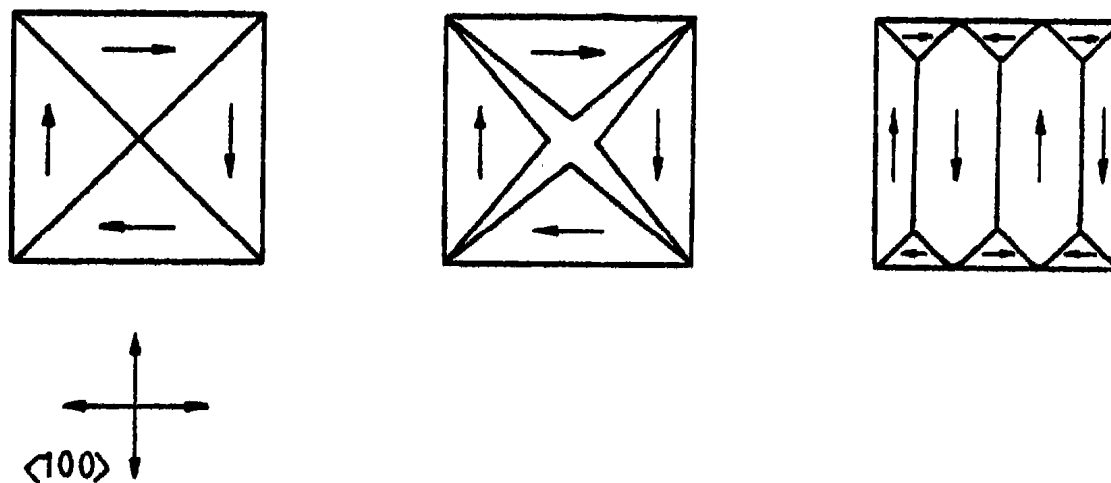
ki v skladu s pogojem:

$$\frac{\partial W}{\partial n} = -\frac{1}{n^2} \cdot k \cdot J^2 + k' \cdot w = 0$$

teži k temu, da doseže minimalno vrednost. Optimalno število  $n$  je torej enako:

$$n = \sqrt{\frac{k \cdot J^2}{k' \cdot w}}$$





Nastanek krožnega magnetnega pretoka

Pregrada je torej mejni sloj med dvema spontano namagnetenima območjema, ki imata različni smeri magnetne polarizacije  $J_1$ ,  $J_2$ .

Spontano magnetenje se odvija v prednostnih smereh, ki so določene z anizotropijami kristala.

Pri heksagonalni strukturi **kobalta** z enosno anizotropijo imamo le pregrade, ki ločujejo za  $180^\circ$  premaknjena območja spontanega magnetenja.

Pri **železu** so vse  $\langle 100 \rangle$  kristalografske smeri prednostne, zato imamo poleg pregrad, ki ločujejo območja s premaknitvijo prednostnih smeri magnetenja za  $180^\circ$ , tudi pregrade, ki ločujejo območja s premaknitvijo prednostnih smeri za  $90^\circ$ .

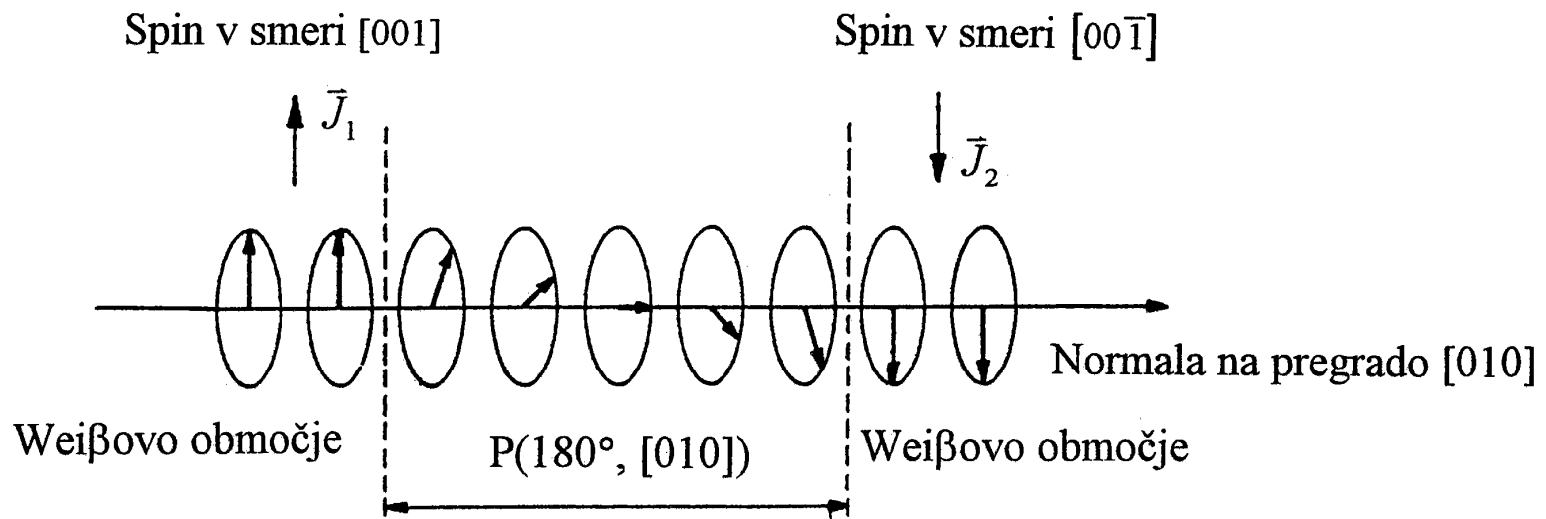
Za prednostne smeri  $\langle 111 \rangle$  pri **niklju** so koti med pregradami lahko  $180^\circ$ ,  $109,47^\circ$  in  $70,53^\circ$ .

Bloch:

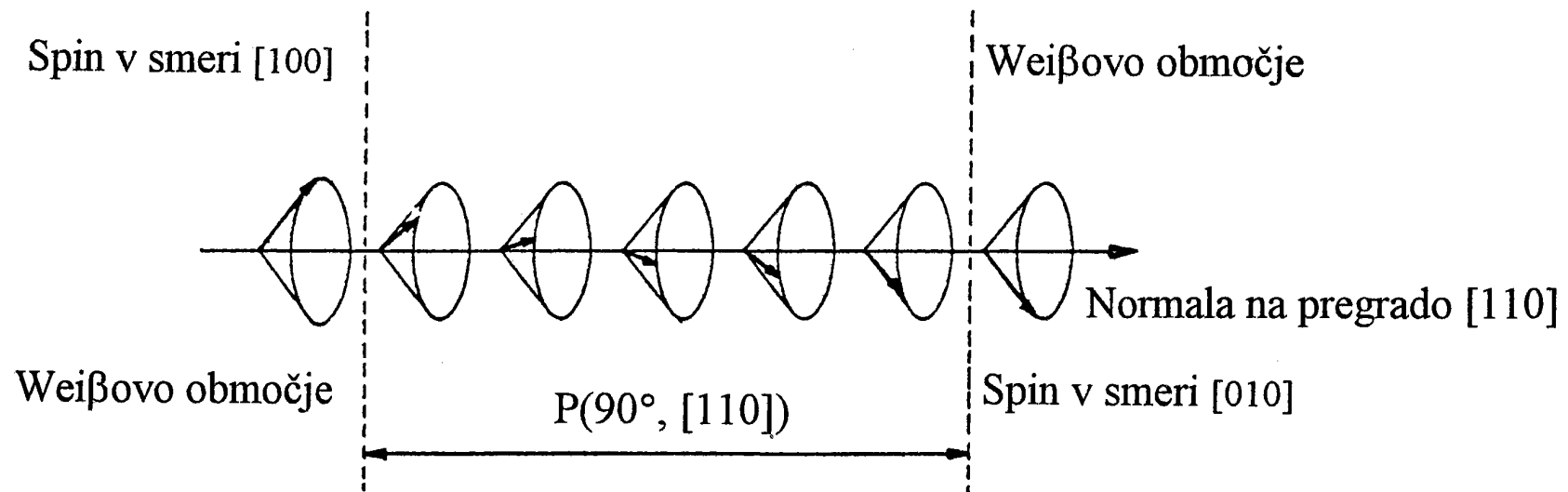
“Pri prehodu med posameznimi območji z različnimi smermi prednostnega magnetenja, se sprememba smeri ne odvija skočno ampak postopoma.

Določil je tudi debelino pregrad, ki znaša približno 1000 medatomskih razdalj.

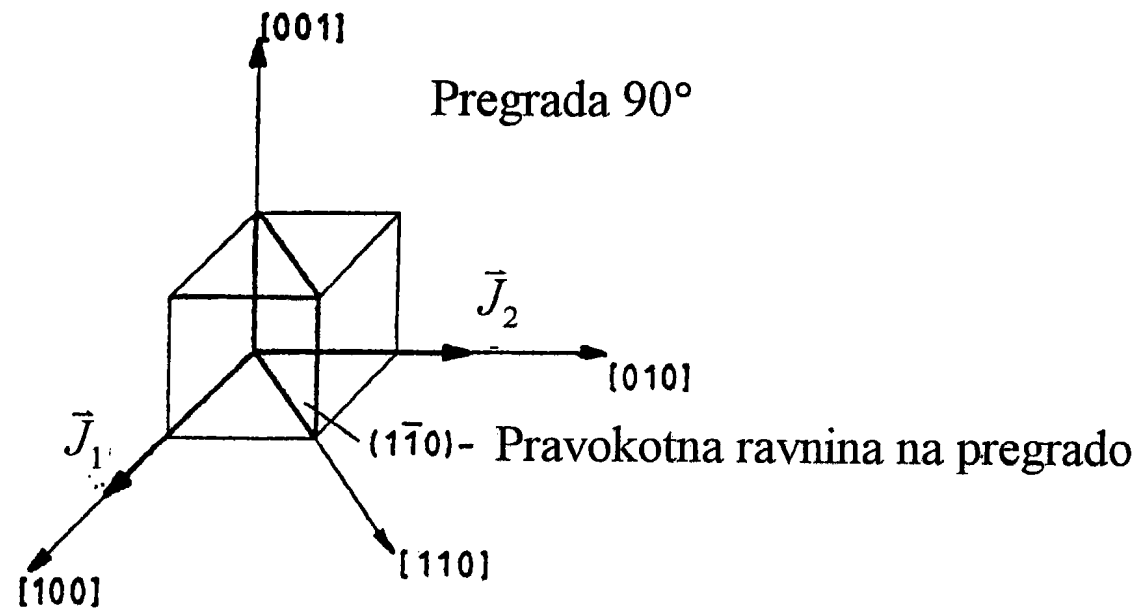
Pregrade so zgrajene tako, da pri prehajanju iz ene prednostne smeri v drugo, ne nastane dodatno stresano polje, ki bi imelo za posledico dodatno porabo energije.

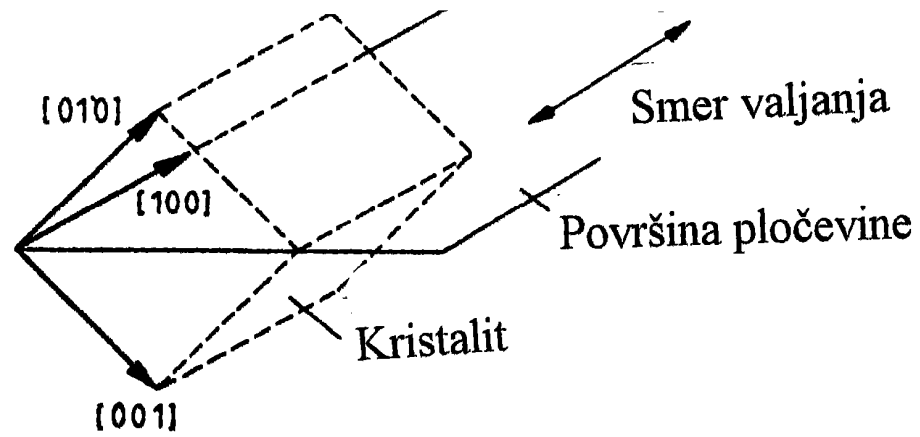


Sprememba smeri magnetenja za  $180^\circ$

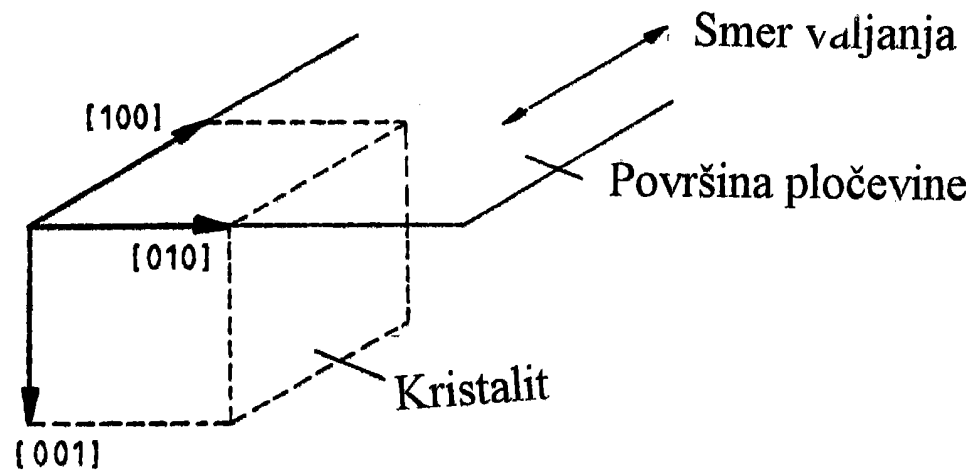


Sprememba smeri magnetenja preko pregrade za  $90^\circ$

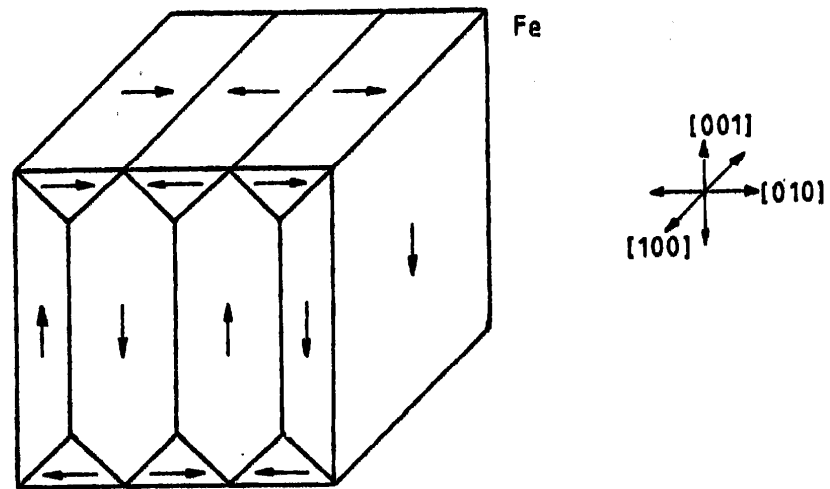




Slika 5.23



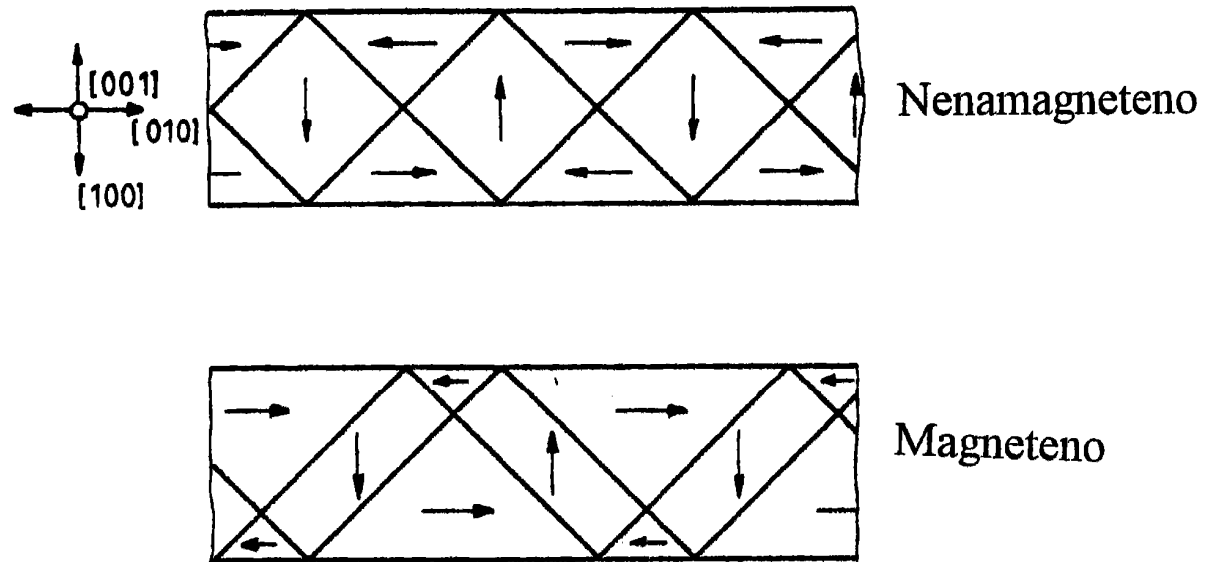
Slika 5.24



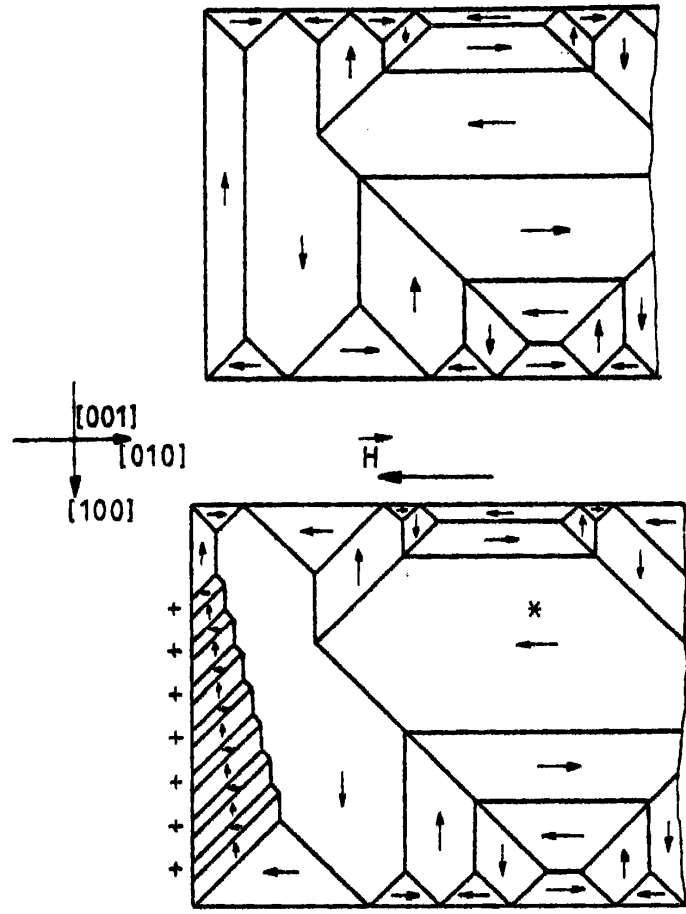
Slika 5.25



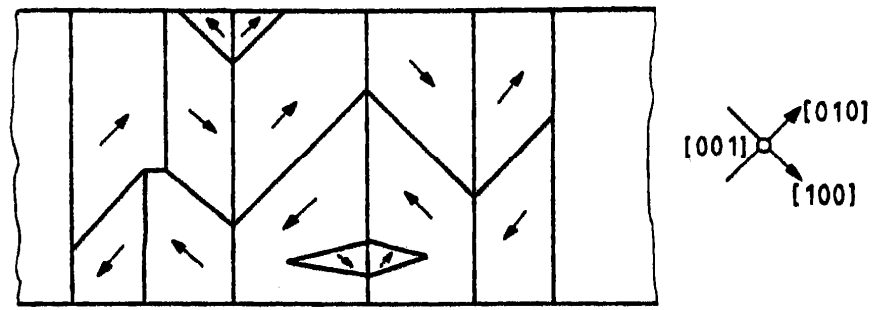
Nitka iz železa



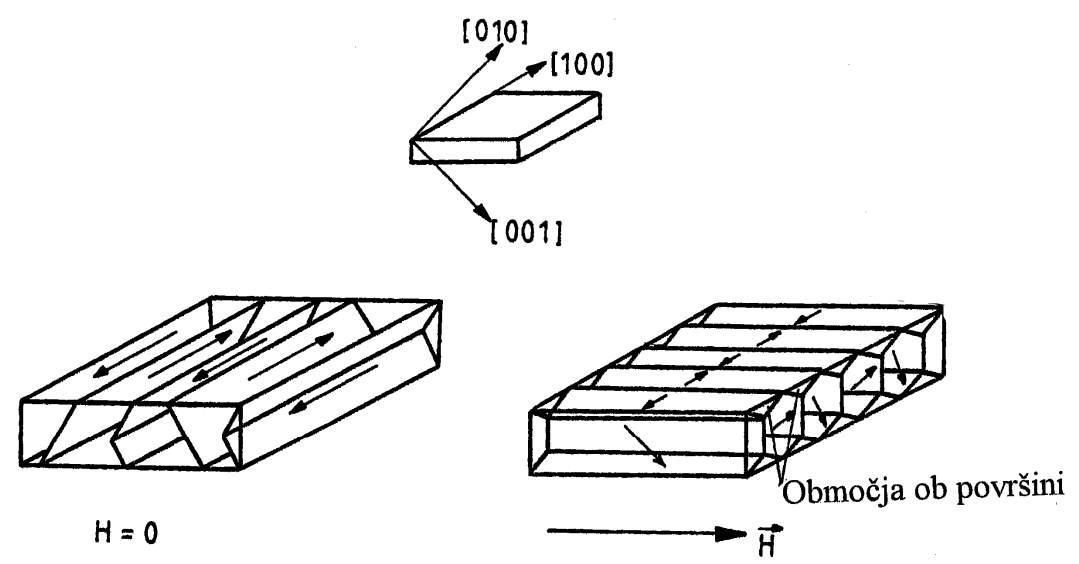
Slika 5.26



Slika 5.27



Slika 5.29

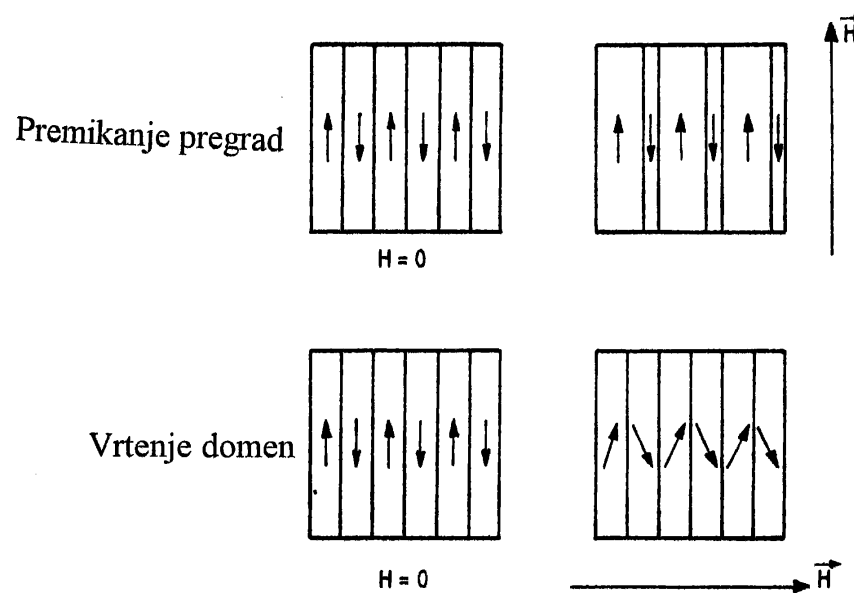


Slika 5.30

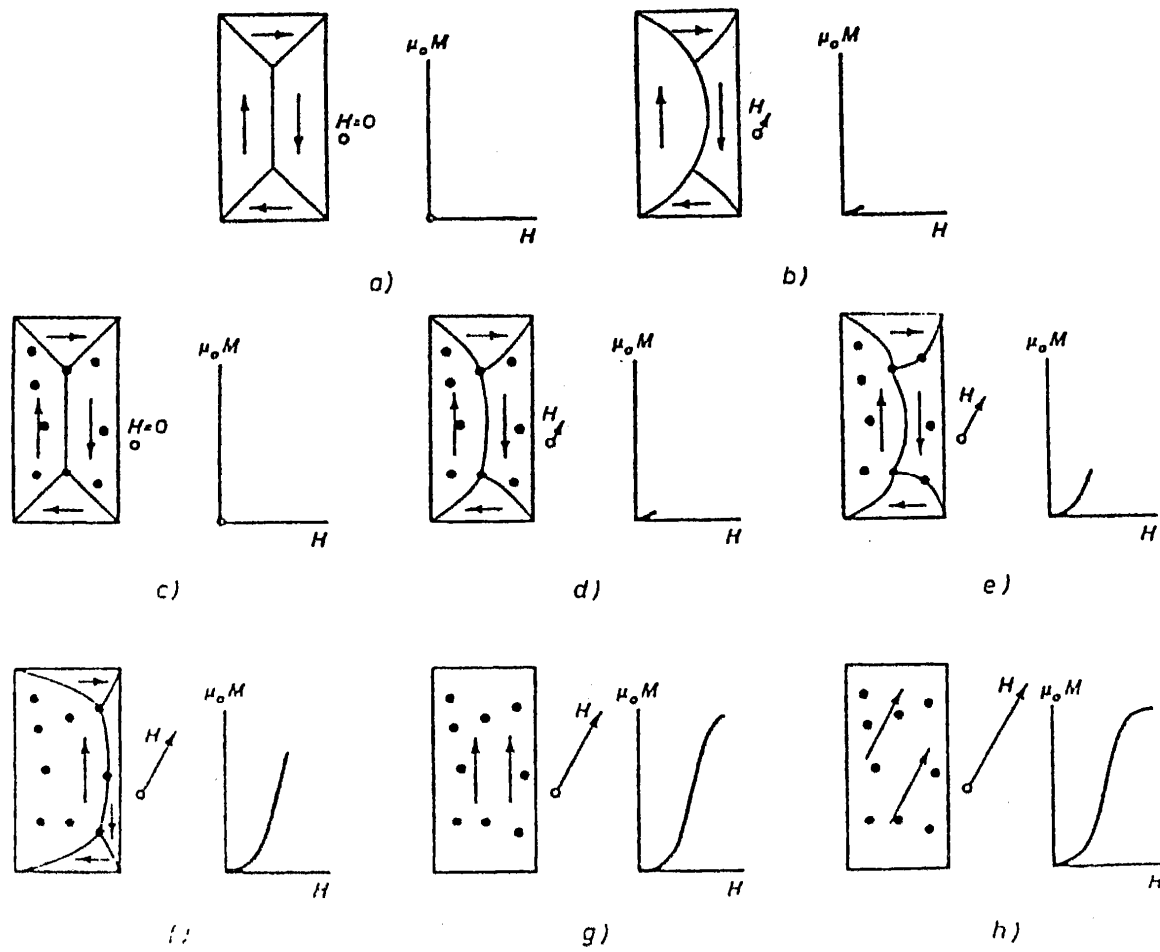
# Proces magnetenja feromagnetne snovi

V splošnem se proces magnetenja feromagnetne snovi odvija na dva načina:

- s premikanjem pregrad,
- z vrtenjem domen.



Slika 5.30



Slika 5.31