VIII. MAGNETSKI MATERIJALI I MAGNETSKA SVOJSTVA

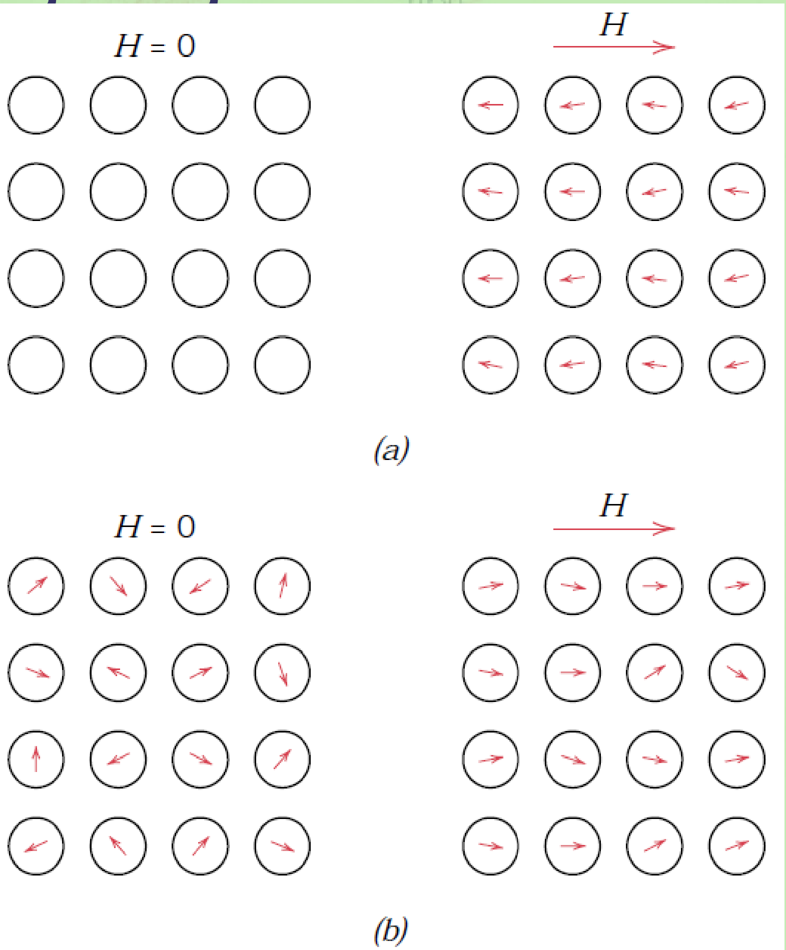
- Magnetska svojstva materijala su važna:
  - primjena: osvrnimo se oko sebe
  - temelj: kvantna fizika
  - podjela: primjer s početka semestra

A. Dijamagneti i paramagneti

- (a) dijamagneti:
  - Svi materijali su dijamagnetični. Dijamagnetizam je vrlo slab, pa je zasjenjen ostalim magnetskim svojstvima, te stoga i marginalan.
  - Osnova dijamagnetizma je Lenzovo pravilo: pri nametanju magnetskog polja inducira se struja elektrona čije polje teži poništiti nametnuto polje.
  - Podrijetlo struje elektrona:
    - atomski dijamagnetizam
    - Landauov dijamagnetizam vodljivih elektrona
    - Meissnerov učinak supravodljivih elektrona

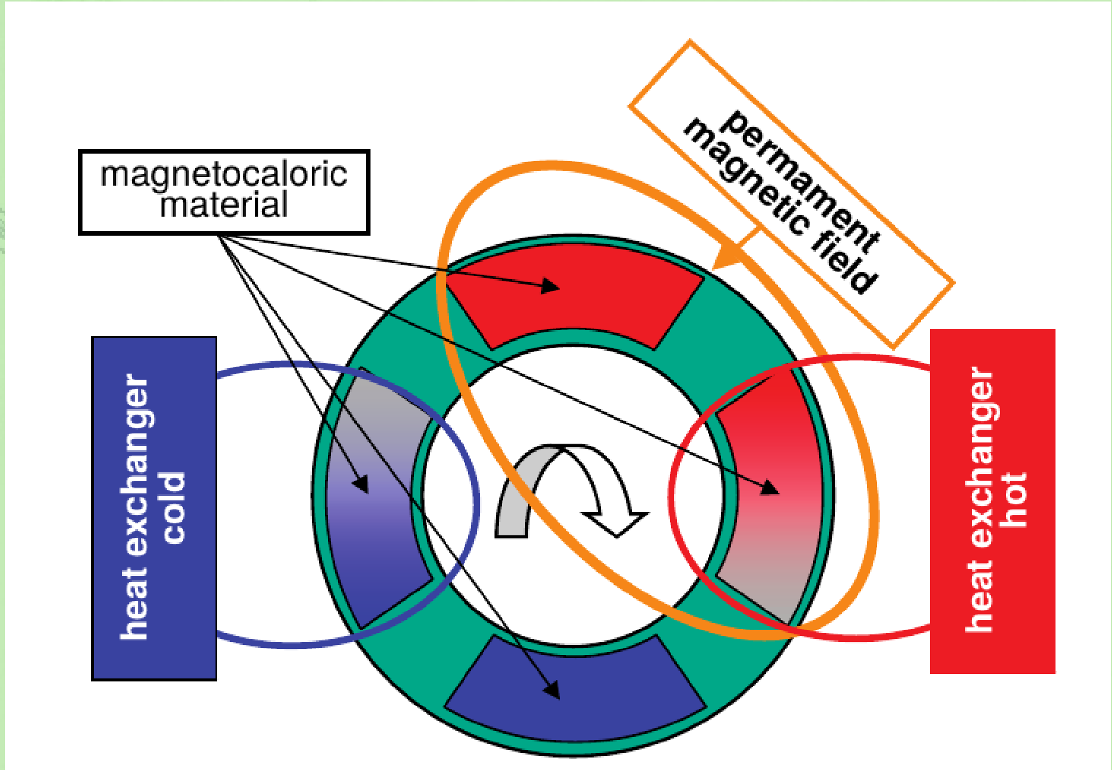
A. Dijamagneti i paramagneti

- (b) paramagneti: kristali, tekućine, plinovi, u kojima atomi ili molekule posjeduju stalan magnetski moment
- Curiev zakon



Primjene

- Dijamagneti: najjači je Meissnerov učinak
- Paramagneti: adijabatska demagnetizacija
- + magnetski hladnjaci

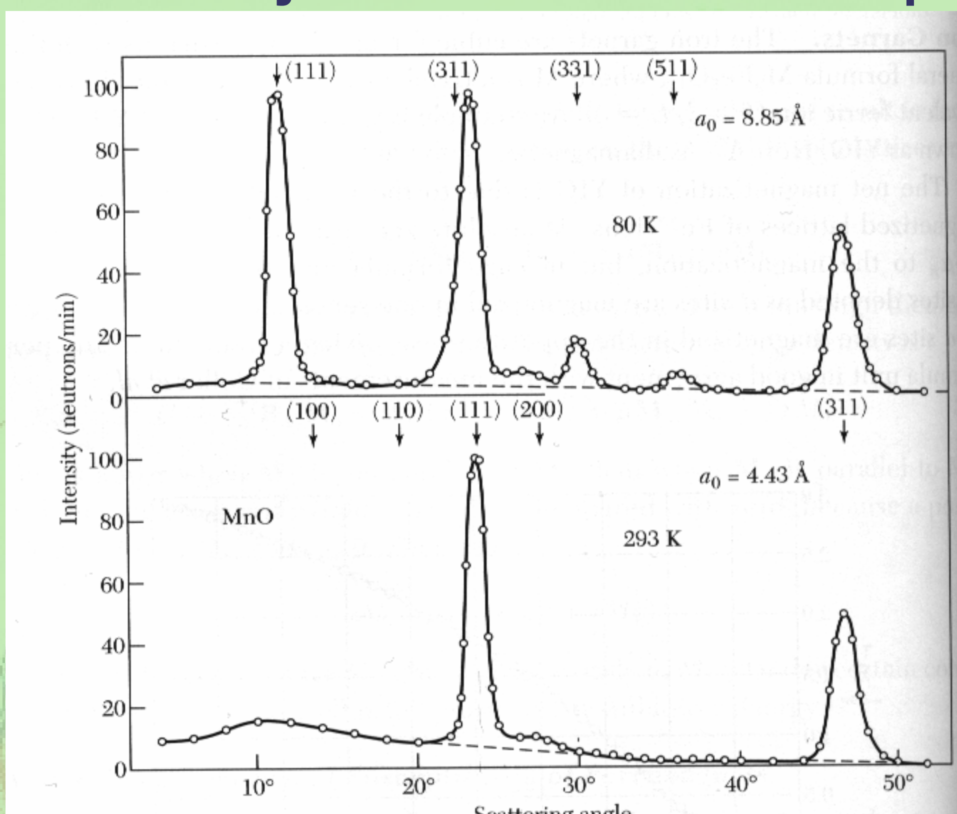


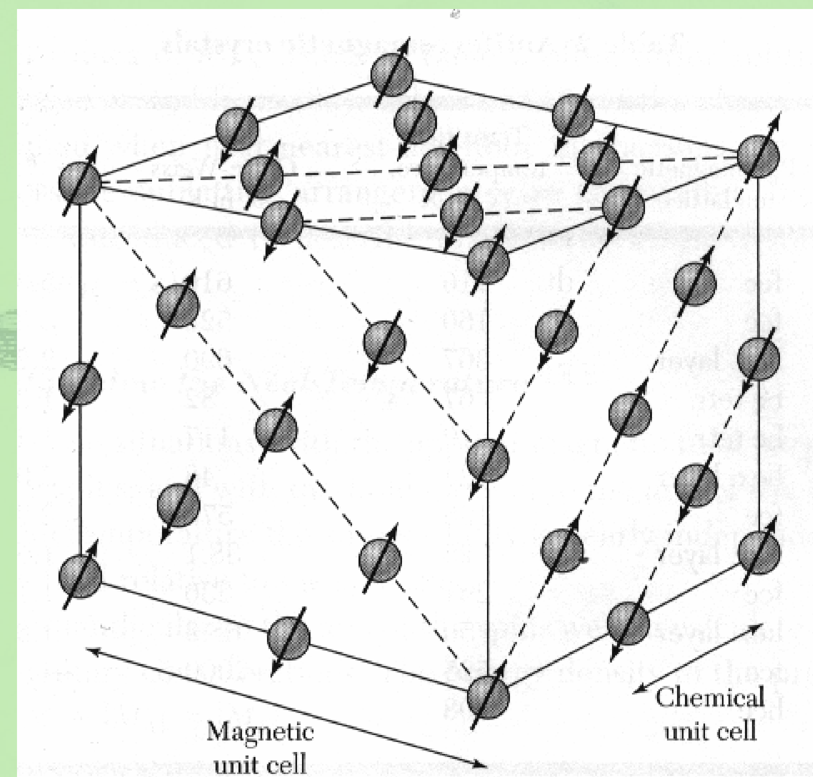
C. Fizika permanentnog magnetskog uređenja

- Heisenbergov hamiltonijan, ako je međudjelovanje spinova jako
- važna je međusobna orijentacija susjednih spinova, a ne samo međudjelovanje s vanjskim poljem
- feromagnet pri dominaciji toplinske energije postaje paramagnetičan, ali pamti temperaturu uređenja

D. Antiferomagneti

- Magnetizacija varira preko jako malih udaljenosti: od atoma do atoma.
- Primjena: u mikroskopskom (nano) svijetu.



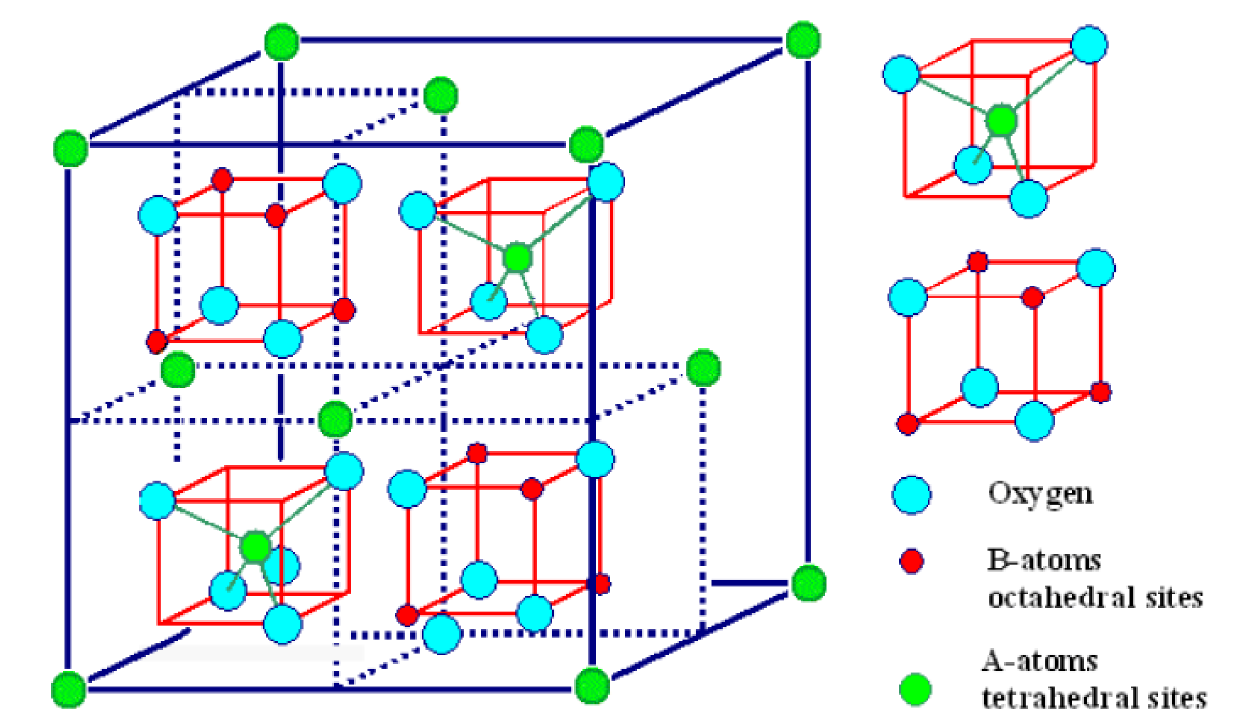


E. Ferimagneti

- Ferimagnet je antiferomagnet s dvije podrešetke različitih spinova (suprotno usmjereni spinovi su različiti).
- Mnoštvo ostvarenja.
- 3*AFM umjesto 1*AFM+2*FM
- Tehnološka i historijska važnost.

Spineli ($MgAl_2O_4$)

- Feriti: $[MFe_2O_4]_8$



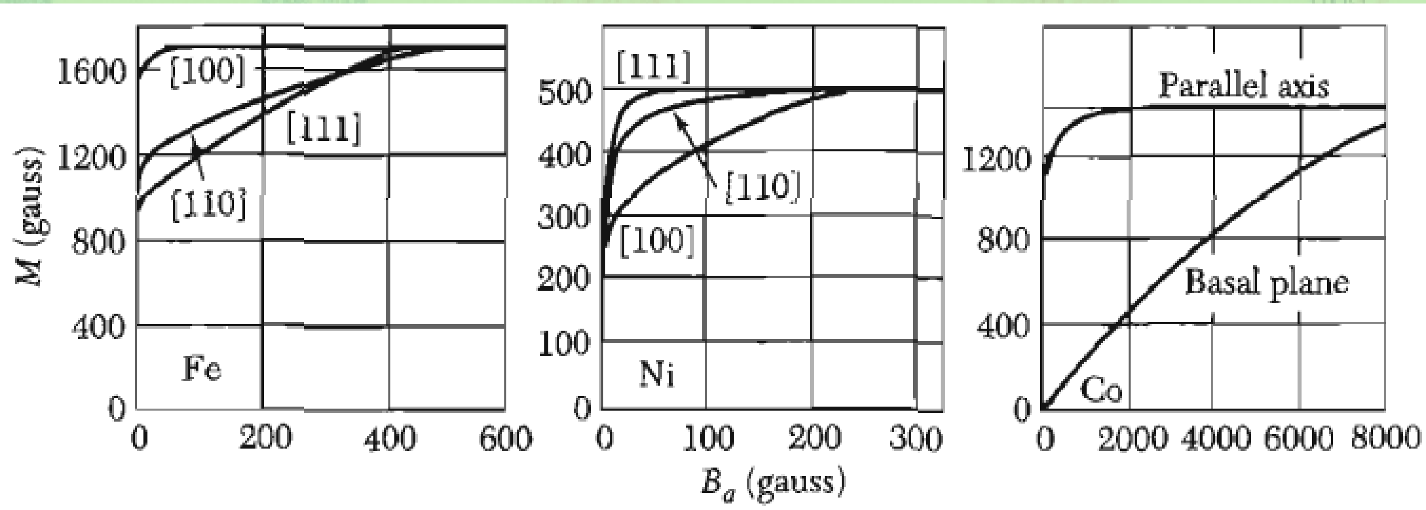
AB_2O_4 **spinel** The red cubes are also contained in the back half of the unit cell

Cation	*Octahedral Lattice Site*	*Tetrahedral Lattice Site*	*Net Magnetic Moment*
Fe^{3+}	↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑	↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓	Complete cancellation
Fe^{2+}	↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑	—	↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑

F. Feromagneti

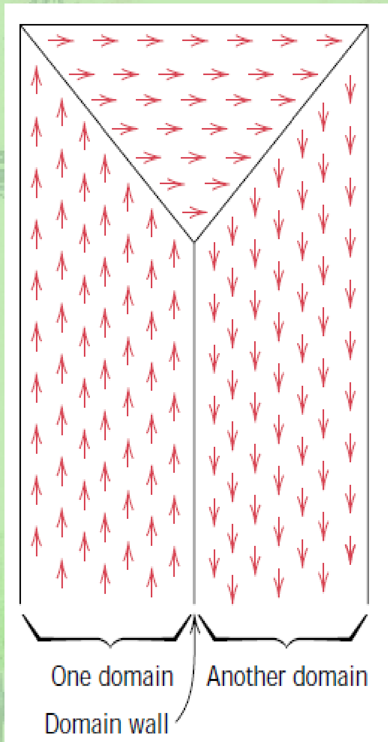
- To su "klasični" magneti.
- Feromagneti mogu biti i vodiči i izolatori (za razliku od antiferomagneta).
- Izolatorski feromagneti objašnjavaju se slično antiferomagnetizmu i ferimagnetizmu uz $J>0$ između paramagnetskih centara (CrO_2)
- Vodljivi feromagneti: itinerantni feromagnetizam – spinsko međudjelovanje elektrona, gdje se oni žele postaviti paralelno (Fe, Ni, Co)

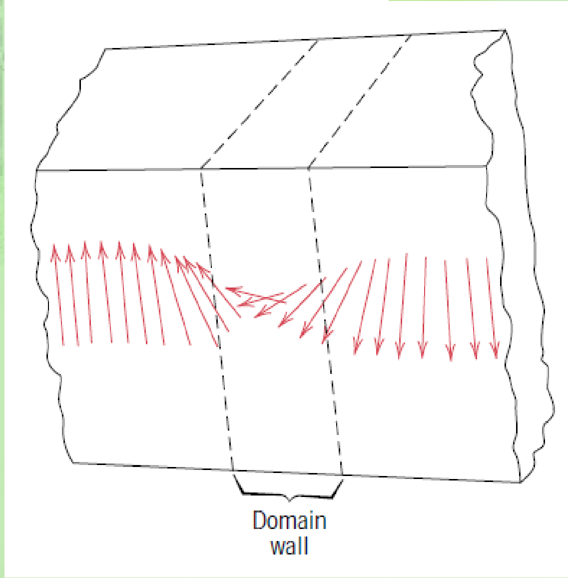
- magnetska anizotropija



G. Magnetske domene

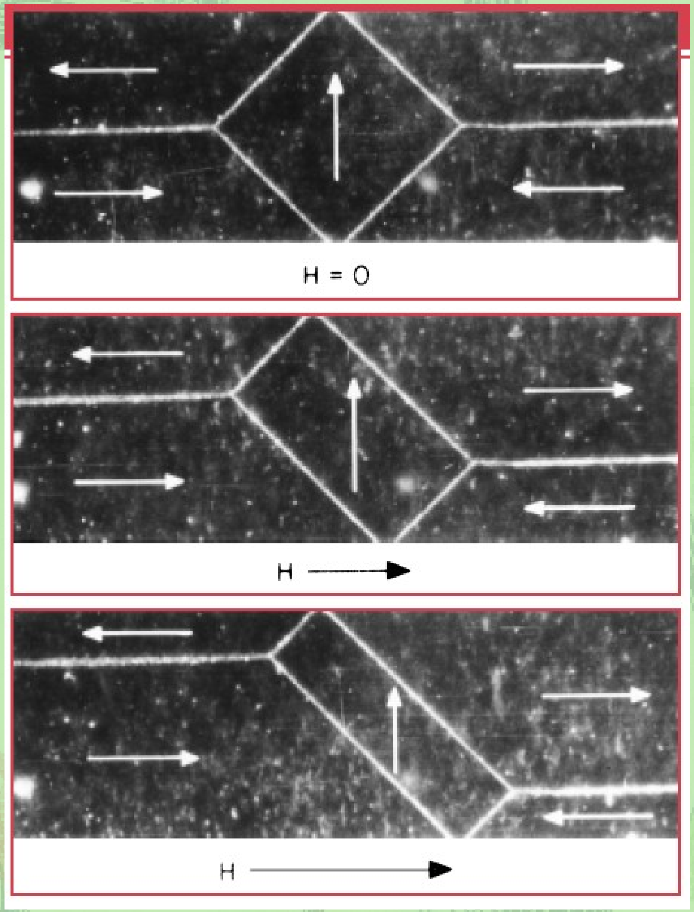
- Feromagnet ili ferimagnet uređen do velikih udaljenosti s uniformnom magnetizacijom: domena.
- Domene odvojene Blochovim domenskim zidovima.
- Ni domene ni zidovi nisu u vezi s polikristalnim zrnima i granicama.

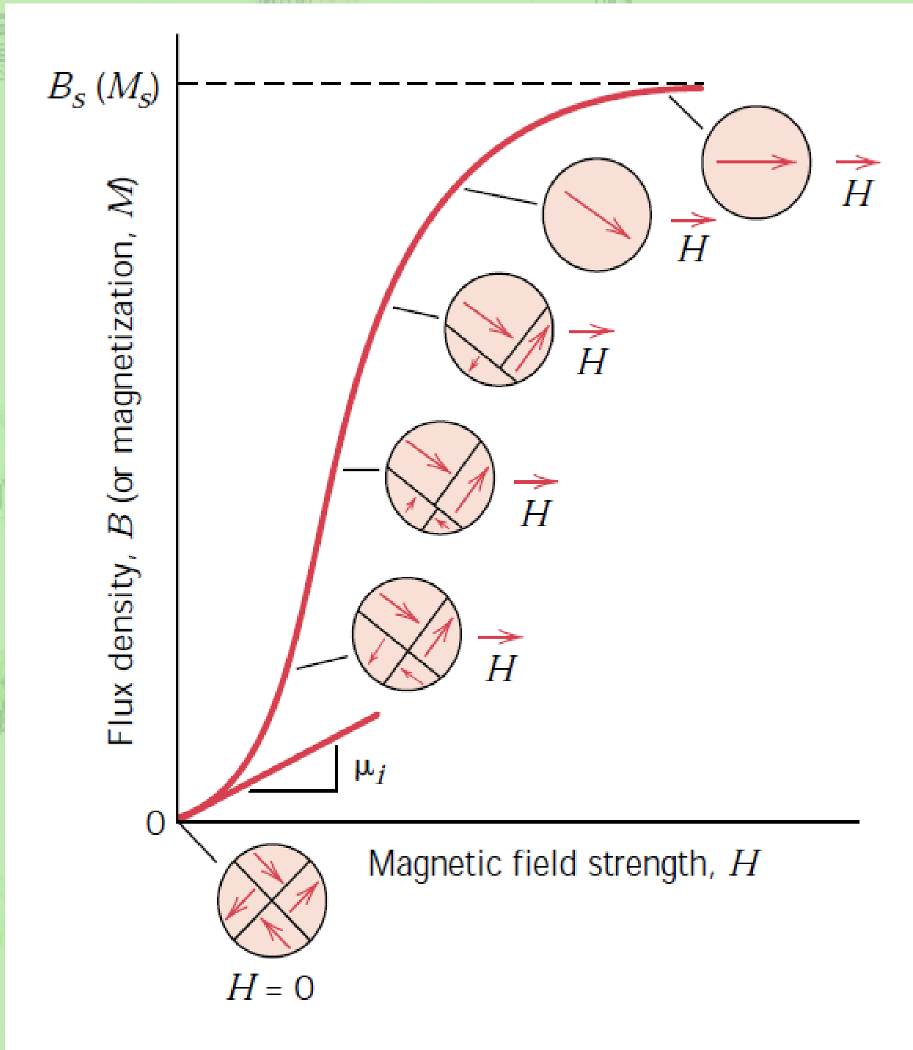




- Formiranje domena razmatramo pomoću magnetske energije. Povoljno je stanje u kojem je magnetski tok zatvoren na prostor uzorka.
- Svojstva domena u magnetskom polju određuju tehnološku primjenu:
  - meki i tvrdi magneti
  - relaksacija lakša gdje je veći red (jednofazni sustavi s velikim zrnima i anilirani), a teža gdje je nered (guste granice zrna)

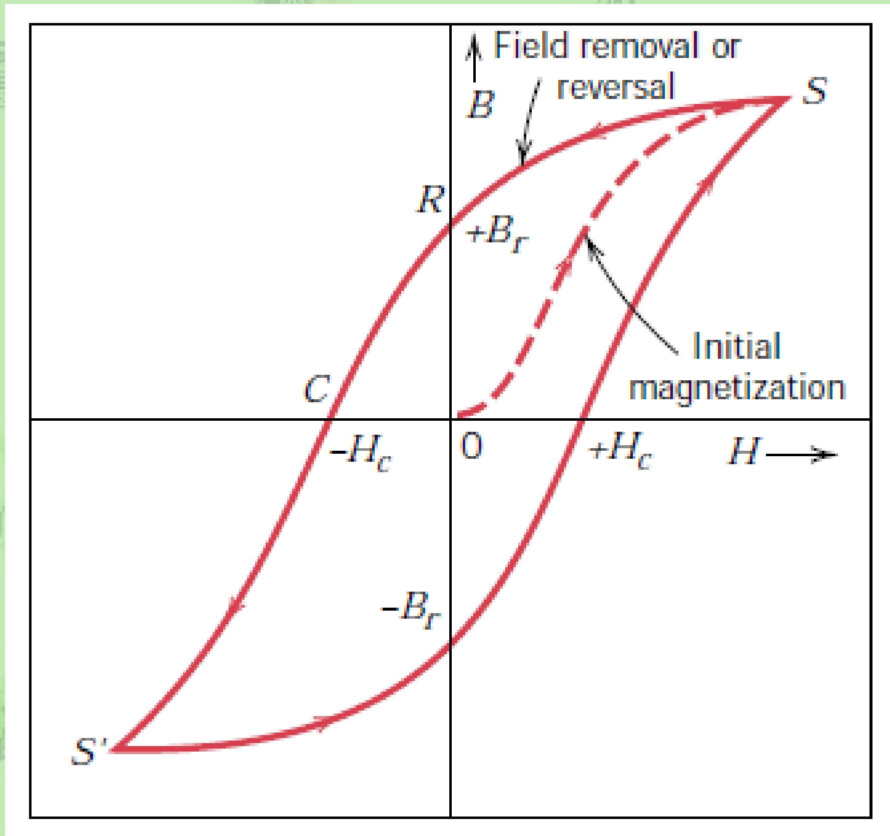
Proces magnetiziranja



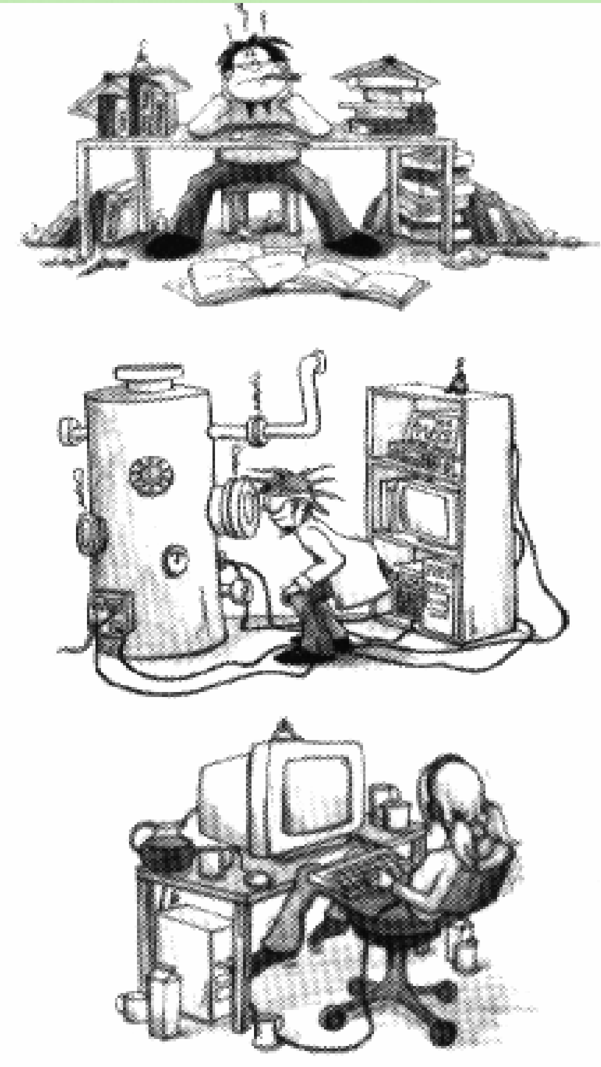


Magnetska histereza

- Parametri:
  - remanententna magnetizacija (ili polje)
  - koercitivno polje
  - magnetizacija (ili polje) saturacije
  - energija potrebna za načiniti jedan ciklus

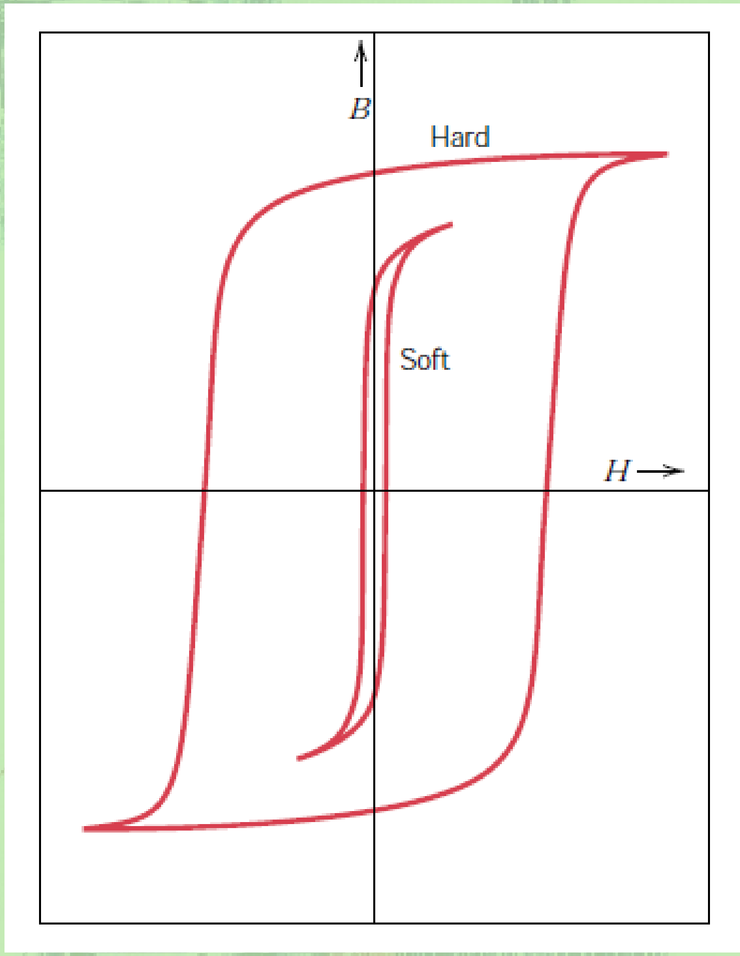


- "Few subjects in science are more difficult to understand than magnetism."
  - Encyclopaedia Brittanica, 1989



The three forces in magnetism: theory, experiment, and simulation. (Courtesy Wiebke Drenckhan).

H. Meki i tvrdi magneti i primjena



- Tvrdi:
  - DC elektromagneti (veliki B uz mali H), permanentni magneti
- Meki:
  - transformatori
  - električna vodljivost?

Material	*Composition (wt%)*	*Initial Relative Permeability* μ_i	*Saturation Flux Density* B_s *[tesla (gauss)]*	*Hysteresis Loss/Cycle [J/m³ (erg/cm³)]*	*Resistivity* ρ *(Ω-m)*
Commercial iron ingot	99.95Fe	150	2.14 (21,400)	270 (2700)	1.0×10^{-7}
Silicon–iron (oriented)	97Fe, 3Si	1400	2.01 (20,100)	40 (400)	4.7×10^{-7}
45 Permalloy	55Fe, 45Ni	2500	1.60 (16,000)	120 (1200)	4.5×10^{-7}
Supermalloy	79Ni, 15Fe, 5Mo, 0.5Mn	75,000	0.80 (8000)	—	6.0×10^{-7}
Ferroxcube A	48$MnFe_2O_4$, 52$ZnFe_2O_4$	1400	0.33 (3300)	~40 (~400)	2000
Ferroxcube B	36$NiFe_2O_4$, 64$ZnFe_2O_4$	650	0.36 (3600)	~35 (~350)	10^7

Material	Composition (*wt%*)	Remanence B_r [tesla (gauss)]	Coercivity H_c [amp-turn/m (Oe)]	$(BH)_{max}$ [kJ/m³ (MGOe)]	Curie Temperature T_c [°C (°F)]	Resistivity ρ (Ω-m)
Tungsten steel	92.8 Fe, 6 W, 0.5 Cr, 0.7 C	0.95 (9500)	5900 (74)	2.6 (0.33)	760 (1400)	3.0×10^{-7}
Cunife	20 Fe, 20 Ni, 60 Cu	0.54 (5400)	44,000 (550)	12 (1.5)	410 (770)	1.8×10^{-7}
Sintered alnico 8	34 Fe, 7 Al, 15 Ni, 35 Co, 4 Cu, 5 Ti	0.76 (7600)	125,000 (1550)	36 (4.5)	860 (1580)	—
Sintered ferrite 3	BaO-$6Fe_2O_3$	0.32 (3200)	240,000 (3000)	20 (2.5)	450 (840)	$\sim 10^4$
Cobalt rare earth 1	$SmCo_5$	0.92 (9200)	720,000 (9,000)	170 (21)	725 (1340)	5.0×10^{-7}
Sintered neodymium-iron-boron	$Nd_2Fe_{14}B$	1.16 (11,600)	848,000 (10,600)	255 (32)	310 (590)	1.6×10^{-6}