

DIELETTRICI



Materiali dielettrici (isolanti): sostanze con resistività elettrica molto elevata.

Utilizzati praticamente come isolatori o come condensatori; ρ è maggiore di circa $10^6 \Omega\text{m}$.

Nei dielettrici non ci sono portatori di carica liberi (la BC contiene un numero trascurabile di elettroni): applicazione di campi elettrici non implica corrente circolante.

I dielettrici sono solidi con legame ionico o covalente (o misto), come pure solidi molecolari con legami di Van der Waals. Esempi di dielettrici comuni sono SiO_2 , NaCl , acqua.

DIELETTRICI



Condensatore nel vuoto:

Q = carica immagazzinata

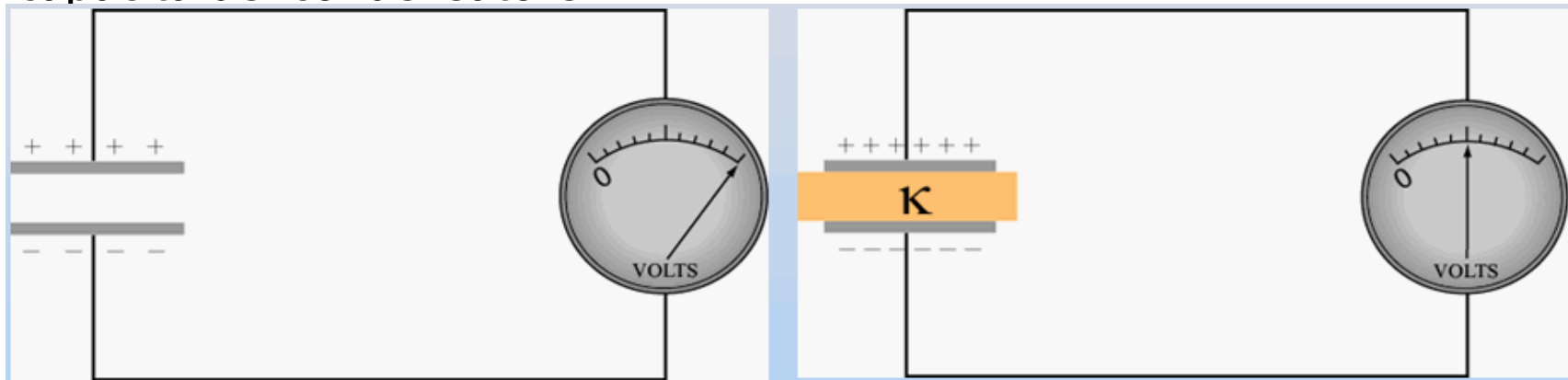
V = tensione applicata

C = capacità del condensatore

$$Q = C_0 V ; C_0 = \frac{\epsilon_0 A}{d}$$

$$Q = \frac{\epsilon_0 A}{d} V \Rightarrow \frac{Q}{A} = \epsilon_0 E$$

ϵ_0 (permeabilità del vuoto) = 8.85×10^{-12} F/m



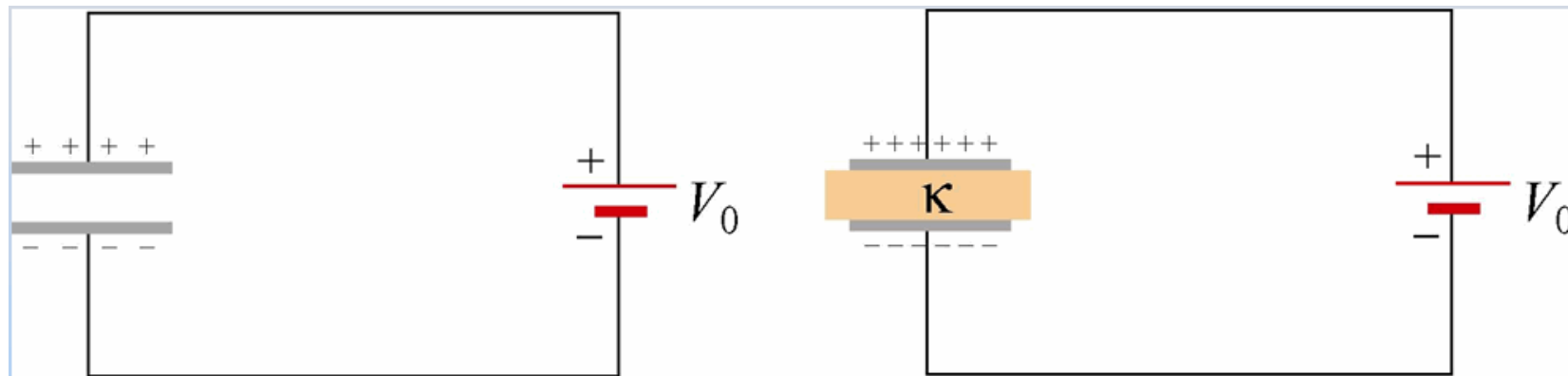
$$\frac{V(\text{vuoto})}{V(\text{dielettrico})} = \frac{1}{k} ; k > 1$$

k è una proprietà del materiale e non della geometria

DIELETTRICI



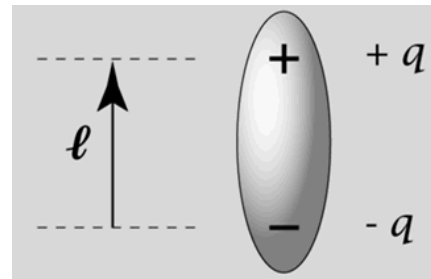
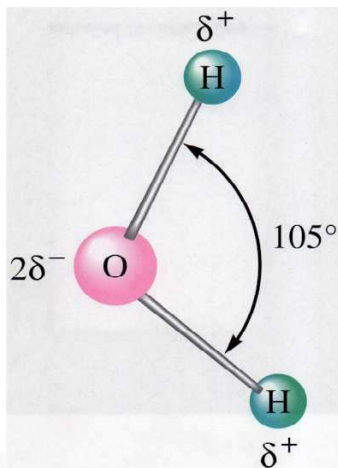
Altro modo per descrivere il comportamento di un dielettrico in un condensatore: V costante $\rightarrow$ aumenta la carica immagazzinata sulle armature del condensatore



DIELETTRICI

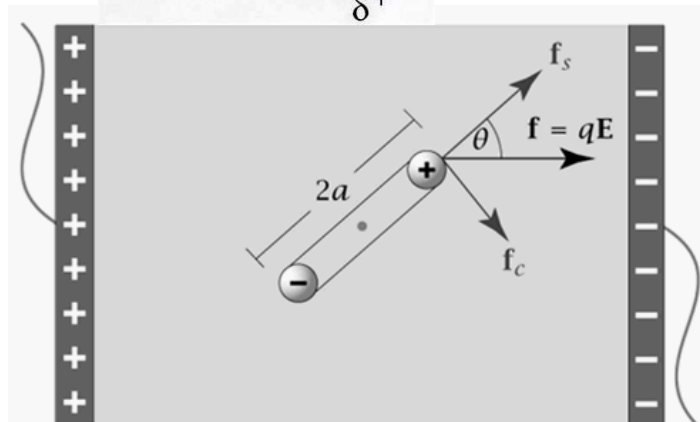


Nei dielettrici sono presenti i dipoli elettrici (permanenti o indotti):



$$\underline{\mu} = q \underline{l}$$

Momento di
dipolo



$$\underline{P} = \frac{\sum \underline{\mu}}{V} = N \underline{\mu}$$

N dipoli per
unità di
volume tutti
uguali

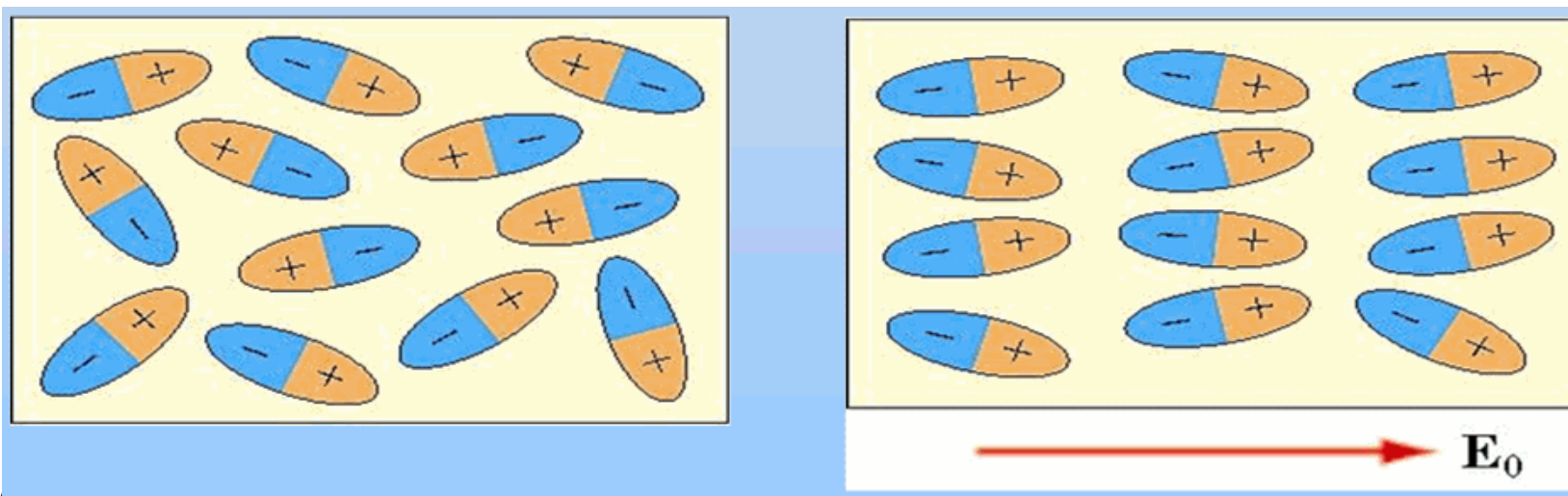
Vettore polarizzazione



DIELETTRICI

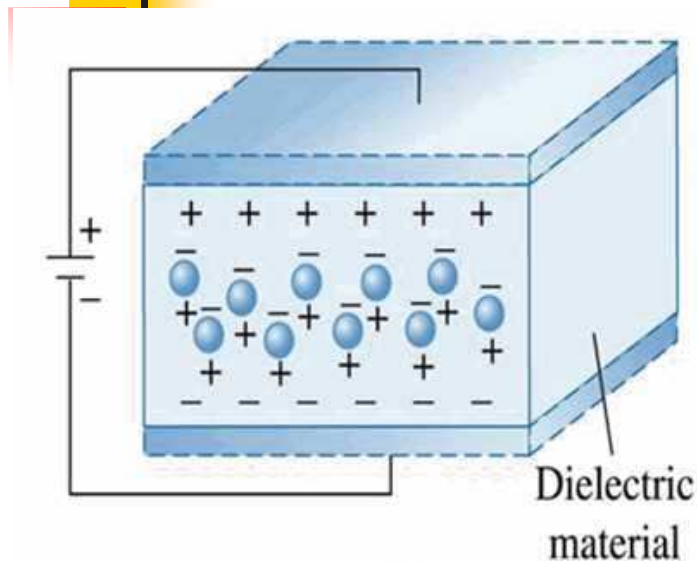
Importante fenomeno all'interno dei materiali dielettrici quando sono sottoposti a campi elettrici: la **POLARIZZAZIONE**.

Polarizzazione: fenomeno di allineamento dei dipoli presenti (propri o indotti) al campo elettrico esterno. Alla fine del processo sulle superfici esterne del dielettrico compaiono delle cariche (densità di carica).





DIELETTRICI



Conseguenza della polarizzazione:
comparsa di carica (+) nel materiale
affacciato all'armatura (-) e viceversa.

Si dimostra che la densità di carica di
polarizzazione (σ_{pol}) è:

$$\epsilon = k\epsilon_0$$

Permeabilità dielettrica

$$\frac{Q_{pol}}{A} = \sigma_{pol} = \underline{P} \cdot \underline{n}$$

$$E_0 = \frac{Q}{A\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad ; \text{riduzione di campo con dielettrico} : \Delta E = \frac{\sigma_{pol}}{\epsilon_0} = \frac{P}{\epsilon_0}$$

$$E = E_0 - \Delta E = E_0 - \frac{P}{\epsilon_0} \quad ; \quad E = \frac{E_0}{k} \Rightarrow \frac{E_0}{k} = E_0 - \frac{P}{\epsilon_0}$$

$$C = \frac{k\epsilon_0 A}{d} = kC_0$$

$$P = (k-1)\epsilon_0 E = \chi_{diel}\epsilon_0 E$$

Costante dielettrica (relativa)

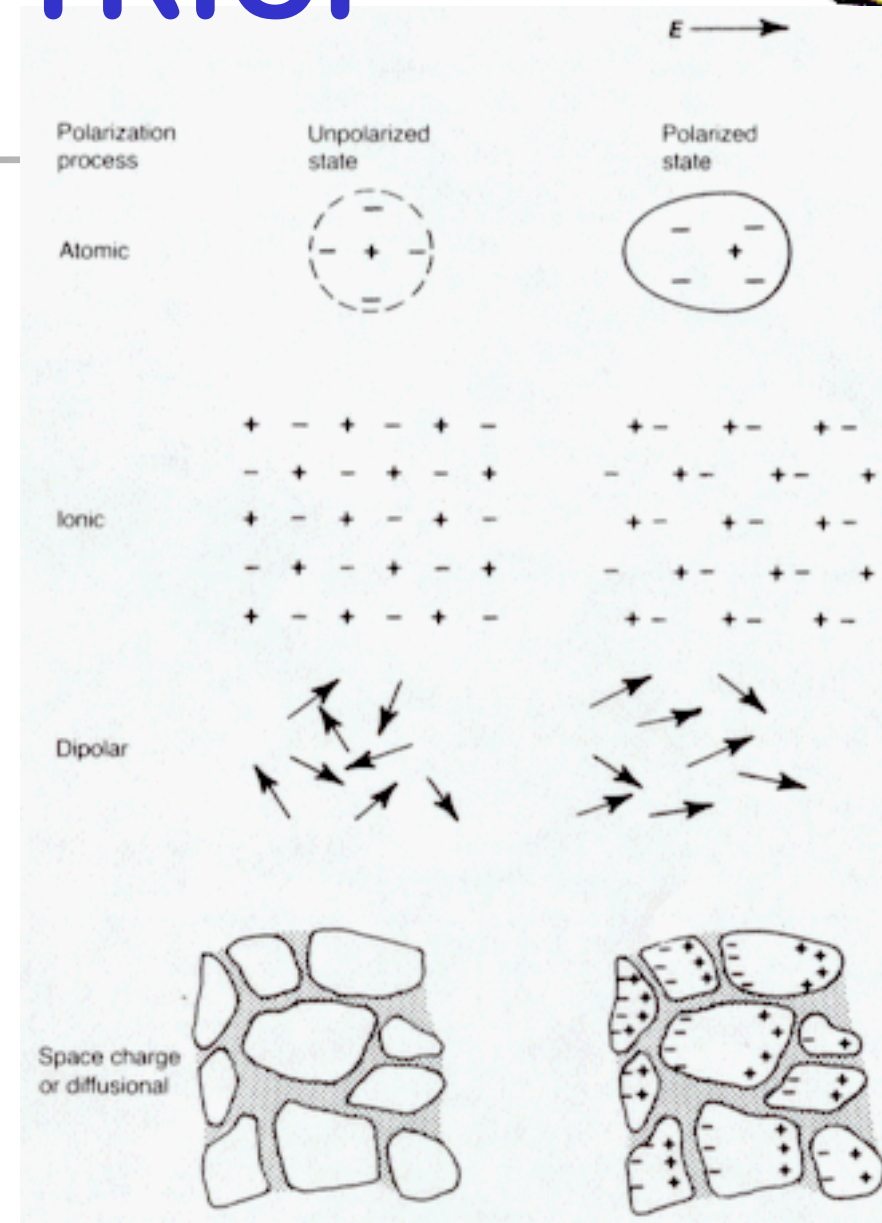
Suscettività dielettrica

DIELETTRICI



A seconda del materiale sono possibili vari meccanismi di polarizzazione:

- elettronica
- ionica
- orientazione
- per carica spaziale



DIELETTRICI



La polarizzazione P è l'effetto macroscopico di moltissimi dipoli elementari μ

Si assume (bassi campi applicati): Polarizzabilità

$$\underline{\mu} = \alpha \underline{E}_{loc} \quad \text{Campo elettrico locale (diverso da quello esterno)}$$

E_{loc} tiene in conto il campo esterno e l'effetto della distribuzione di cariche nel materiale sul punto in esame.

Per N dipoli μ per unità di volume si ha:

$$P = N \alpha \underline{E}_{loc}$$

In α sono contenuti tutti i contributi di polarizzazione; essa rappresenta l'analogo microscopico di ϵ_r macroscopico

DIELETTRICI



I vari meccanismi di polarizzazione sono caratterizzati ognuno da una polarizzabilità corrispondente. La polarizzabilità complessiva è la somma dei vari contributi.

Esistono quindi:

α_e = polarizzabilità elettronica

α_i = polarizzabilità ionica

α_o = polarizzabilità orientazionale

α_{cs} = polarizzabilità per carica spaziale

$$\alpha_{tot} = \alpha_e + \alpha_i + \alpha_o + \alpha_{cs}$$

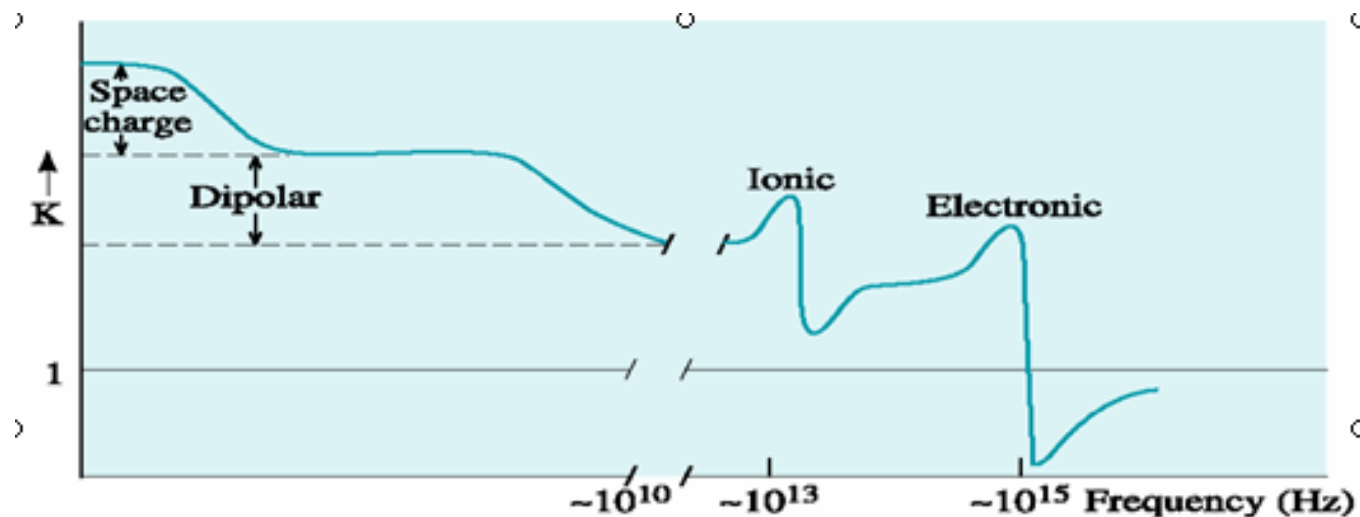
DIELETTRICI



Nei campi alternati la polarizzabilità totale dipende dalla capacità che hanno i vari meccanismi di seguire il campo elettrico nelle sue oscillazioni.

Ogni meccanismo è caratterizzato da un “tempo di rilassamento”

Meccanismo con tempo di rilassamento maggiore saranno i primi a non dare contributo quando la frequenza di oscillazione cresce.



DIELETTRICI



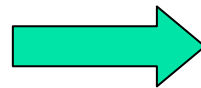
Relazione esistente tra α e ϵ_r . Trattazione classica (approssimata)

$$\underline{E}_{loc} = \underline{E}_0 + \underline{E}_1 + \underline{E}_2 + \dots$$

$$\text{Lorentz : } \underline{E}_1 + \underline{E}_2 + \dots = \frac{\underline{P}}{3\epsilon_0}$$

$$\underline{E}_{loc} = \underline{E}_0 + \frac{\underline{P}}{3\epsilon_0}$$

$$\underline{P} = N\alpha \underline{E}_{loc}$$



$$\frac{k-1}{k+2} = \frac{N\alpha}{3\epsilon_0}$$

Equazione di Clausius-Mossotti

Applicabile a materiali isotropi
e omogenei e che non
contengono dipoli permanenti

DIELETTRICI



La legge di Clausius-Mossotti pur non aderente alla realtà permette però di prevedere l'esistenza dei materiali ferroelettrici.

$$\frac{k-1}{k+2} = \frac{N\alpha}{3\epsilon_0}$$



$$\gamma = \frac{N\alpha}{3\epsilon_0} \Rightarrow \gamma = 1 - \frac{3}{k+2}$$

$$k = \frac{3}{1-\gamma} - 2 \Rightarrow \gamma \rightarrow 1, k \rightarrow \infty$$

Esistono materiali nei quali in particolari condizioni la polarizzazione produce un campo locale che amplifica la polarizzazione: materiali polarizzati spontaneamente

FERROELETTRICI

DIELETTRICI



Le proprietà tecnologiche più importanti dei dielettrici sono:

- costante dielettrica
- rigidità dielettrica
- fattore di perdita

Rigidità dielettrica: campo elettrico massimo applicabile ad un materiale prima che inizi la scarica (rottura) del dielettrico (proprietà fondamentale degli isolanti elettrici).

Fattore di perdita: l'applicazione di campi elettrici alternati comporta movimenti oscillatori dei dipoli nel materiale $\Rightarrow$ ci sono dissipazioni energetiche $\Rightarrow$ l'angolo tra corrente e tensione non è 90° ma $90-\delta$. Il fattore di perdita è definito come $\text{tg}\delta$.

DIELETTRICI



Materiali ceramici (solidi inorganici non metallici) sono i tipici materiali dielettrici di uso industriale

Alcuni esempi di materiali per isolatori:

- porcellana elettrica: argilla ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) al 50 %, silice (SiO_2) al 25 % e feldspato di potassio ($\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$)
- porcellane a base di steatite: talco ($3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) al 90 % e argilla ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) al 10 %
- forsterite: Mg_2SiO_4
- allumina: Al_2O_3

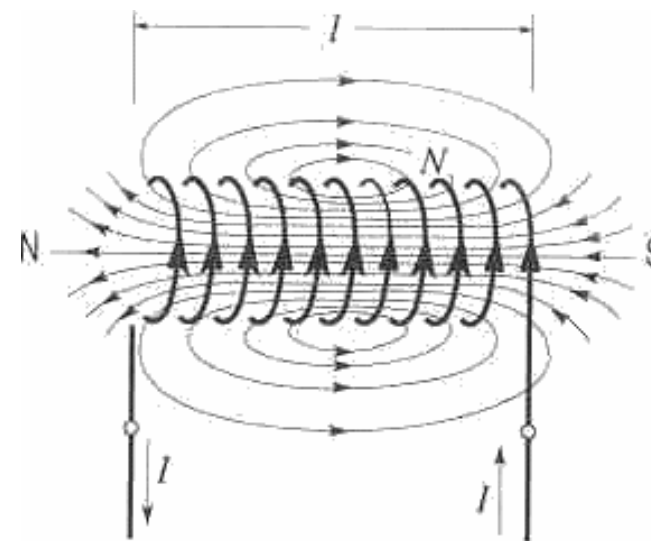
Esempi di materiali per condensatori:

- titanato di bario e derivati: BaTiO_3



MATERIALI MAGNETICI

- Alcuni metalli hanno comportamento magnetico noto da molto tempo: Fe, Co, Ni (sono ferromagnetici).
- Esempi: una calamita si allinea con il campo magnetico terrestre (N e S della calamita) oppure essa esercita un campo magnetico visualizzabile con della limatura di ferro, che si dispone seguendo le linee del campo, evidenziando i poli N e S (non sono mai stati scoperti i monopoli magnetici).
- Il campo magnetico è prodotto anche da conduttori in cui circola corrente.



Campo prodotto:

$$H = nI/L$$

n = numero di spire

L = lunghezza del solenoide (bobina)

I = corrente che circola nelle spire

H si misura in A/m



MATERIALI MAGNETICI

- Ponendo un pezzo di ferro all'interno del solenoide si osserva un campo magnetico molto più intenso.
- Induzione magnetica B = somma del campo applicato H e dell'effetto che ha H sul materiale, indicato con M (magnetizzazione). Ossia:
- $B = \mu_0(H + M)$ misurato in T (Tesla = $\text{Wb/m}^2 = \text{Vs/m}^2$)
 μ_0 permeabilità magnetica del vuoto ($4\pi \times 10^{-7} \text{ Tm/A}$)
 μ (permeabilità magnetica del materiale) = B/H
 $\mu_r = \mu/\mu_0$ permeabilità relativa.
 χ_m (susceptibilità magnetica) = M/H



MATERIALI MAGNETICI

- Parallelismo tra comportamento dielettrico e magnetico
- E (diel) e H (magn) $\rightarrow$ causa esterna
- P (diel) e M (magn) $\rightarrow$ effetto materiale
- χ_{diel} e χ_{magn} $\rightarrow$ proprietà del materiale

$$\underline{M} = \frac{\sum \underline{m}_i}{V}$$

Momento (di dipolo) magnetico; unità: Am^2

MATERIALI MAGNETICI

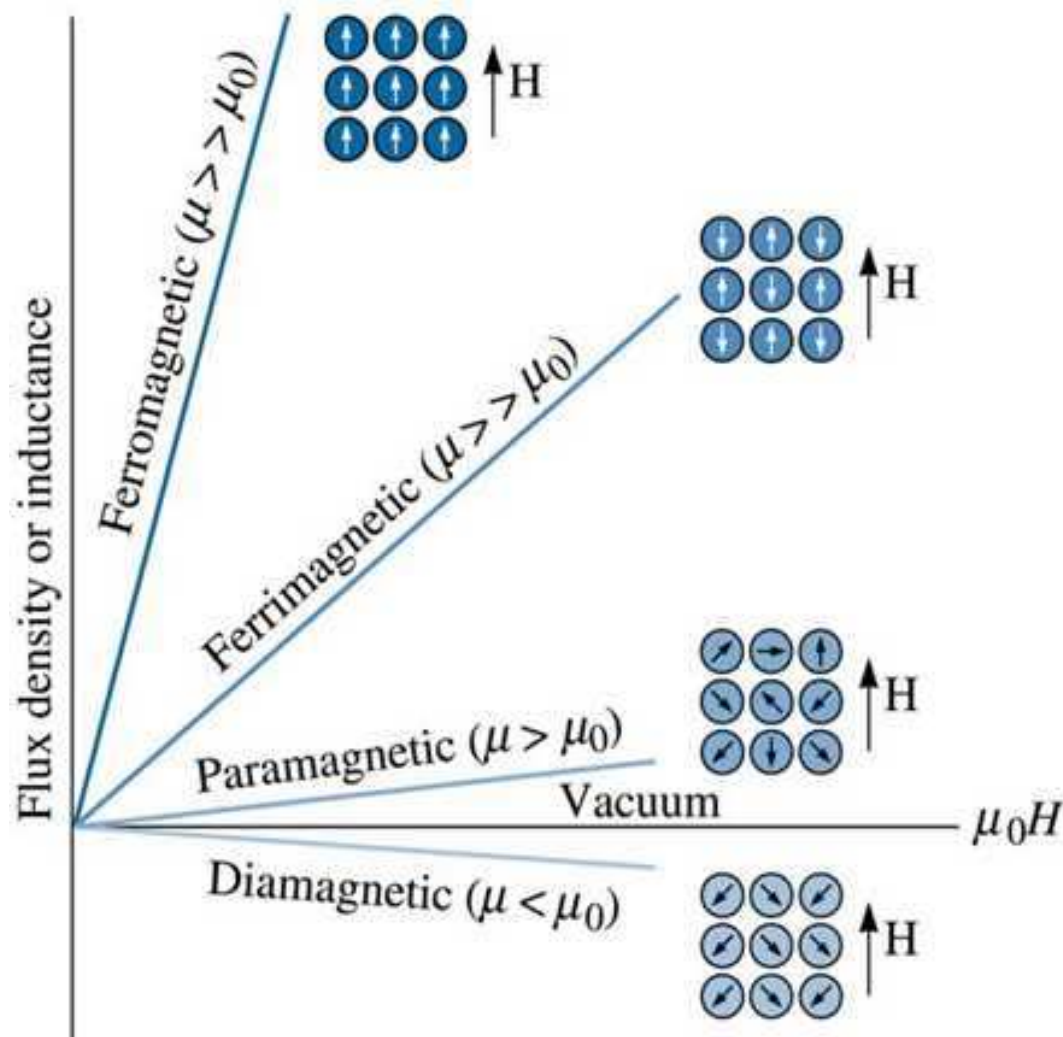


- **DIAMAGNETISMO**: il materiale reagisce al campo H con una debolissima magnetizzazione opposta ad H ($\chi_m \sim -10^{-6}$). Cu, Ag, Zn, Sn sono diamagneti.
- **PARAMAGNETISMO**: il materiale reagisce al campo H con una debolissima magnetizzazione concorde ad H ($\chi_m \sim 10^{-2} \div 10^{-6}$). Al, O₂, Pt, Ti sono paramagneti. Nei diamagnetici e paramagneti l'effetto si annulla al cessare della causa.
- **FERROMAGNETISMO**: il materiale reagisce al campo H con una fortissima magnetizzazione concorde ad H ($\chi_m \sim 10^4 \div 10^6$). Fe, Co, Ni, Gd sono ferromagneti. Nei ferromagneti la magnetizzazione può esistere in assenza di campi esterni.
Antiferromagnetismo e **ferrimagnetismo** casi particolari.



MATERIALI MAGNETICI

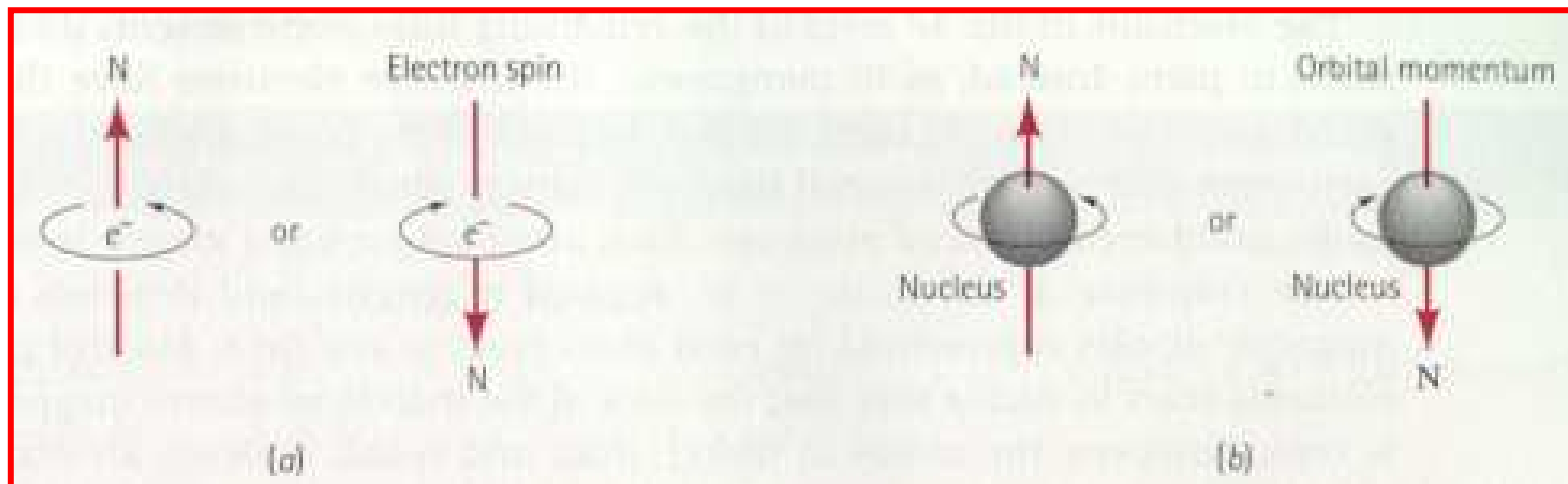
La caratteristica B-H ha i seguenti andamenti per i vari materiali magnetici (per piccoli valori di H)





MATERIALI MAGNETICI

Origine del magnetismo a livello atomico: conseguenza di **momenti magnetici** connessi al movimento degli elettroni: **spin** (numero quantico di spin s) e **moto orbitale** (numero quantico magnetico m_l) – l'atomo ha "attaccato" tante minuscole calamite



Momento magnetico fondamentale (spin di un e):

μ_B **magnetone di Bohr** = $9.27 \times 10^{-24} \text{ Am}^2$.

MATERIALI MAGNETICI



- Come si accoppiano nell'atomo isolato i momenti magnetici di tutti gli elettroni?
- Livelli **completi**: il momento magnetico complessivo è nullo perché:
 - a e^- con $s = -1/2$ corrisponde un e^- con $s = +1/2$ e quindi momento di spin totale = 0
 - a e^- con $m_l = m$ corrisponde un e^- con $m_l = -m$ e quindi il momento magnetico orbitale totale = 0
- Sono importanti solo i livelli **incompleti**



MAGNETISMO ELEMENTARE

$$m_{\text{atomo}} = g_J \mu_B \sqrt{J(J+1)}$$

Momento magnetico dell'atomo **isolato**

$$p = \frac{m_{\text{atomo}}}{\mu_B} = g_J \sqrt{J(J+1)}$$

Rappresenta il numero di μ_B dell'atomo

Regole per il calcolo di g_J e di J :

$$S = \sum s \rightarrow \text{Regole di Hund}$$

$$L = \sum m_l \rightarrow L \text{ deve essere massimo}$$

$$J = \begin{cases} L - S \rightarrow \text{guscio pieno meno di met\`a} \\ L + S \rightarrow \text{guscio pieno pi\`u di met\`a} \end{cases}$$

Ipotesi di base: dapprima si accoppiano gli spin tra loro e i momenti angolari tra loro e poi il momento complessivo \u00e8 determinato

$$g_J = 1 + \frac{J(J+1) - L(L+1) + S(S+1)}{2J(J+1)}$$



MAGNETISMO ELEMENTARE

- Applicazione al caso dell'atomo di ferro:
- $Z = 26$; $[\text{Fe}] = [\text{Ar}]3d^64s^2$
- Core completo e 4s completo $\rightarrow$ no effetto
- Interesse solo per i 6 elettroni sul 3d:
- $\uparrow\downarrow \uparrow\uparrow\uparrow\uparrow \Rightarrow$
 - $S = \frac{1}{2} + (-\frac{1}{2}) + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 2$
 - $L = 2 + 2 + 1 + 0 + (-1) + (-2) = 2$
 - $J = L + S = 4$; $g_J = 1.5$
 - $p = 6.71$



MAGNETISMO NEI SOLIDI

- Come passare dal momento magnetico dei singoli atomi a quello dei solidi?
- I° caso: i livelli incompleti sono relativi a sottolivelli di tipo s e di tipo p
- Questi elettroni formeranno i legami chimici nei solidi $\rightarrow$ il momento magnetico dei singoli atomi sarà sempre annullato e il solido sarà privo di momenti magnetici



MAGNETISMO NEI SOLIDI

- II° caso: i livelli incompleti sono relativi a sottolivelli di tipo d ($3d$, $4d$ e $5d$)
- Elementi del $3d$: il magnetismo dei solidi di questi elementi è influenzato moltissimo dalla formazione del solido
- Importante solo il contributo di spin ("quenching" del moto orbitale causato dal campo del reticolo cristallino): m dipende solo da S mentre $L = 0$



MAGNETISMO NEI SOLIDI

Il ferromagnetismo di Fe, Co e Ni è legato agli elettroni spaiati sul livello $3d$: 4 per il ferro, 3 per il cobalto e 2 per il Ni.

Elettroni $3d$ spaiati	Atomi	Numero di elettroni	Configurazione elettronica orbitali $3d$					Elettroni $4s$
3	V	23	$\uparrow \downarrow$	$\uparrow \downarrow$	$\uparrow \downarrow$	$\uparrow \downarrow$	$\uparrow \downarrow$	2
5	Cr	24	$\uparrow \downarrow$	$\uparrow \downarrow$	$\uparrow \downarrow$	$\uparrow \downarrow$	$\uparrow \downarrow$	1
5	Mn	25	$\uparrow \downarrow$	$\uparrow \downarrow$	$\uparrow \downarrow$	$\uparrow \downarrow$	$\uparrow \downarrow$	2
4	Fe	26	$\uparrow \downarrow$	$\uparrow \downarrow$	$\uparrow \downarrow$	$\uparrow \downarrow$	$\uparrow \downarrow$	2
3	Co	27	$\uparrow \downarrow$	$\uparrow \downarrow$	$\uparrow \downarrow$	$\uparrow \downarrow$	$\uparrow \downarrow$	2
2	Ni	28	$\uparrow \downarrow$	$\uparrow \downarrow$	$\uparrow \downarrow$	$\uparrow \downarrow$	$\uparrow \downarrow$	2
0	Cu	29	$\uparrow \downarrow$	$\uparrow \downarrow$	$\uparrow \downarrow$	$\uparrow \downarrow$	$\uparrow \downarrow$	1



MAGNETISMO NEI SOLIDI

- Elementi del $4d$ e $5d$: il magnetismo dei solidi di questi elementi è influenzato dalla formazione del solido
- Gli elettroni sui livelli $4d$ e $5d$ sono “debolmente” legati ai nuclei → sovrapposizione con banda $5s$ e $6s$ → il m è nullo.



MAGNETISMO NEI SOLIDI

- III° caso: i livelli incompleti sono relativi a sottolivelli di tipo f ($4f$ e $5f$)
- La formazione del solido incide molto poco nel comportamento magnetico perché il sottolivello f è più fortemente trattenuto dal nucleo
- Il solido si può considerare costituito da atomi isolati

MATERIALI MAGNETICI



- 3 situazioni possibili:
 - Non ci sono i dipoli magnetici elementari (**materiale diamagnetico**) e il campo H esterno induce dipoli magnetici opposti ad H
 - Ci sono i dipoli magnetici elementari ma essi sono orientati a caso e solo in presenza di H esterno tendono ad allinearsi, ma ciò avviene in scarsa misura a causa di effetti termici e di interazioni con gli atomi circostanti (**materiale paramagnetico**)
 - I dipoli magnetici presenti su atomi adiacenti si allineano parallelamente anche su lunghe distanze ed anche in assenza di H esterno (**materiale ferromagnetico**)



FERROMAGNETISMO

- In pochi casi a bassa (relativa) T l'energia di interazione $\gg$ energia termica: ferromagnetismo con una χ_m circa 10^4 volte maggiore

- Θ = temperatura di Curie, trasformazione (reversibile) paramagnetico-ferromagnetico

- Legge di Curie-Weiss ($T > \Theta$):

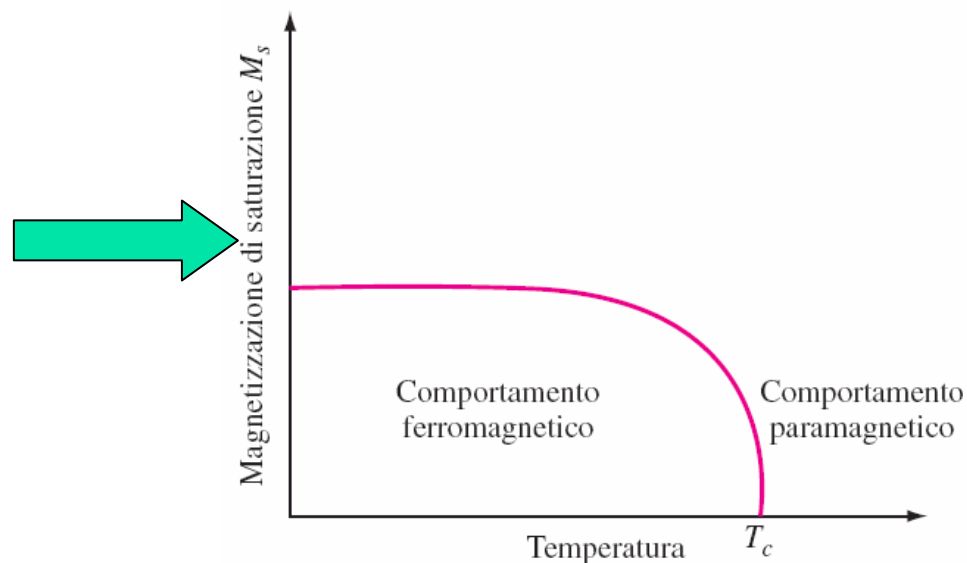
$$\chi_m = C/(T - \Theta)$$

Ferromagnetic compound	T_C/K
Fe	1043
Co	1388
Ni	627
Gd	293
Tb	220–230
Dy	87–176
CrO ₂	386
SmCo ₅	973
Nd ₂ Fe ₁₄ B	573



MATERIALI MAGNETICI

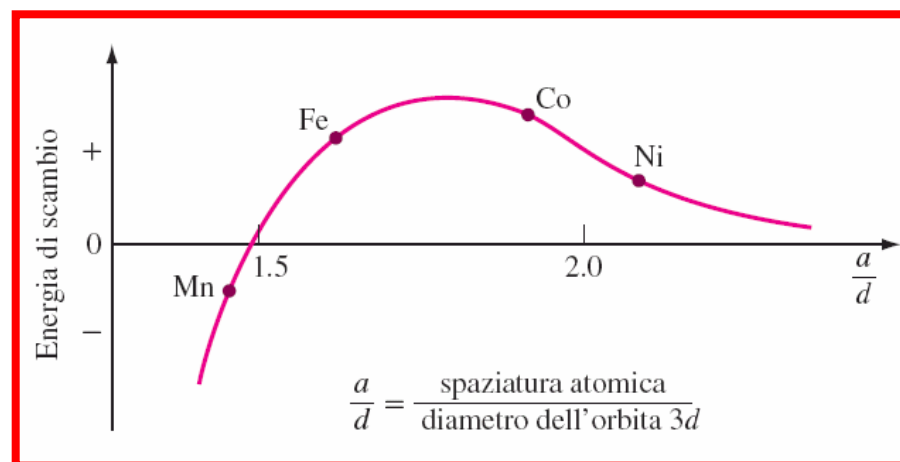
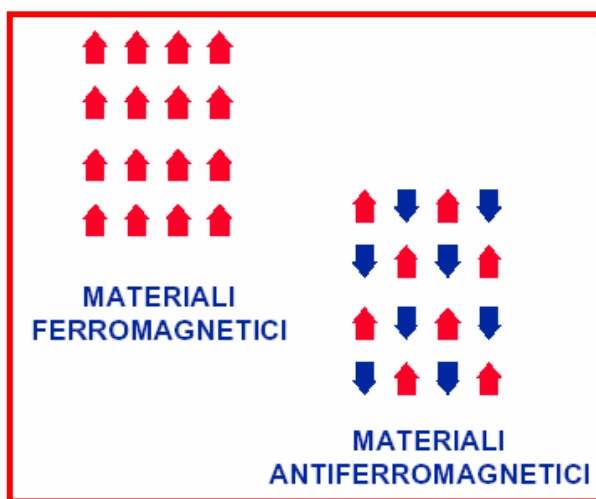
- Motivazioni quantistiche alla base del ferromagnetismo.
- Il momento magnetico di atomi adiacenti tende ad allinearsi (interazione di scambio) $\Rightarrow$ magnetizzazione complessiva presente anche in assenza di campo esterno
- La magnetizzazione massima varia con la temperatura





MATERIALI MAGNETICI

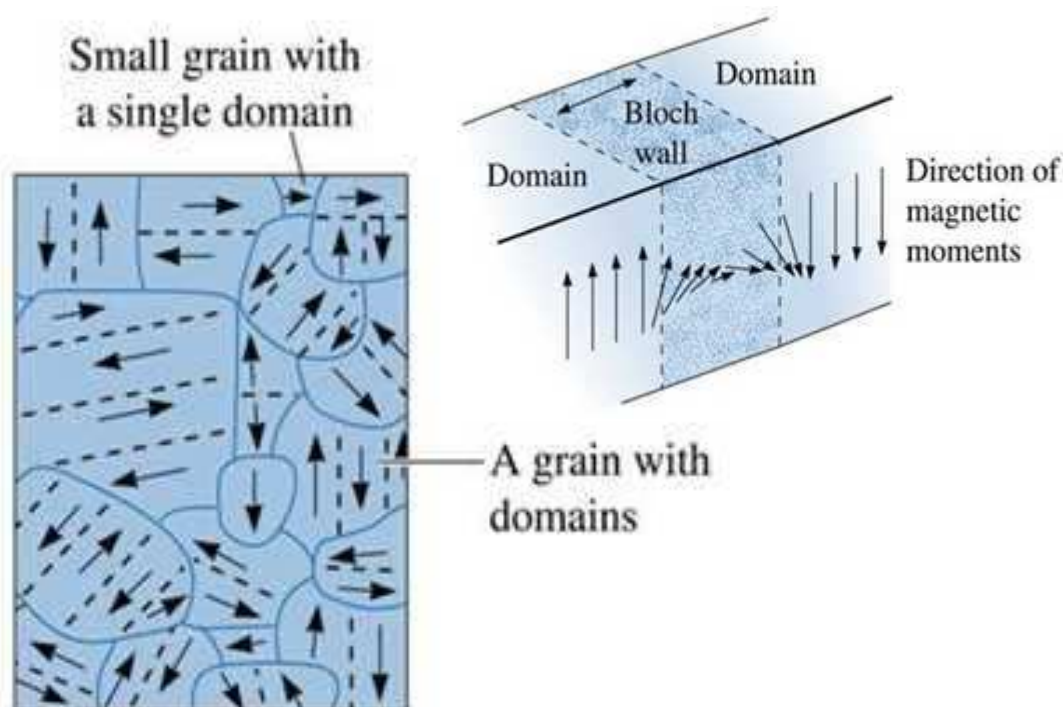
- Perché sono ferromagnetici solo Fe, Co, Ni e non ad esempio Mn?
- Esistono materiali nei quali l'allineamento dei dipoli adiacenti avviene in direzione opposta: **antiferromagnetismo** (Cr e Mn). Parametro fondamentale: rapporto tra distanza tra gli atomi e dimensione dell'atomo; con più elettroni sul 3d esso diventa più compatto sfavorendo il legame
- Situazione intermedia (Fe_3O_4): **ferrimagnetismo** (accoppiamento antiparallelo non sufficiente ad annullare totalmente la magnetizzazione spontanea)





MATERIALI MAGNETICI

Nei materiali ferromagnetici per $T < \Theta$ i momenti di dipolo magnetico si allineano uno all'altro in piccole regioni (analoghe ai grani cristallini ma per nulla coincidenti) dette domini magnetici o domini di Weiss.

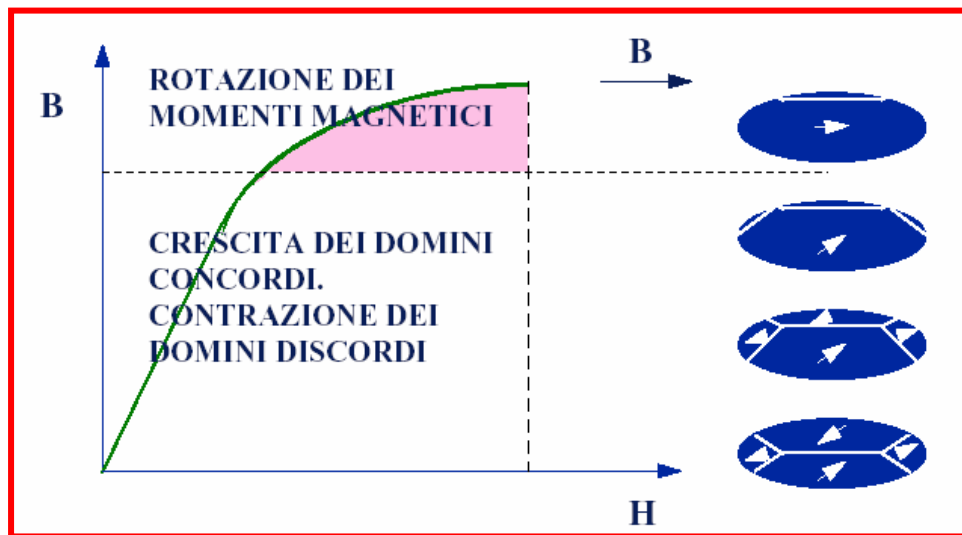


In ogni dominio la direzione del momento magnetico è la stessa per tutti i dipoli che vi appartengono. Ogni dominio ha una direzione diversa da quello adiacente. La somma vettoriale di tutti i momenti dei singoli domini può essere nulla: materiale non magnetizzato.



MATERIALI MAGNETICI

Applicando ad un materiale ferromagnetico non magnetizzato (riscaldandolo a $T > \Theta$ e poi raffreddando molto lentamente) un campo magnetico via via crescente: i domini più favorevolmente orientati rispetto al campo esterno H crescono a spese degli altri. Dopo la fase di crescita ha luogo la rotazione dei domini residui (zona della curva a bassa pendenza) fino a raggiungere la saturazione.

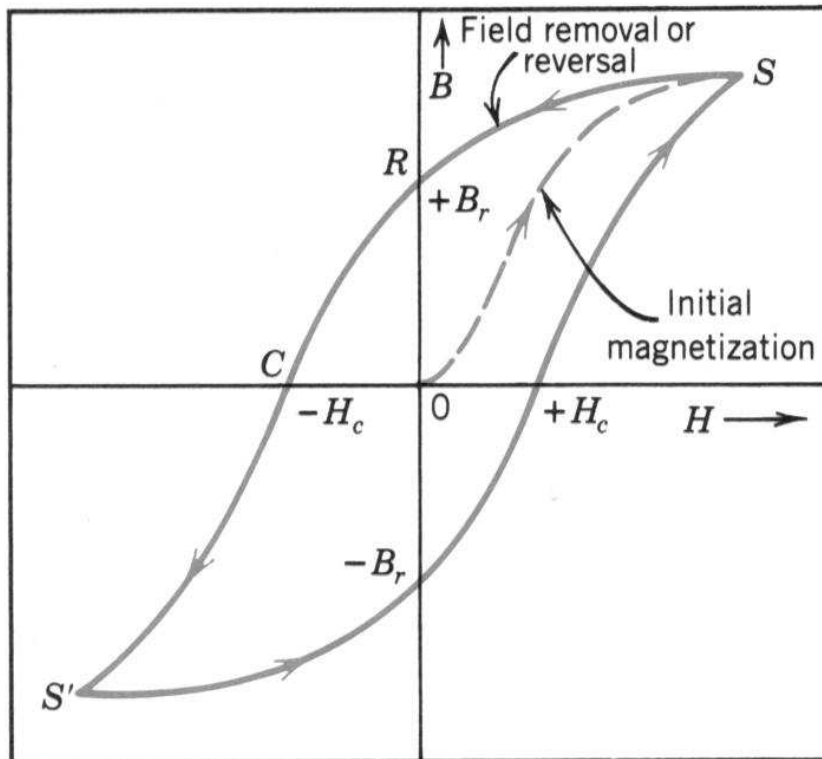


La forma, la dimensione e la struttura dei domini ferromagnetici derivano da considerazioni volte alla minimizzazione dell'energia globale connessa al sistema, che prevede normalmente moltissimi domini.

MATERIALI MAGNETICI: CICLO DI ISTERESI



Cosa succede quando viene smagnetizzato un materiale portato a saturazione? Ciclo di isteresi.



B_s induzione di saturazione

B_r induzione residua quando $H = 0$

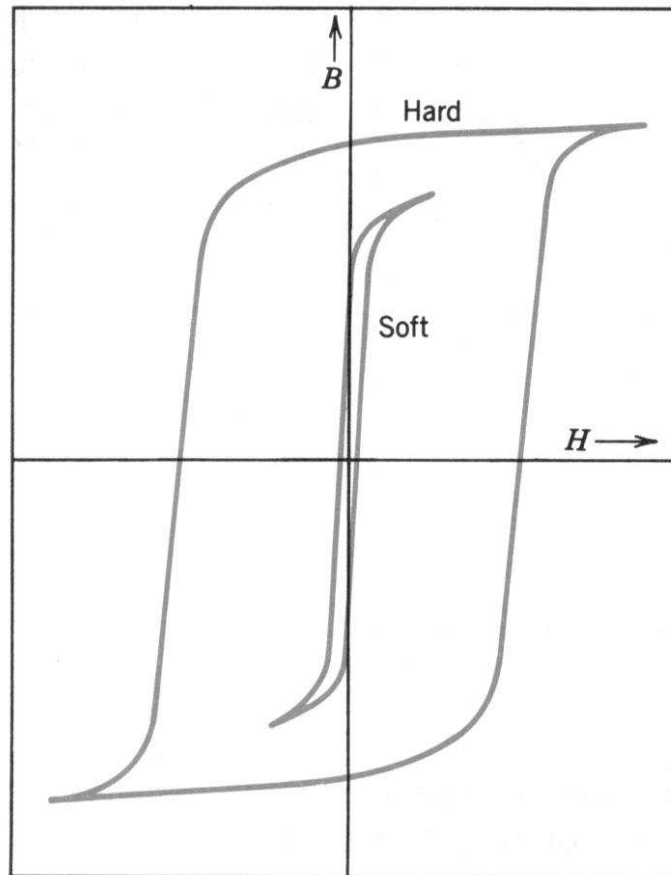
H_c campo coercitivo, ossia H necessario per avere $B = 0$

Il ciclo è simmetrico rispetto all'origine. L'area del ciclo è una misura dell'energia spesa (o lavoro compiuto) per un ciclo completo.

$[B] = T$; $[H] = A/m$; $[area] = TA/m$

$TA/m = Vsm^{-2}Am^{-1} = Wsm^{-3} = Jm^{-3}$

MATERIALI MAGNETICI DOLCI E DURI



- Magneti dolci: bassa forza coercitiva e area del ciclo piccola. Ideale: ciclo stretto e lungo (materiali soggetti a frequenti cicli di magnetizzazione-smagnetizzazione)
- Magneti duri: alta forza coercitiva ed elevata induzione residua (magneti permanenti)



MATERIALI MAGNETICI DOLCI

- Perdite energetiche nei magneti dolci:
 - perdite per isteresi
 - perdite per correnti parassite
- **Perdite per isteresi** → area del ciclo → energia spesa per orientare i domini (diventa calore). Gli ostacoli al movimento dei bordi dei domini aumentano tali perdite (inclusioni, impurezze, imperfezioni cristalline, deformazioni permanenti). L'aumento della frequenza di lavoro aumenta tali perdite.
- **Perdite per correnti parassite** → perdite per effetto Joule delle correnti circolanti nei magneti conduttori, quando il campo magnetico variabile produce tensioni transitorie al loro interno.

MATERIALI MAGNETICI DOLCI:

LEGHE FE-SI

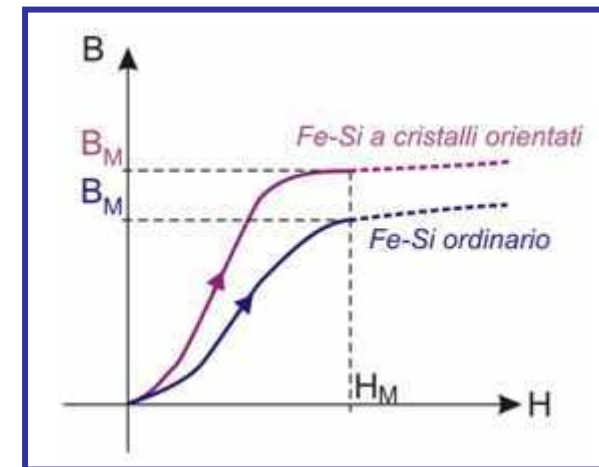
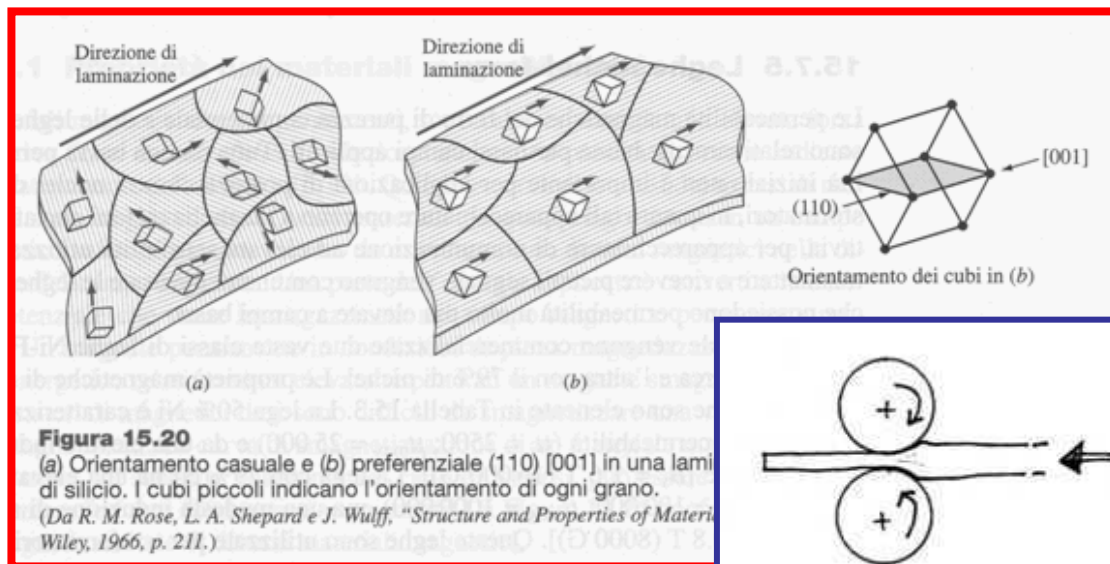


- Il materiale magnetico dolce più diffuso è dato dalle leghe Fe-Si, con Si al 3-4 %. È il materiale base per la realizzazione dei lamierini dei trasformatori. Il silicio è aggiunto perché esso:
 - aumenta la resistività del ferro;
 - diminuisce H_c e quindi diminuisce le perdite per isteresi;
 - diminuisce l'anisotropia cristallina e quindi aumenta la permeabilità;
- Effetti negativi del silicio:
 - oltre il 4% di Si la lega diventa troppo poco duttile
 - il silicio diminuisce B_s e Θ

MATERIALI MAGNETICI DOLCI: LEGHE FE-SI



- Ulteriori migliorie su tali leghe: realizzazione di lamierini separati ($\sim 300 \mu\text{m}$) da strati di isolante (eliminazione delle correnti parassite perpendicolari al lamierino) e orientamento dei grani mediante laminazione lungo la direzione $\{110\}\langle 001 \rangle$ (lamierini a grani orientati).



MATERIALI MAGNETICI DOLCI

VETRI METALLICI

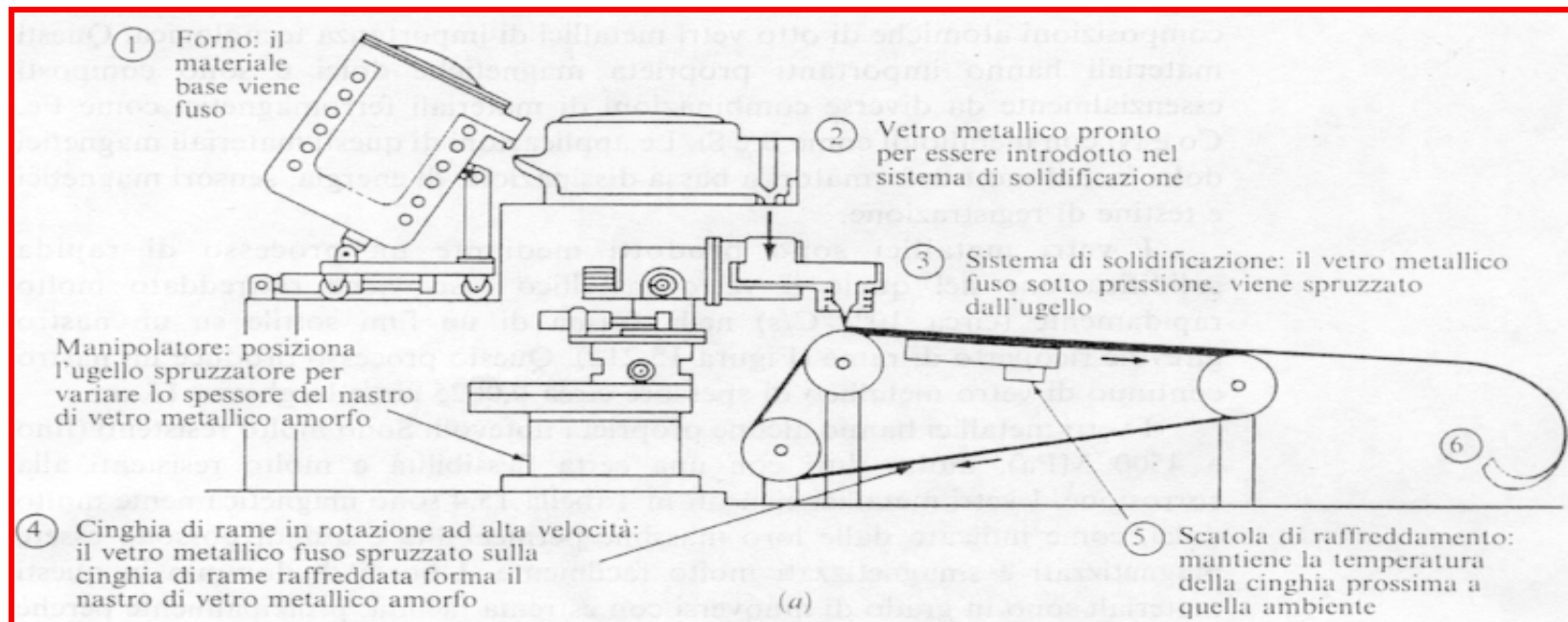


- Classe di materiali relativamente nuova per magneti dolci: i vetri metallici, leghe metalliche con struttura atomica amorfa.
- Evitare la cristallizzazione dei metalli è difficilissimo (struttura cristallina semplice, atomi tutti uguali); nei vetri metallici formulazione chimica complicata (esempio: $\text{Fe}_{72}\text{Co}_8\text{B}_{15}\text{Si}_5$), velocità di raffreddamento a partire dal fuso elevatissima (10^6 °C/s), materiale in forma di film sottile (25 μm di spessore).
- Alcuni pregi dei vetri metallici: resistenti meccanicamente, duri, molto resistenti alla corrosione, sono molto facilmente magnetizzabili e smagnetizzabili perché non ci sono bordi grano. Le perdite per isteresi possono essere il 70 % in meno rispetto ai materiali tradizionali.

MATERIALI MAGNETICI DOLCI: VETRI METALLICI



Schema del processo di rapida solidificazione per i vetri metallici.

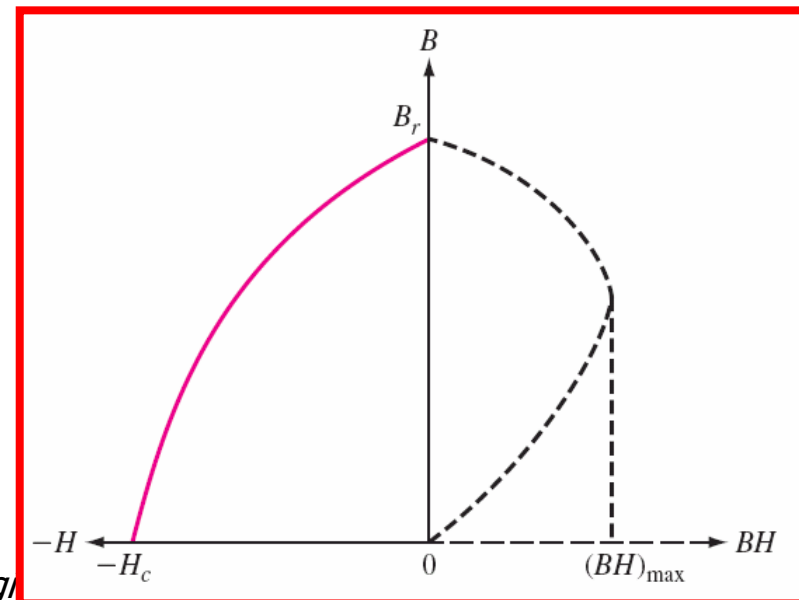
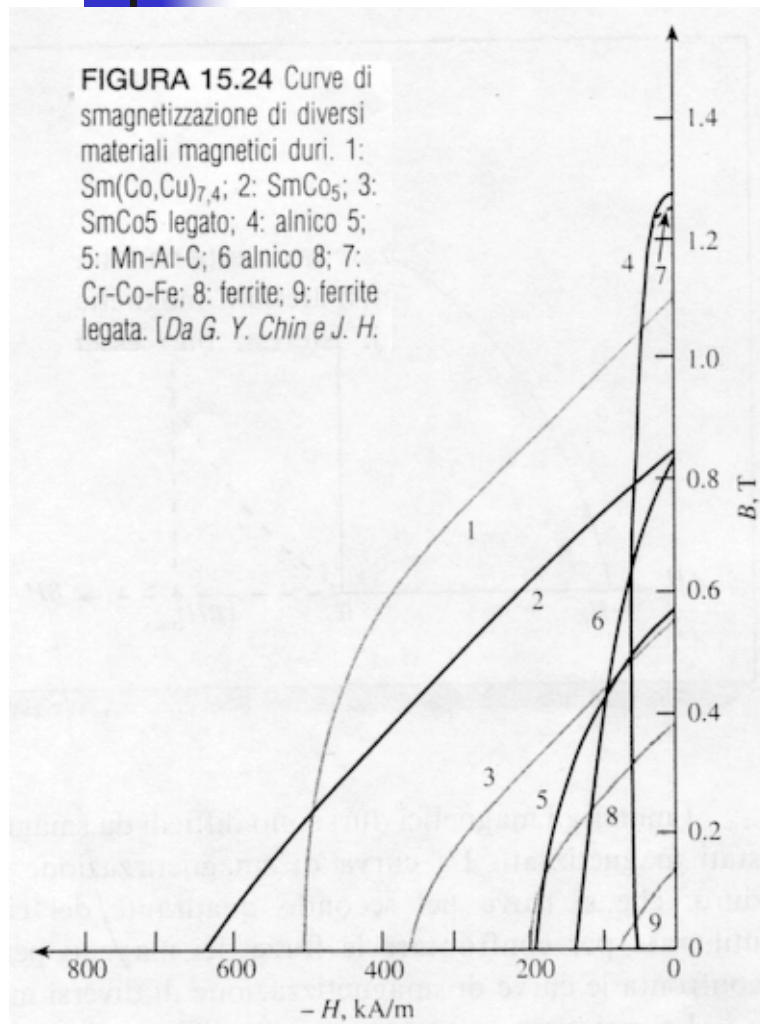


MATERIALI MAGNETICI DURI



I materiali magnetici duri sono caratterizzati da elevata forza coercitiva, elevata induzione residua e grande area del ciclo. Essi sono utilizzati come magneti permanenti.

La parte più importante del ciclo è la curva di smagnetizzazione (II° Quadrante) da cui si determina il $(BH)_{\max}$.



MATERIALI MAGNETICI DURI



TABELLA 15.5 Alcune proprietà magnetiche di materiali magnetici duri

Materiale e composizione	Induzione residua B_r , T	Forza coercitiva H_c , kA/m	Massimo prodotto energetico $(BH)_{\max}$, kJ/m ³
Alnico 1, 12 Al, 21 Ni, 5 Co, 2 Cu, resto Fe	0.72	37	11.0
Alnico 5, 8 Al, 14 Ni, 25 Co, 3 Cu, resto Fe	1.28	51	44.0
Alnico 8, 7 Al, 15 Ni, 24 Co, 3 Cu, resto Fe	0.72	150	40.0
Terra rara-Co, 35 Sm, 65 Co	0.90	675 – 1200	160
Terra rara-Co, 25.5 Sm, 8 Cu, 15 Fe, 1.5 Zr, 50 Co	1.10	510 – 520	240
Fe-Cr-Co, 30 Cr, 10 Co, 1 Si, 59 Fe	1.17	46	34.0
MO·Fe ₂ O ₃ (M = Ba, Sr) (ferrite dura)	0.38	235 – 240	28.0

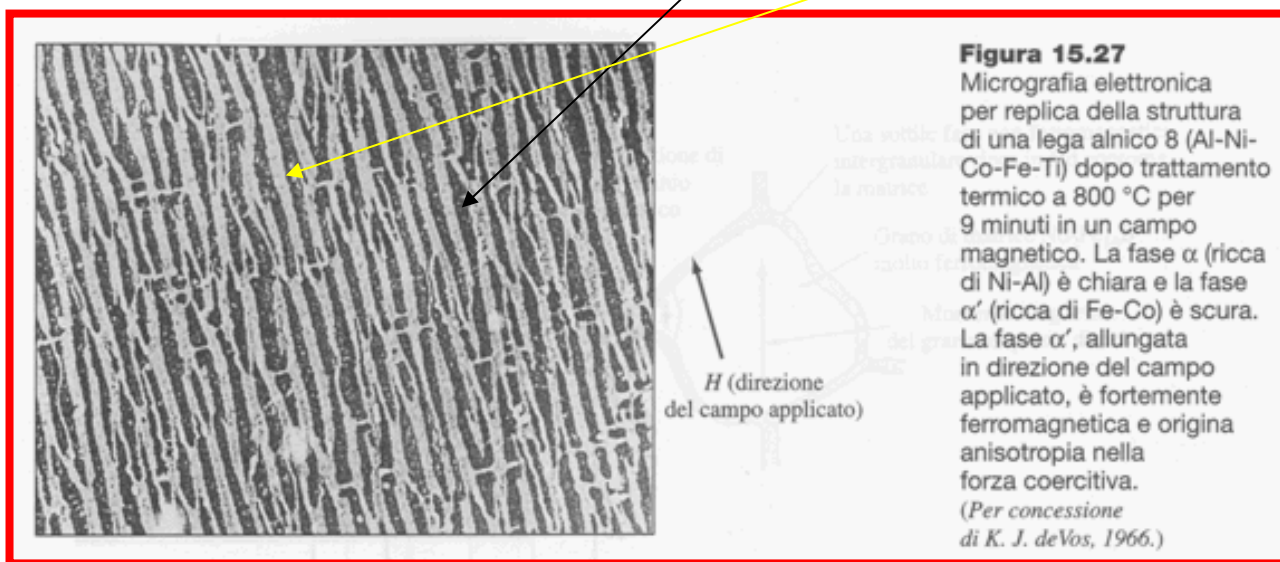
Fonte: G. Y. Chin and J. H. Wernick, "Magnetic Materials, Bulk", vol. 14: "Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology", 3d 3d., Wiley, 1981, p. 686.

Leghe alnico (AlNiCo) costituite da ferro con elementi di lega dati da Al, Ni e Co in varia concentrazione. Sono i magneti duri più diffusi. Le varie leghe sono numerate da 1 a 9. Sono materiali fragili e quindi si preparano o per fusione o per sinterizzazione delle polveri.



MATERIALI MAGNETICI DURI

- Ciclo di una lega AlNiCo:
 - Solubilizzazione $T > 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ (fase BCC)
 - Decomposizione a $750 - 850\text{ }^{\circ}\text{C}$ in due fasi α (Al-Ni poco magnetica) e α' (Fe-Co fortemente magnetica)

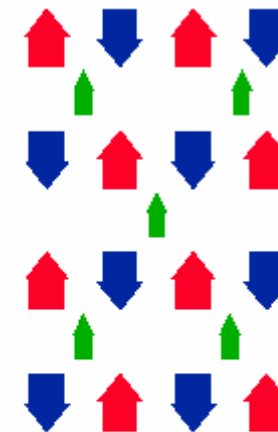


MATERIALI FERRIMAGNETICI



Il ferrimagnetismo è tipico di alcuni materiali ceramici dove ioni differenti hanno momento magnetico allineato in modo antiparallelo, con il risultato che c'è un momento magnetico netto in una direzione. Questi materiali sono spesso indicati con il termine di ferriti. Molte ferriti derivano dal composto Fe_3O_4 che era il minerale magnetico dell'antichità.

Il comportamento ferrimagnetico deriva per le ferriti dalla loro particolare struttura cristallina a spinello.

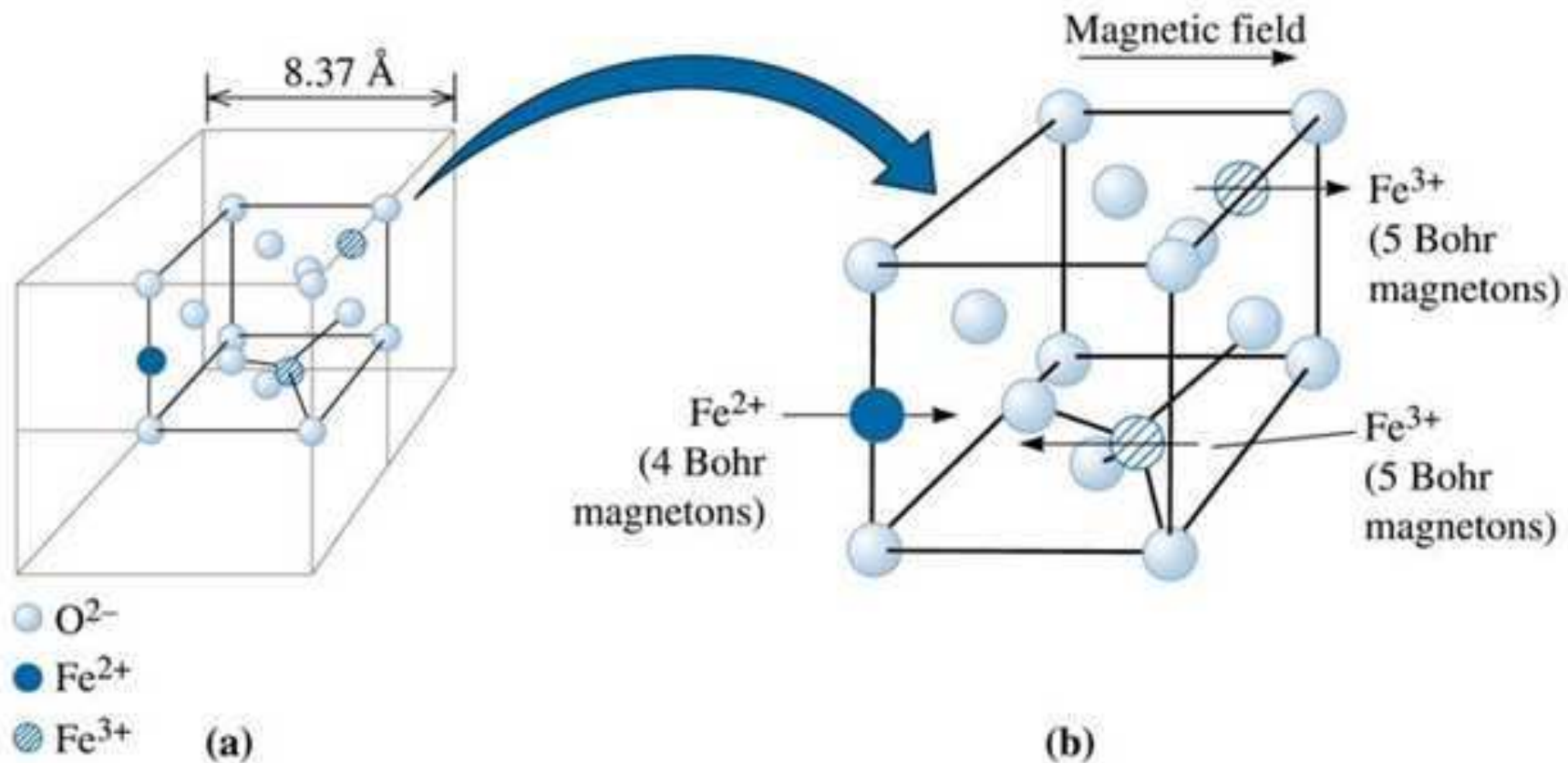


**MATERIALI
FERRIMAGNETICI**

MATERIALI FERRIMAGNETICI



Il comportamento ferrimagnetico deriva per le ferriti dalla loro particolare struttura cristallina a spinello.



MATERIALI FERRIMAGNETICI



La struttura cristallina delle ferriti è detta a spinello inverso (derivata da quella dello spinello MgAl_2O_4) con la presenza di ioni bivalenti M^{+2} , ioni trivalenti M^{+3} e anioni ossigeno. La cella elementare è costituita da 8 celle FCC con O^{-2} nei siti FCC (32 ioni totali), 8 ioni M^{+3} nei siti ottaedrici e 8 ioni M^{+3} nei siti tetraedrici, 8 ioni M^{+2} nei siti ottaedrici. Il momento magnetico degli ioni in siti ottaedrici e siti tetraedrici è antiparallelo. Il momento magnetico netto è legato agli ioni bivalenti.

In ogni cella elementare sono contenute 8 unità di formula della ferrite.

MATERIALI FERRIMAGNETICI



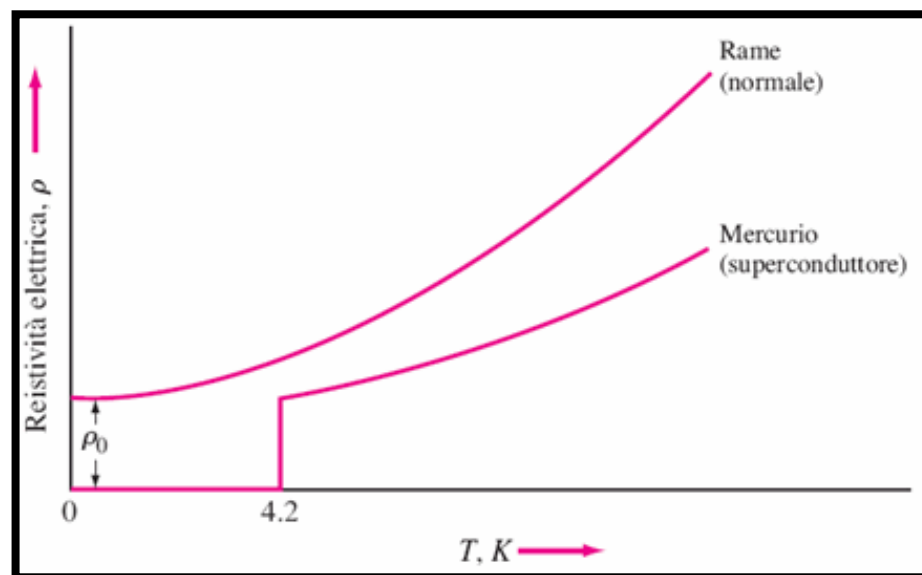
Le ferriti dolci industriali sono in realtà miscele di ferriti. Le più importanti sono le ferriti al Ni-Zn ($\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$) e al Mn-Zn ($\text{Mn}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$).

Si preparano miscelando le polveri di Fe_2O_3 con polveri di ossidi o carbonati degli altri metalli. Seguono i passaggi tipici di preparazione di un prodotto ceramico.



MATERIALI SUPERCONDUTTORI

Materiali che mostrano resistività nulla al di sotto di una temperatura particolare detta **Temperatura di transizione critica T_c** . Soltanto alcune sostanze mostrano questo particolare comportamento.





MATERIALI SUPERCONDUTTORI

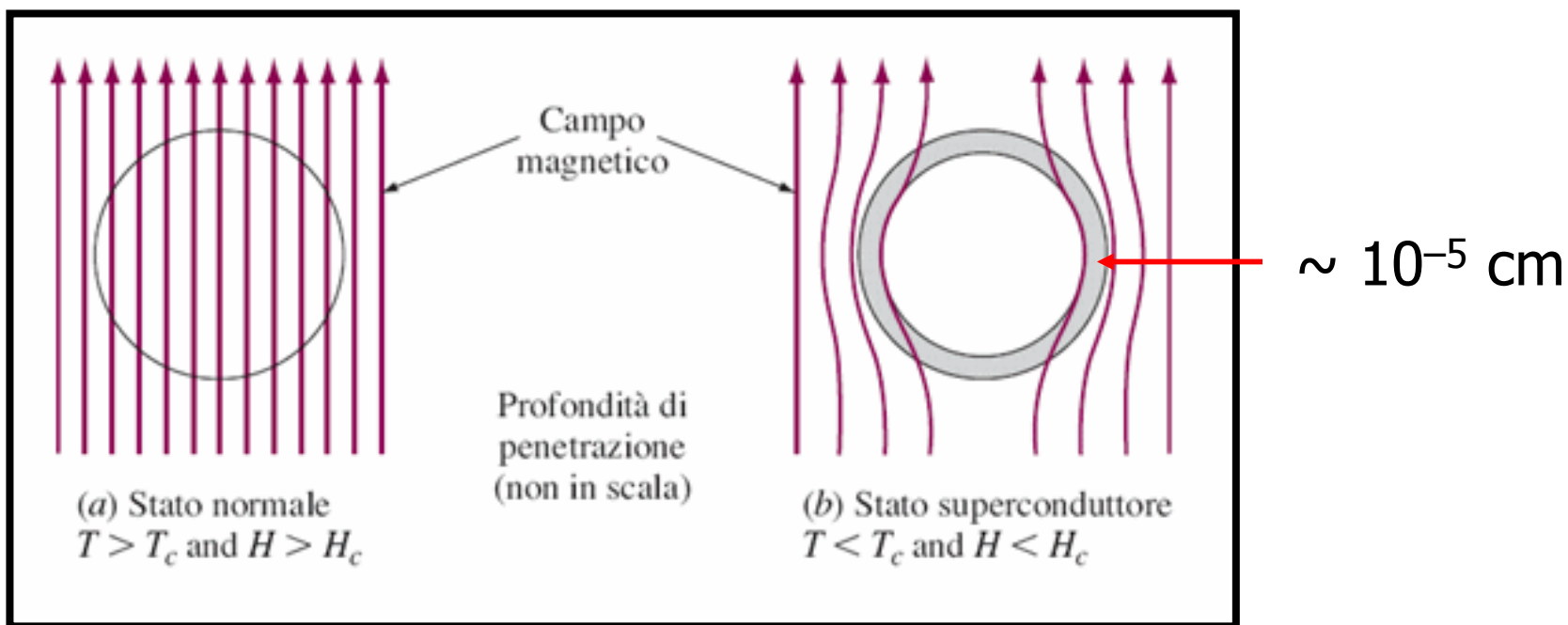
Elementi superconduttori

[illegible]



MATERIALI SUPERCONDUTTORI

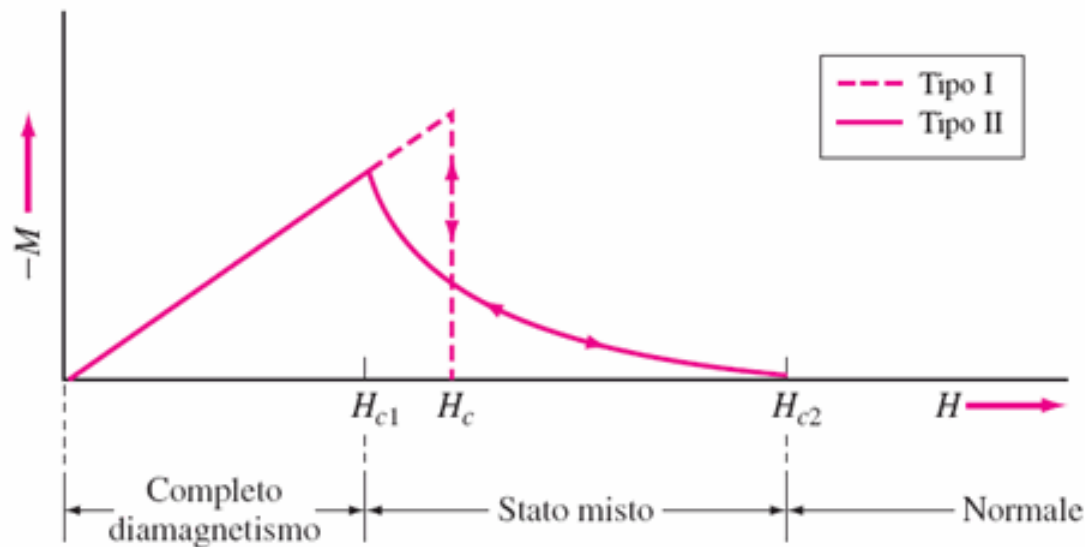
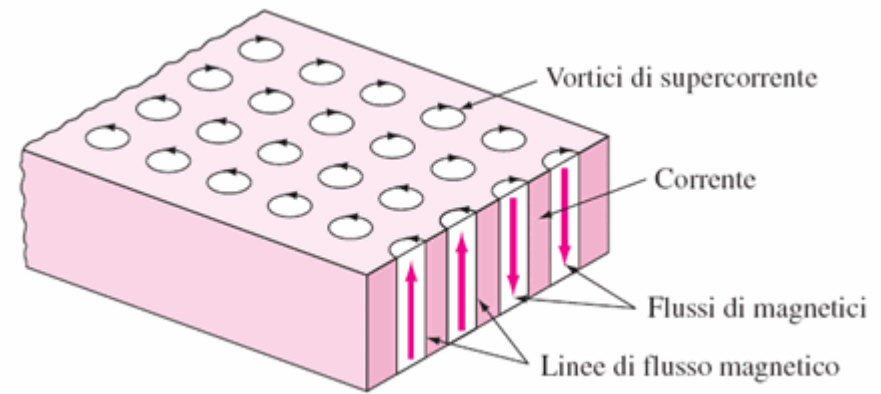
Effetto Meissner: **diamagnetismo perfetto.**



SUPERCONDUTTORI DI TIPO I e DI TIPO II



I materiali di Tipo I hanno valori di H_c troppo bassi per applicazioni pratiche.



PROPRIETÀ DI ALCUNI SUPERCONDUTTORI



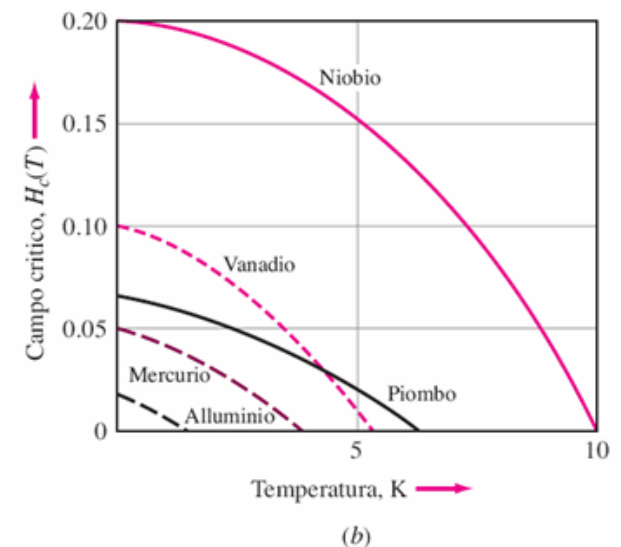
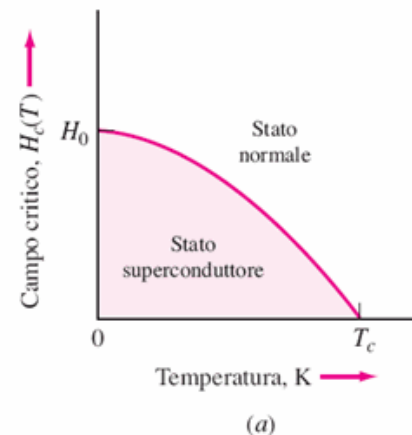
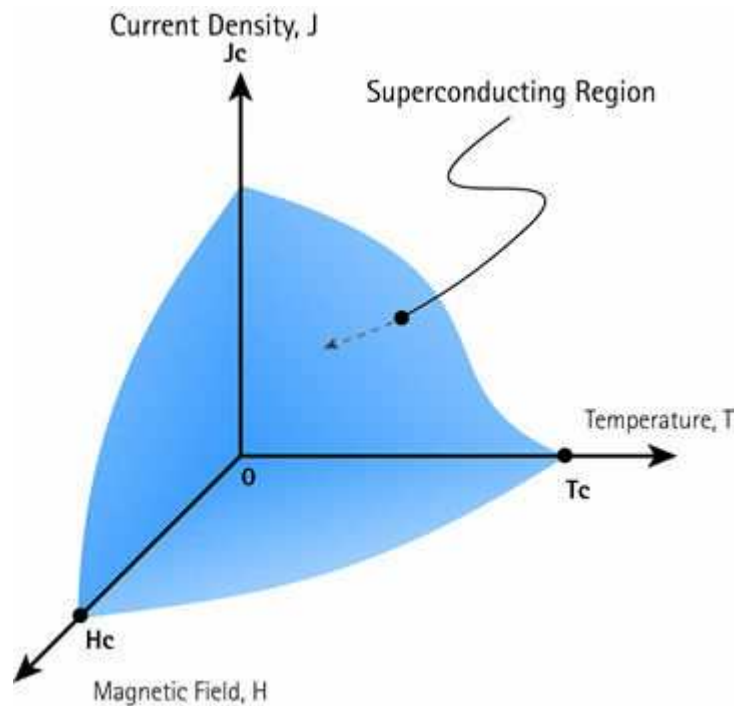
Sostanza	T_c (K)	H_c (T)	Tipo di materiale
Hg	4.15	0.0411	Metallo
Nb	9.26	0.198	Metallo
Pb	7.19	0.0803	Metallo
Nb ₃ Sn	18.05	26.4	Intermetallico
Nb ₃ Ge	23.2	36.4	Intermetallico
V ₃ Ga	16	23.9	Intermetallico
NbTi	11	12	Lega metallica
YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x}	92	~200	Ceramico

DIAGRAMMA DI STATO DEI SUPERCONDUTTORI



Effetto della Densità di Corrente: J_c .

Diagramma di stato della superconduttività.





TEORIA DEI SUPERCONDUTTORI

Comprensione teorica del fenomeno: teoria BCS del 1957 (J. Bardeen, L.N. Cooper, J.R. Schrieffer), premi Nobel nel 1972.

Teoria poggiata completamente sulla meccanica quantistica, cioè la superconduttività non può essere spiegata con le leggi della meccanica classica.

La teoria BCS fondamentalmente spiega la superconduttività con:

- interazioni tra reticolo ed elettroni di conduzione
- i portatori di carica sono coppie di elettroni (coppie di Cooper)

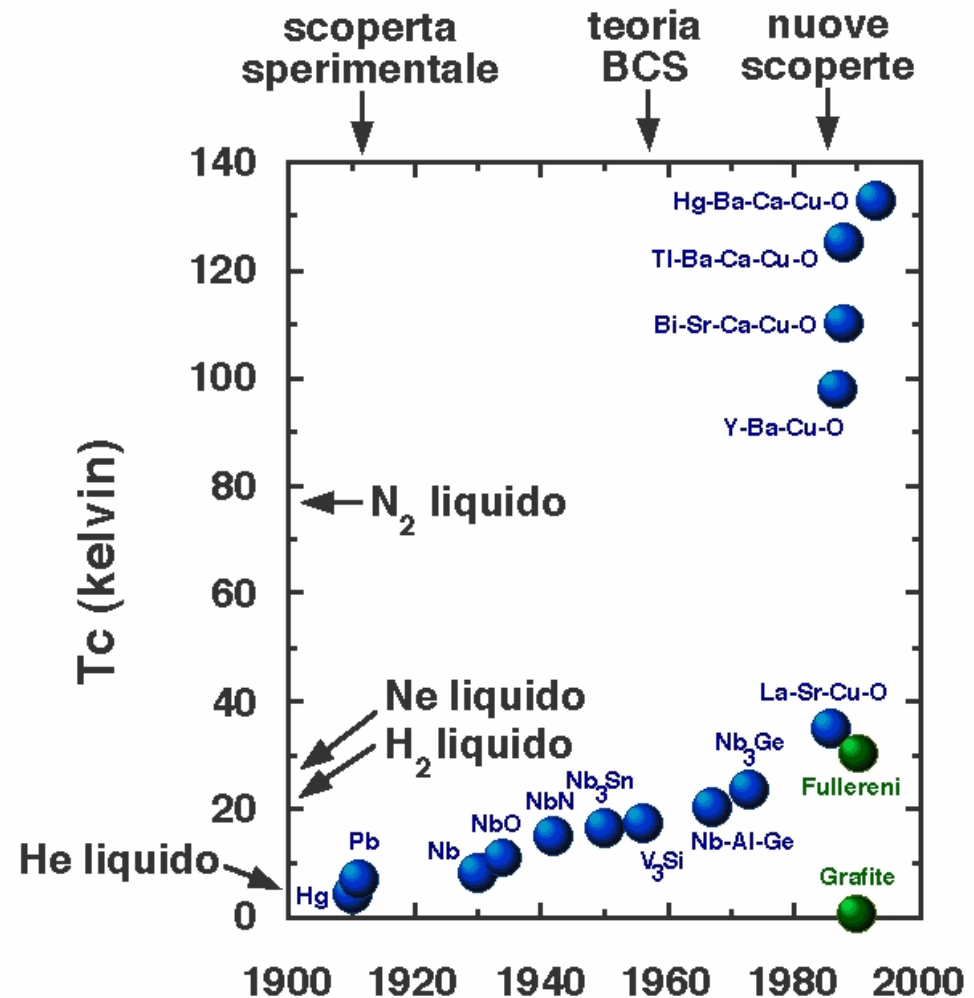
EVOLUZIONE STORICA DEI SUPERCONDUTTORI



Sviluppo storico della superconduttività.

Fino agli anni 70 erano noti superconduttori solo a base di metalli con una T_c massima di circa 23 K.

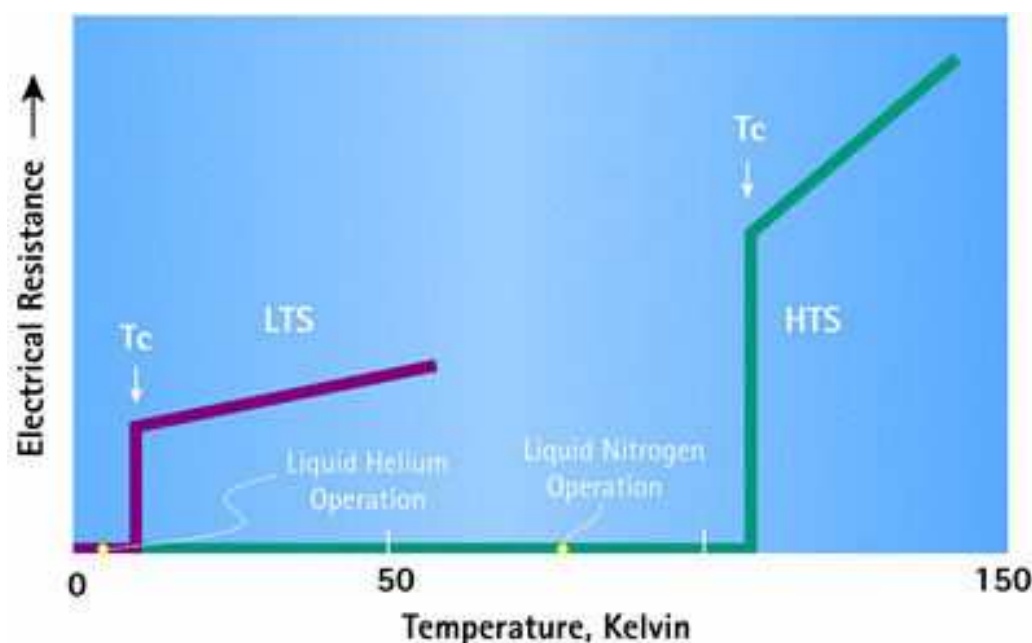
“Rivoluzione” del 1986: superconduttività a 35 K nel composto $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ scoperta da Bednorz e Muller, che diede il via ad una mole di ricerche scientifiche mai vista in tutta la scienza.





SUPERCONDUTTORI

I superconduttori vengono classificati in due grosse categorie:
di bassa T_c (convenzionali), utilizzabili in He liquido, e di alta T_c ,
utilizzabili in N_2 liquido.



SUPERCONDUTTORI CONVENZIONALI



Sono quelli utilizzati a livello industriale per le poche applicazioni oggi ancora disponibili per i superconduttori.

I più importanti sono:

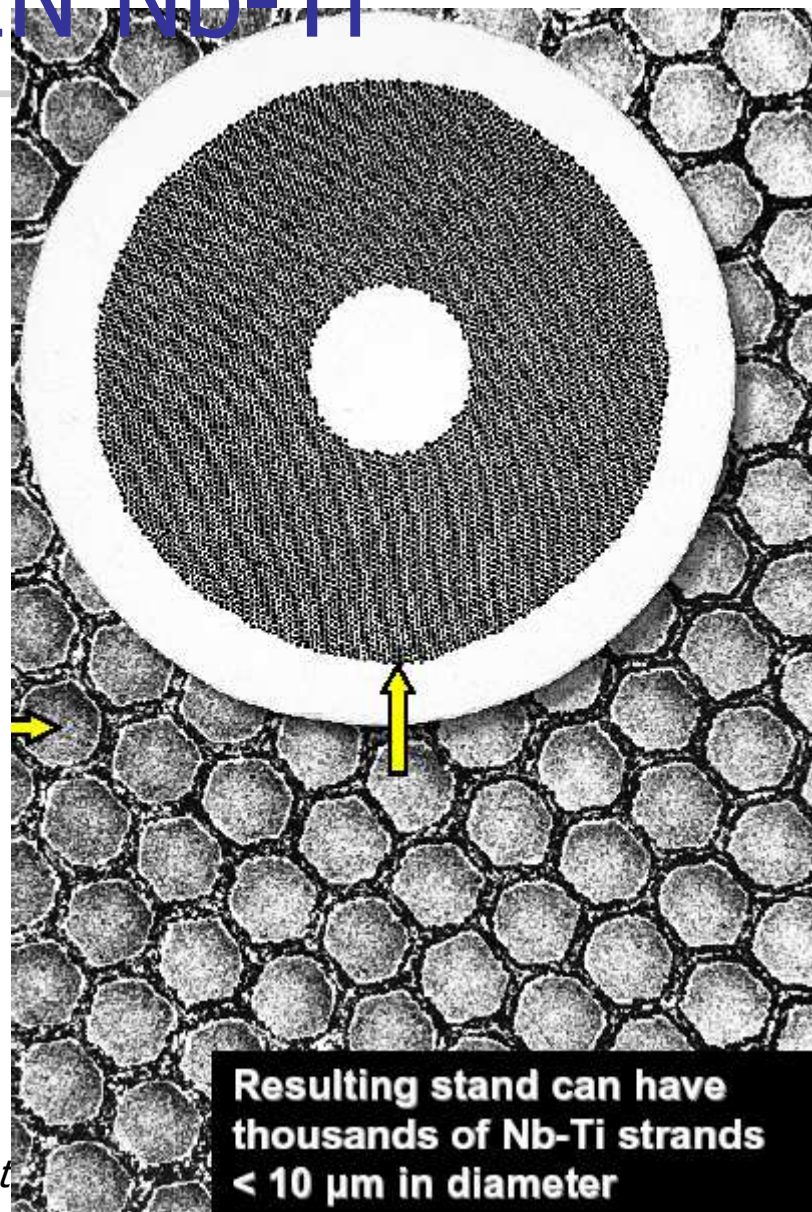
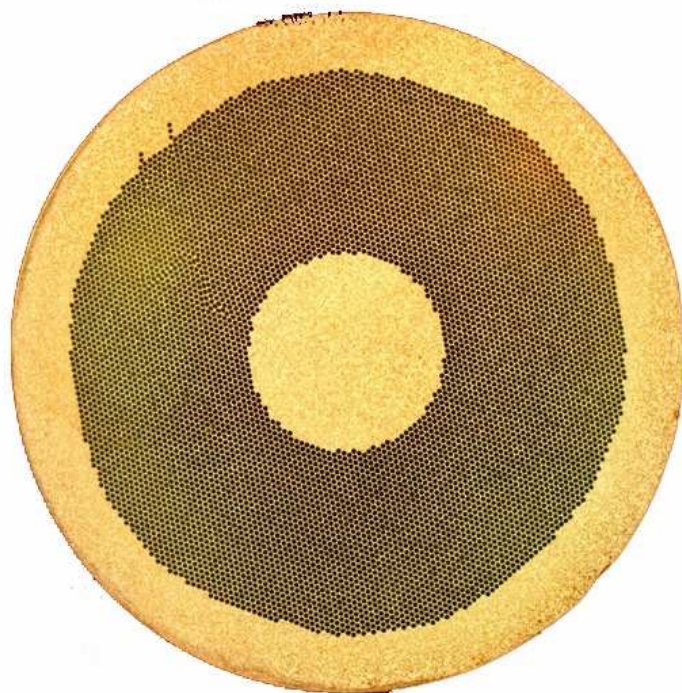
a) lega Nb-Ti (in assoluto il più utilizzato superconduttore)

b) composto intermetallico Nb_3Sn



MICROGRAFIA DEL CAVO MULTIFILAMENTARE IN Nb-Ti

Microstruttura del cavo multifilamentare. Il Cu è circa 1.5 volte il NbTi per ragioni di sicurezza e stabilità



SUPERCONDUTTORE CONVENZIONALE Nb-Ti



Il Nb-Ti è il superconduttore di minore costo oggi disponibile; si stima che la richiesta annuale sia di circa 1000 ton (rame compreso) di cavi per apparecchiature di risonanza magnetica e altrettante per gli acceleratori di particelle.

Altra applicazione spettacolare per i superconduttori convenzionali è il treno a levitazione magnetica (già operante su una breve tratta in Giappone)



http://www.rtri.or.jp/rd/maglev/html/english/maglev_frame_E.html

Record di velocità: 581
km/h



SUPERCONDUTTORI DI ALTA T_c

Sono stati scoperti recentemente (1987) e sono costituiti da ossidi misti di 3 o più elementi chimici diversi, tra i quali è sempre presente il rame (cuprati superconduttori). Un elemento comune di tutti questi composti risiede nella particolare struttura cristallina, derivata dalla struttura perovskitica (CaTiO_3).

Ne esistono varie famiglie:

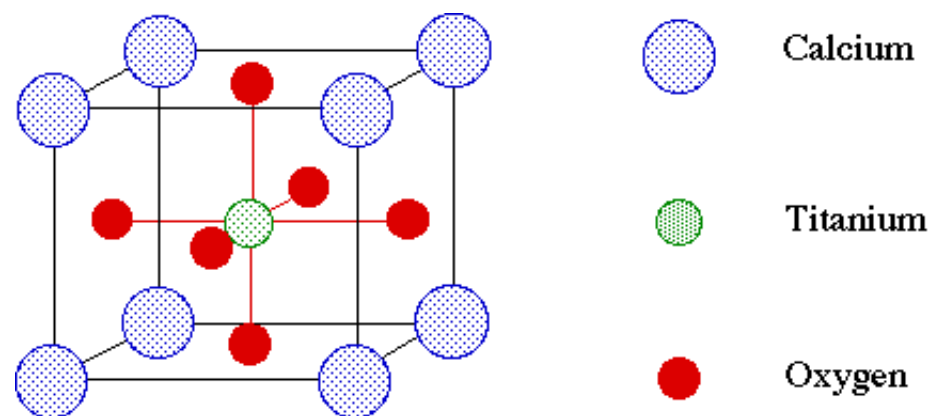
YBCO ($\text{Y}_2\text{O}_3 + \text{BaO} + \text{CuO}$)

BSCCO ($\text{Bi}_2\text{O}_3 + \text{SrO} + \text{CaO} + \text{CuO}$)

TBCCO ($\text{Tl}_2\text{O}_3 + \text{BaO} + \text{CaO} + \text{CuO}$)

HBCCO ($\text{HgO} + \text{BaO} + \text{CaO} + \text{CuO}$).

Il record di T_c è detenuto dal composto $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$ con $T_c = 133 \text{ K}$





SUPERCONDUTTORI DI ALTA T_c

Non esiste ancora una teoria per la comprensione del fenomeno nei superconduttori ceramici di alta T_c .

Aspetti acclarati:

- i "super-elettroni" sono ancora Coppie di Cooper;
- le coppie di Cooper si muovono nei piani CuO_2 .

Forte anisotropia nel comportamento di questi materiali.

