



Laboratori Nazionali di Frascati



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

- Ente pubblico che promuove, coordina ed effettua la ricerca scientifica nel campo della **fisica subnucleare, nucleare ed astroparticellare**
- nonché la ricerca e lo **sviluppo tecnologico** necessari alle attività in tali settori,
- in stretta collaborazione con l'Università e nel contesto della collaborazione e del confronto internazionale



1951

4 Sezioni universitarie
Milano, Torino, Padova, e Roma

1957

Laboratori Nazionali di
Frascati

Legnaro



20 Sezioni

9 Gruppi collegati

4 Laboratori Nazionali

Laboratori del Sud



Gran Sasso

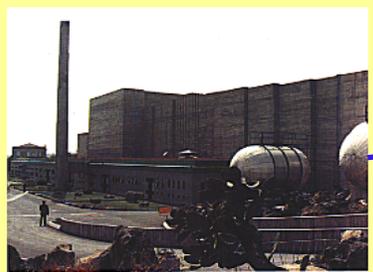


Frascati



Cascina

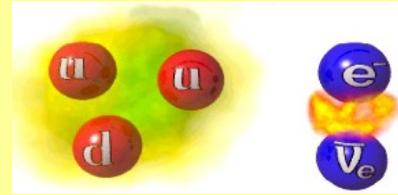
EGO



Catania L.N.S

Attività dei LNF

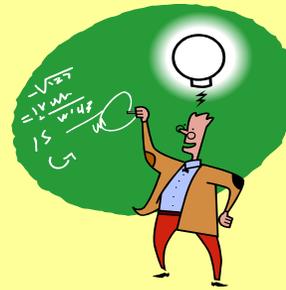
Studi sulla struttura intima della materia



Ricerca di onde gravitazionali



Elaborazione di modelli teorici



Studio e sviluppo di tecniche acceleratrici

Sviluppo e costruzione di rivelatori di particelle



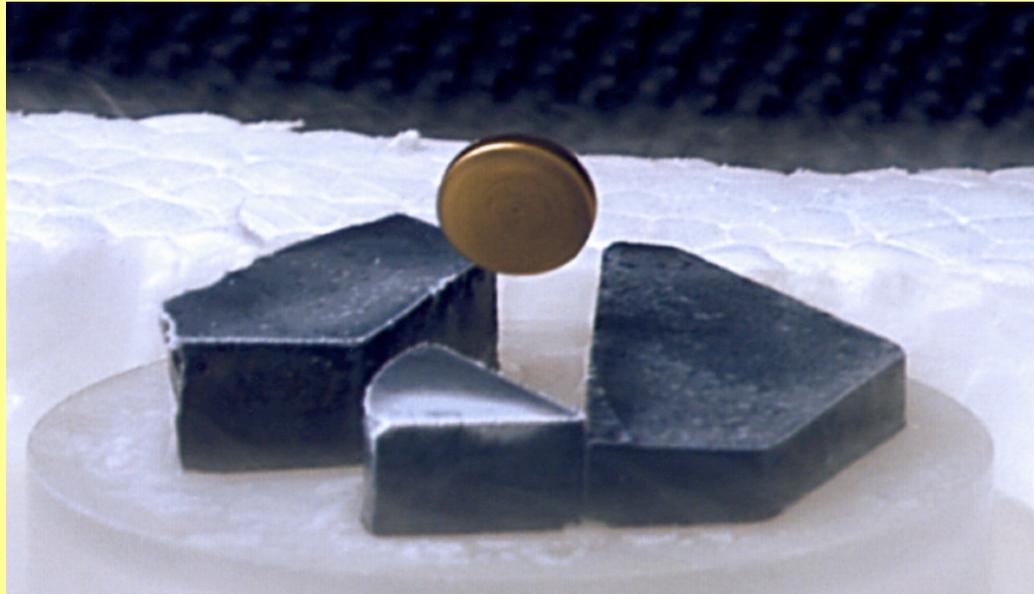
Studi di materiali e ricerche biomediche con luce di sincrotrone



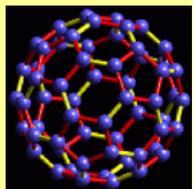
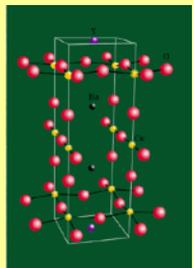
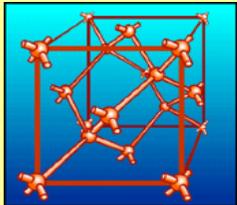
Sviluppo e supporto di sistemi di calcolo e reti



Il fenomeno della Superconduttività

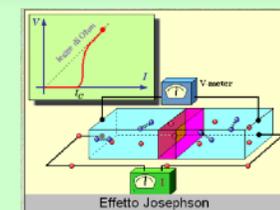
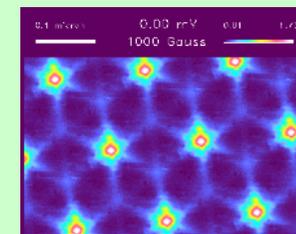
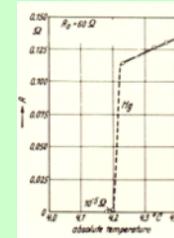


Dr. Daniele Di Gioacchino
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Laboratori Nazionali di Frascati



- ◆ **La Superconduttività è uno stato della materia con eccezionali proprietà elettriche e magnetiche.**
- ◆ **Nasce da un comportamento collettivo degli elettroni (supercorrenti & flussoni magnetici).**
- ◆ **Evidenzia un comportamento della fisica quantistica nei solidi.**
- ◆ **E' uno dei rarissimi effetti quantistici macroscopici ed ha applicazioni tecnologiche: dispositivi & apparati**

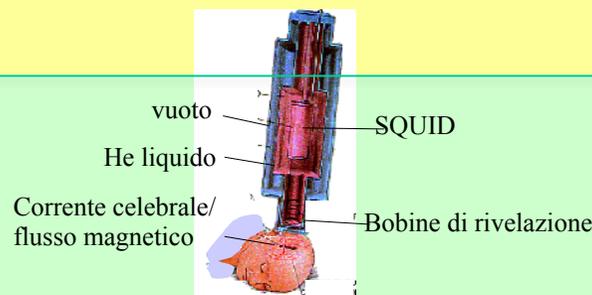
Fu scoperto da Onnes nel 1911



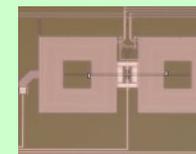
Treni veloci a levitazione magnetica



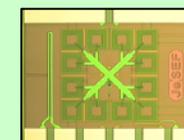
Potenti Magneti per MNR



Analisi biomagnetiche con SQUID



SQUID

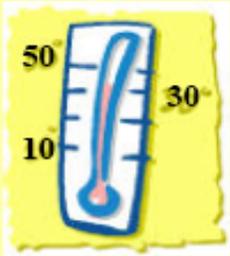


Giunzione Josephson

Come si caratterizza?

1. La superconduttività è un fenomeno che accade a bassa temperatura :

- ✓ la sostanza raffreddata sotto una temperatura critica (T_c) presenta questo nuovo stato



Il liquefattore di elio con cui Onnes il 10 Luglio 1908 fece diventare liquido il gas di elio a -269 C

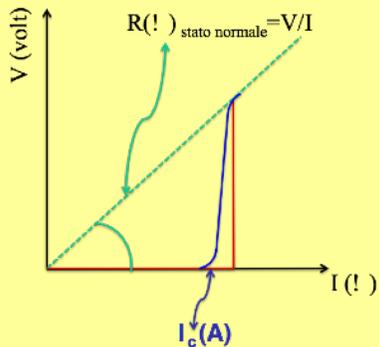
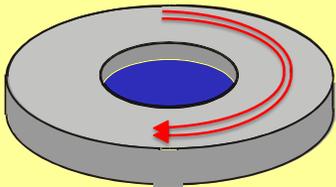
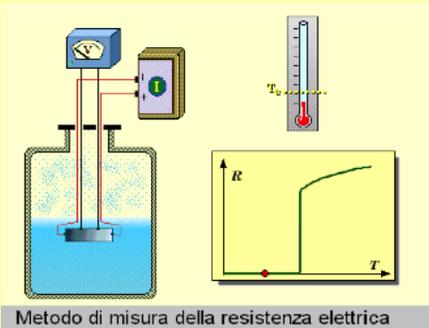


**Quel giorno
il suo laboratorio
divenne il luogo
più freddo della
Terra!!**

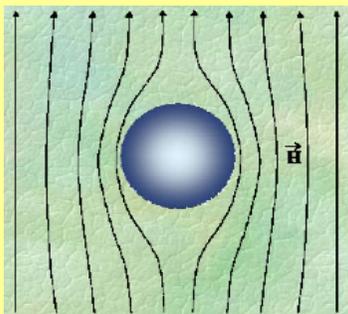
Come si caratterizza?

2. E' una fase della materia dove la elettricità fluisce senza resistenza:

- ✓ Si può trasportare corrente elettrica a qualsiasi distanza senza perdite.
- ✓ Se la corrente scorre in un filo chiuso nello stato superconduttore fluirà per sempre senza perdite misurabili
- ✓ Esiste una corrente critica (I_c).
Sopra tale valore la materia torna nello stato di conducibilità elettrica normale



Come si caratterizza?

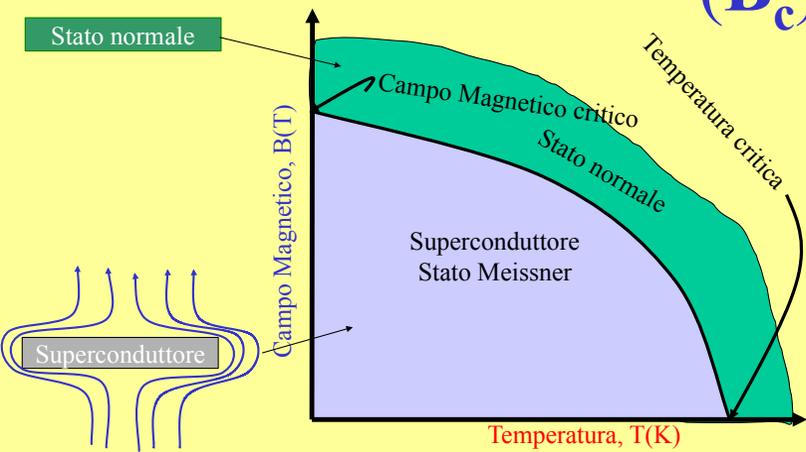


3. Il campo magnetico è espulso: diamagnetismo perfetto (effetto Meissner)

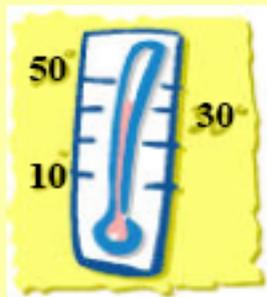


Levitazione magnetica di un magnetino (0.1 Tesla) su pezzi di YBCO materiale superconduttore ceramico. Foto LNF-INFN

✓ Esiste un valore critico del campo magnetico (B_c) sopra il quale il materiale torna normale

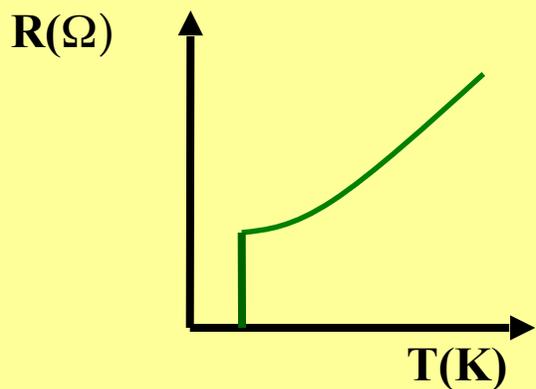


Osserviamo queste proprietà più da vicino



1. La superconduttività è un fenomeno a bassa temperatura

forse non è proprio così. . .



2. I superconduttori sono una fase della materia dove la elettricità fluisce senza resistenza

.... in certi casi non è così esatto



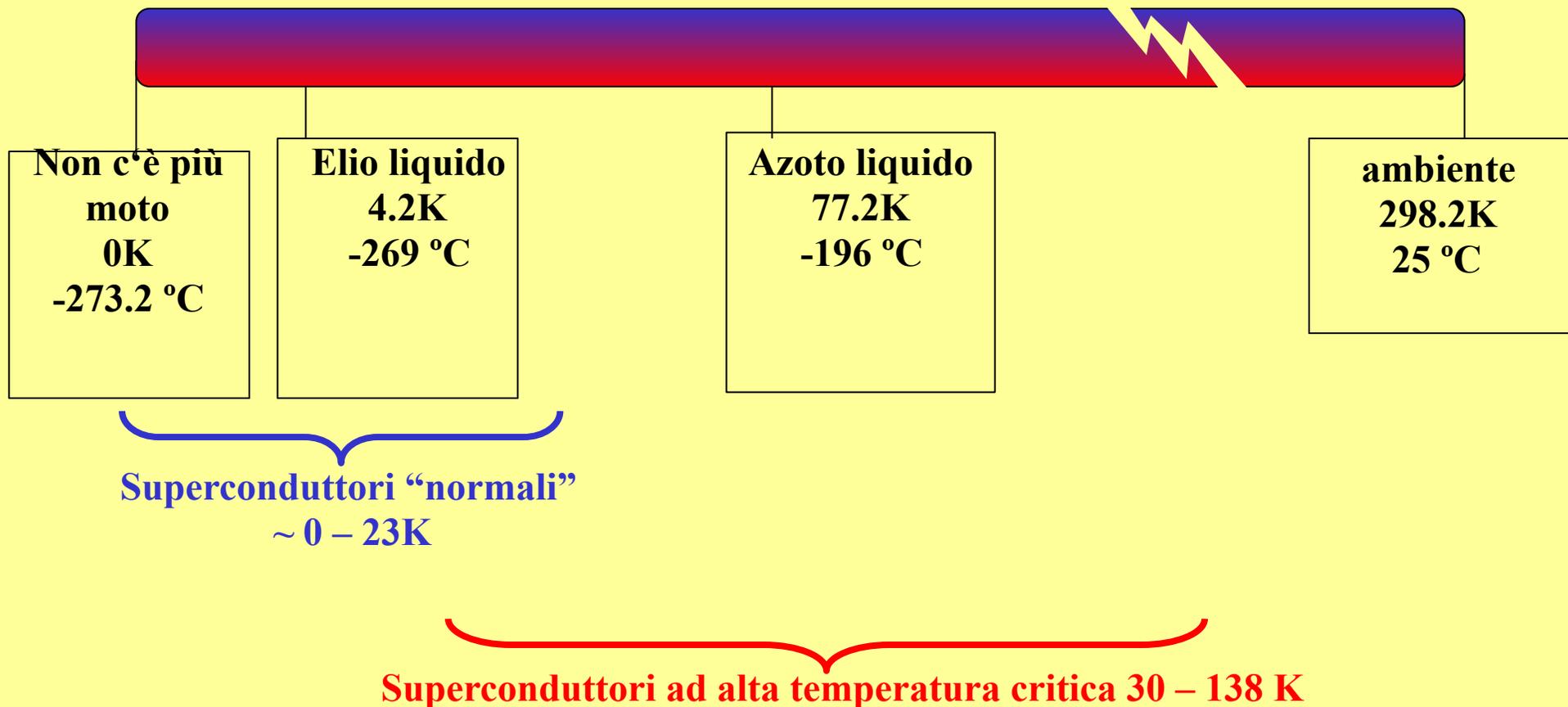
3. Superconduttori in presenza di un campo magnetico lo espellono completamente

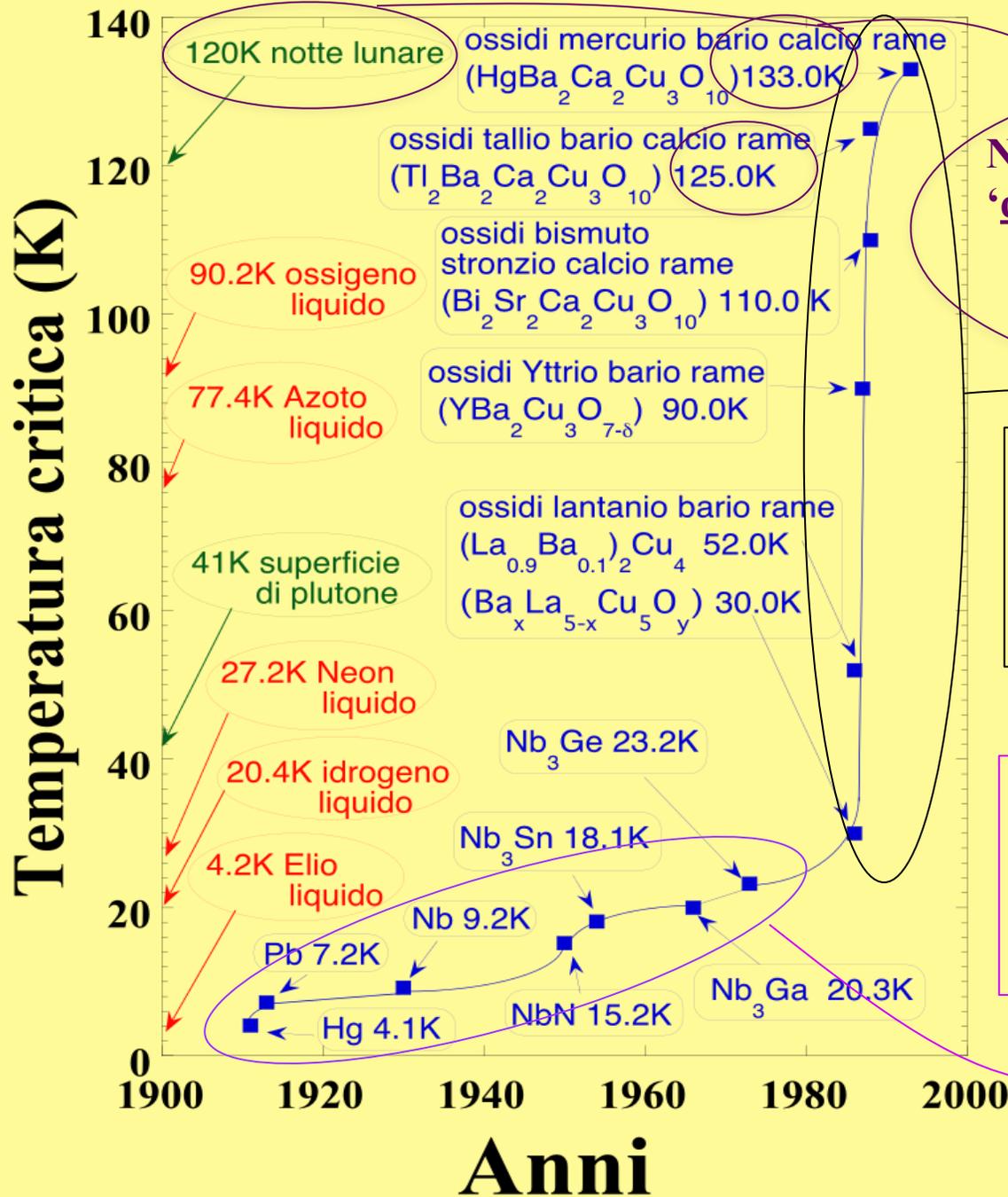


(effetto Meissner)

Talvolta in parte

1. La superconduttività accade a ~~bassa~~ temperatura *una relativamente*





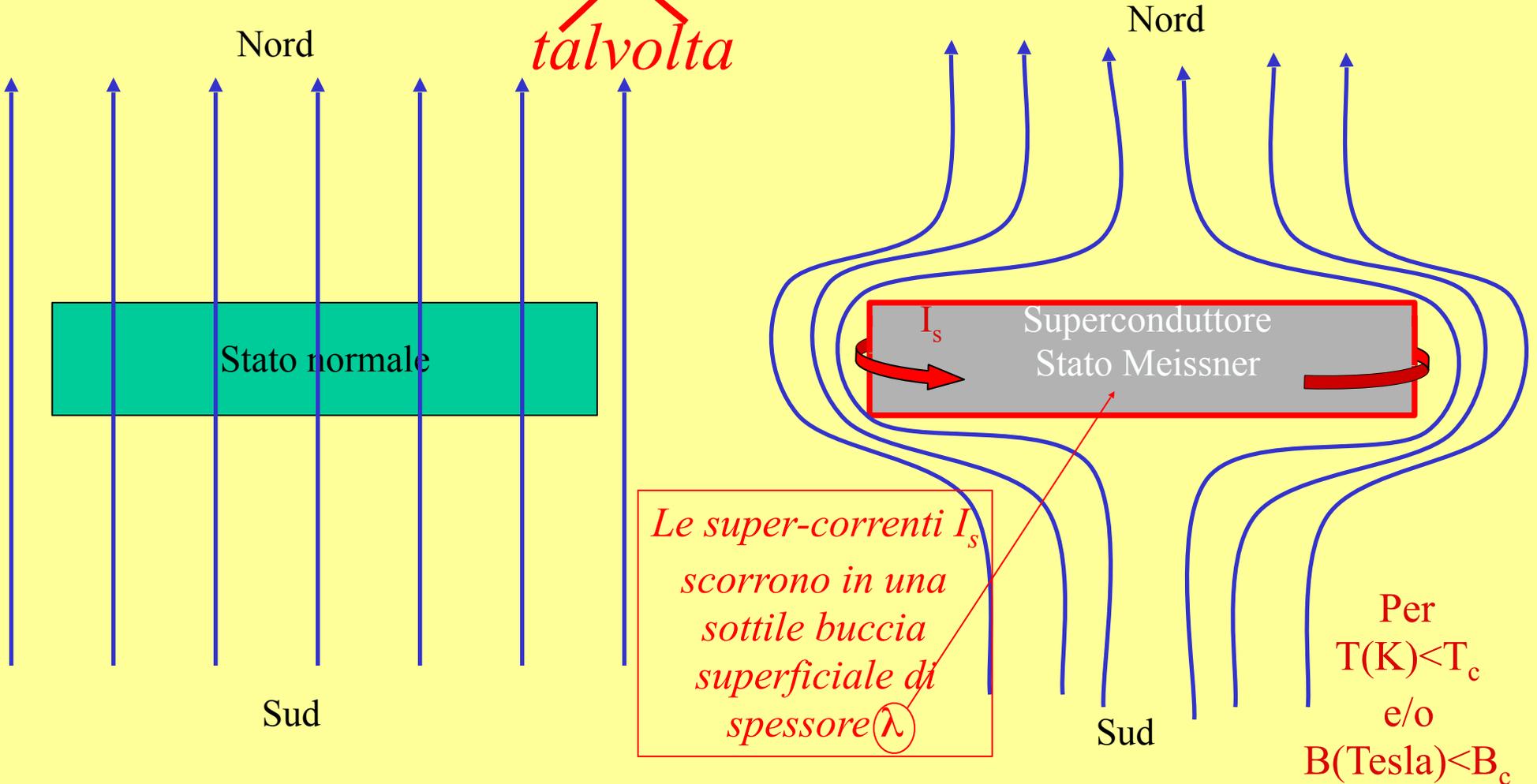
Non abbiamo bisogno di criogenia in 'dark side of the moon'

Superconduttori alta temperatura critica (ceramici)

Superconduttori Bassa temperatura critica (metallici)

.....parliamo ora della 3^a proprietà (prima della 2^a seconda)

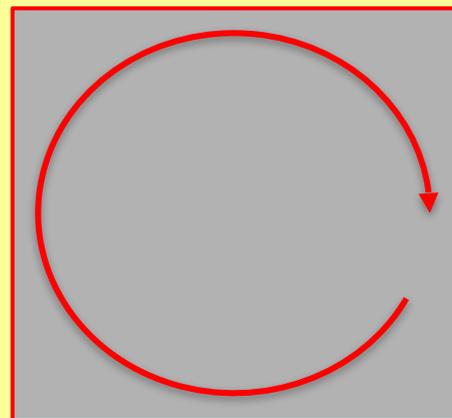
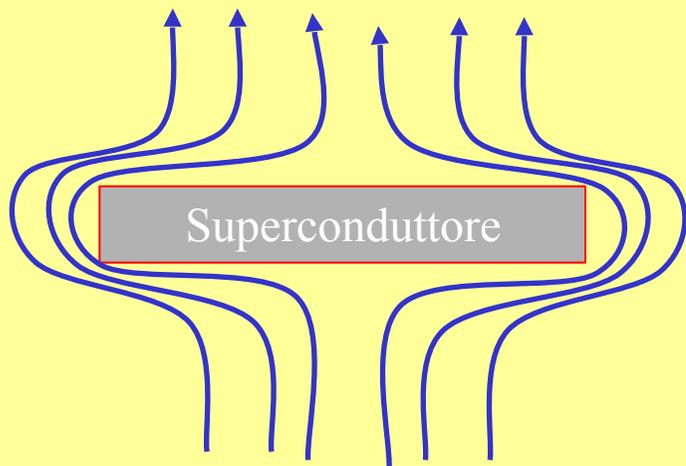
3. I Superconduttori espellono il campo magnetico



talvolta

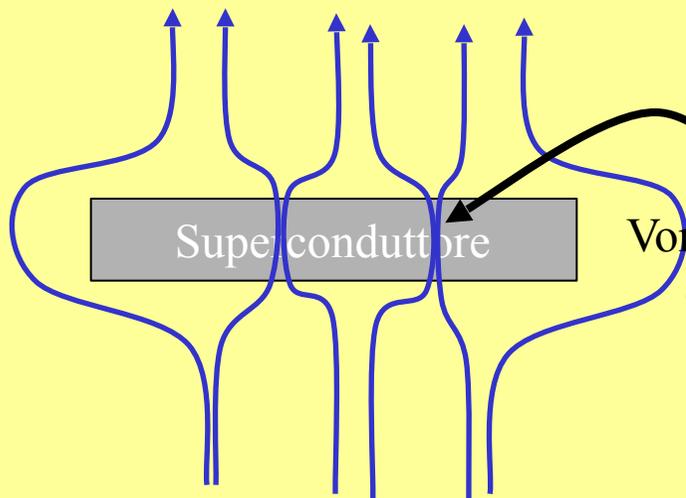
3. I Superconduttori *espellono* il campo magnetico

Vista dall'alto

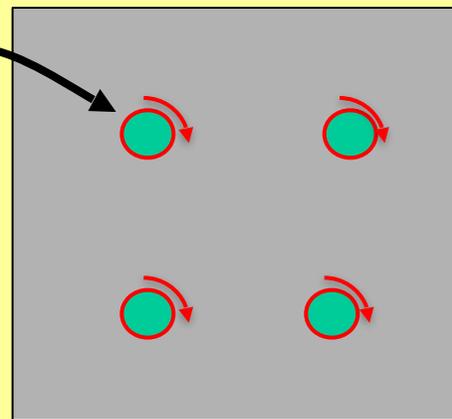


Superconduttori
di tipo I

*..ma esistono dei superconduttori dove c'è uno stato intermedio con zone miste:
una parte del campo magnetico va attraverso il materiale ed è forzata essere quantizzata*



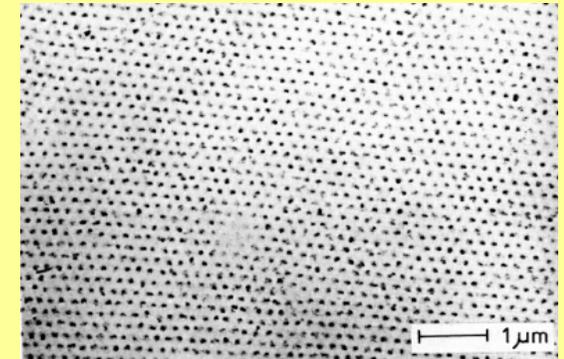
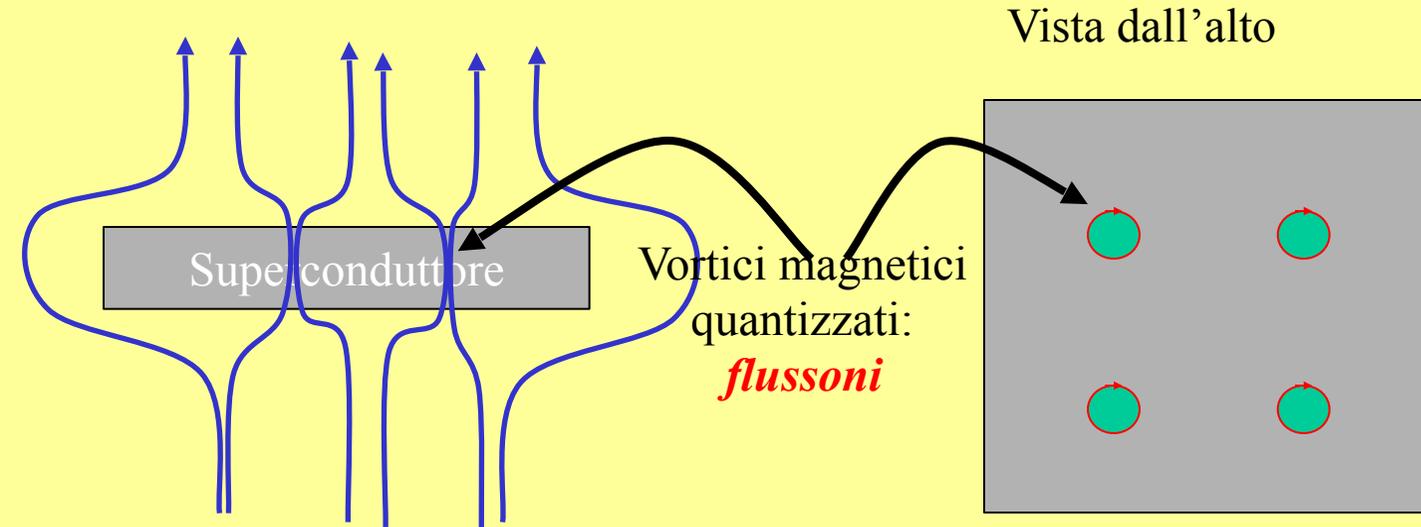
Vortici magnetici
quantizzati



Superconduttori
di tipo II

3. Lo stato di parziale espulsione del campo magnetico dei Superconduttori di II tipo

Un esperimento semplice
...straordinario quanti di
flusso in evidenza!



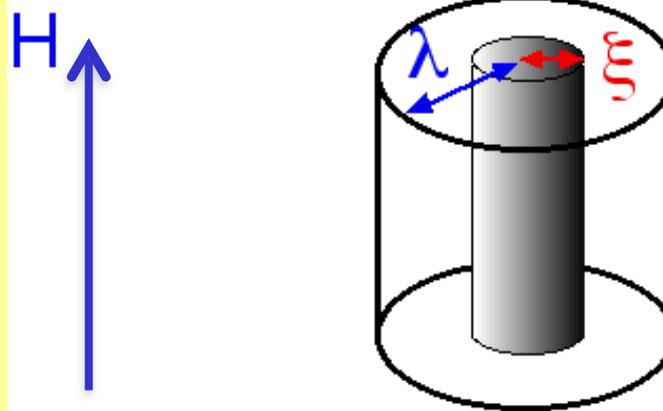
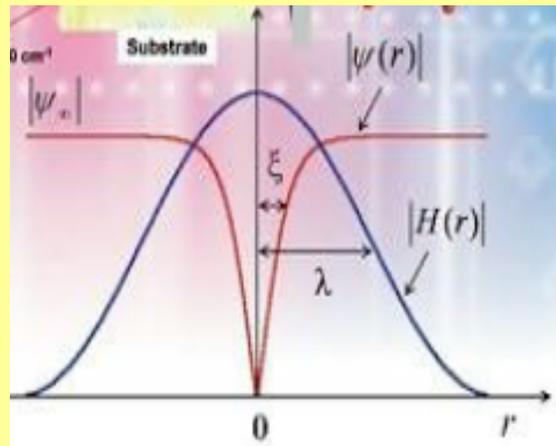
Reticolo di vortici in Niobio
U.Essmann (1967)

I flussoni consistono:

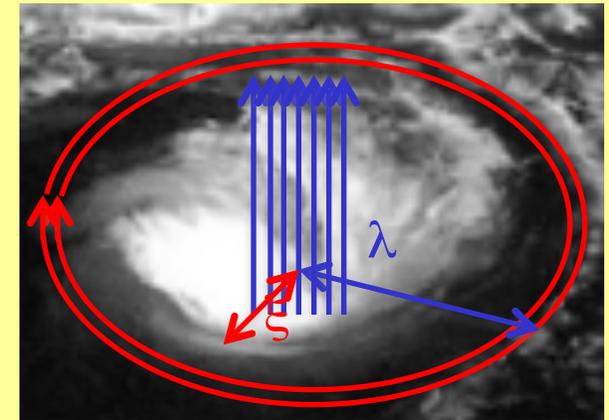
- in un nucleo di materiale normale dove è confinato il flusso di campo magnetico
- una buccia dove circola la **supercorrente come in un vortice**. Forma un contro campo magnetico che scherma il campo penetrato

3. Lo stato di parziale espulsione del campo magnetico dei Superconduttori di II tipo

Quanto di Flusso magnetico



Campo magnetico



supercorrenti

➤ Due dimensioni lo definiscono:

ξ (lunghezza di coerenza) e λ (lunghezza di penetrazione campo magnetico)

➤ Flusso di quanto magnetico $\Phi_0 = h/2e = 2 \times 10^{-15}$ weber (tesla metro²)

➤ Il valore del rapporto fra queste due lunghezze, $\kappa = \lambda/\xi$, determinerà se un superconduttore è di tipo I ($\kappa < 1/\sqrt{2}$) o tipo II ($\kappa > 1/\sqrt{2} \approx 0.7$)

➤ I valori di queste due lunghezze vanno da migliaia di nanometri a qualche nanometro.

Diagramma di fase B-T Superconduttori di I tipo

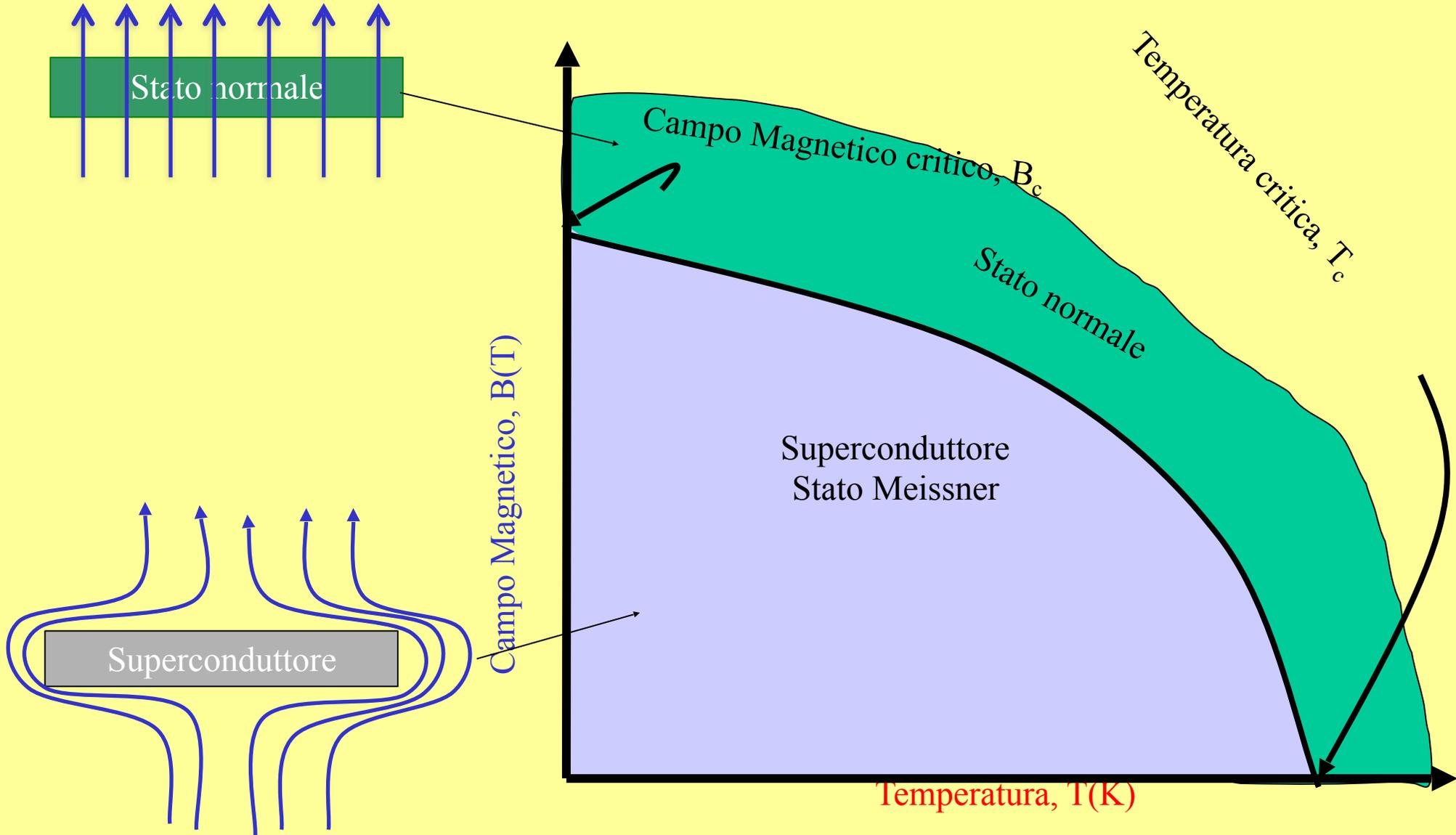
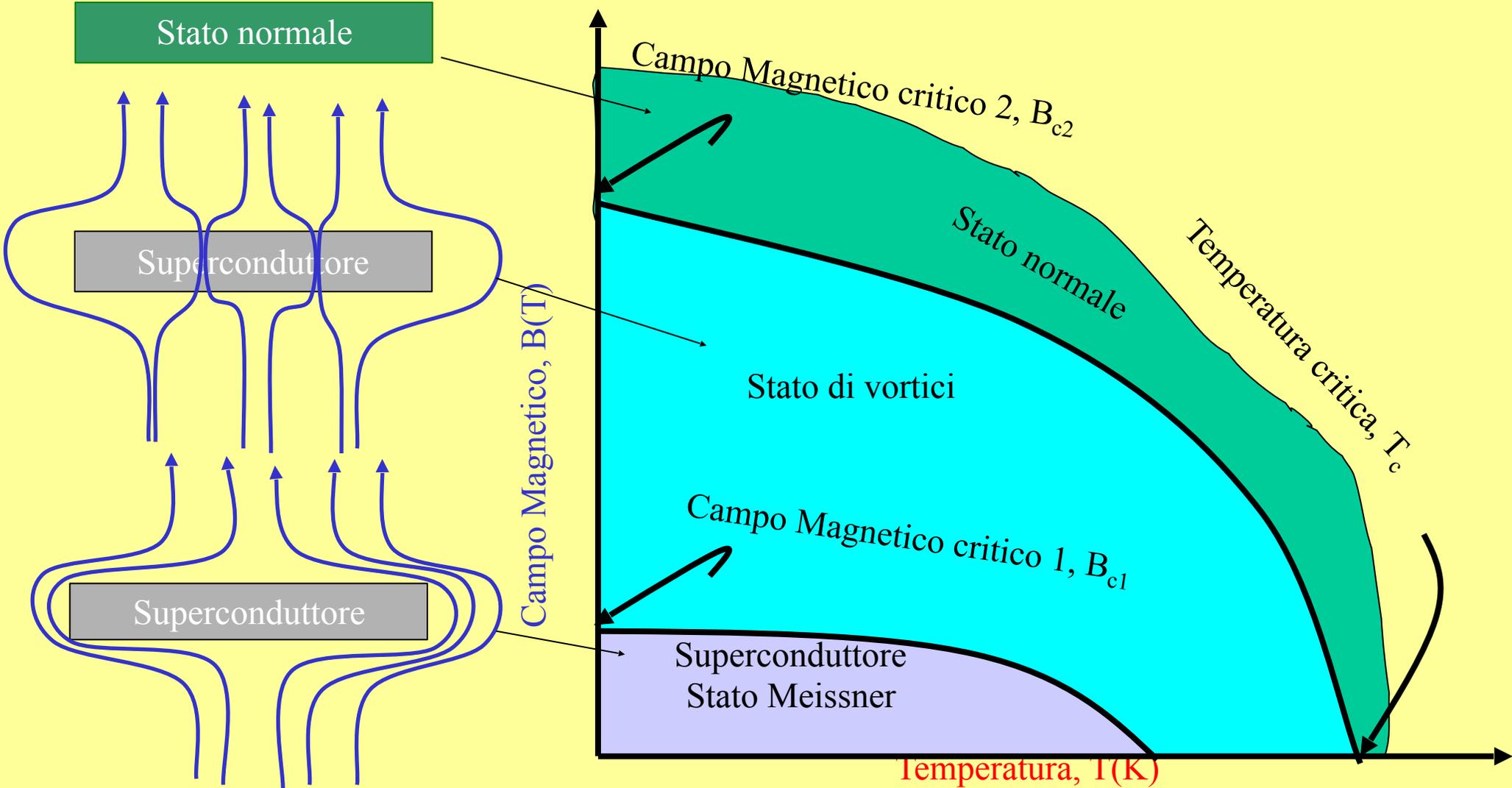


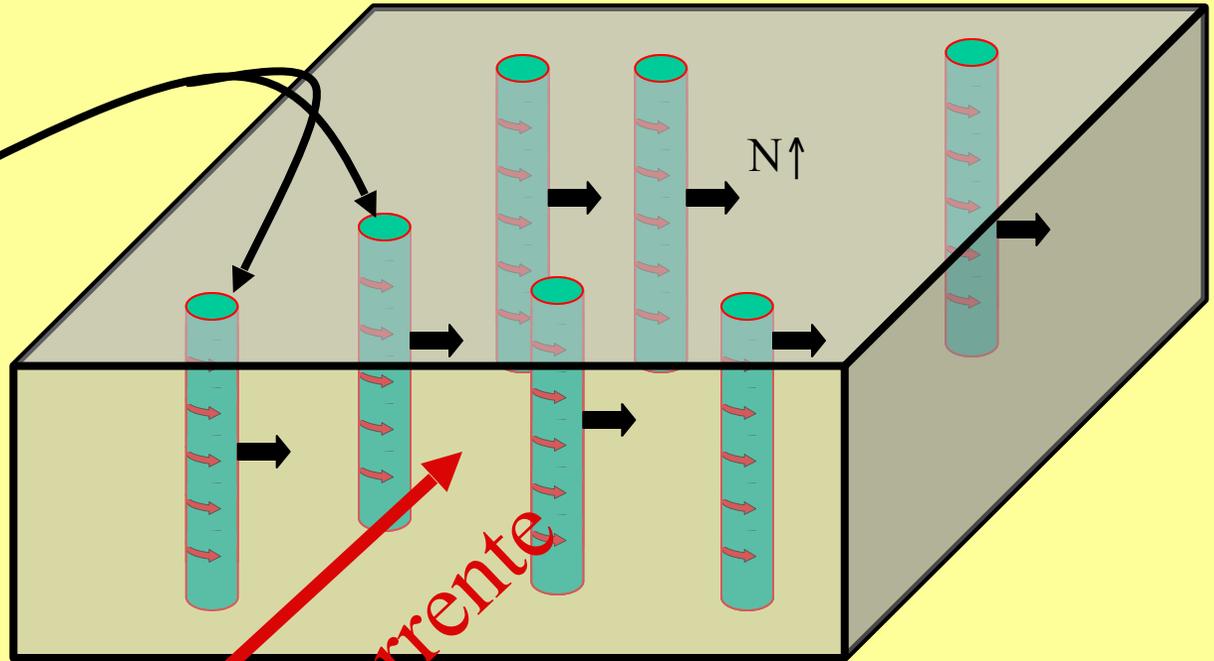
Diagramma di fase B-T Superconduttori di II tipo



..... ora parliamo della 2^a proprietà

2. I superconduttori II ~~non hanno~~ resistenza *possono avere*

- E' una resistenza dovuta alla **frizione** dei quanti di flusso quando si spostano nel superconduttore



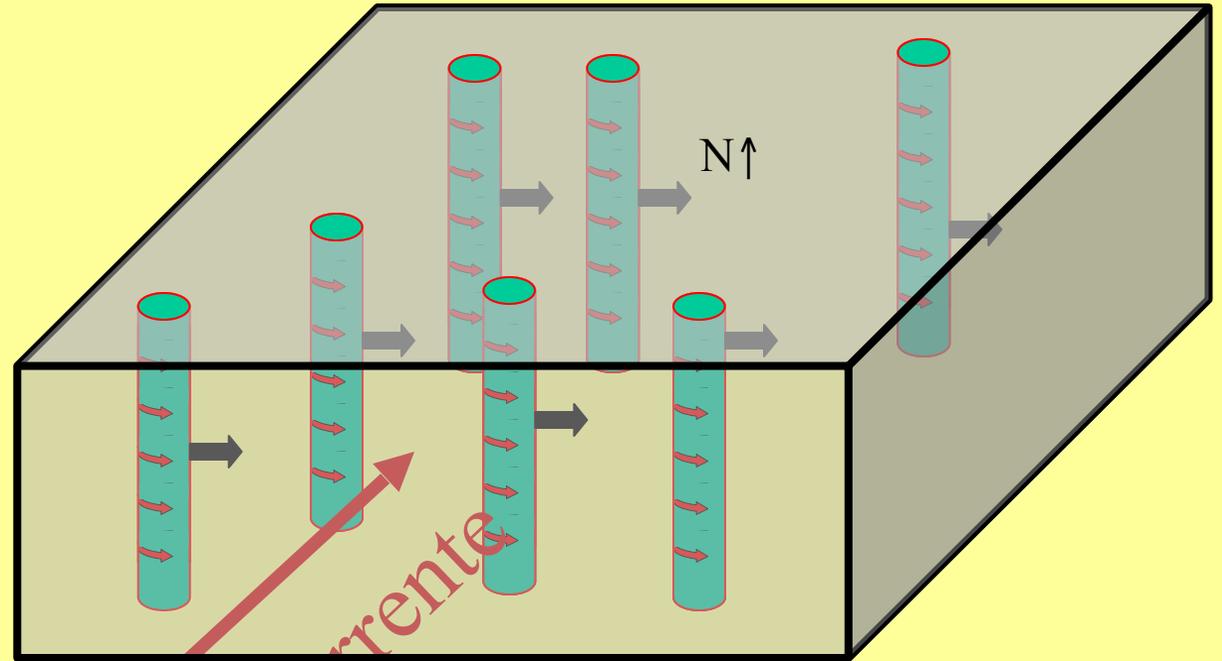
- L'applicazione di una supercorrente elettrica fa nascere una **forza si Lorentz** sui vortici magnetici

Come può avvenire ciò?

2. I superconduttori II ~~non hanno~~ resistenza

possono avere

- ..e i vortici possono fluire con una frizione

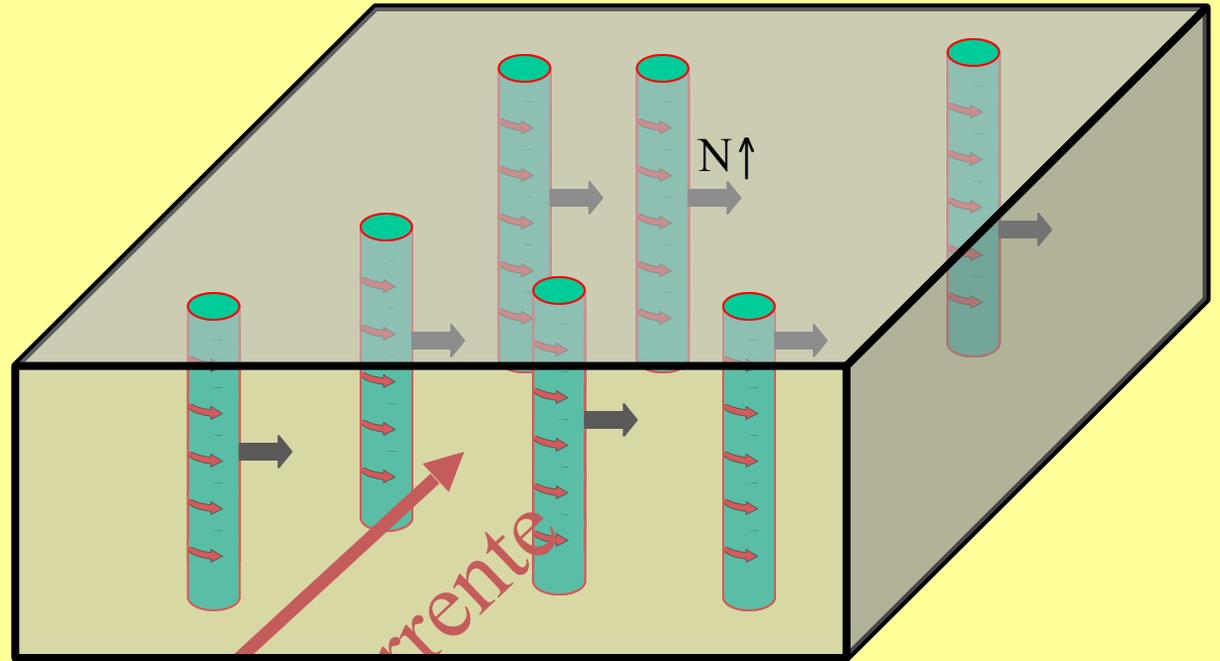


Super-corrente

2. I superconduttori II ~~non hanno~~ resistenza

possono avere

- ..e i vortici possono fluire con una frizione

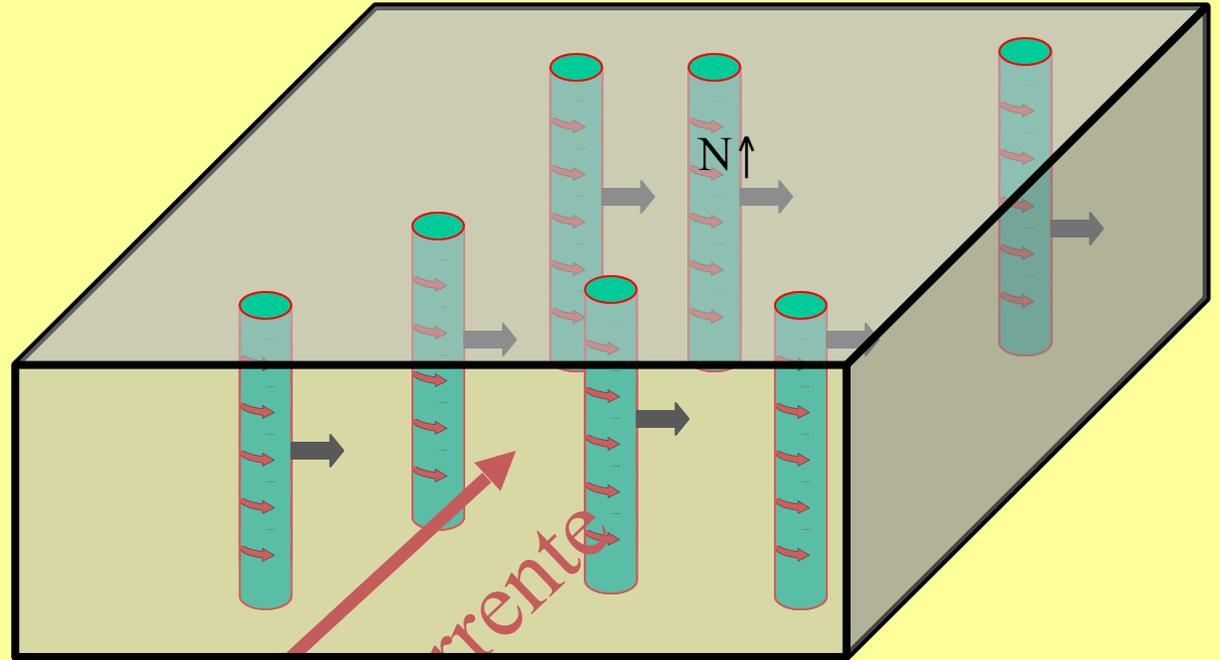


Super-corrente

2. I superconduttori II ~~non hanno~~ resistenza

possono avere

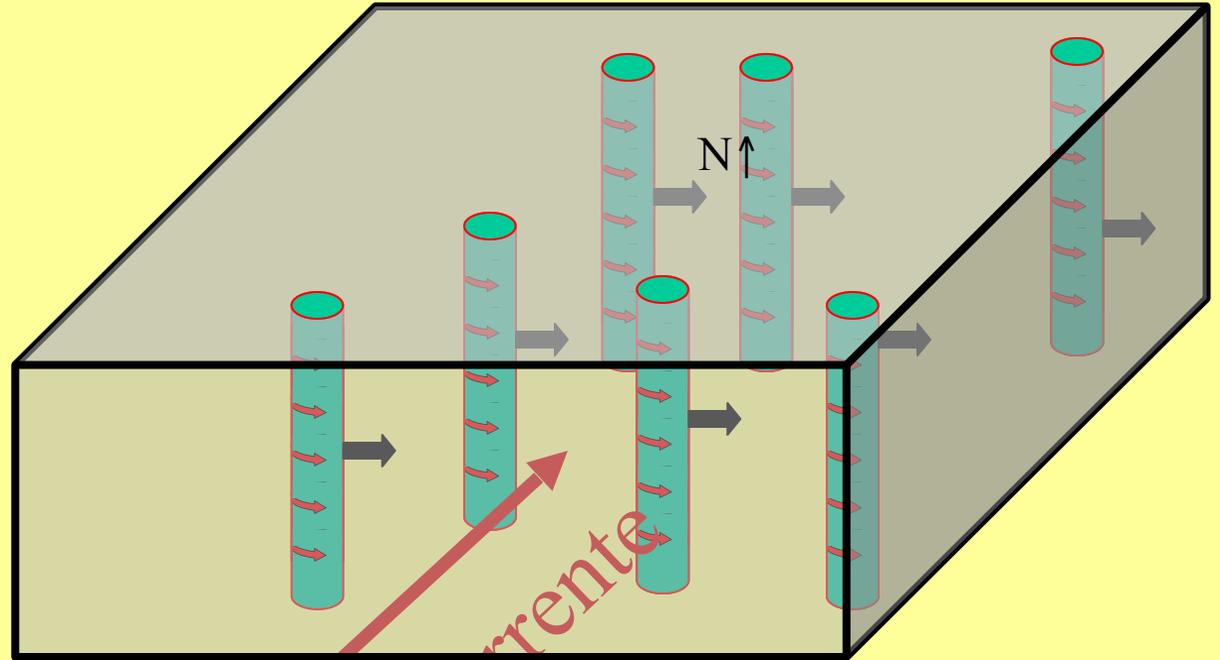
- ..e i vortici possono fluire con una frizione



2. I superconduttori II ~~non hanno~~ resistenza

possono avere

- ..e i vortici possono fluire con una frizione

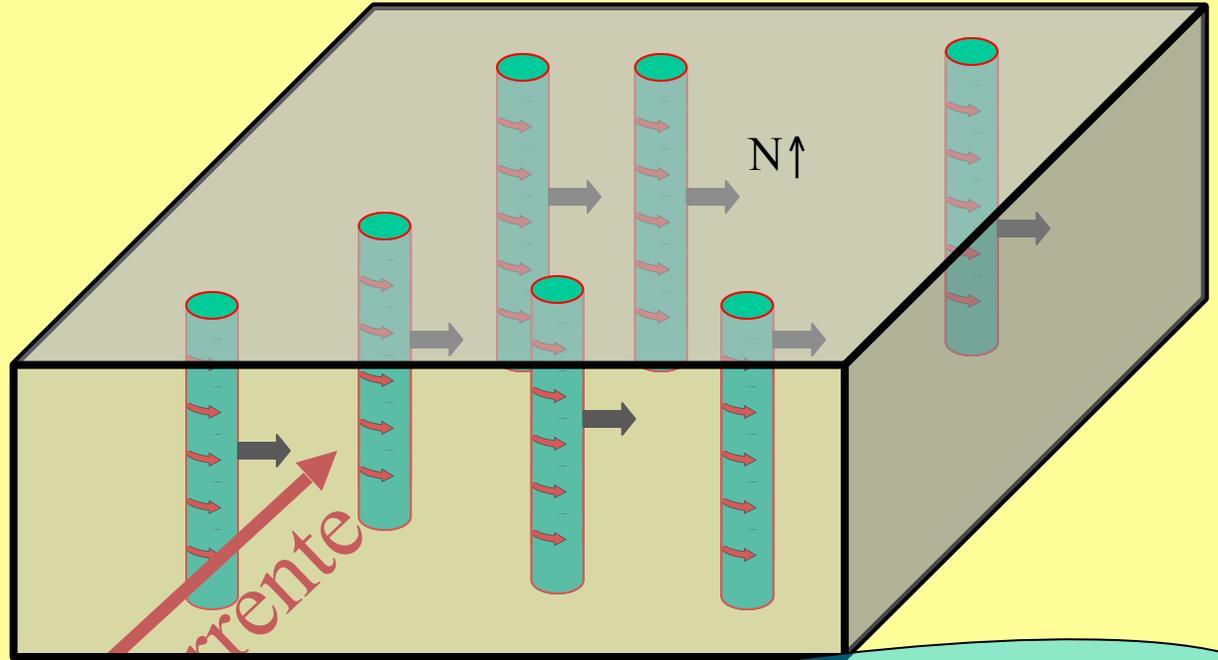


Super-corrente

2. I superconduttori II ~~non hanno~~ resistenza

possono avere

i 'cuori normali'
dei flussoni in moto
danno resistenza
Elettrica
Per effetto Joule



Super-corrente

il superconduttore transisce nello stato normale

2. I superconduttori II ~~non hanno~~ resistenza

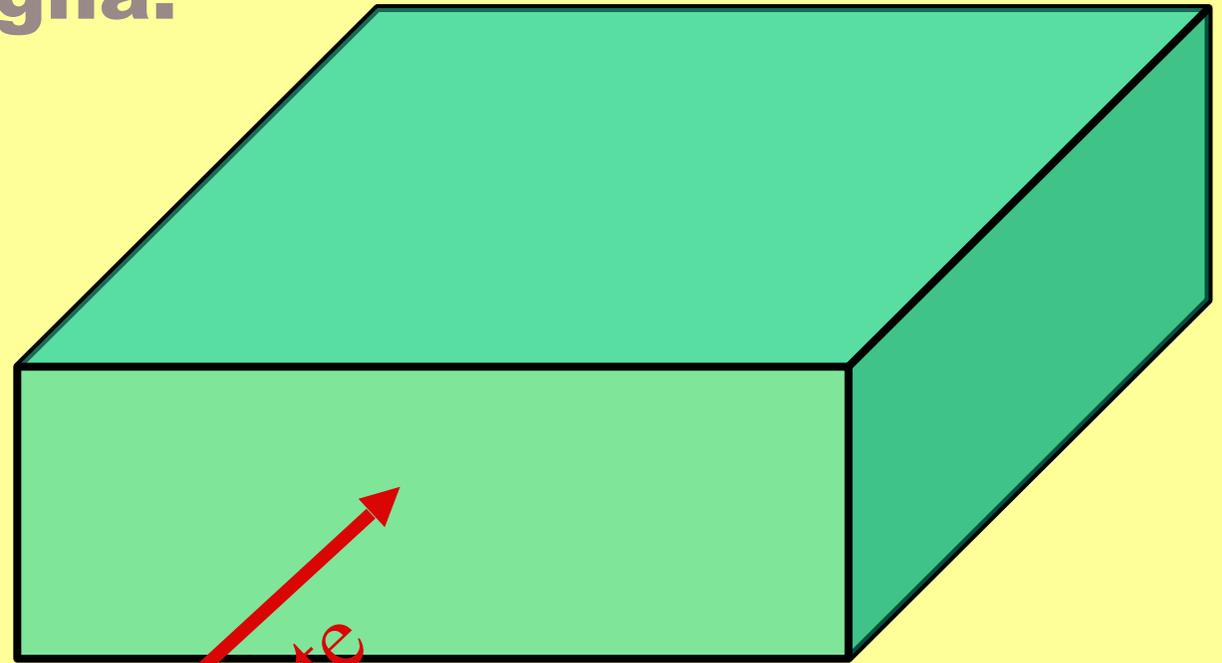
possono avere

La natura è maligna:

**la stessa
supercorrente**

**fa transire
nello stato
normale**

**il
superconduttore**

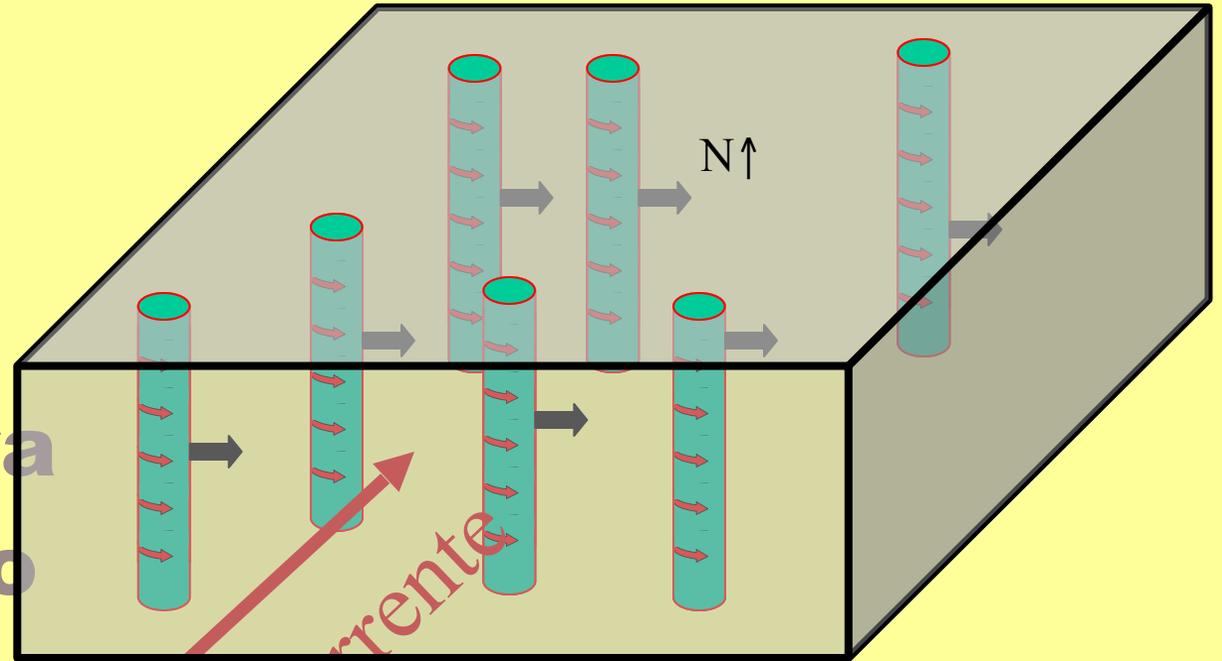


Corrente

2. I superconduttori II ~~non hanno~~ resistenza

possono avere

**La situazione
non è così
disperata
la stessa natura
ci viene il aiuto**



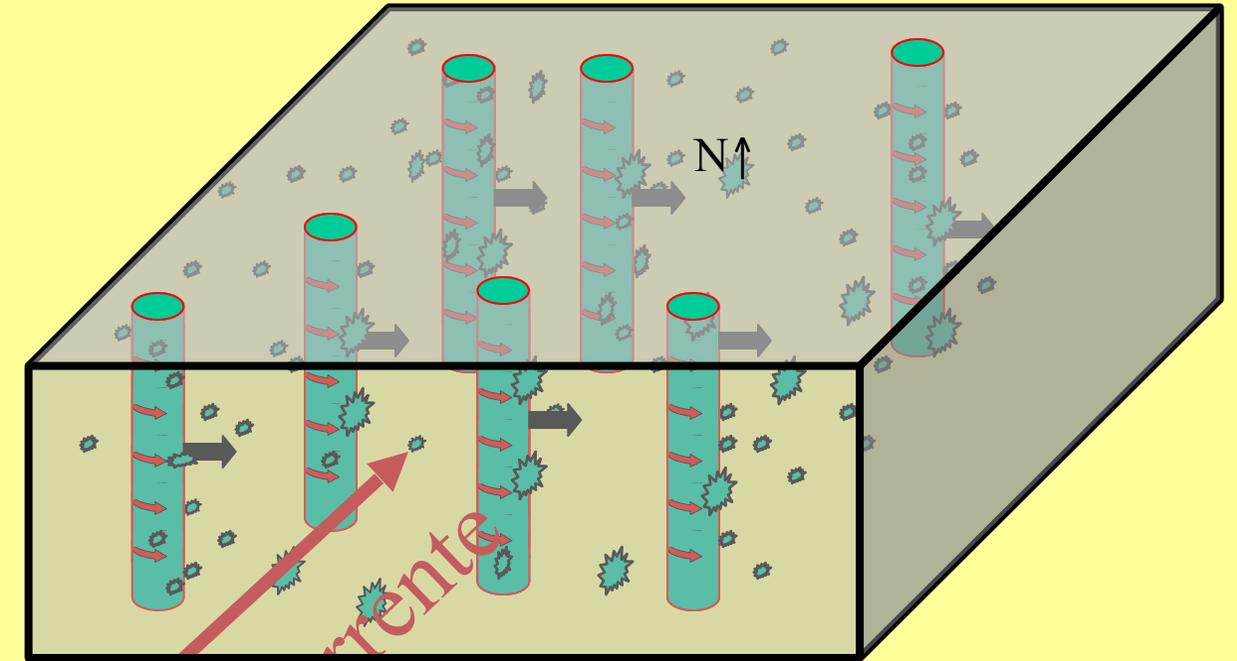
Super-corrente

2. I superconduttori II ~~non hanno~~ resistenza

possono avere

- esistono sempre disperse nel materiale: imperfezioni, inquinanti non superconduttrici

che



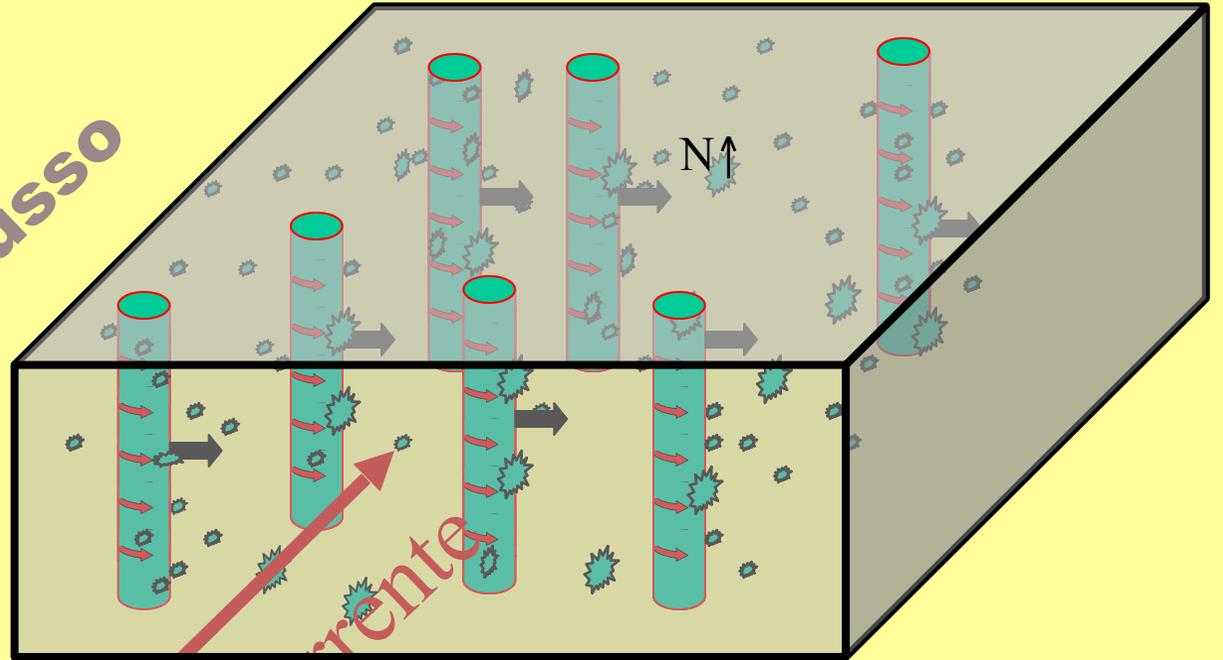
Super-corrente

2. *I superconduttori II ~~non hanno~~ resistenza*

possono avere

- I quanti di flusso vanno sulle imperfezioni e

bloccano i quanti di flusso

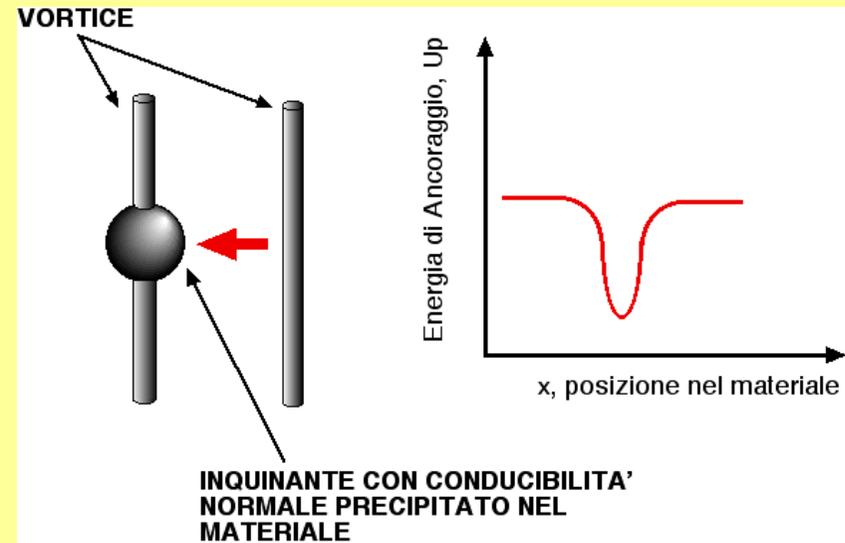


super-corrente

2. ~~I superconduttori II non hanno resistenza~~ *possono avere*

- I quanti di flusso vanno sulle imperfezioni e

➤ Ancoraggi



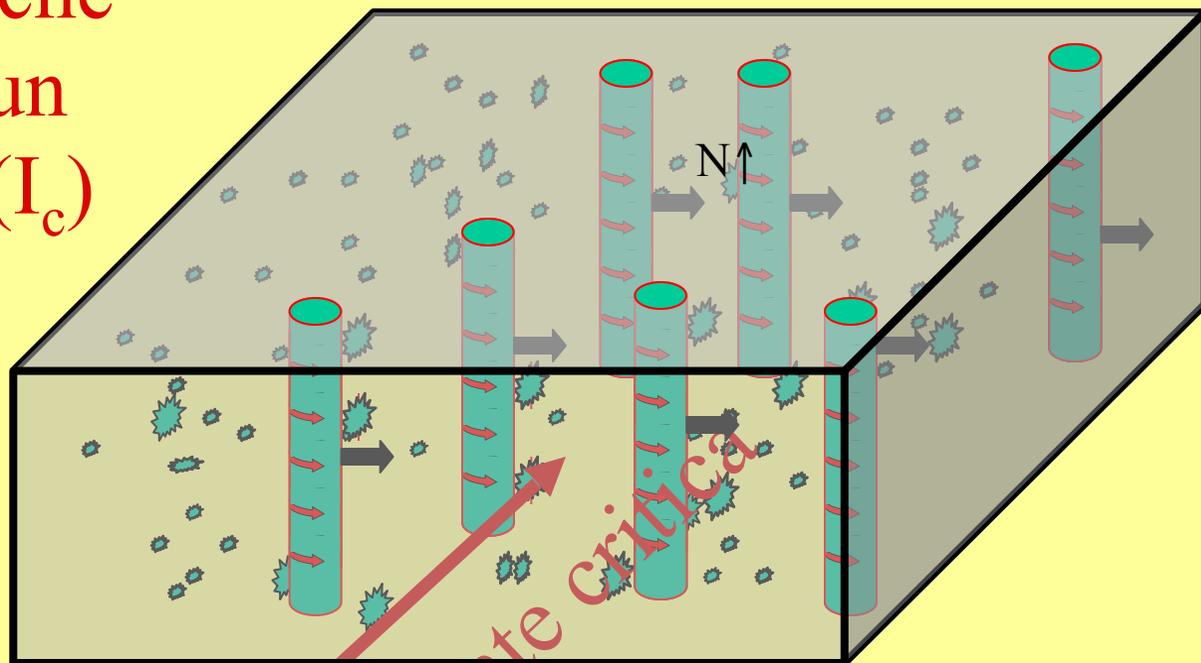
bloccano i quanti



2. I superconduttori II ~~non hanno~~ resistenza

possono avere

- ..stanno fermi fino a che la super-corrente ha un valore limite *critico* (I_c) e...



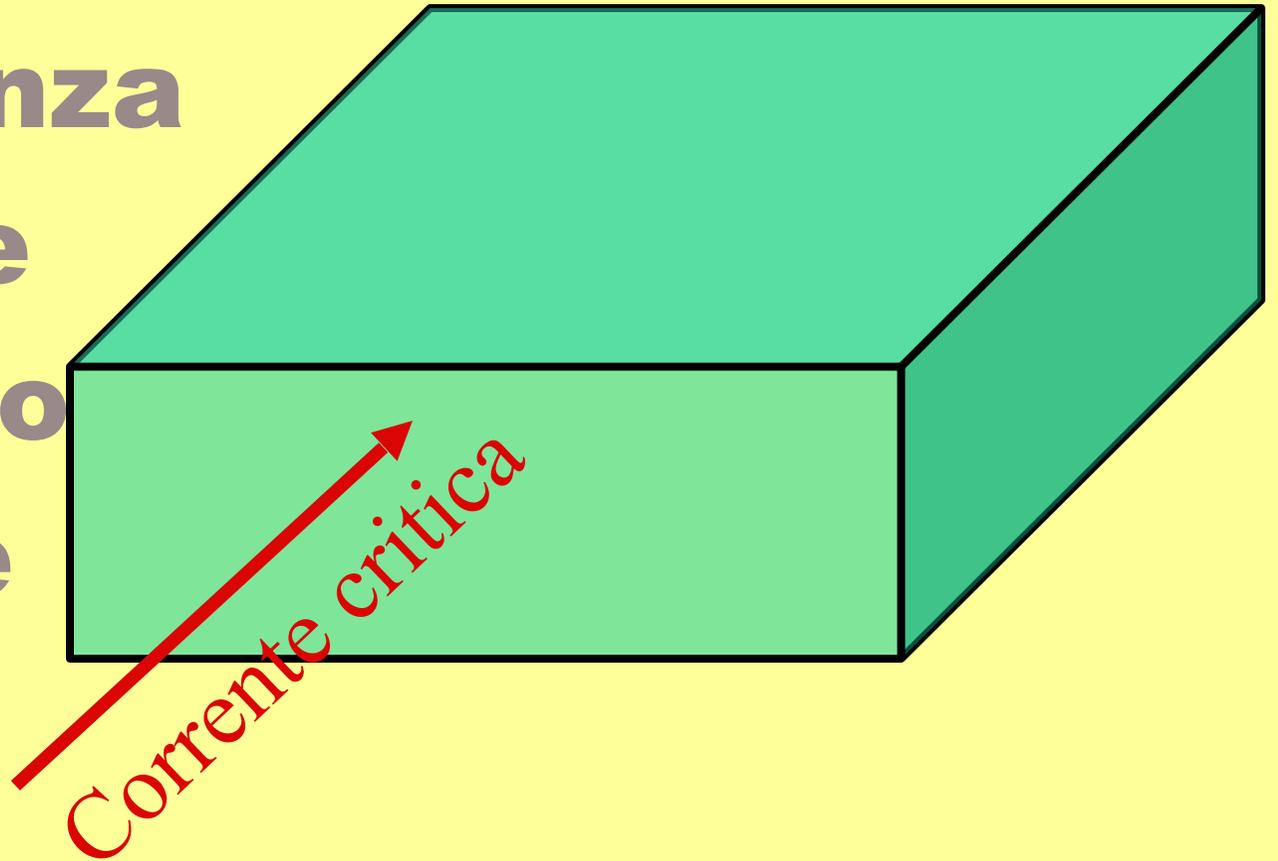
↓
i quanti di flusso
corrono via

Super-corrente critica

2. I superconduttori II ~~non hanno~~ resistenza

possono avere

**..e la sostanza
transisce
nello stato
normale**



2. I superconduttori II ~~non hanno~~ resistenza

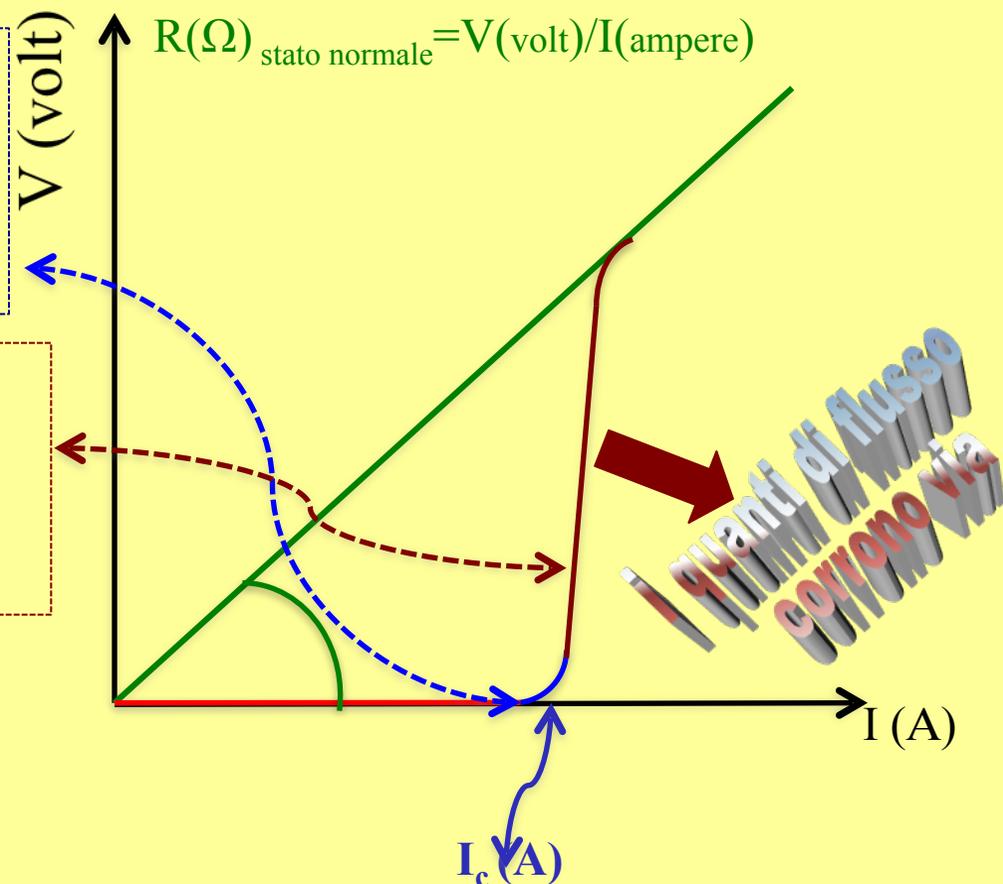
possono avere

- Il libero moto dei quanti di flusso descritto in precedenza è chiamato 'Flux Flow'

◆ A I_c il materiale è ancora un superconduttore ma sta transendo allo stato normale

◆ mostra una resistenza elettrica che varia velocemente con la corrente

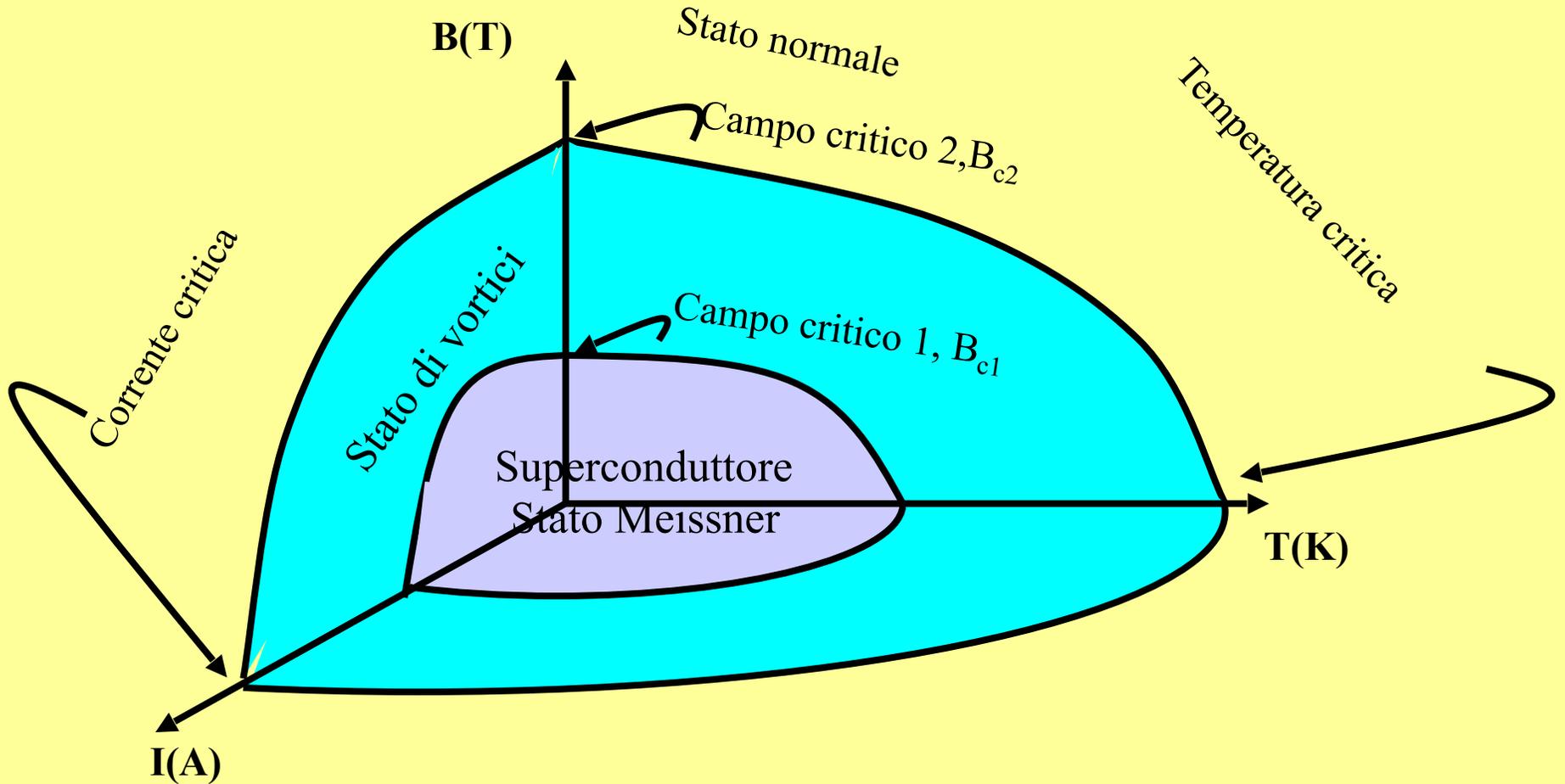
➤ **Alcuni dispositivi elettronici funzionano su questo principio**



Lo stato superconduttore è individuato da tre parametri:

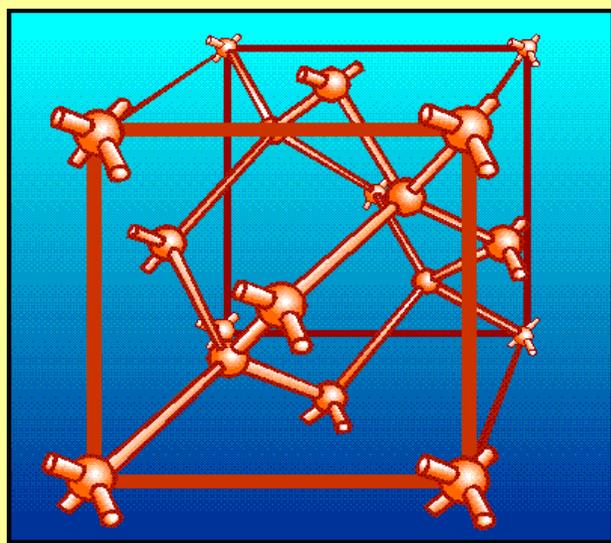
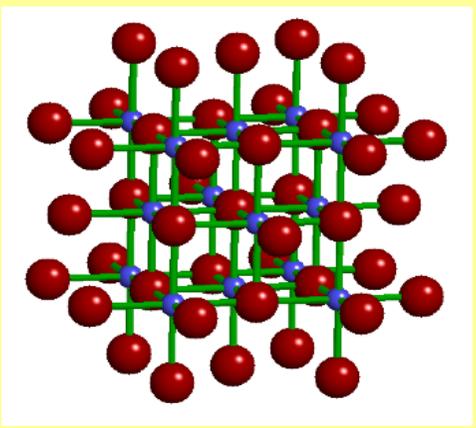
- Temperatura critica (T_c)
- Campo magnetico critico (B_c)
- corrente critica (I_c)

Diagramma di fase B - T - I per i Superconduttori di II tipo

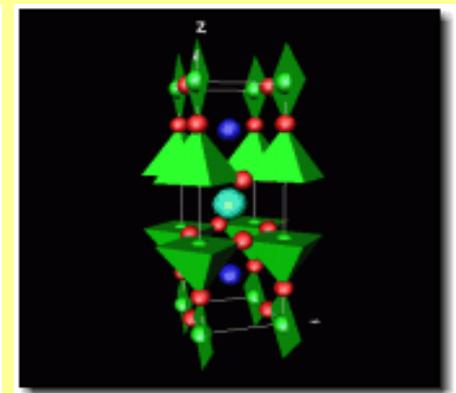
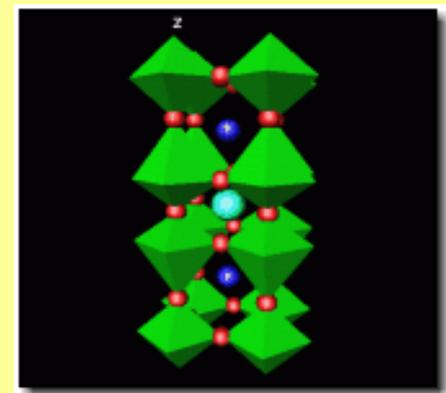
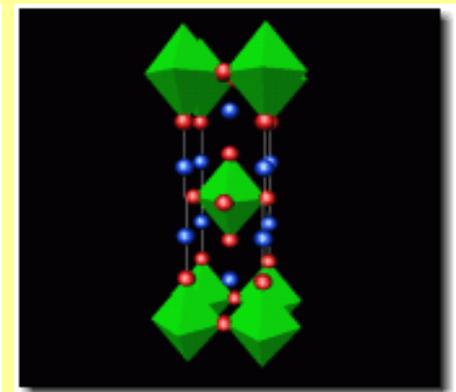
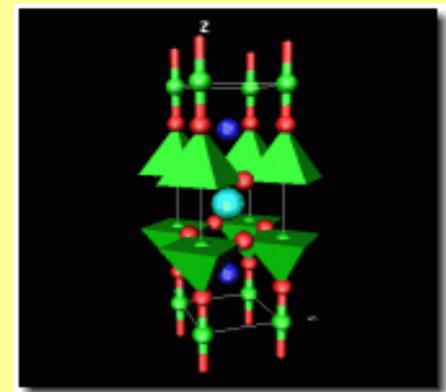


Strutture chimiche dei superconduttori

metallici bassa T_c
Struttura 3-Dimensionale

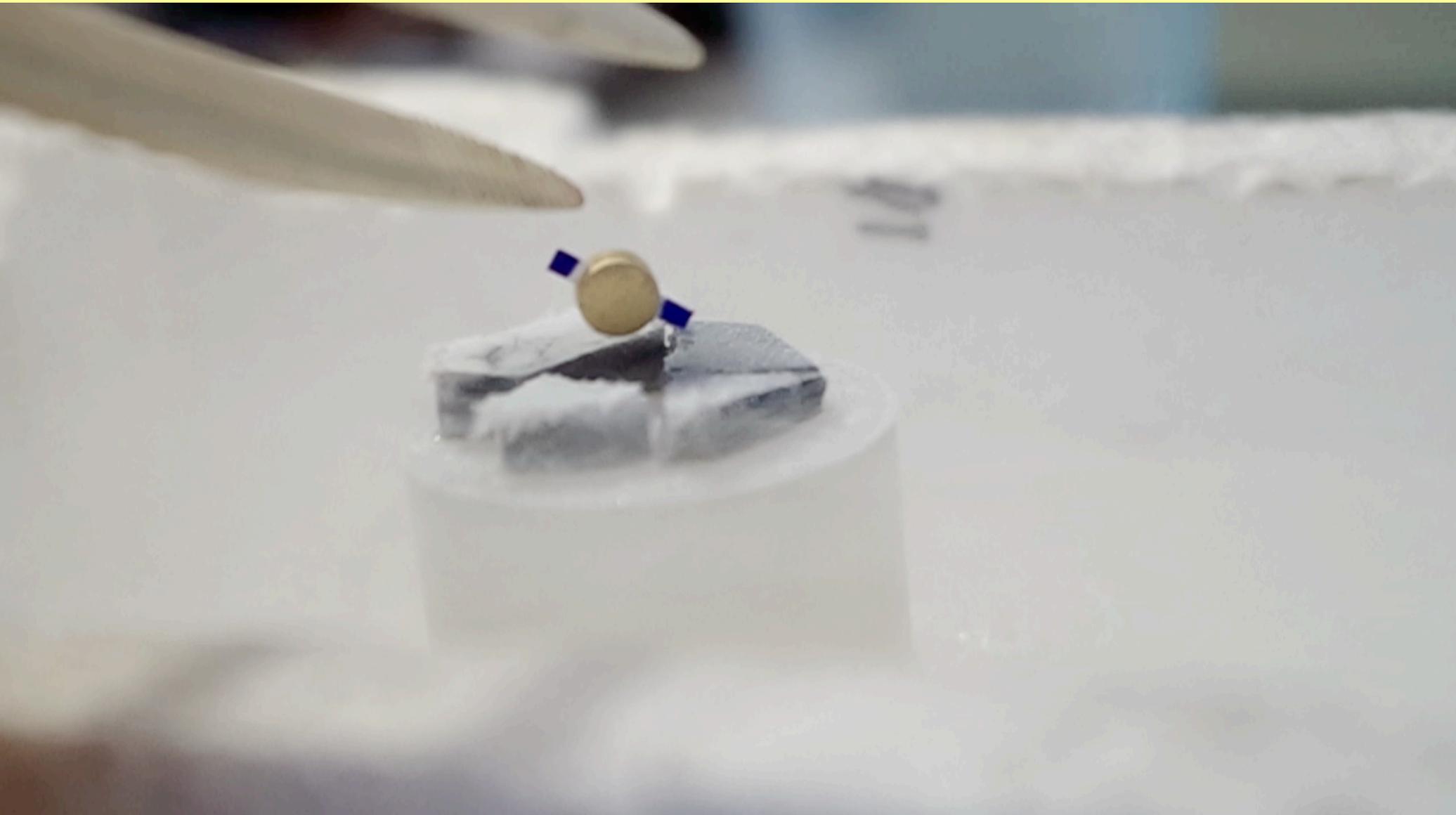


Ceramici alta T_c
Struttura 2-dimensionale
a strati



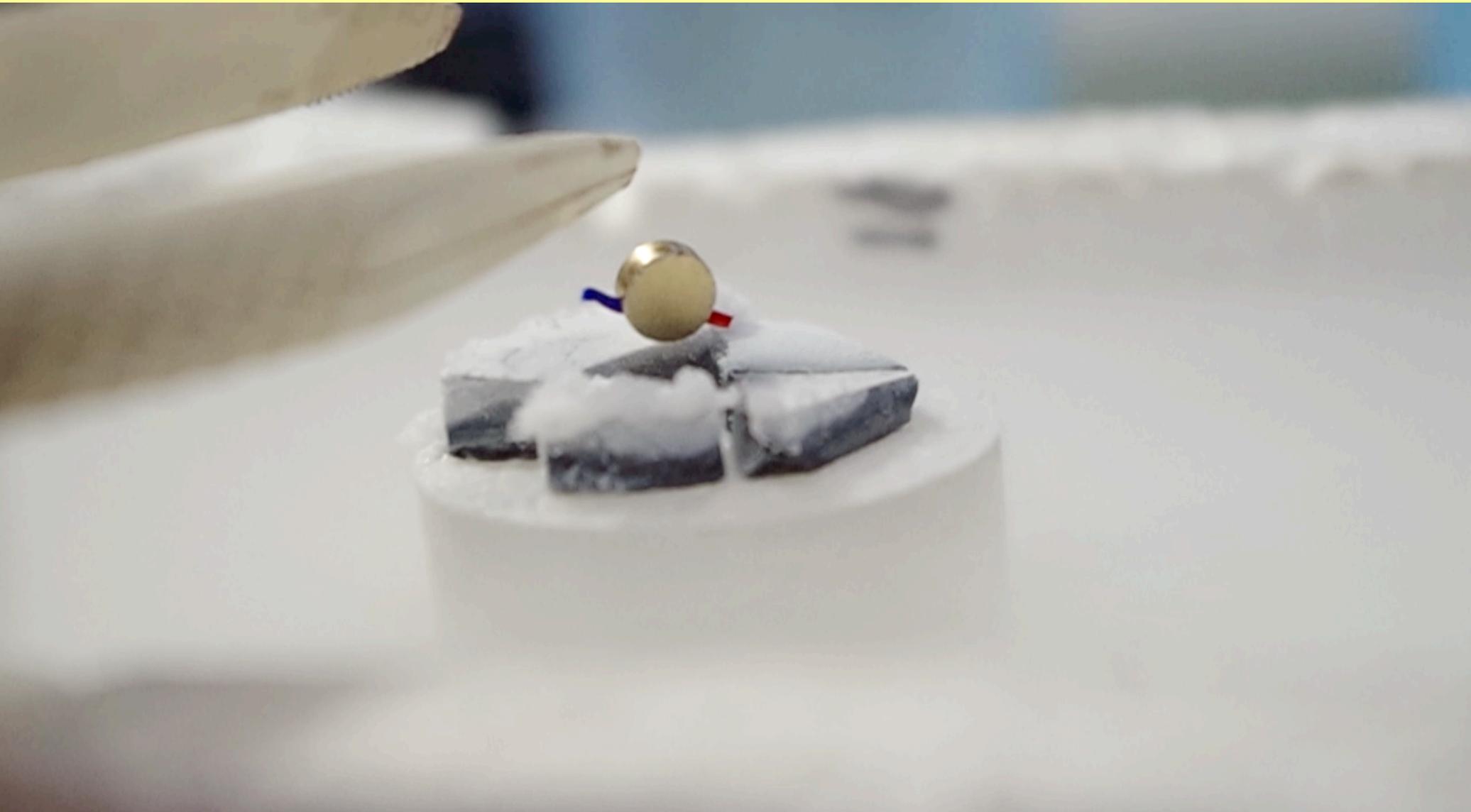
..un facile esperimento

....la ruota di..... Meissner



..un facile esperimento

...sempre ruote magnetiche volanti per effetto Meissner



..una applicazione tecnologica

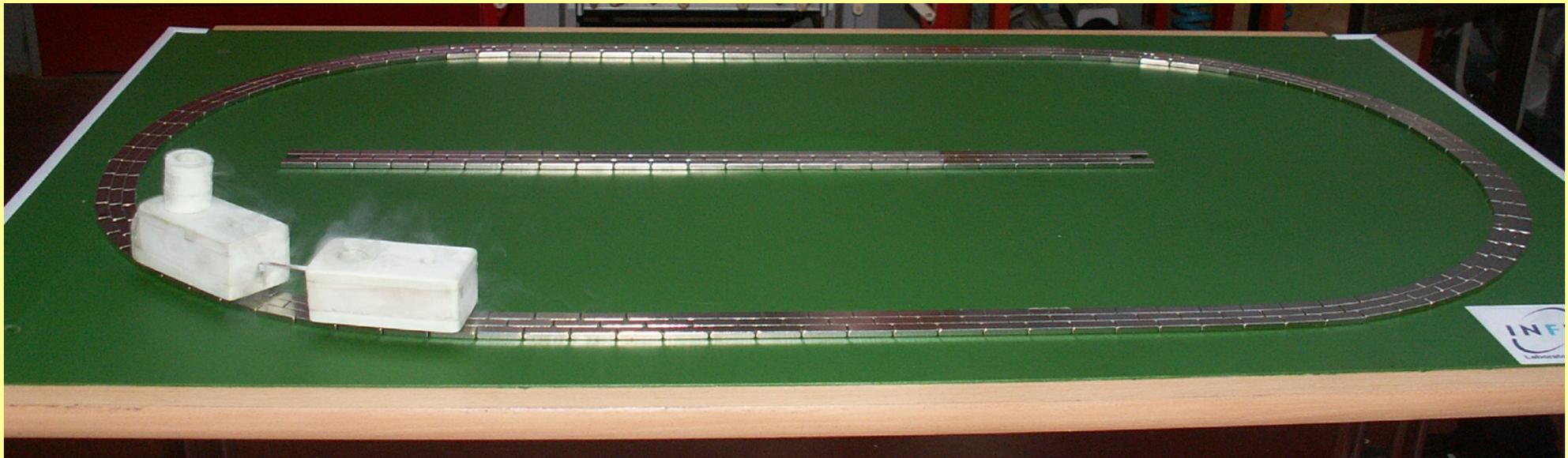


**..una ferrovia magnetica
di parallelepipedi**

**NdFeB (Neodimio-Ferro-Boro) forza
di attrazione: 6Kg**

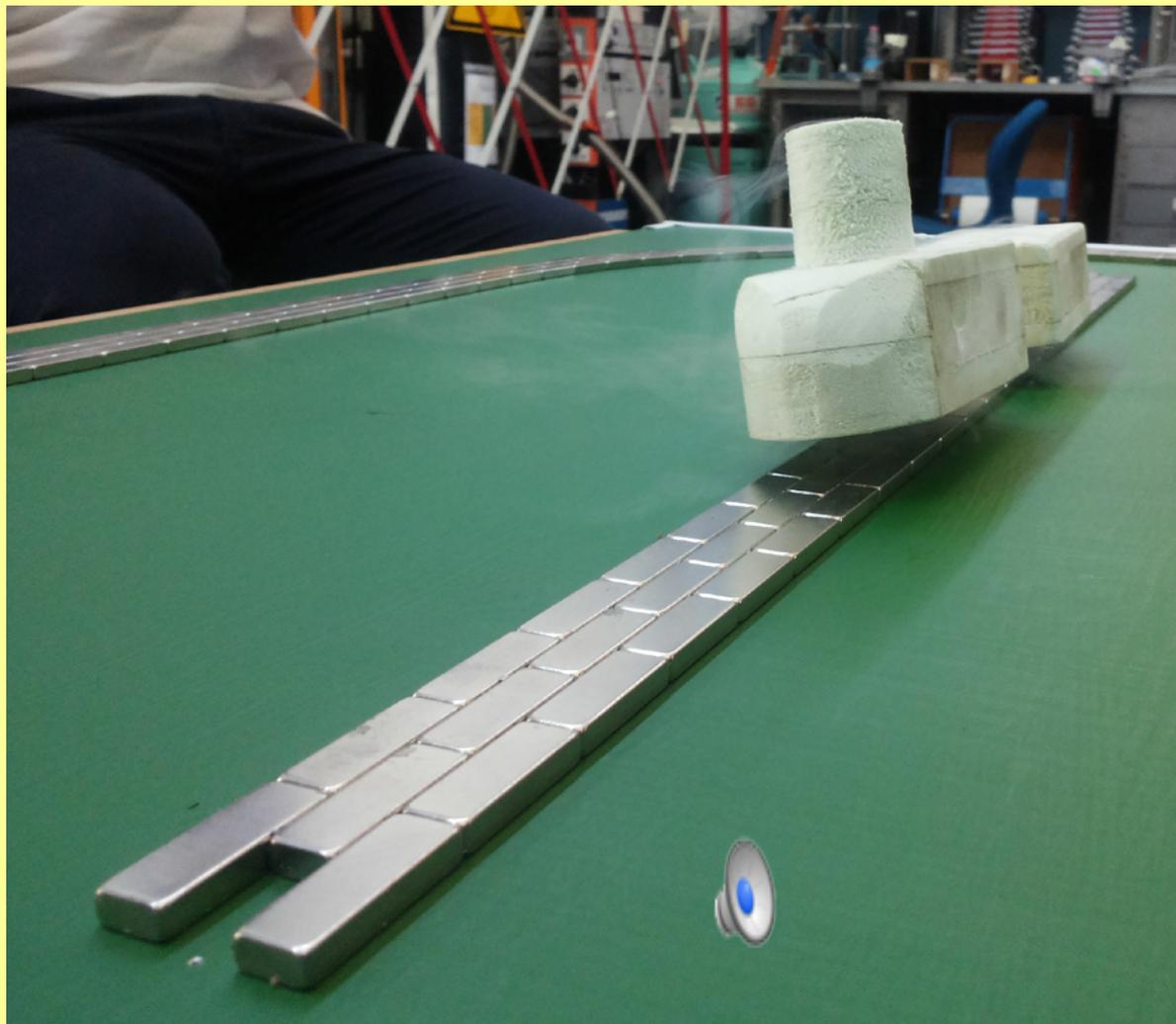


**.. una locomotiva, un vagone con serbatoi
di azoto liquido e superconduttori sulla base**



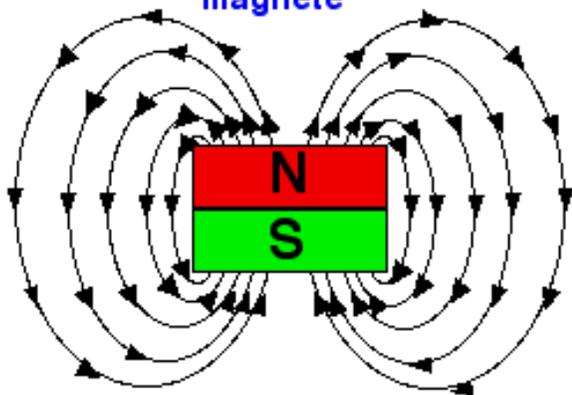
..una applicazione tecnologica

Il treno..... MAGLEV

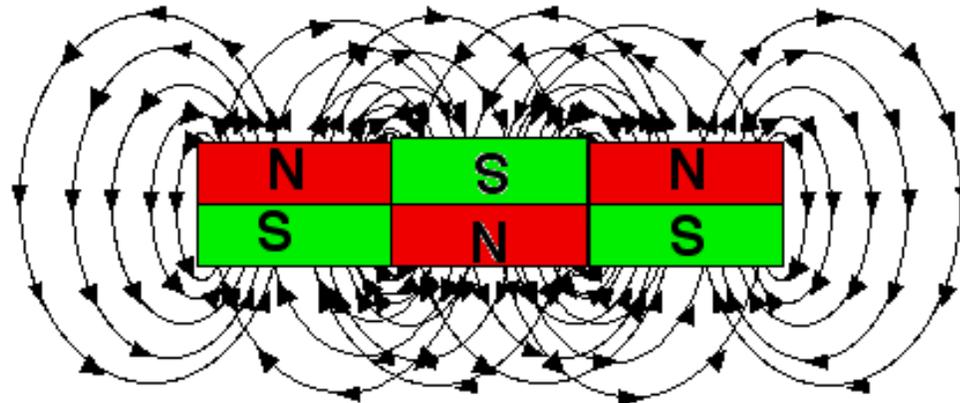


..una applicazione tecnologica

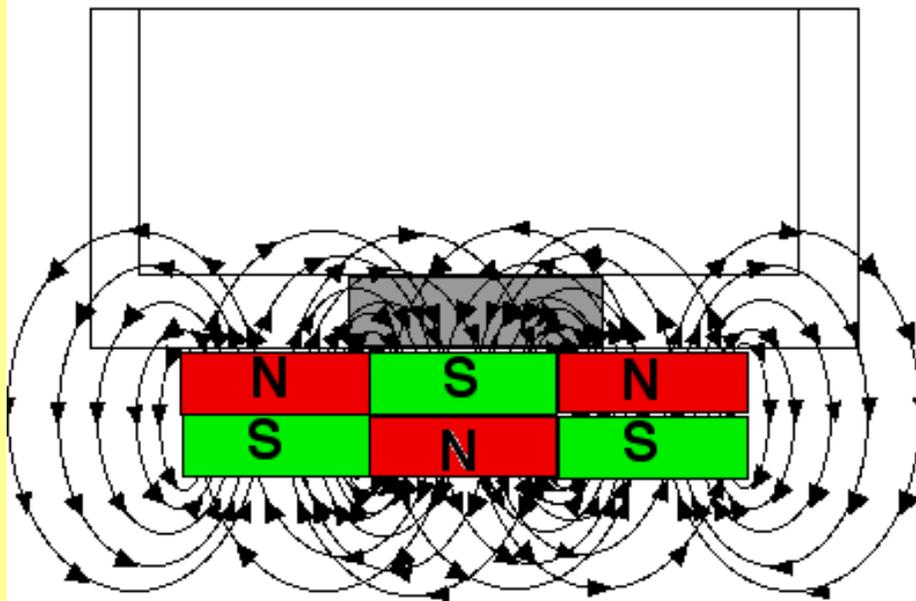
magnete



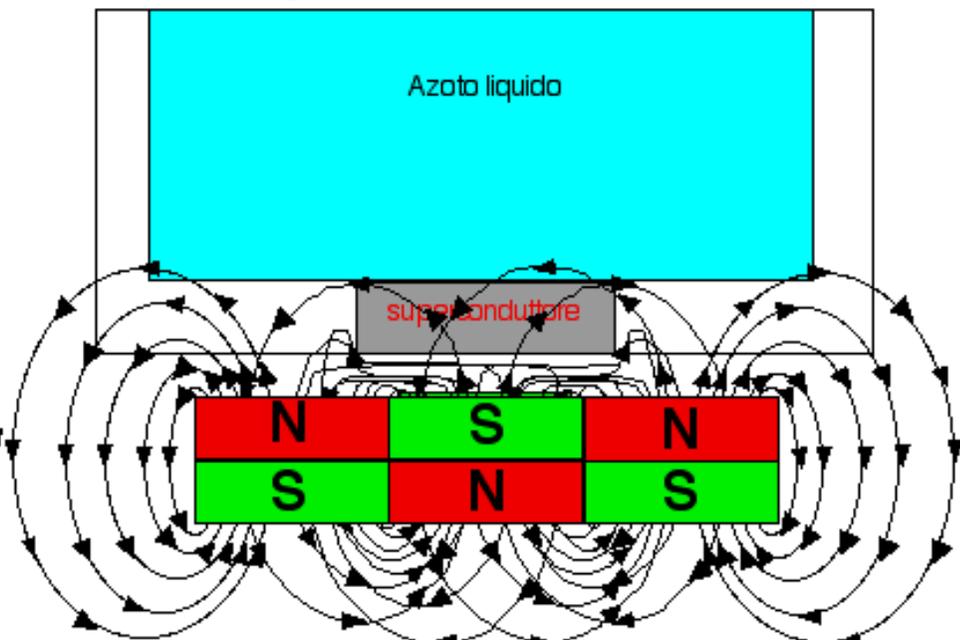
rotaia magnetica



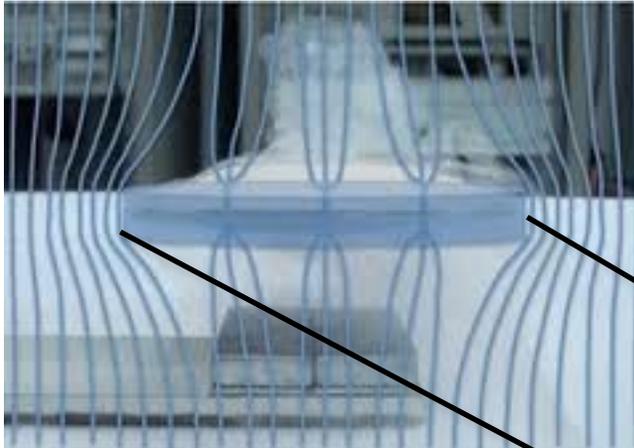
treno con materiale superconduttore in stato normale su rotaia magnetica $T(K) > T_c$



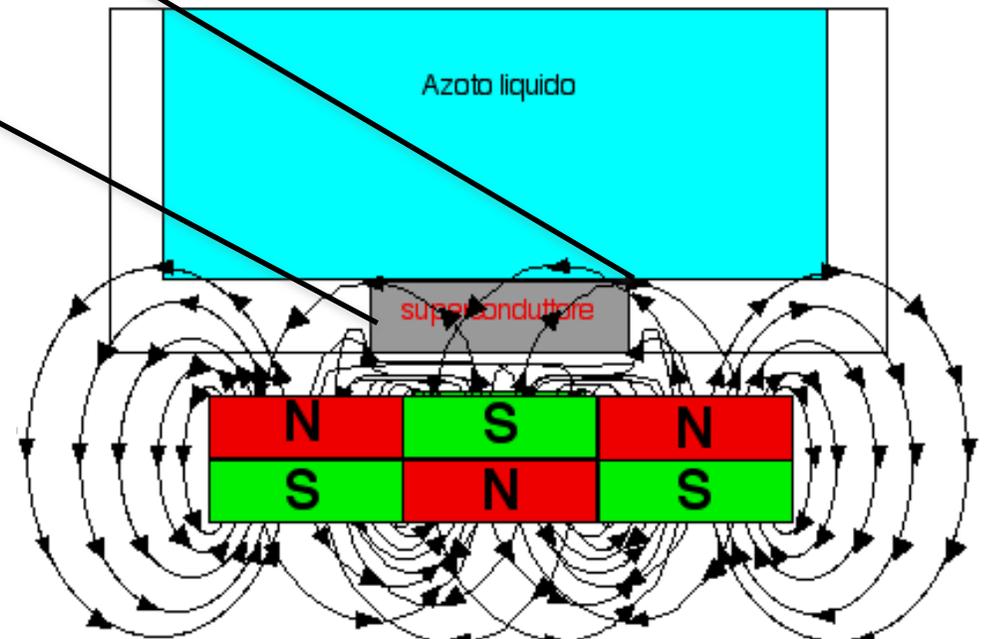
treno con stesso materiale in stato superconduttore su rotaia magnetica $T(K) < T_c$



..una applicazione tecnologica



treno con stesso materiale in stato **superconduttore**
su rotaia magnetica $T(K) < T_c$



un po' di teoria.....:

-BCS-

Nel 1957 tre fisici americani, John Bardeen, Leon Cooper e Robert Schieffer svilupparono una teoria basata sulla meccanica quantistica nella materia.

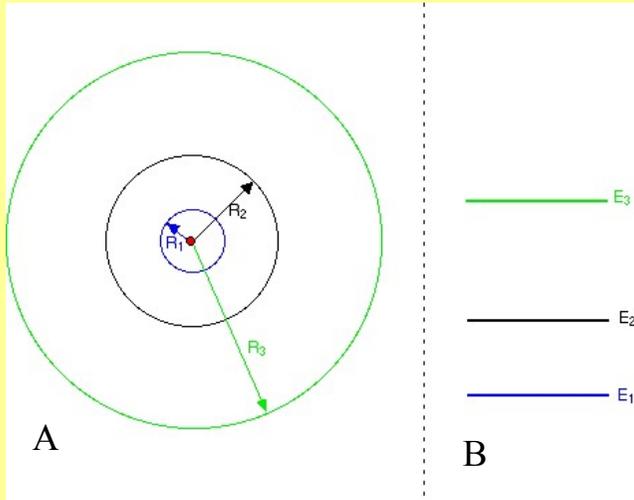
- In un superconduttore gli elettroni **condensano** in uno stato quantistico di minima energia e si muovono in coppie (coppie di Cooper) **collettivamente e coerentemente** senza incontrare resistenza.

Teorie precedenti: Modello a due fluidi (London, Gorter e Casimir) e primo modello quantistico di Ginzburg-Landau

**Ma per capire c'è
bisogno di
qualche cenno su
come
è fatta la materia**

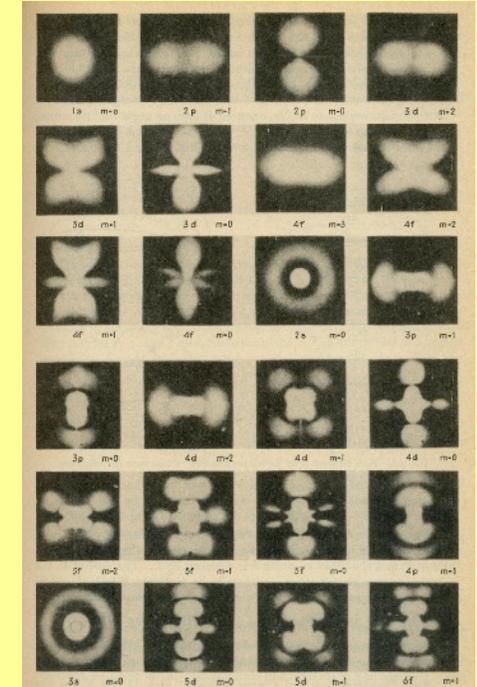
Atomi

Come si rappresenta un atomo...?



Le orbite elettroniche in realtà sono...zone di spazio: **orbitali**

Meccanica



A) Orbite elettroniche in un atomo
B) Livelli energetici elettronici rispetto al nucleo
MODELLO PLANETARIO DI BOHR

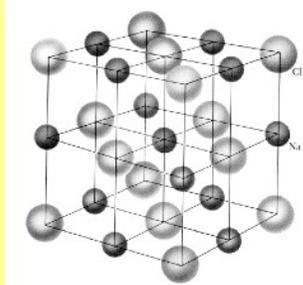
Orbitali elettronici di un atomo di idrogeno:

- ✓ $n=1$ (alto a sinistra) il più vicino al nucleo e occupa lo spazio più piccolo
- ✓ $n>1$ hanno energia maggiore e occupano generalmente uno spazio più grande e sono più lontani dal nucleo

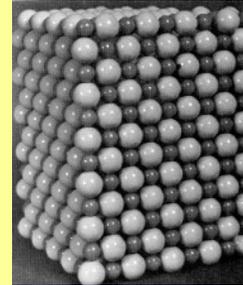
➤ Gli **Orbitali** sono descritti dal quadrato della funzione d'onda elettronica, Ψ , proporzionale alla **probabilità di presenza** in una data regione dello spazio

Solidi

Cosa avviene quando si avvicinano N



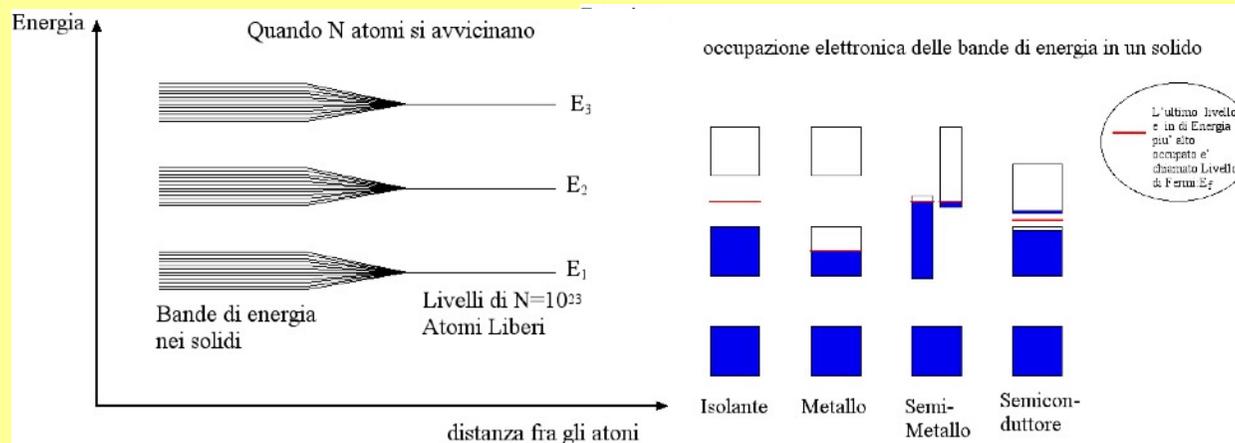
NaCl



Si formano dei reticoli di atomi nello spazio

I livelli energetici degli elettroni negli atomi singoli si sovrappongono:

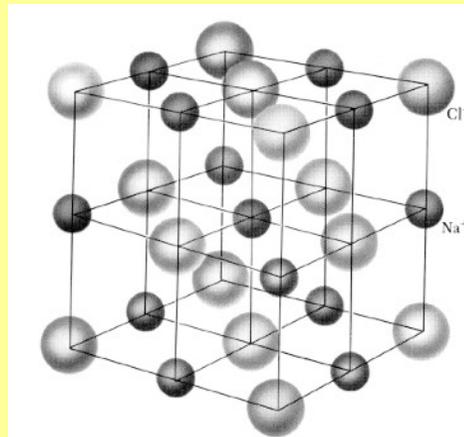
si formano delle bande di energia con N livelli



10^{23} elettroni riempiono le bande

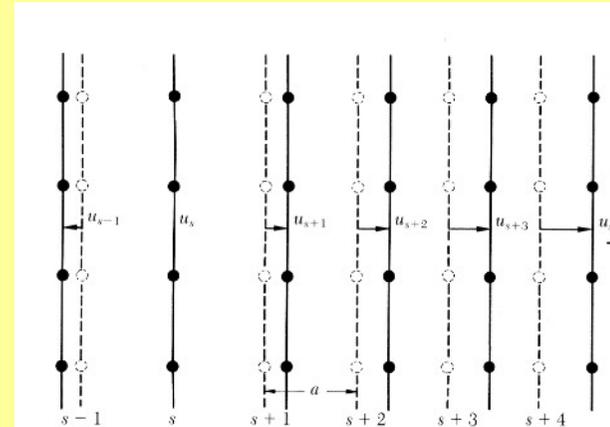
I reticoli di atomi vibrano. . .

Il reticolo di atomi ha delle vibrazioni stazionarie intorno al loro punto di equilibrio:
fononi

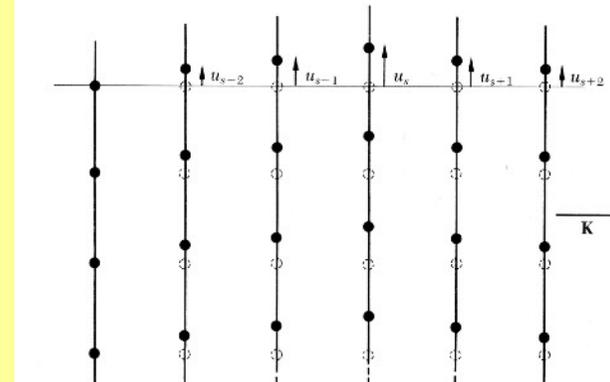


NaCl

Moto (fononi)
longitudinali
(ACUSTICI)



Moto (fononi)
trasversali
(OTTICI)



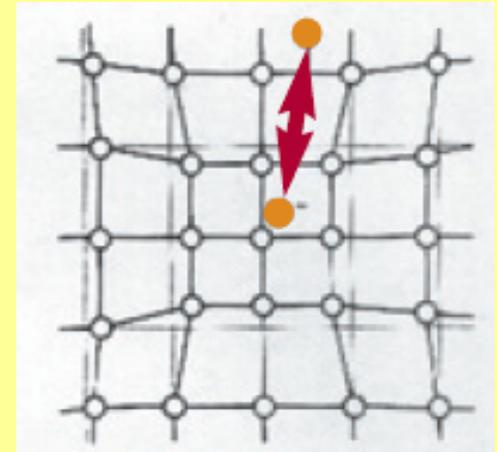
un po' di teoria.....:

-BCS-

Alcuni elettroni (carica elettrica negativa), con energia di Fermi, in un solido viaggiano con una velocità di circa 10^8 cm/sec all'interno del reticolo periodico di ioni di carica elettrica positiva

Vedremo che
...le coppie di

Gli ioni vengono attratti al passaggio dell'elettrone: tale distorsione è regolata dalle vibrazioni del reticolo di ioni (fononi)



interagiscono per

un po' di teoria.....: -BCS-

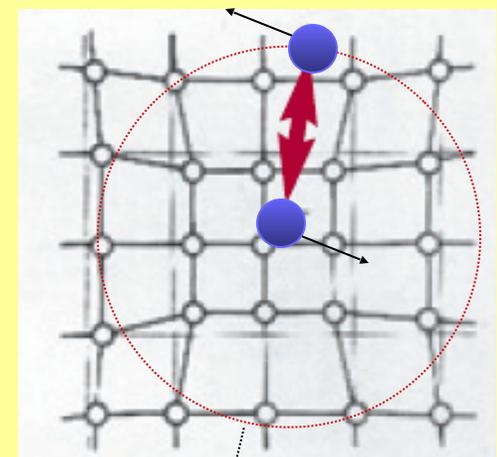
- Consideriamo due elettroni
- Il primo si stà muovendo nel reticolo degli ioni e attrae ioni intorno a se
- Un secondo elettrone 'vede' il primo coperto da cariche positive

□ Se le cariche positive eccedono quella negativa (all'interno di un volume caratteristico)

Cosa succede?

- Questa azione produce una forza risultante tra di essi **attrattiva**
- I due elettroni formano una coppia (Coppia di Cooper) per mezzo dell'interazione con le vibrazioni reticolari del cristallo (fononi)

....le coppie di



Volume caratteristico

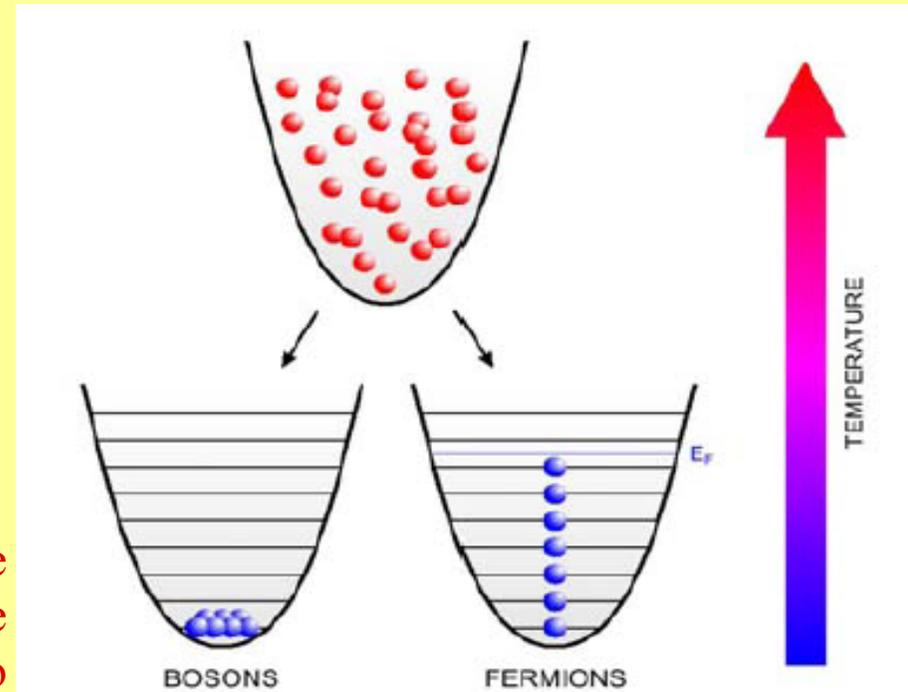
In un volume di

un po' di teoria.... : -BCS-

.perchè gli elettroni si comportano in modo

Gli elettroni (Fermioni) hanno **spin semi-intero** e devono rispondere al principio di esclusione di Pauli ed energeticamente si impilano via via ad energie più alte (statistica di Dirac-Fermi)

Ma una coppia di Cooper ha **spin intero** (Bosone) e non risponde al principio di esclusione di Pauli. Le coppie condensano in uno stesso stato energetico (statistica di Bose-Einstein)



spin e

un po' di teoria.....:

-BCS-

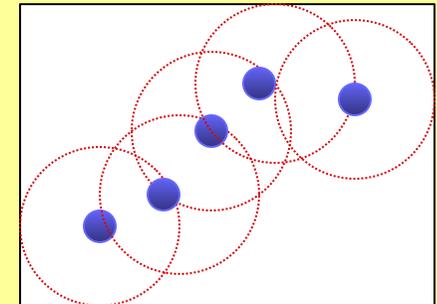
Gli elettroni sono in un solido un numero enorme: circa 10^{23}

All'interno di quel volume caratteristico (volume di coerenza) ci sono tanti elettroni e tutti si accoppiano: **sono particelle identiche** indistinguibili

Dimostriamo che tutto il materiale è in uno stato superconduttore:

- ✓ gli elettroni sul bordo del volume caratteristico sono a loro volta al centro di altri volumi di coerenza.
- ✓ Tutti gli elettroni di un volume di coerenza si accoppiano con tutti gli altri elettroni di volumi esterni a quella prima regione.
- ✓ Tale processo permette al materiale di essere interamente in uno stato superconduttore quantistico coerente e rigido:
tutte le coppie si devono comportare allo stesso modo

il sistema e' rigido...



..tutto coerente

un po' di teoria.....: -BCS-

Quindi c'è una modifica radicale del comportamento di un conduttore.

I portatori di carica (coppie di Cooper), contrariamente a quanto succede per gli elettroni liberi in un metallo normale, si muoveranno se sottoposti a campi elettrici e/o magnetici senza attrito e coerentemente

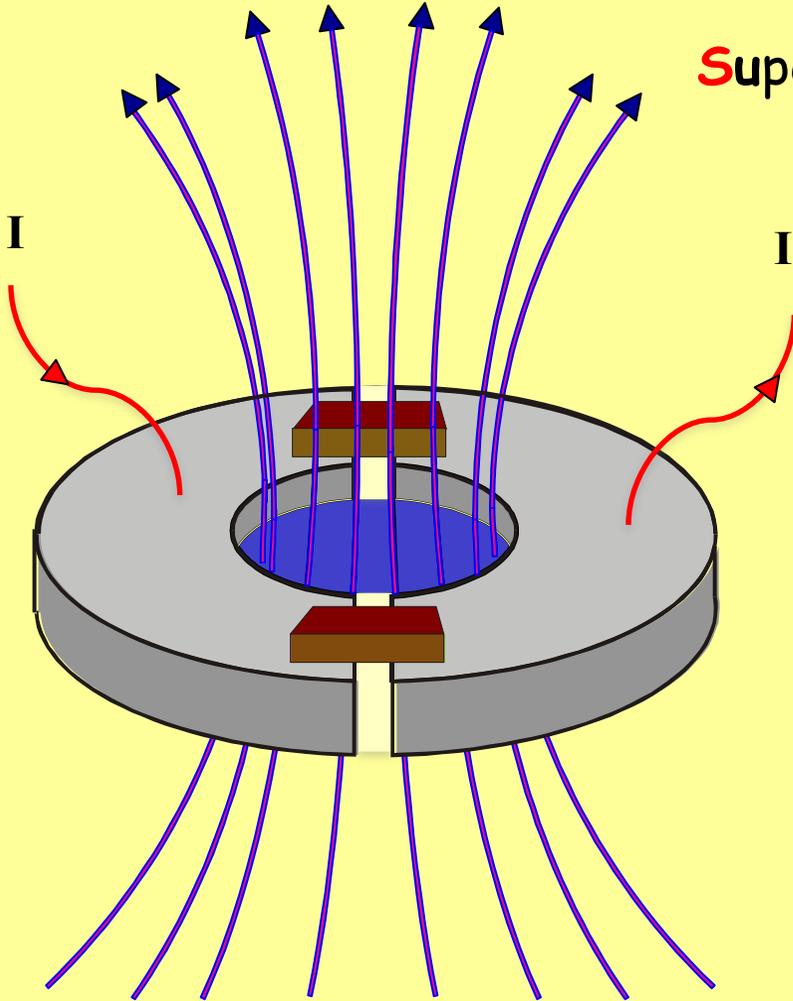
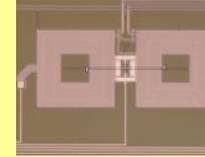
si muovono tutti

...senza attrito---> resistenza

Che cosa è lo SQUID?

Superconducting QUantum Interference Device

(SQUID)



Caratteristiche

- È il più sensibile rivelatore di campo magnetico:

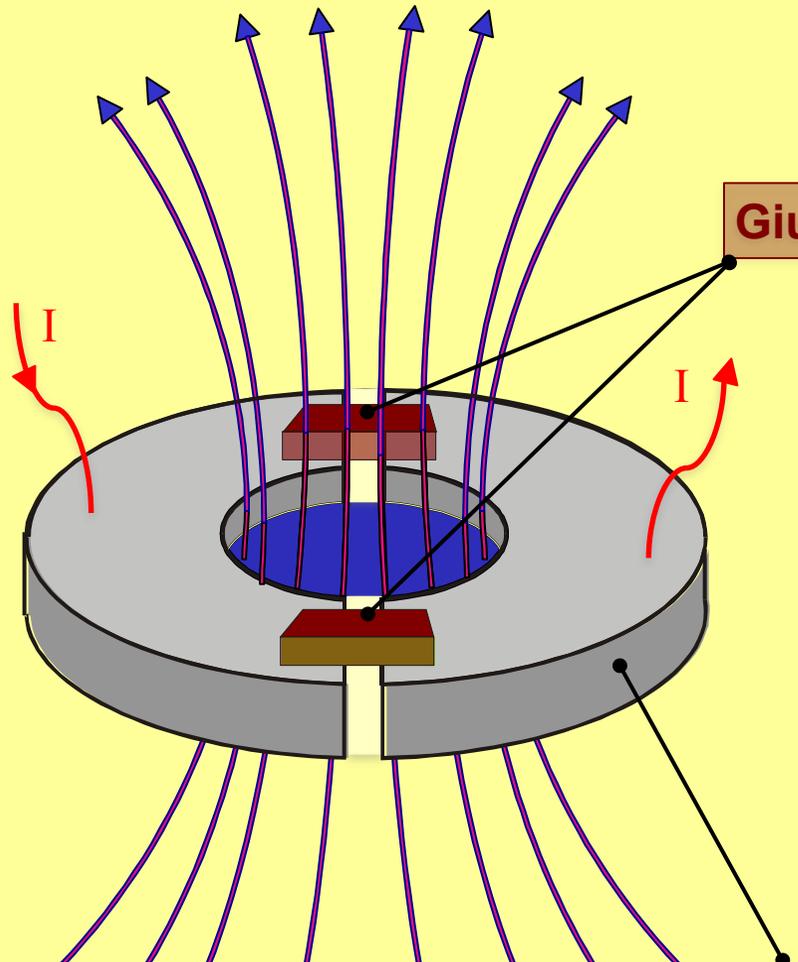
> $1/2\Phi_0 \approx 1 \times 10^{-15}$ Weber

- Al più semplice livello è uno strumento che converte minute quantità di campo magnetico in voltaggio a temperatura ambiente

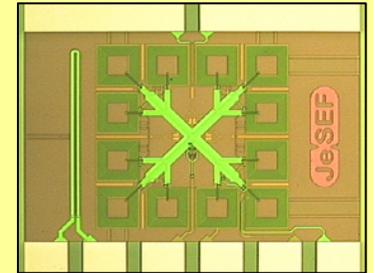
Lo SQUID è un amplificatore



Che cosa è lo SQUID?



Giunzioni Josephson



Lo SQUID è un trasduttore basato su **cinque** principi fisici derivati dalla **superconduttività**:

- Resistenza Zero
- Effetto Meissner
- Quantizzazione del campo magnetico
- Effetto Josephson (Tunnel Quantomeccanico)
- Interferenza fra le onde

E' un anello Superconduttore interrotto da (una o) due giunzioni

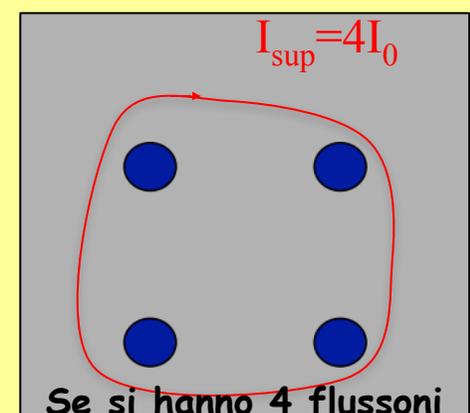
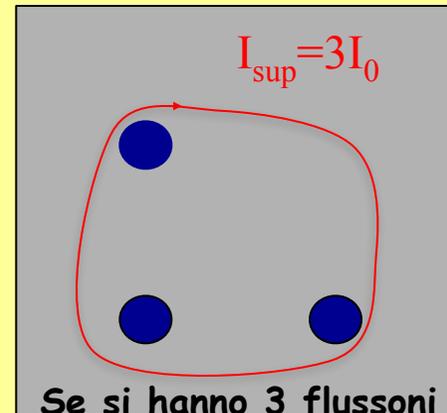
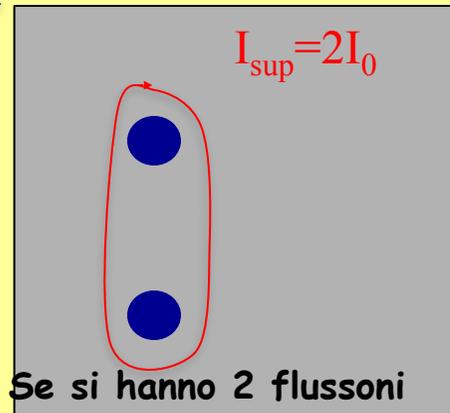
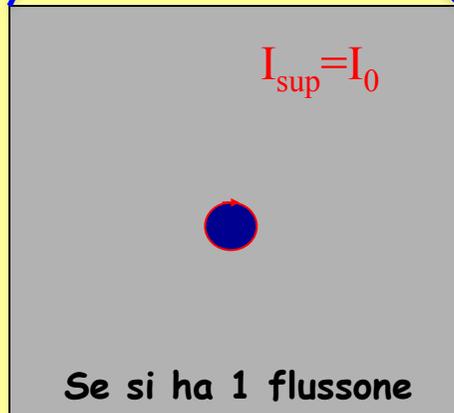
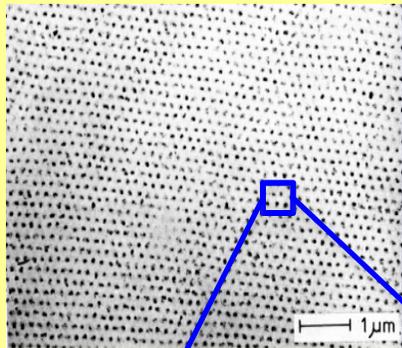
Che cosa è lo SQUID?

La quantizzazione del flusso magnetico
in un anello superconduttore

Alcuni chiarimenti:

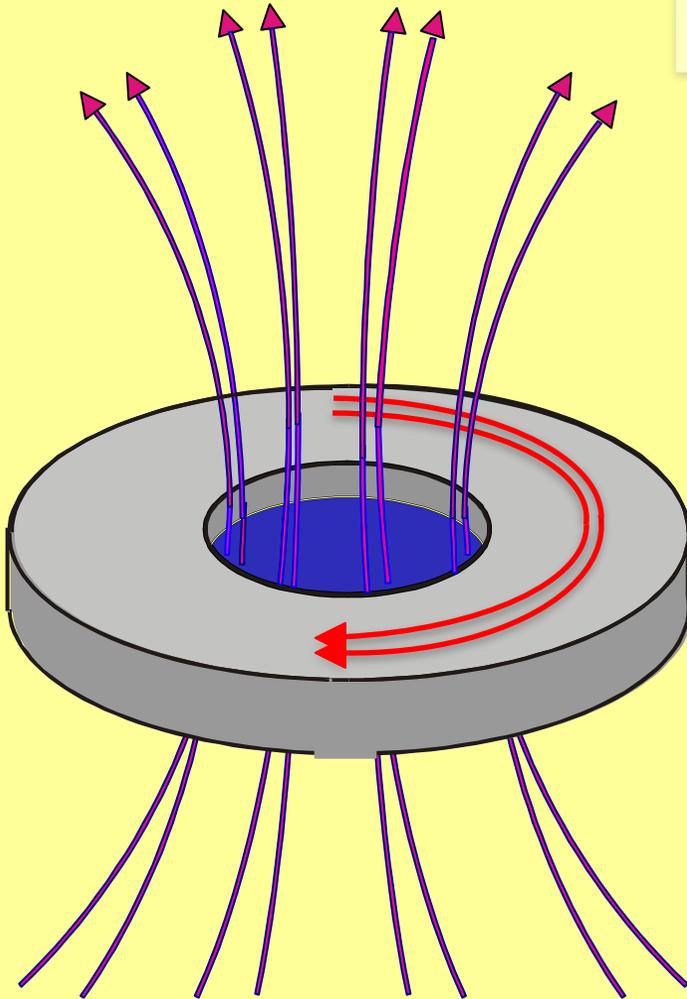
➤ Il valore della supercorrente che scorre in un superconduttore in un campo magnetico è proporzionale al numero dei quanti di flusso

➤ Il cuore normale è assimilabile a un foro



Che cosa è lo SQUID?

La quantizzazione del flusso magnetico
in un anello superconduttore



Stessa cosa nella situazione
capovolta:

➤ La supercorrente è
proporzionale al numero
di quanti di flusso
all'interno dell'anello

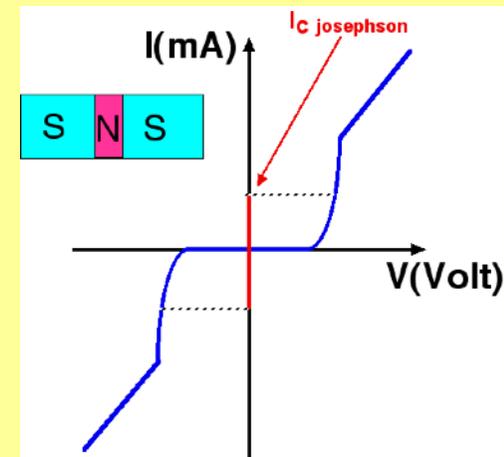
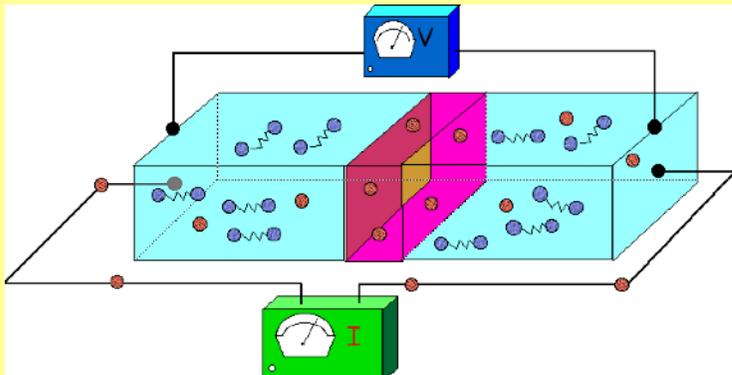
Che cosa è lo SQUID?

Effetto Josephson (tunnel Quanto-meccanico)

Un superconduttore (S) è separato in due regioni da una sottile regione resistiva normale (N) (1-10nm)

le coppie di elettroni, coppie di Cooper, possono fare un tunnel quantistico attraverso la regione resistiva senza caduta di voltaggio

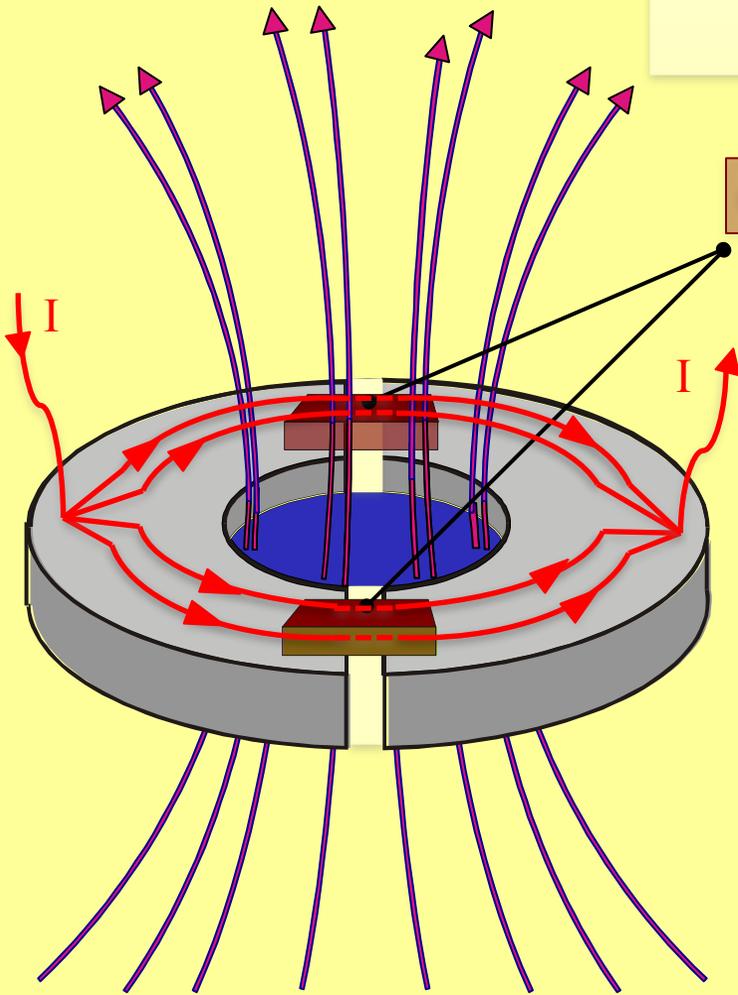
la corrente critica massima Josephson ha un valore più piccolo della corrente critica del superconduttore



Che cosa è lo SQUID?

Interferenza fra onde

Giunzioni Josephson (JJ)



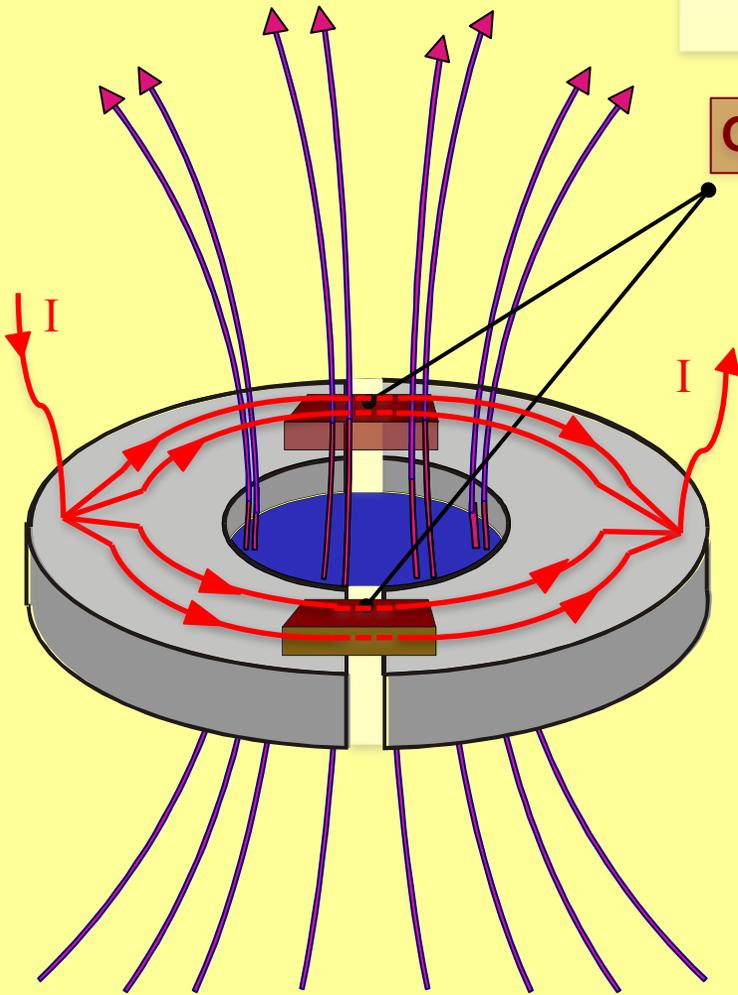
- le giunzioni sono la parte debole superconduttiva: I_c molto bassa
- Interferenza della corrente fra i due rami è costruttiva (le giunzioni influiscono poco)

➤ Scorre indisturbata la supercorrente Josephson

Che cosa è lo SQUID?

Interferenza fra onde

Giunzioni Josephson (JJ)



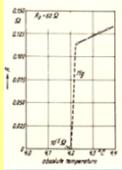
- Per ogni 'quanto di flusso magnetico' che sta entrando attraverso la giunzione
- Abbiamo un alterazione delle supercorrenti che scorrono nei due rami
- Interferenza non è più costruttiva e la supercorrente diminuisce finchè il quanto di flusso non entra completamente nel foro per poi riaumentare

❑ Quindi in uno SQUID la supercorrente Josephson oscilla: ABBIAMO un contatore di quanti di flusso

Premi Nobel per la superconduttività

Kamerling Onnes (1913)

Per le sue ricerche sulla proprietà della materia a bassa temperatura che ha condotto inoltre alla produzione dell'elio liquido



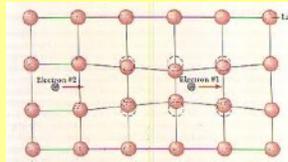
Lev Davidovich Landau (1962)

Per le teorie pionieristiche sulla materia condensata, in particolare l'elio liquido



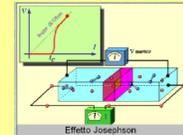
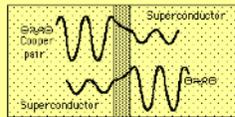
J. Bardeen, L.N. Cooper, J.R. Schrieffer (1972)

Per la loro teoria della Superconduttività sviluppata congiuntamente, conosciuta come teoria BCS



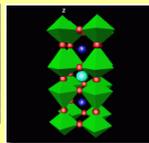
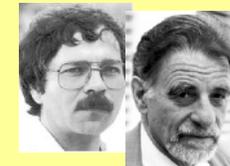
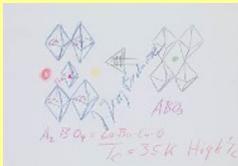
I. Giavner, B.D. Josephson (1973)

Per la scoperta sperimentale riguardante il fenomeno tunnel nei superconduttori e la predizione teorica delle proprietà di una supercorrente attraverso una barriera tunnel (effetto Josephson)



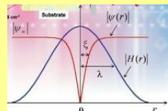
J. G. Bednorz, K.A. Muller (1987)

Per il loro importante successo nella scoperta della superconduttività nei materiali ceramici



A. A. Abrikosov, K.L. Ginzburg, A.J. Leggett (2003)

Per I pionieristici contributi alla teoria della superconduttività e superfluidità



$$\mathbf{j} = \frac{2e}{m} \text{Re} \{ \psi^* (-i\hbar\nabla - 2e\mathbf{A}) \psi \}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{m}{4\mu_0 e^2 \psi_0^2}}$$

.....qualche formula sul magnetismo

B=induzione magnetica o densita' di flusso magnetico
o campo magnetico

[weber/m²=tesla MKS]

B=1 tesla=10⁴Gauss [Gauss CGS]

E' comunemente usata nelle applicazioni

M=momento magnetico per unita' di volume o peso o massa,
chiamata anche intensita' di magnetizzazione

[weber/m²=tesla MKS]

ma attenzione

M= 1 tesla=1/4π x10⁴ Gauss=7.96x10⁴ G [Gauss CGS]

H= campo magnetico applicato

[Ampere/metro MKS]

1A/m= 4πx10⁻³ Oe [Oested=Gauss CGS]

μ₀= 4πx10⁻⁷ H/m permiabilita' magnetica

del vuoto MKSma attenzione: μ₀= 4π [Gauss CGS]

χ= suscettivita' magnetica

MKS e CGS

Correlazione fra B,M,H

In MKS

$$B= M+\mu_0 H$$

$$B=0 \text{ (Meissner)}$$

$$\chi= M/H=-1/\mu_0$$

In Gauss CGS

$$B= M+4\pi H$$

$$B=0 \text{ (Meissner)}$$

$$\chi =-1/4\pi$$