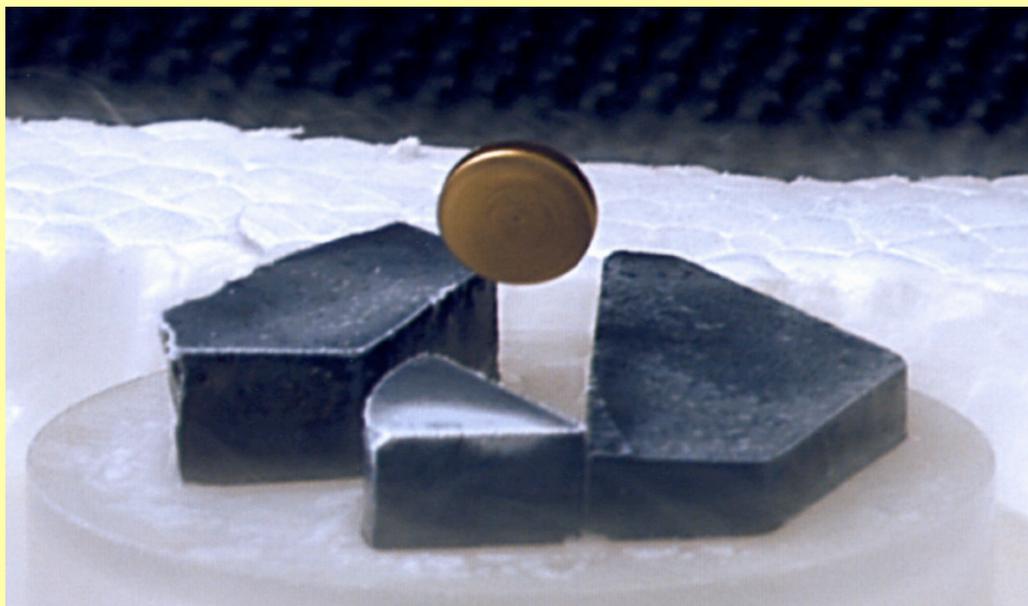
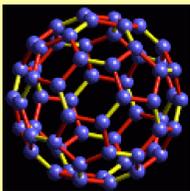
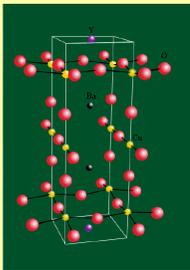
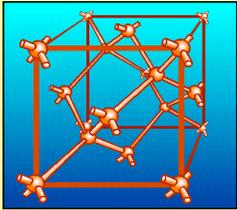


Il fenomeno della Superconduttività

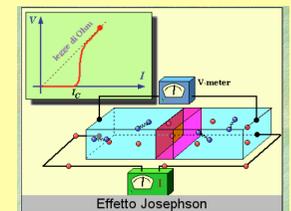
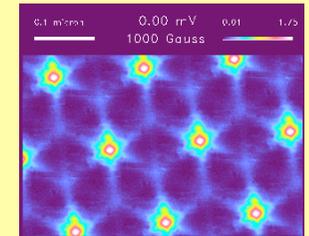
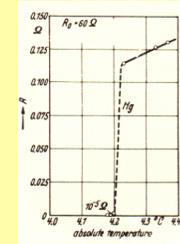


Dr. Daniele Di Gioacchino
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Laboratori Nazionali di Frascati

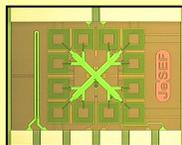


La Superconduttività e' uno stato della materia con eccezionali proprietà elettriche e magnetiche. Evidenzia un comportamento della fisica quantistica nei solidi. E' uno dei rarissimi effetti quantistici macroscopici.

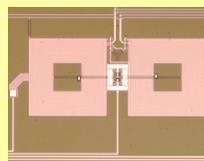
Fu scoperto da Onnes nel 1911



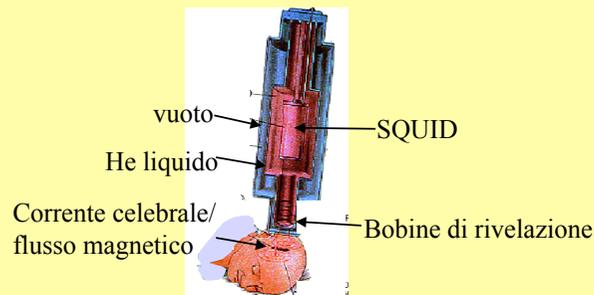
Treni veloci a levitazione magnetica



Giunzione Josephson



SQUID

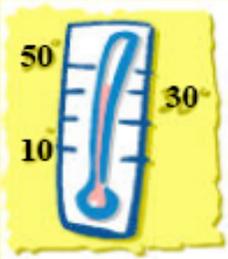


Analisi biomagnetiche con SQUID



Potenti Magneti per MNR

Come si caratterizza?

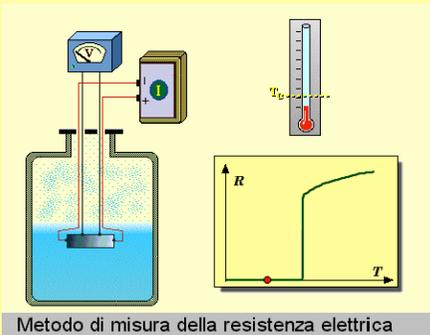


1. La superconduttività è un fenomeno che accade a bassa temperatura :

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

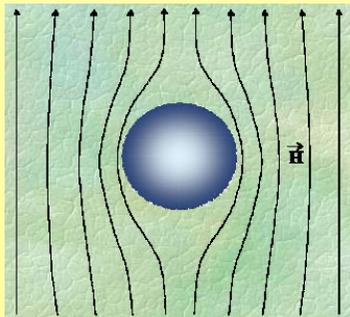
Come si caratterizza?

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



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

Come si caratterizza?

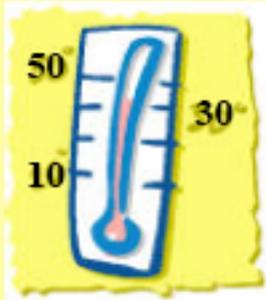


Levitazione magnetica di un magnetino (0.1 Tesla) su pezzi di YBCO materiale superconduttore ceramico. Foto LNF-INFN

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

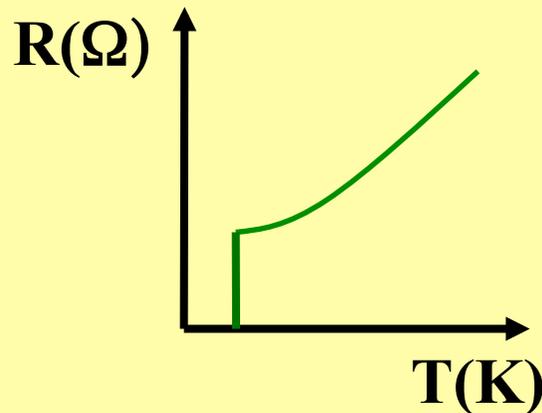
- ✓ Esiste un valore critico del campo magnetico (B_c) sopra il quale il materiale torna normale

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



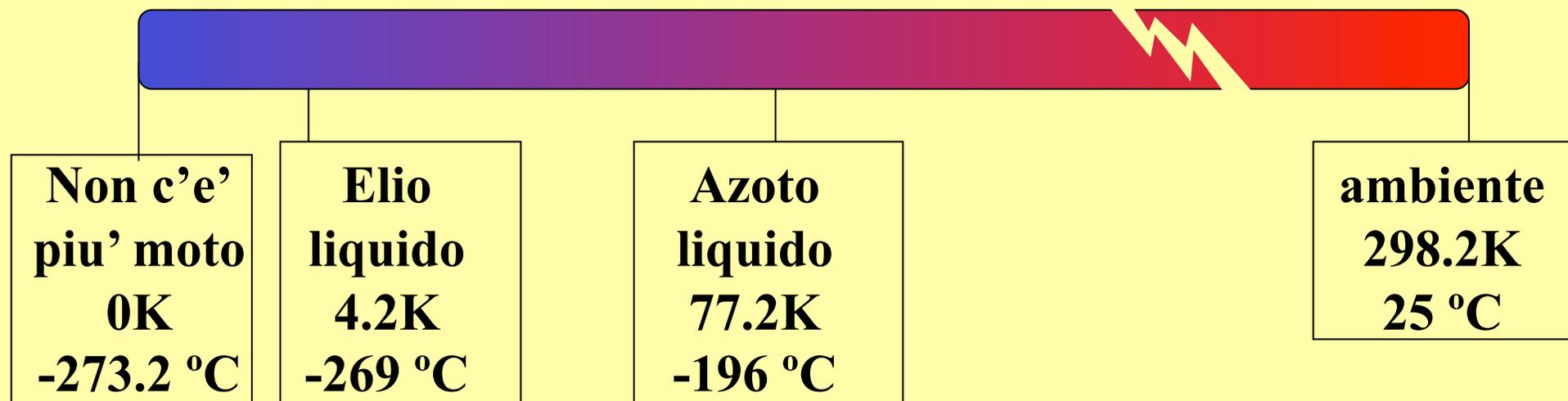
3. Superconduttori in presenza di un campo magnetico lo espellono completamente

Talvolta

(effetto Meissner)

1. La superconduttività accade a bassa temperatura

una relativamente

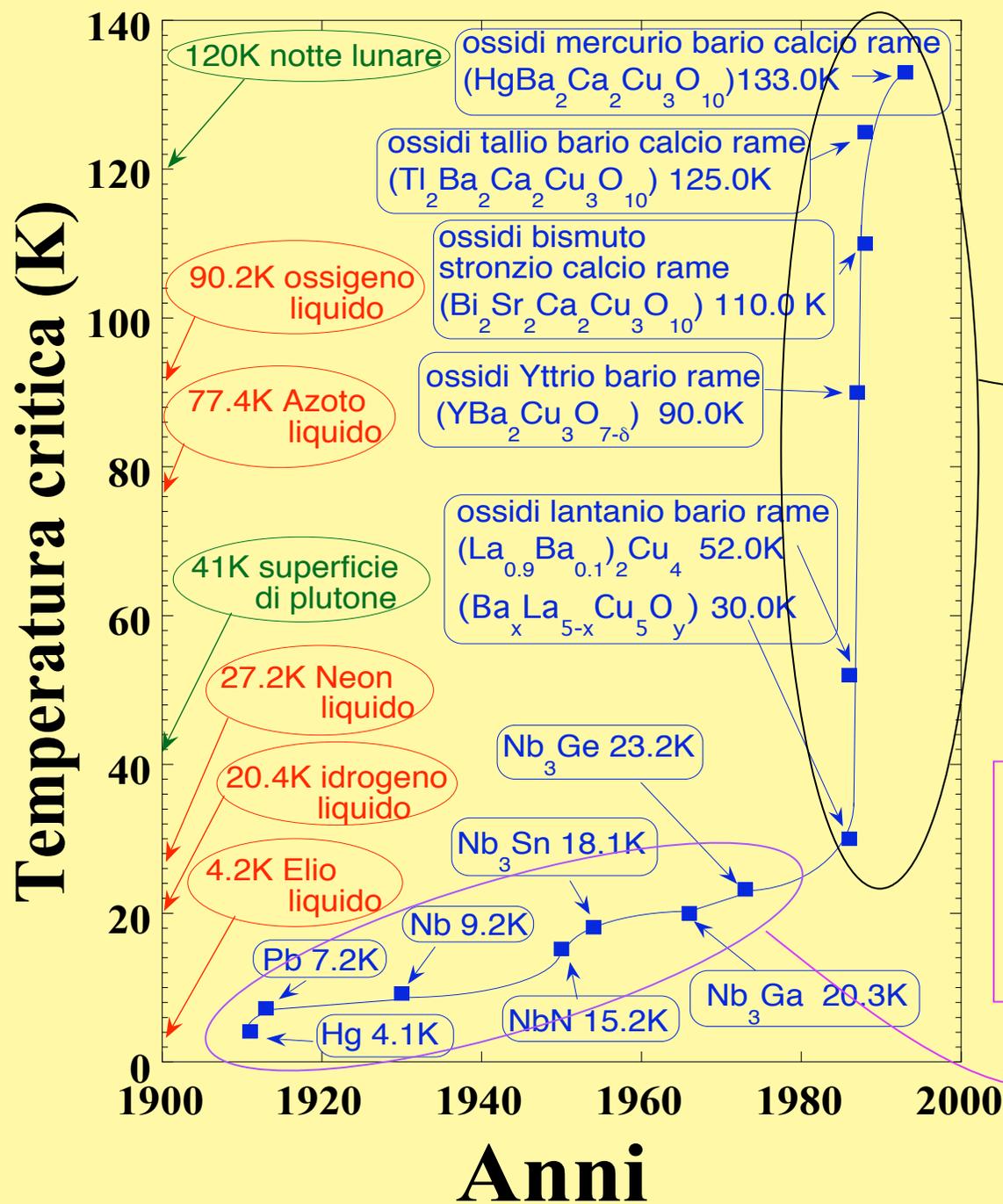


Superconduttori "normali"

~ 0 – 23K

Superconduttori ad alta temperatura critica

30 – 138 K

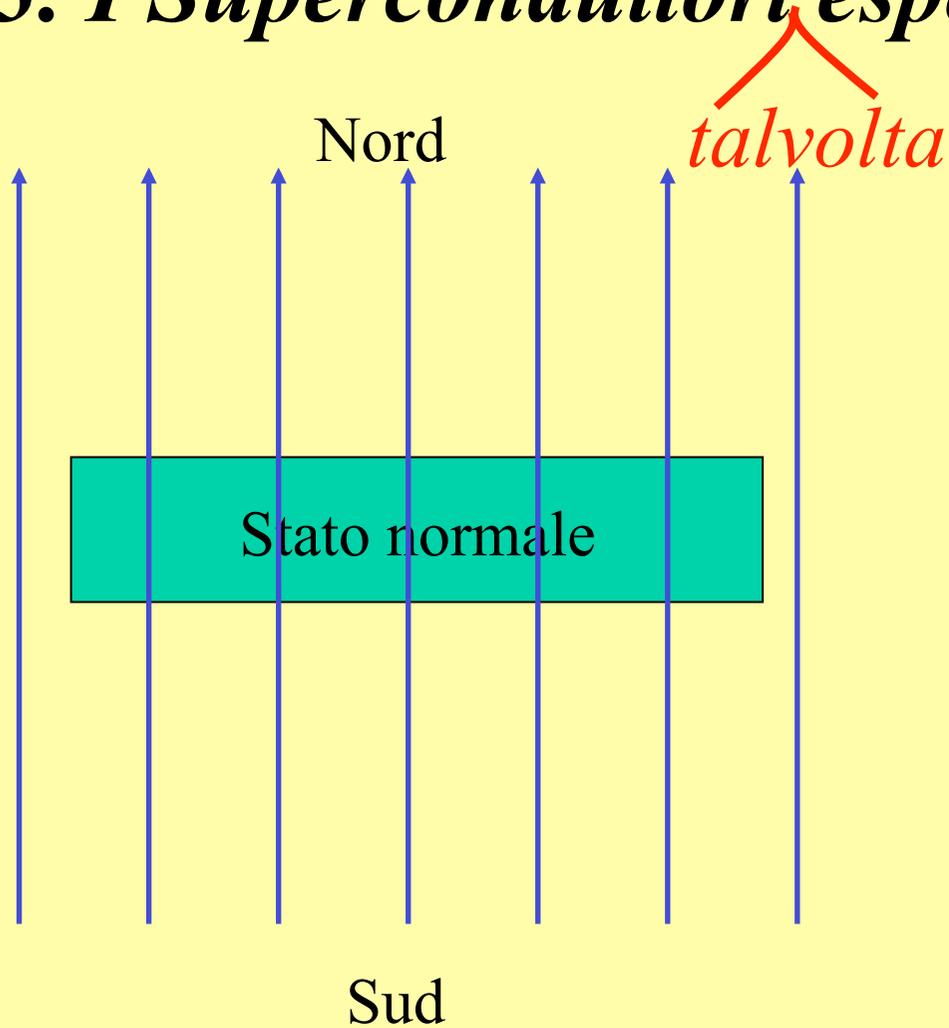


Superconduttori alta temperatura critica (ceramici)

Superconduttori Bassa temperatura critica (metallici)

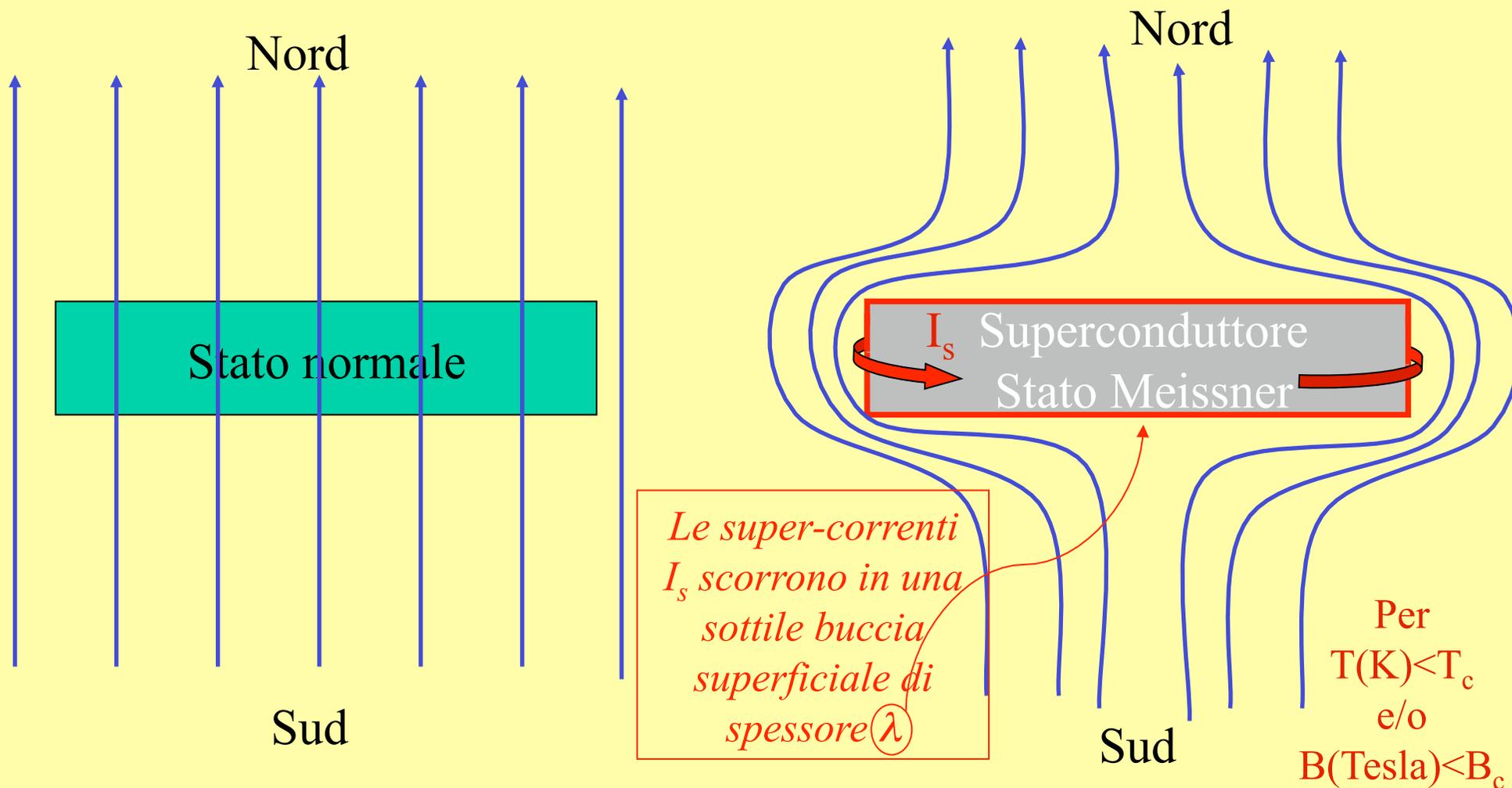
.....parliamo ora della 3^a proprieta' (prima della 2^a seconda)

3. I Superconduttori espellono il campo magnetico



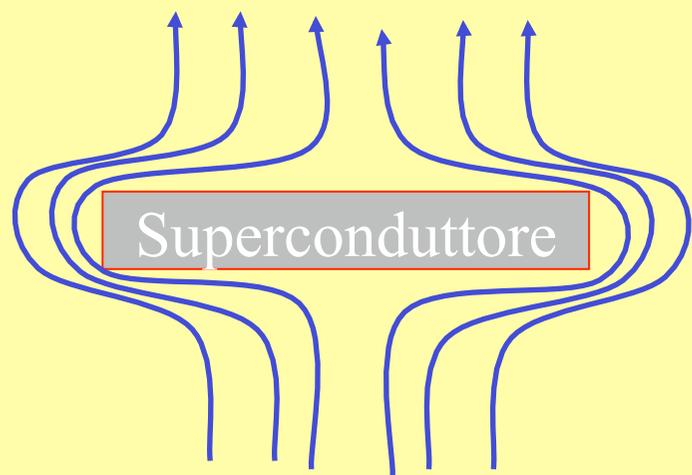
talvolta

3. *I Superconduttori espellono il campo magnetico*



talvolta

3. *I Superconduttori espellono il campo magnetico*

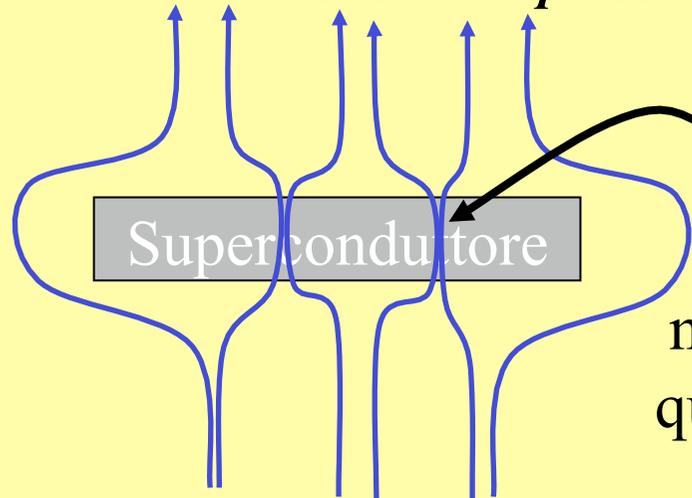


Vista dall'alto

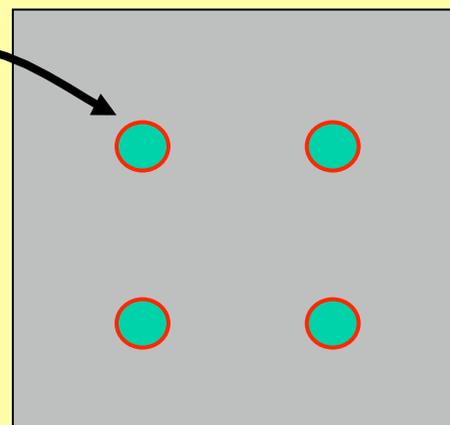


Superconduttori di tipo I

..ma esistono dei superconduttori dove c'è uno stato intermedio con zone miste

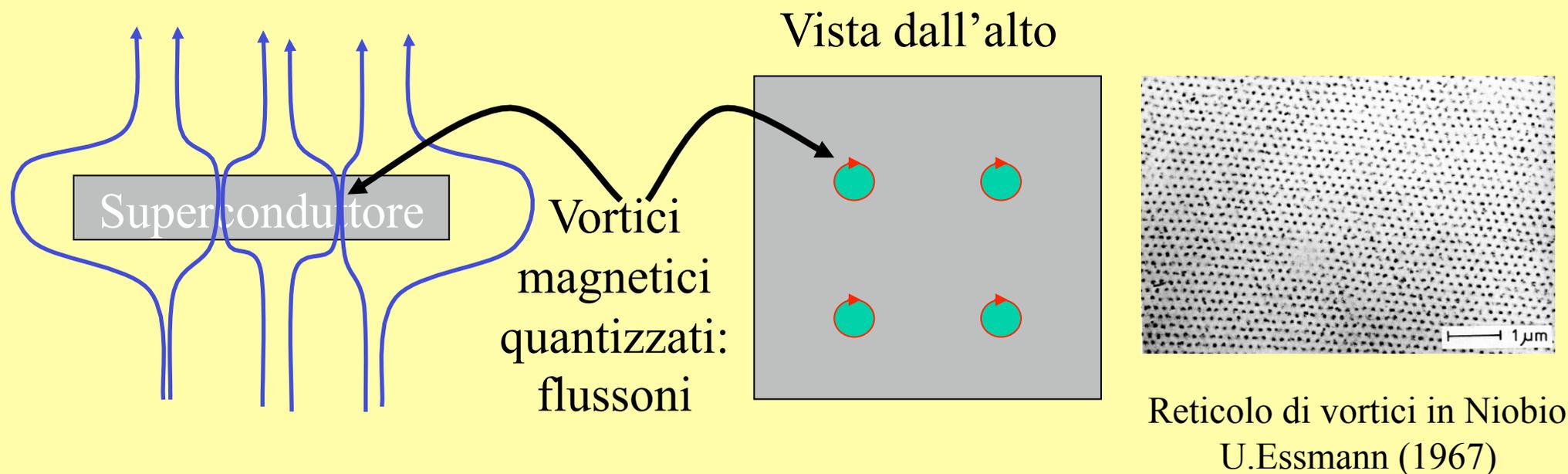


Vortici magnetici quantizzati



Superconduttori di tipo II

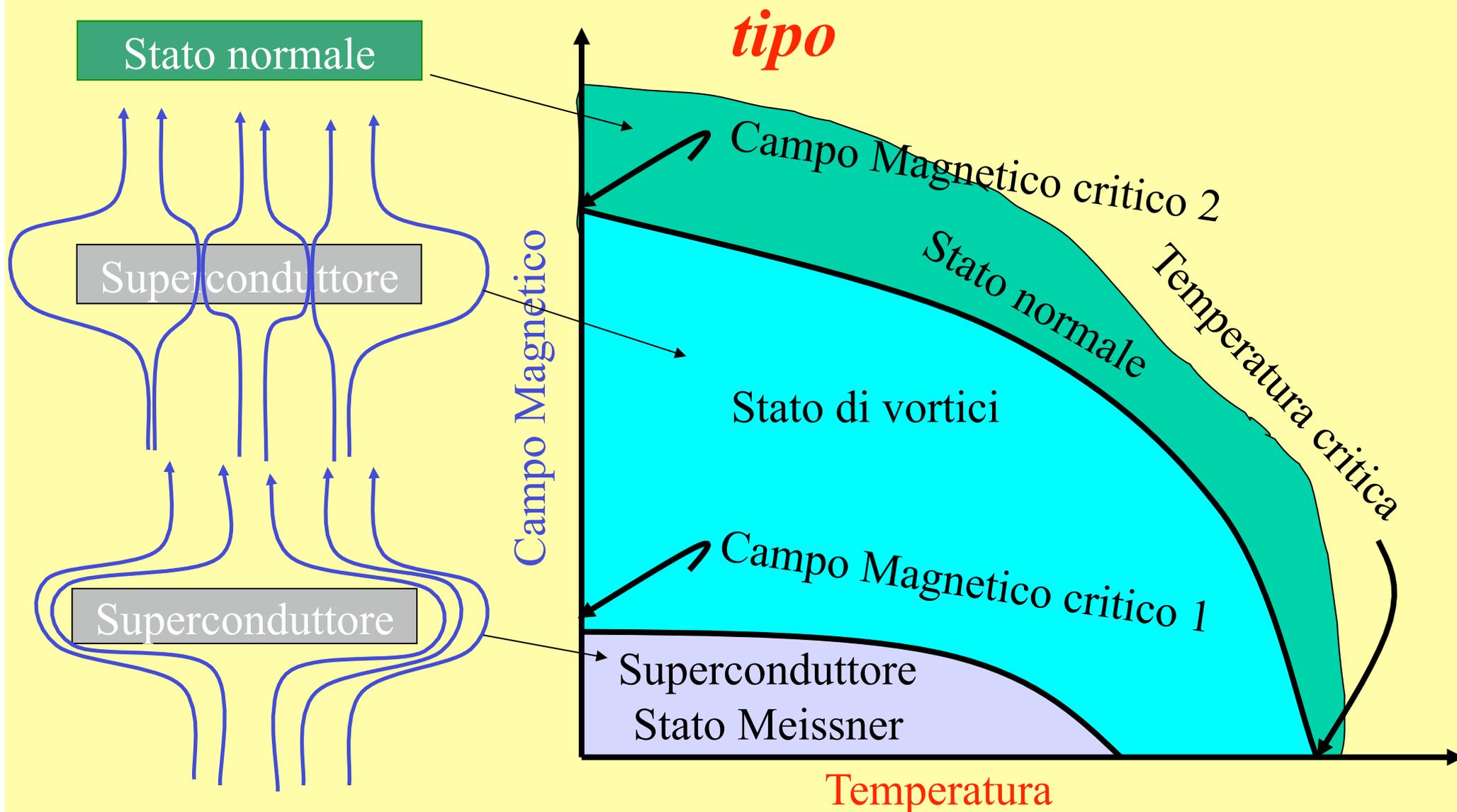
3. *Lo stato di parziale espulsione del campo magnetico dei Superconduttori di II tipo*



I flussoni consistono:

- in un nucleo di materiale normale dove e' 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

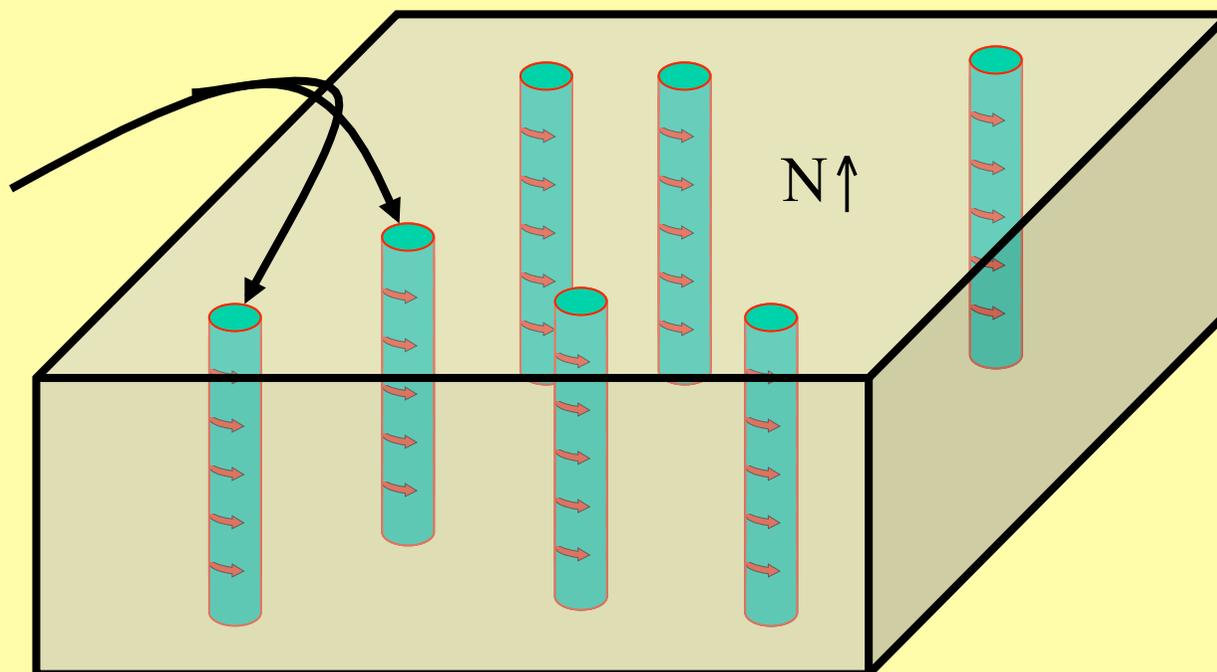
Diagramma di fase B-T per i Superconduttori di II tipo



..... 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

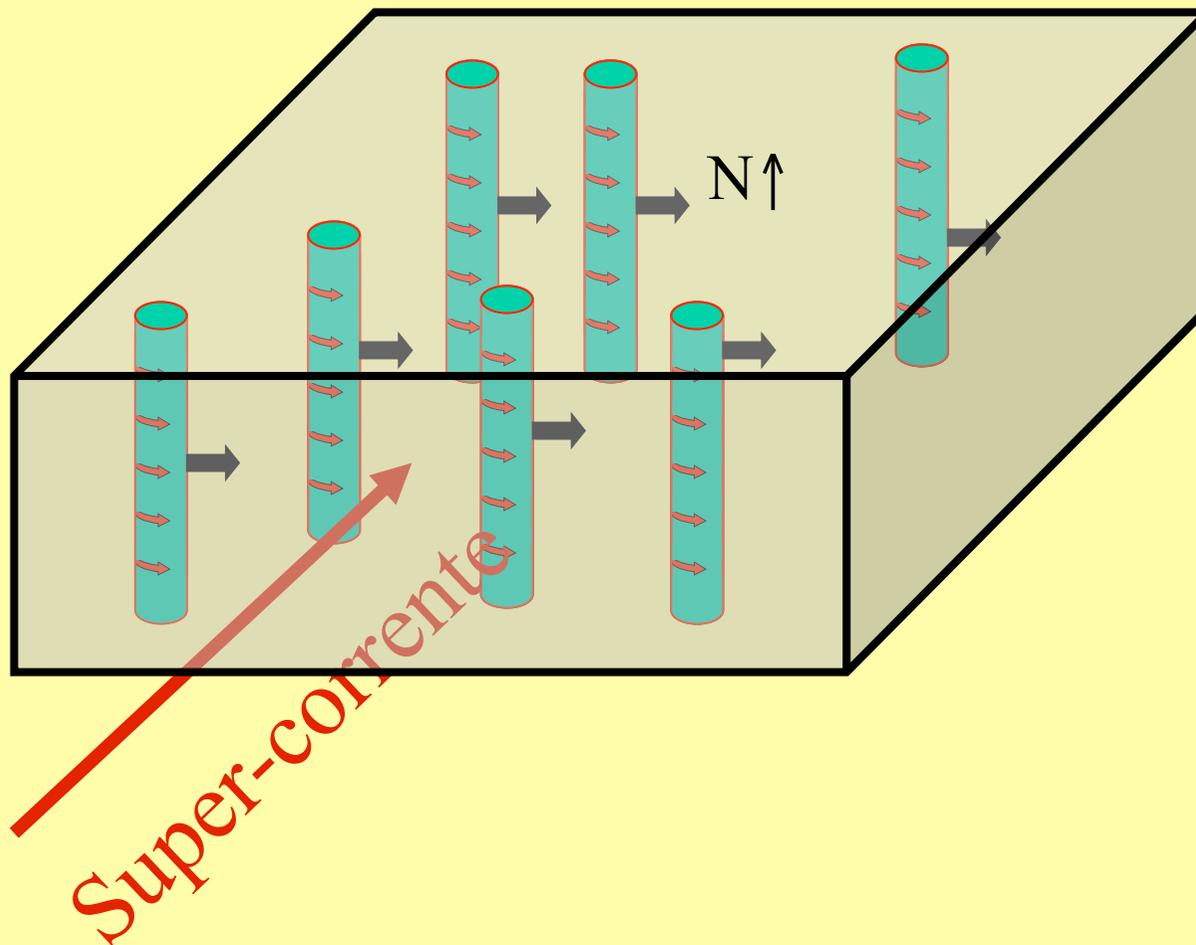


Come puo' avvenire questo moto?

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

possono avere

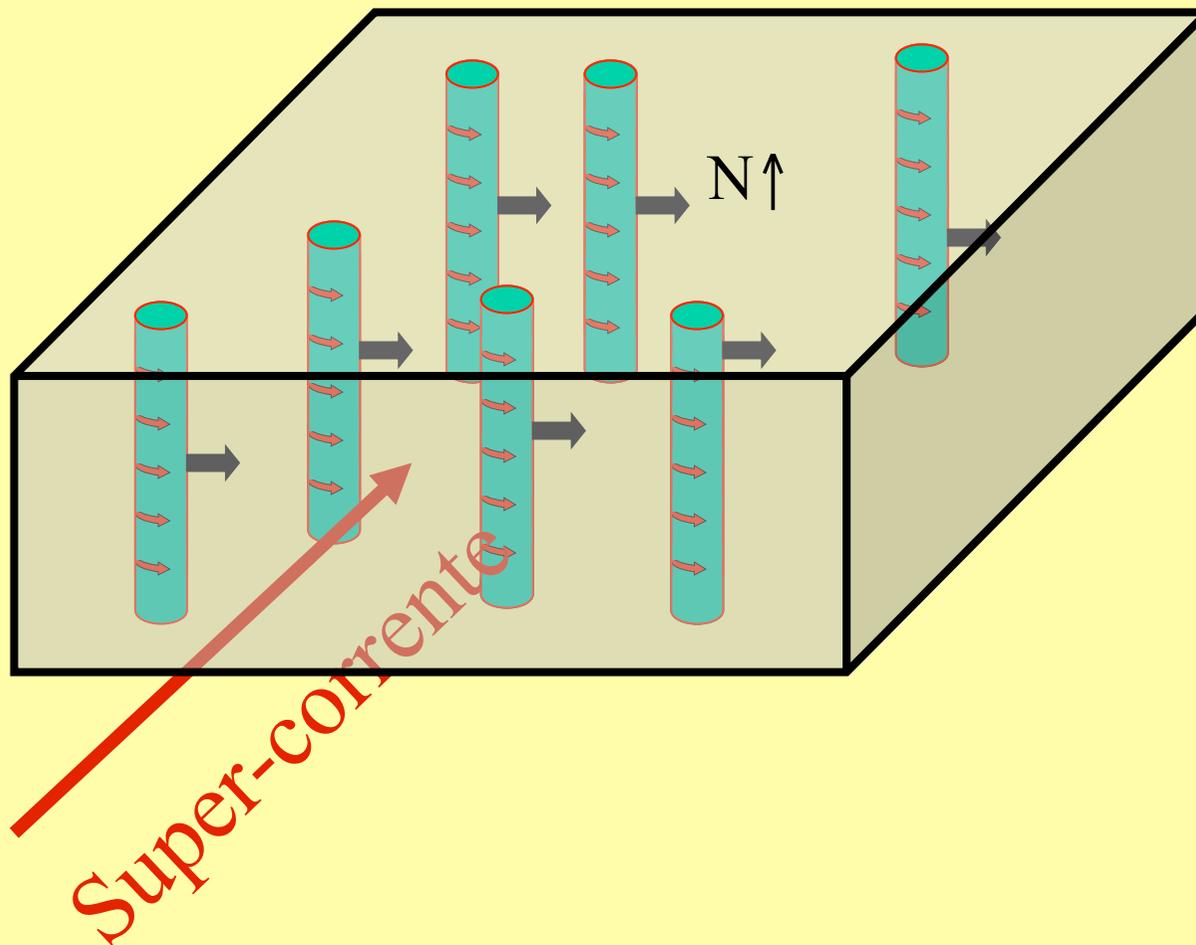
- L'applicazione di una super-corrente elettrica fa nascere una *forza* sui vortici magnetici



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

possono avere

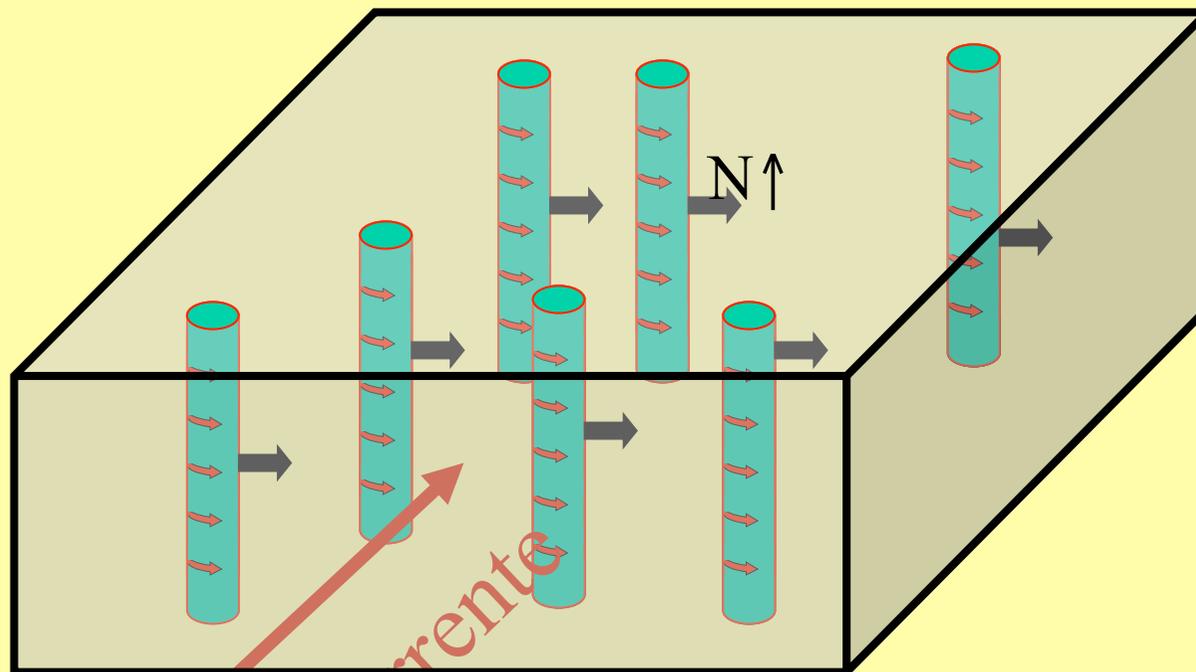
- ..e i vortici possono fluire con una frizione



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

possono avere

- ..e i vortici possono fluire con una frizione

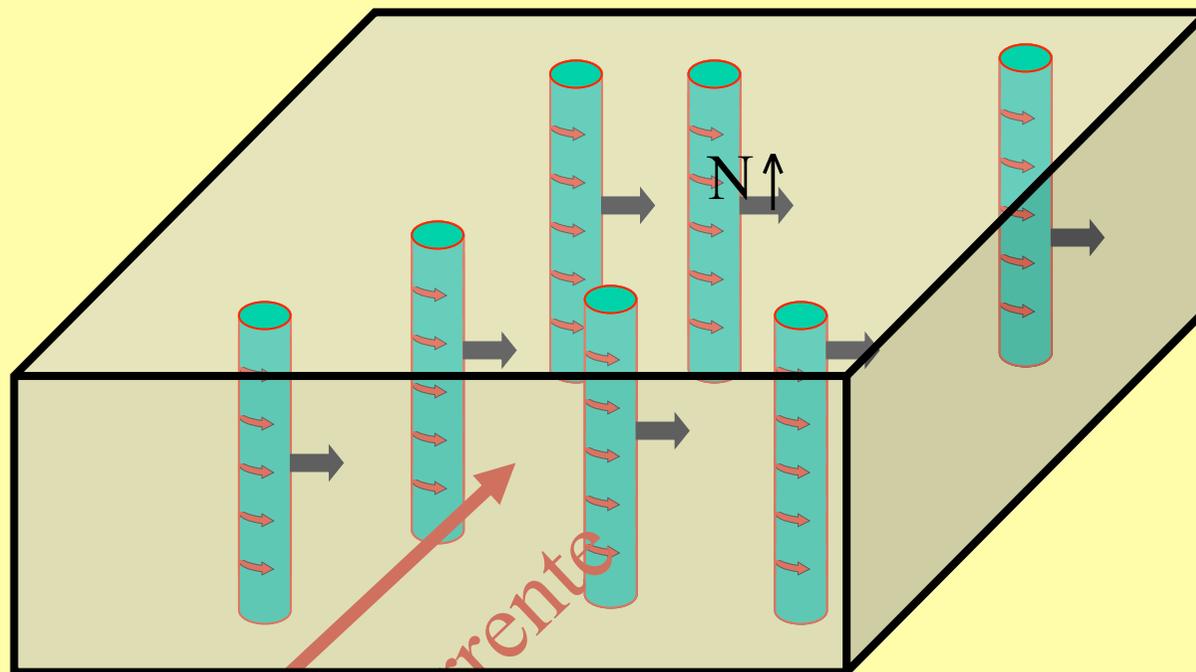


Super-corrente

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

possono avere

- ..e i vortici possono fluire con una frizione

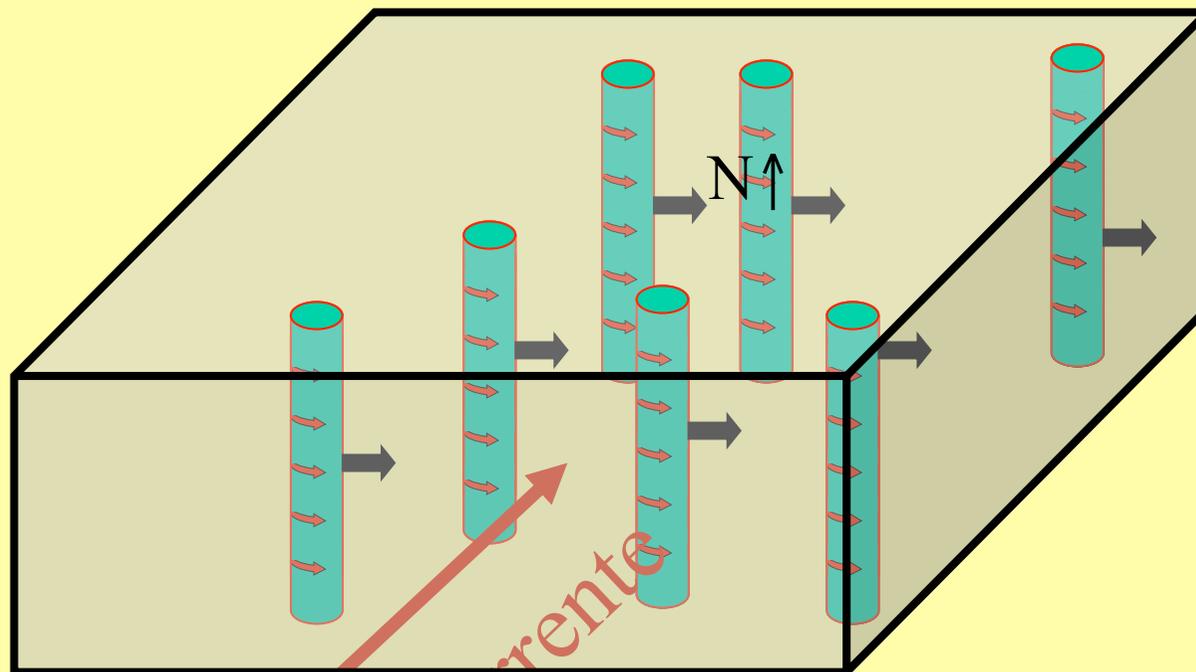


Super-corrente

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

possono avere

- ..e i vortici possono fluire con una frizione

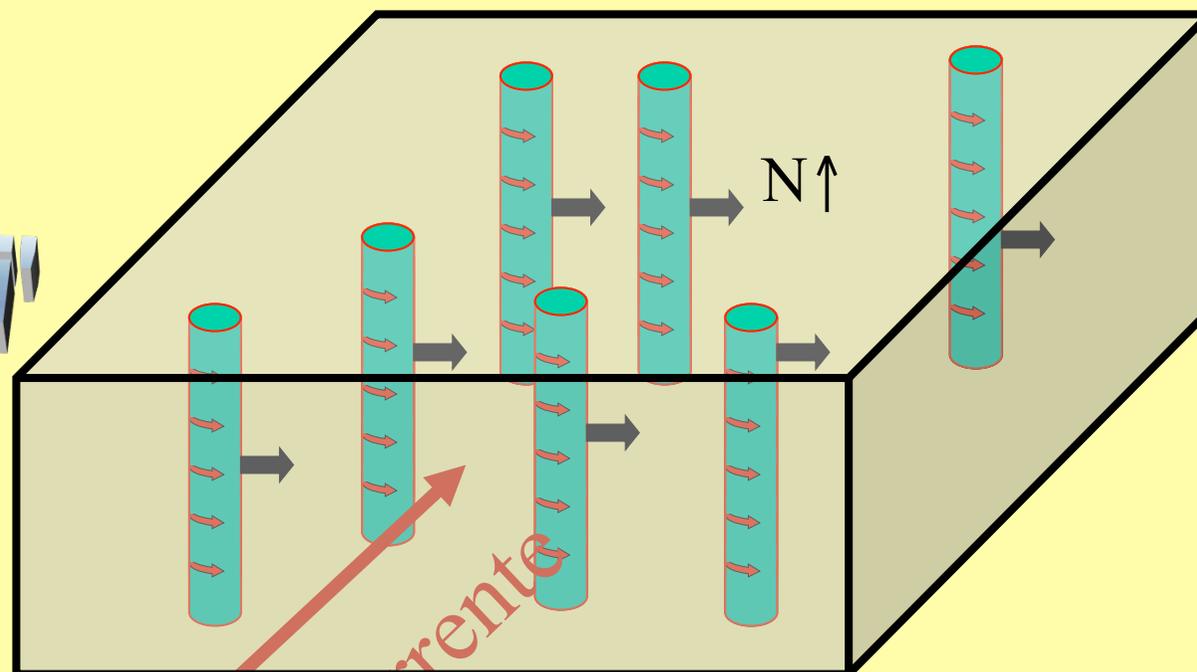


Super-corrente

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

possono avere

**“cuori normali”
dei flussoni
in moto
danno resistenza**



Super-corrente

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

possono avere

La natura e' maligna:

la stessa

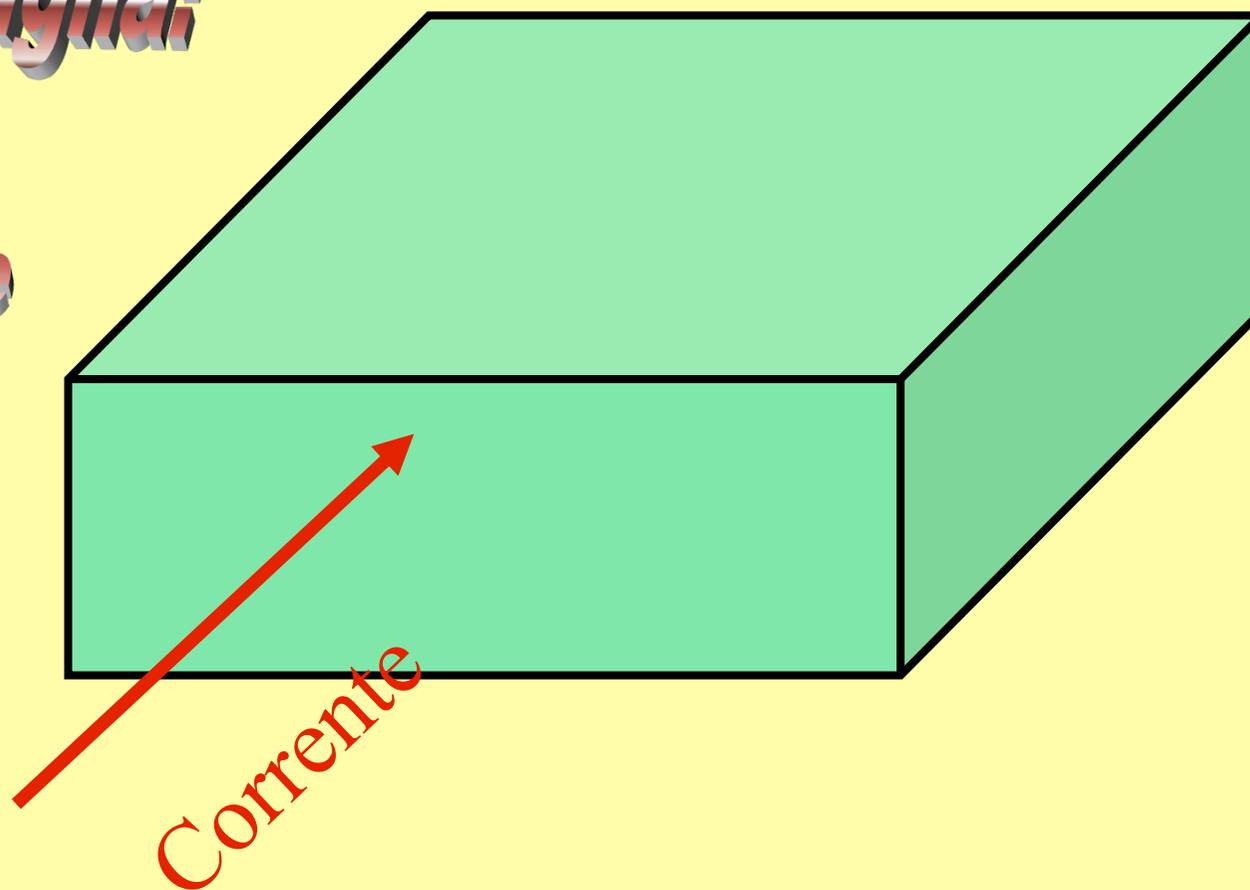
super-corrente

fa transire

nello stato normale

il

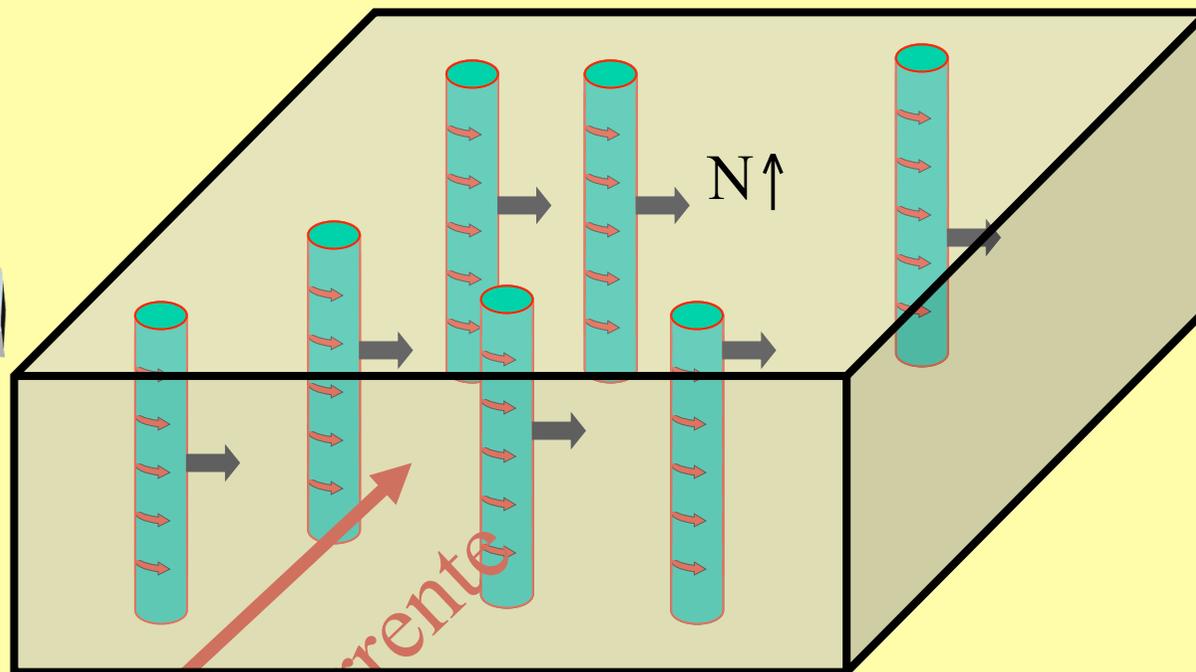
superconduttore



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

possono avere

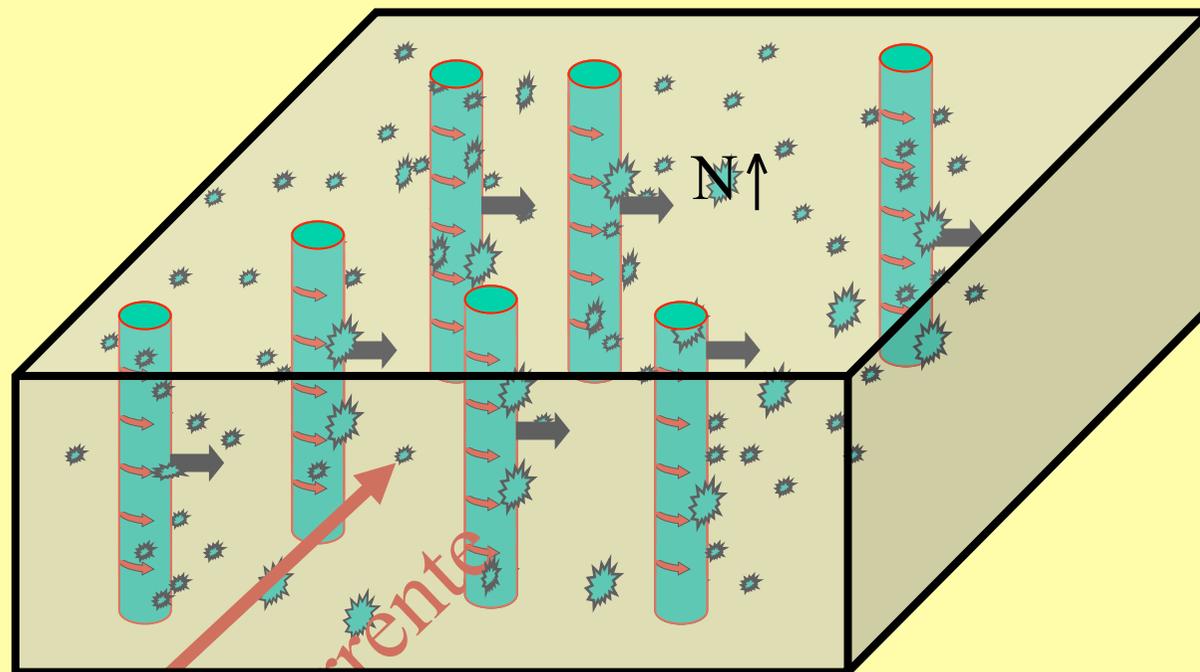
La situazione
non e' cosi' disperata
la stessa natura
ci viene il aiuto



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

possono avere

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



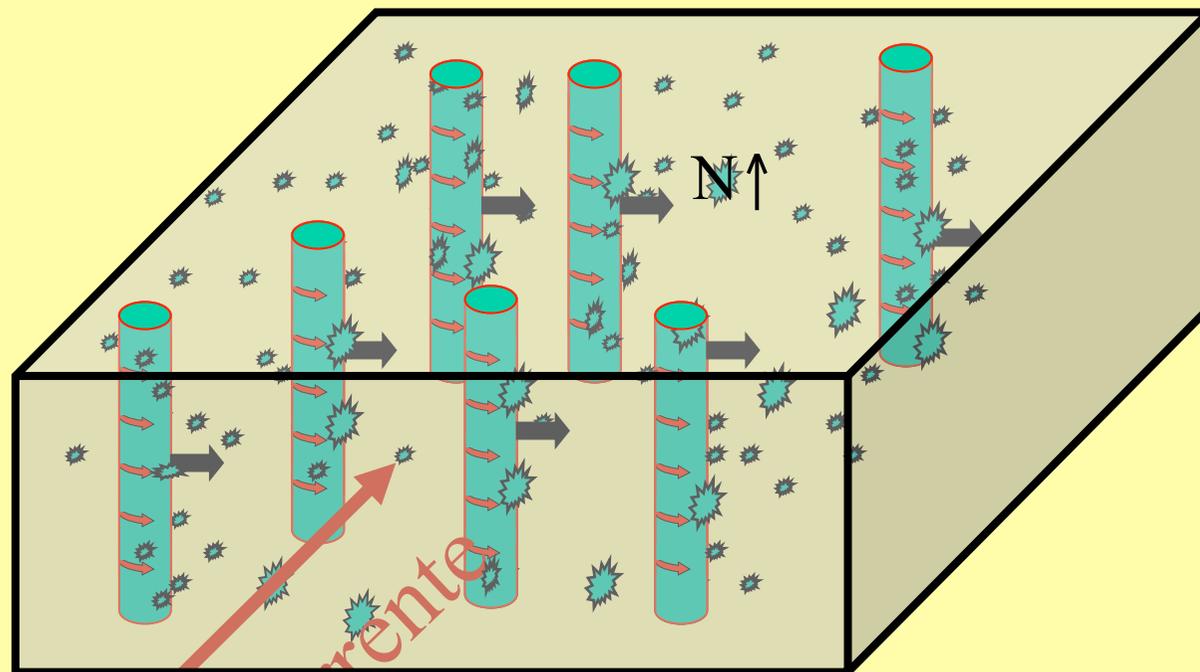
che succede?

Super-corrente

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

possono avere

- I quanti di flusso vanno sulle imperfezioni e



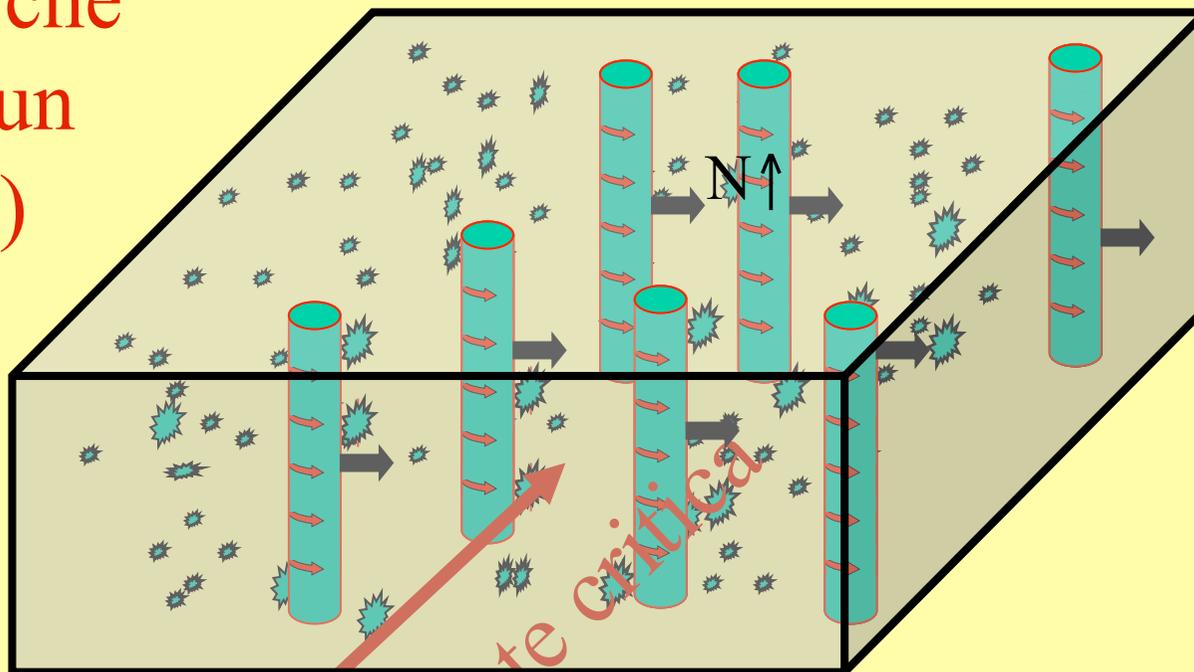
bloccano i quanti di flusso

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

possono avere

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

↓
I quanti di flusso
corrono via

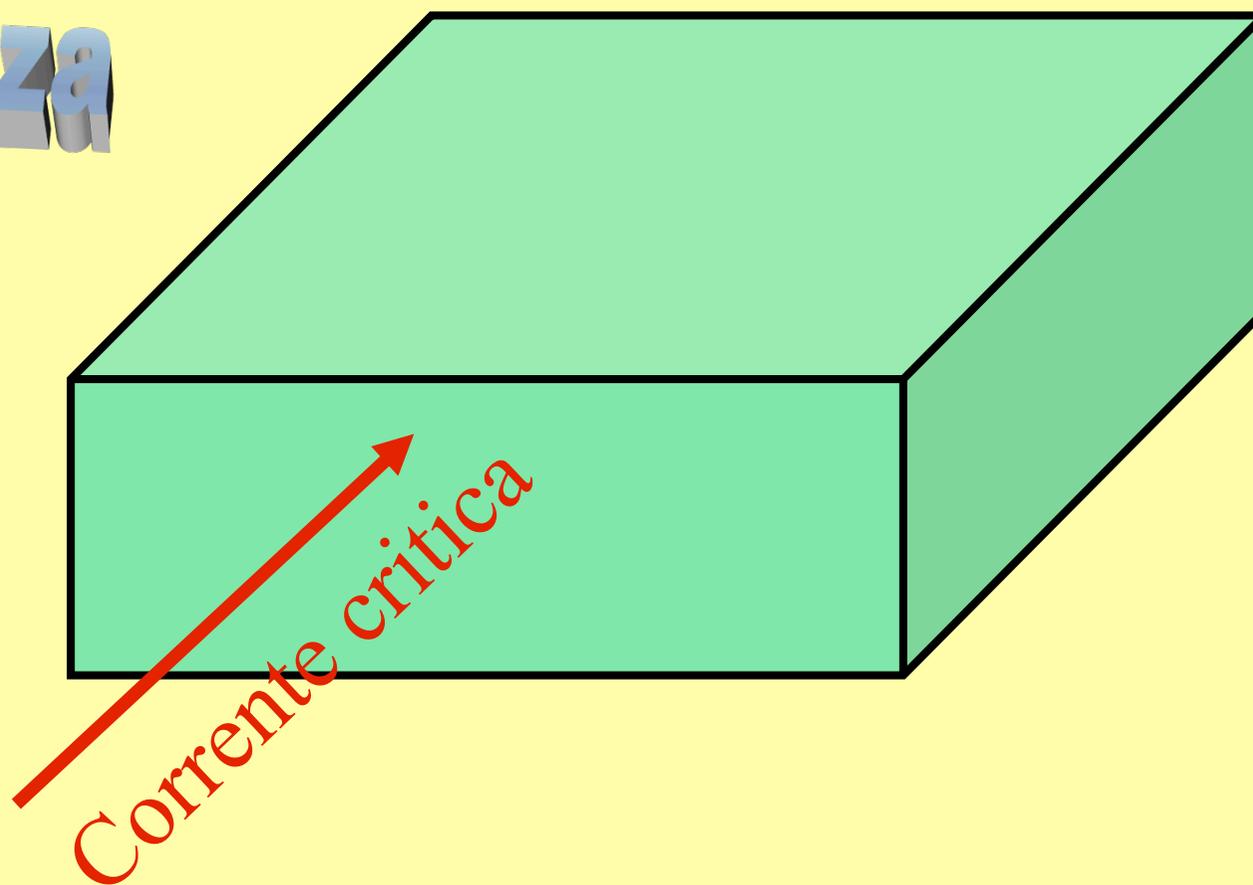


Super-corrente critica

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

possono avere

«e la sostanza
transisce
nello stato
normale



Lo stato superconduttore e' individuato da tre parametri:

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

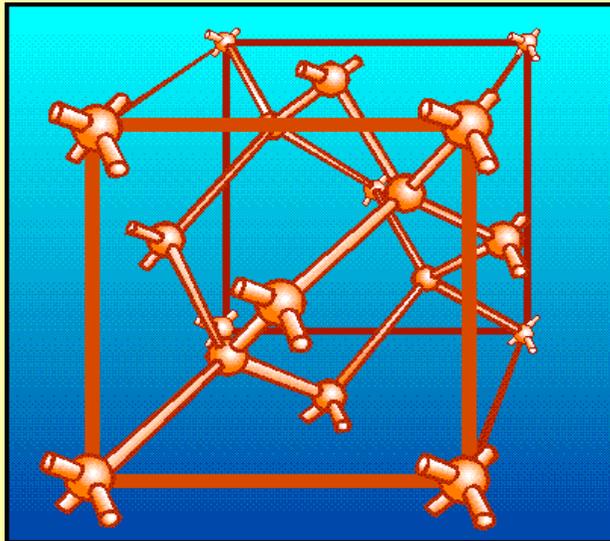
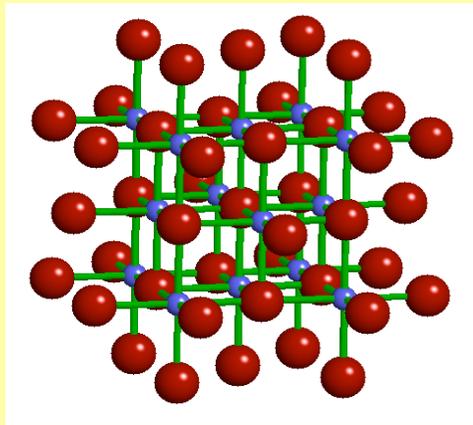
Diagramma di fase B-T-I per i Superconduttori di II tipo



Strutture chimiche dei superconduttori

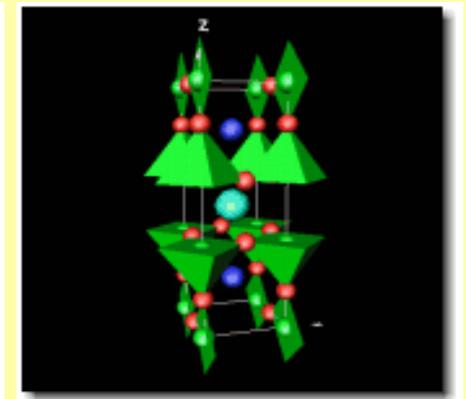
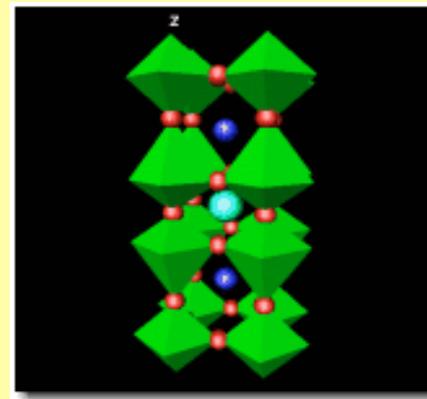
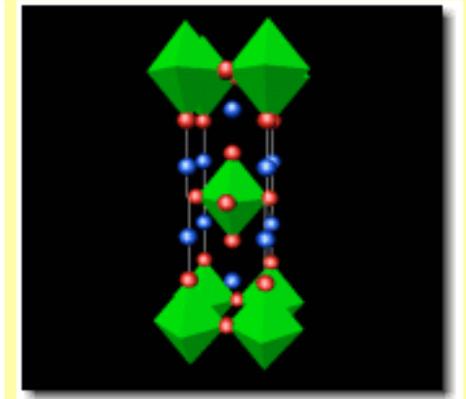
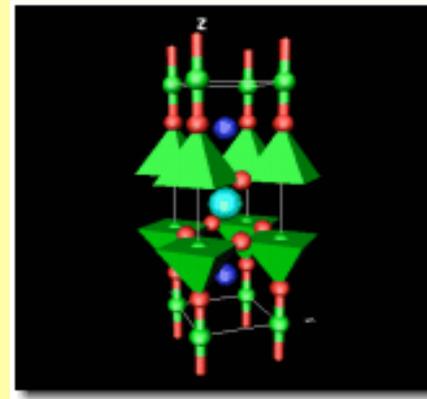
metallici bassa T_c

Struttura 3-Dimensionale



Ceramici alta T_c

Struttura 2-dimensionale
a strati



un 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 energia minima e si muovono **collettivamente e coerentemente** senza incontrare resistenza in coppie (coppie di Cooper).

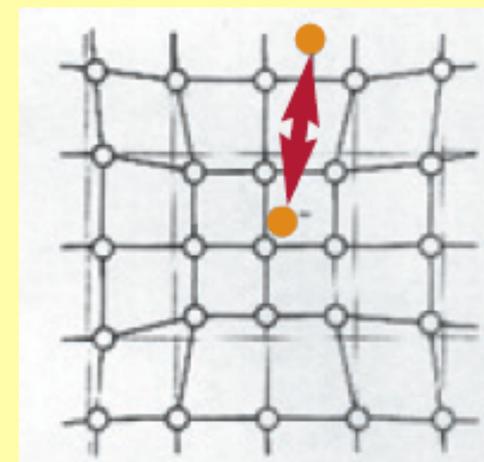
Teorie precedenti: Modello a due fluidi (London, Gorter e Casimir) e primo modello quantistico di Ginzburg-Landau

un po' di teoria.....:

-BCS-

elettroni e fononi

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



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

interagiscono per dare.....

un po' di teoria.....

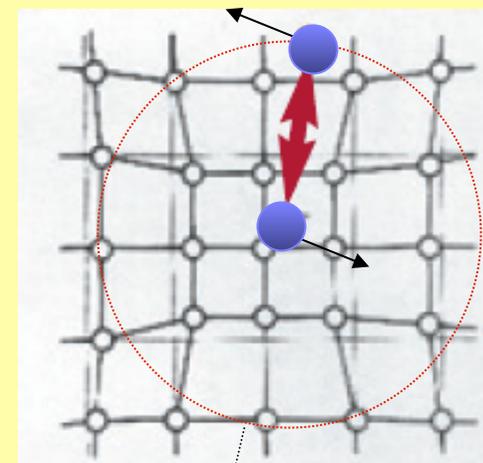
-BCS-

le coppie di Cooper

Un altro elettrone che si muove in modo opposto e con opposto spin vicino al primo (all'interno di un volume caratteristico) vede il primo elettrone coperto da cariche positive che eccedono quella negativa dell'elettrone stesso

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)



Volume caratteristico

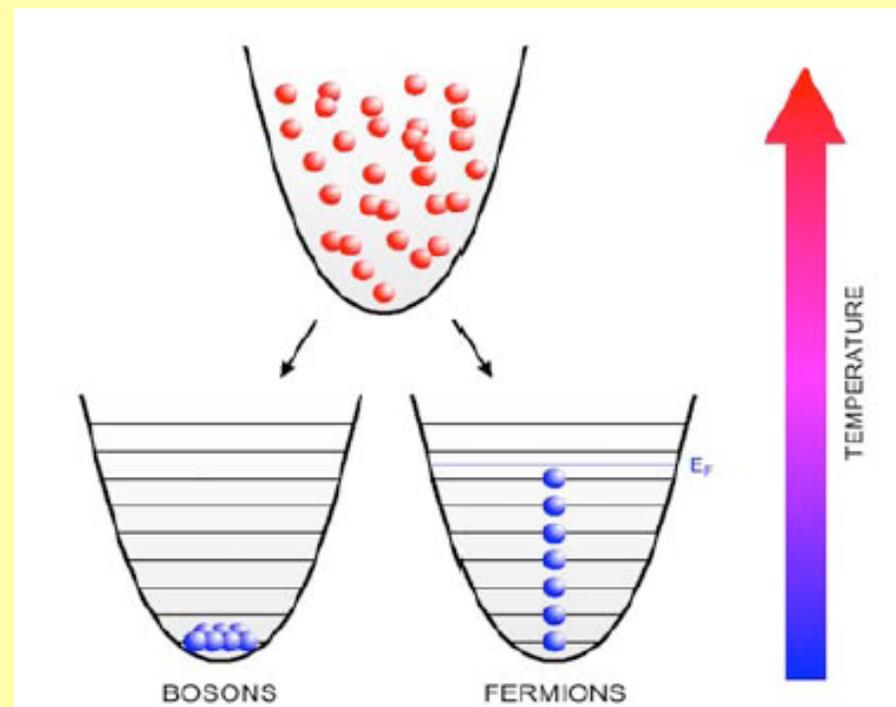
volume di coerenza

un po' di teoria.....

-BCS-

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

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

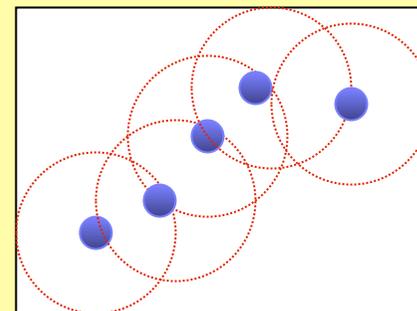
Dimostriamo che tutto il materiale e' in uno stato superconduttore:

gli elettroni sul bordo del volume caratteristico sono al centro di altri volumi di coerenza.

C'e' l'accoppiano con altri elettroni che stanno fuori di 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 insieme...

senza attrito → resistenza nulla

.....qualche formula sul magnetismo e l'effetto Meissner (perfetto diamagnetismo)

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 x 10⁴Gauss=7.96x10⁴G [Gauss CGS]

H= campo magnetico applicato

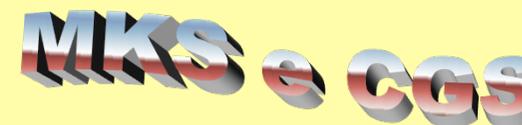
[Ampere/metro MKS]

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



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

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

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

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

Esperienze in laboratorio sulla Superconduttività

Misura dell'effetto 'Meissner'

Levitazione di un magnete su provini di un materiale ceramico granulare ad alta temperatura critica ($T_c = 90\text{K}$) chiamato YBCO ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$)

Scopo dell'esperienza:

Si mostra in modo qualitativo ma con un interessante effetto visivo l'esclusione del campo magnetico da parte di un superconduttore

L'esperimento consistera' nel far fluttuare un magnetino (0.1Tesla) su alcuni pezzi di superconduttore ceramico a temperatura sotto la temperatura critica.

DESCRIZIONE ESPERIMENTO

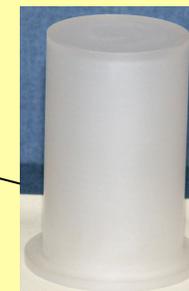
Si usano alcuni pezzi di materiale ceramico di tipo granulare chiamato YBCO ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$)



Piccolo magnete



Un dito freddo di zaffiro



Un contenitore di polistirolo



Azoto liquido

Guanti, pinzette

DESCRIZIONE ESPERIMENTO

Esecuzione dell'esperienza

- Viene raffreddato lo zaffiro e lasciato immerso in azoto liquido
- I vari campioni vengono poggiati sul dito freddo con pinzette
- Viene sospeso un piccolo magnete fra i vari pezzi di YBCO



L'importanza tecnologica dell'effetto 'Meissner': il treno MAGLEV

Levitazione di un trenino con pasticche di materiale ceramico granulare ad alta temperatura critica ($T_c = 90\text{K}$) chiamato YBCO ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$) su una rotaia magnetica

Scopo dell'esperienza:

Si mostra in modo qualitativo un tipo di uso tecnologico dell'espulsione e/o esclusione del campo magnetico da parte di un superconduttore:

ecco l'idea base di TRASFERIMENTO TECNOLOGICO

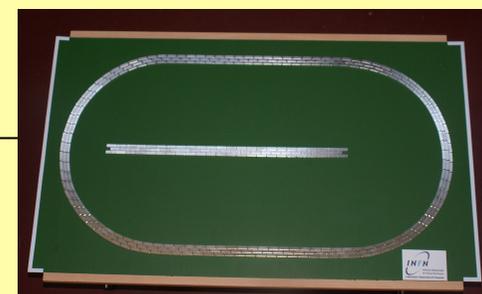
L'esperimento consisterà nel far fluttuare su una rotaia magnetica un trenino sulla cui base sono stati inseriti dei dischi di superconduttore ceramico a una temperatura sotto la temperatura critica superconduttiva

DESCRIZIONE ESPERIMENTO

Per campione si usano alcune pasticche di materiale ceramico di tipo granulare chiamato YBCO ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$),
non è un buon conduttore elettrico



Una rotaia magnetica formata da potenti magneti posati su una lastra di ferro



Dei contenitori di polistirolo con dischi di YBCO fissati sul fondo simulano la locomotiva e un vagone



Azoto liquido: liquido molto freddo a **$-169\text{ }^\circ\text{C}=77\text{ }^\circ\text{K}$**

Guanti, pinzette per proteggere le mani dal freddo



DESCRIZIONE ESPERIMENTO

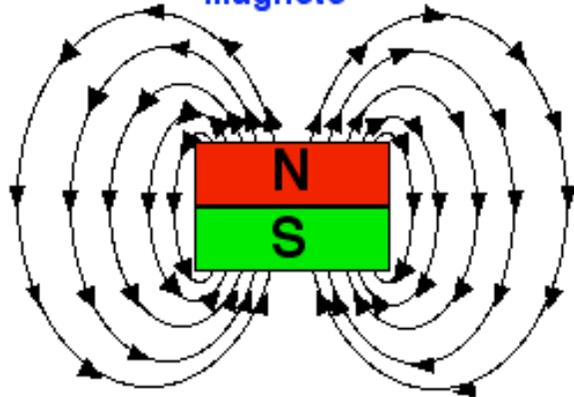
Esecuzione dell'esperienza

- Vengono raffreddati la locomotiva e il vagone di polistirolo con azoto liquido (uso di guanti).
- la locomotiva e il vagone vengono poggiati sul due barrette di legno posti ai lati della rotaia magnetica (uso di guanti e pinzette).
- viene spinto facendo muovere il trenino che sta levitando sulla rotaia (uso di guanti e pinzette)
- Si mostra l'ancoraggio del trenino sulla rotaia durante il moto

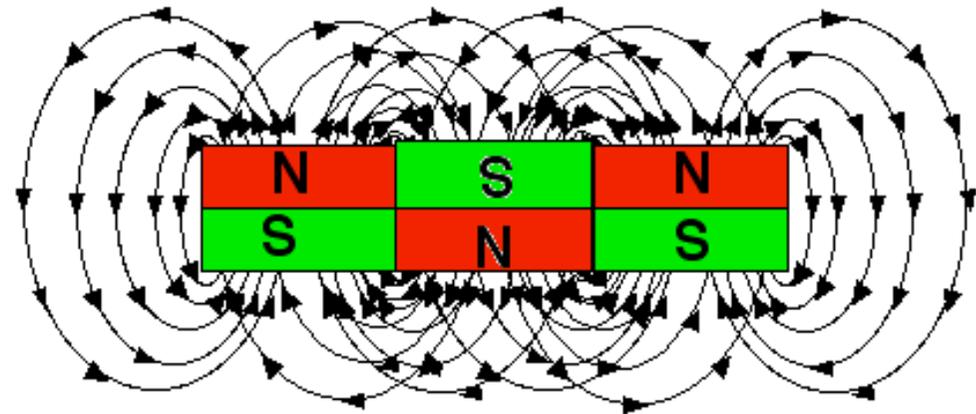


DESCRIZIONE ESPERIMENTO

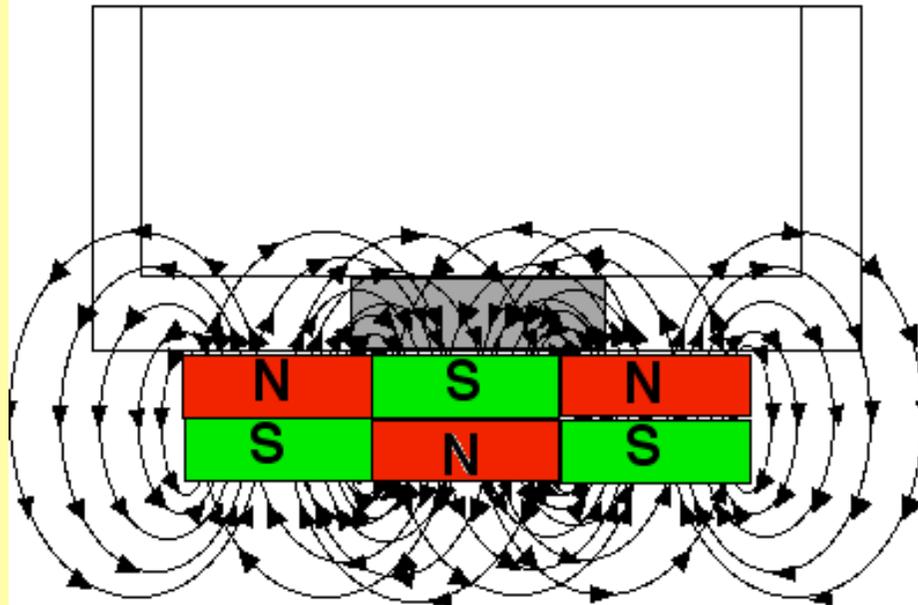
magnete



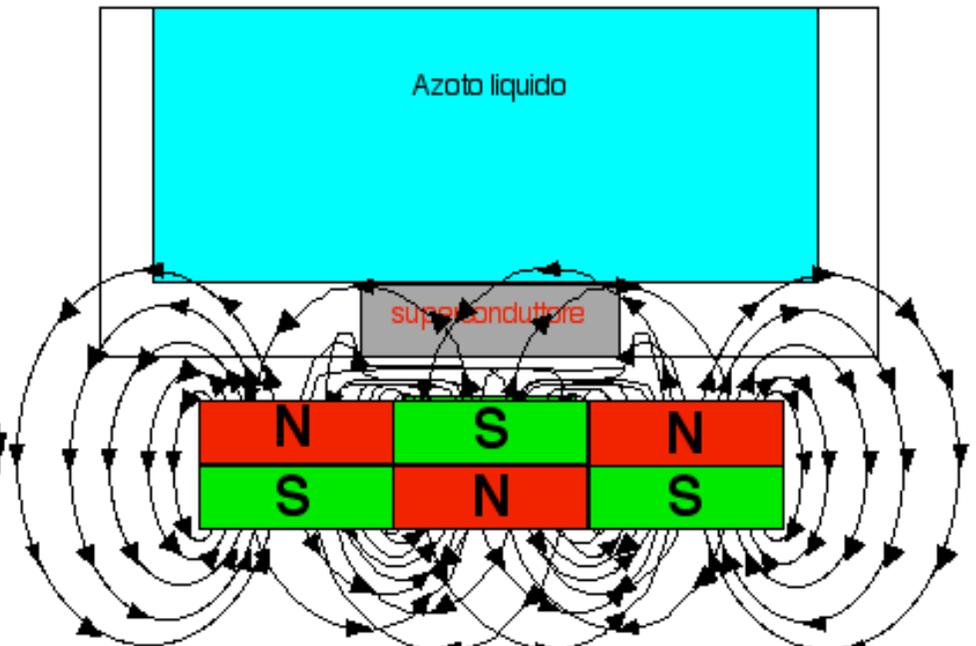
rotaia magnetica



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



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



Transizione diamagnetica di un superconduttore in funzione della temperatura

Scopo dell'esperienza:

Caratterizzazione quantitativa “dell'Effetto Meissner”:
analisi della risposta puramente diamagnetica mediante
la misura della suscettività magnetica a.c. in funzione
della temperatura

La misura sperimentale consisterà nel misurare la parte reale e la parte immaginaria delle componenti della suscettività, la I^a e la III^a armonica in funzione della temperatura durante la transizione dallo stato superconduttore a quello normale.

DESCRIZIONE ESPERIMENTO

Il provino è un materiale ceramico di tipo granulare denominato BSCCO ($\text{Bi}_1\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_2\text{O}_3$) la cui T_c è $\sim 110\text{K}$ chiuso in un tubetto di argento e schiacciato a nastro.



Il metodo utilizzato per la misurazione della **susce**ttività' è basato sul l'effetto di **mutua induzione magnetica**

La risposta magnetica verrà misurata da un **ponte bilanciato di bobine** avvolte in modo anti induttivo (tensione ai capi del ponte = 0Volt) inserito nella bobina che produce il campo magnetico di eccitazione.

Il **campione** viene posto in **una** delle due bobine del ponte. Qualsiasi effetto magnetico sbilancia il ponte di bobine (tensione ai capi del ponte $\neq 0\text{Volt}$).

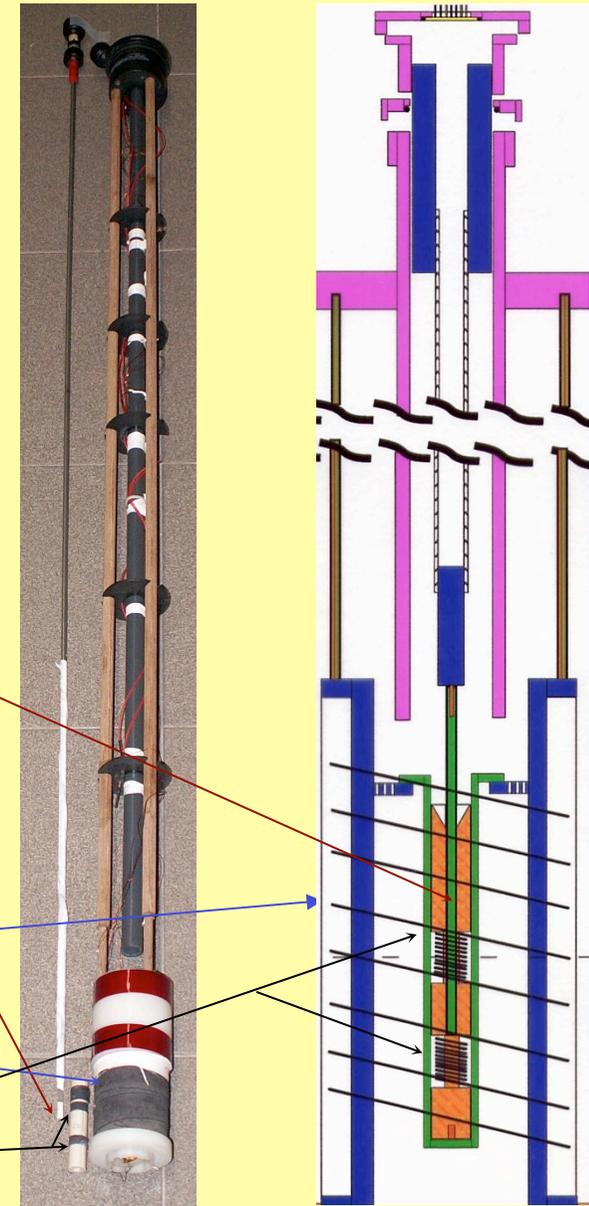
La **tensione** prodotta ai capi del ponte **viene misurata da** un volmetro particolarmente sensibile il **Lock-in**

DESCRIZIONE ESPERIMENTO

Il provino posto su un 'discendente chiamato **suscettometro magnetico criogenico**' con un termometro

Il discendente e' formato da:

- A) Porta-campioni: il campione e' fissato su una barretta di zaffiro con un termometro. Il porta campioni sara' posto dentro un bicchiere in zaffiro
- B) Bobina di eccitazione
- C) Ponte di bobine avvolte anti-induttive



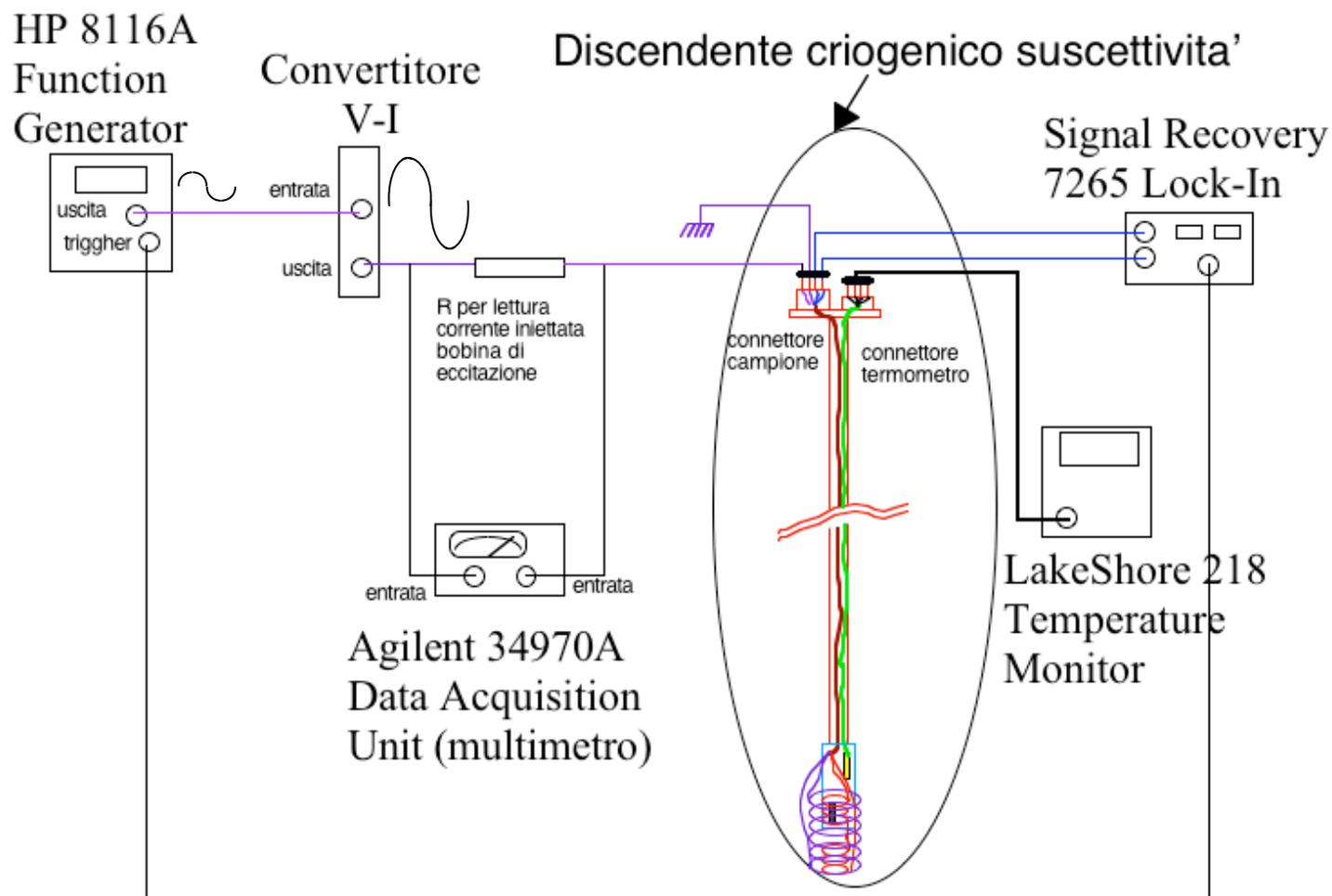
DESCRIZIONE ESPERIMENTO

Strumentazione usata:

- LakeShore 218 Temperature Monitor (**per leggere la temperatura**)
- HP 8116A Function Generator (**fornisce il segnale sinusoidale in tensione**)
- Convertitore V-I (**converte e amplifica il segnale sinusoidale da tensione in corrente che verrà iniettata nella bobina di eccitazione**)
- Signal Recovery 7265 Lock-In (**legge la tensione sul ponte di bobine di pick-up in cui è posto il campione**)
- Oscilloscopio (**visualizzazione della forma d'onda**)
- programma in Labview al computer per gestione della misura e dei dati

DESCRIZIONE ESPERIMENTO

Schema a elettrico a blocchi della misura



Esecuzione dell'esperienza:

- Montaggio campione sul suscettometro:
 - **Montiamo il campione sul portacampioni di zaffiro**
 - **inseriamo il porta campioni nel suscettometro**
 - **inseriamo il suscettometro in un bidone di polistirolo e μ -metal**
- Imposteremo un valore del campo magnetico variabile di:
 - **$|H_{ac}|=0.47$ mTesla (3.4Gauss) corrisponde a $V=600$ mV sul generatore di forma d'onda**
 - **Forma d'onda : sinusoidale con frequenza=107 Hz**

Esecuzione dell'esperienza:

- Procedura

- **discesa della temperatura senza campo magnetico in azoto liquido (77K=-169C)**
- **accensione del campo magnetico in stato superconduttore**
- **Misura con la temperatura in salita**

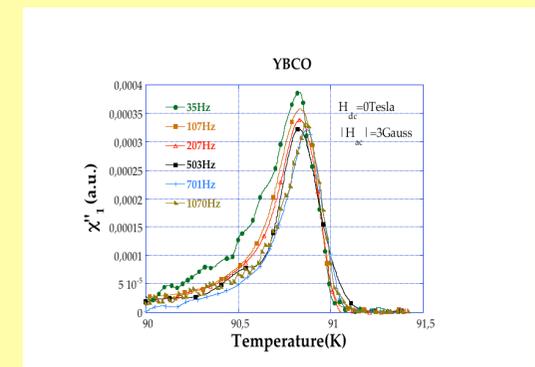
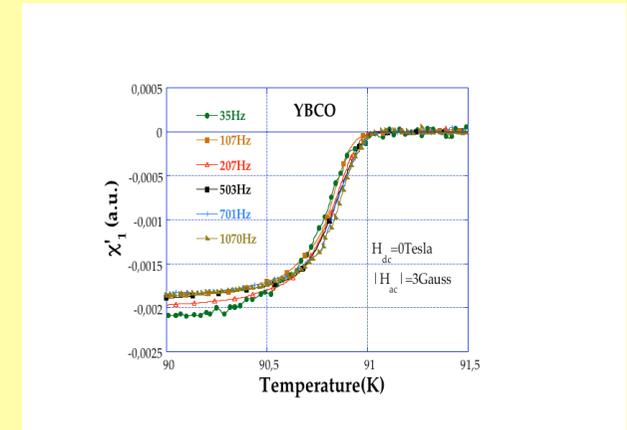
Esecuzione dell'esperienza:

- Note:
 - ✓ Il campione viene raffreddato inserendo il discendente in un bagno di azoto liquido alla temperatura minima possibile ($T=77\text{K}$)
 - ✓ Sul display del computer sarà mostrato la parte reale e la parte immaginaria della I^a e III^a componente della suscettività e la temperatura acquisita.
 - ✓ Ad una eccitazione lineare sinusoidale corrisponde una risposta fortemente non lineare del superconduttore con diverse componenti di Fourier

Significato della misura:

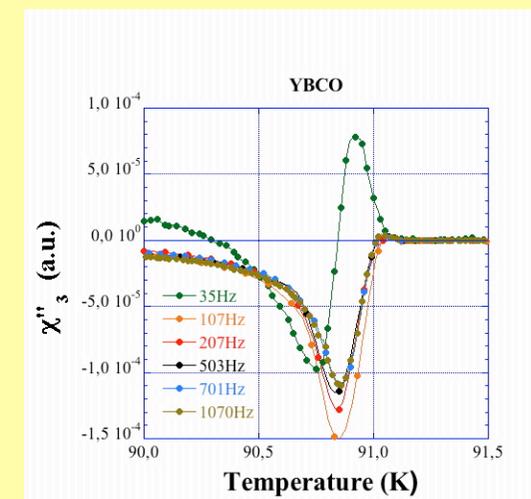
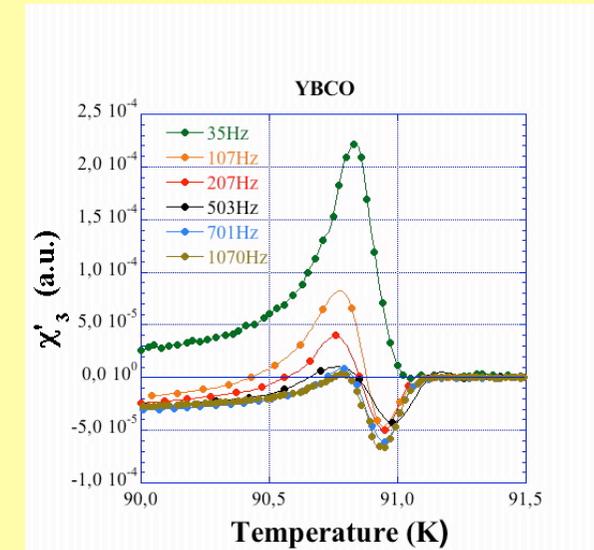
- La **parte reale della 1^a armonica** della suscettività, misura il **tipo di magnetismo** del campione:
 - da debolmente paramagnetico **positivo**, quando e' nello **stato normale** va alla temperatura di transizione in uno stato di **perfetto diamagnetismo negativo** nello stato **superconduttore**

- La **parte immaginaria della 1^a armonica** della suscettività misura le correnti di perdita proporzionali **all'area del ciclo di isteresi** indotto dal campo magnetico variabile:
 - **piccole correnti di Foucault** indotte nel campione nello **stato normale** (area piccola) alla temperatura critica si sovrappongono via via piu' alte **supercorrenti** indotte (area sempre più grande)

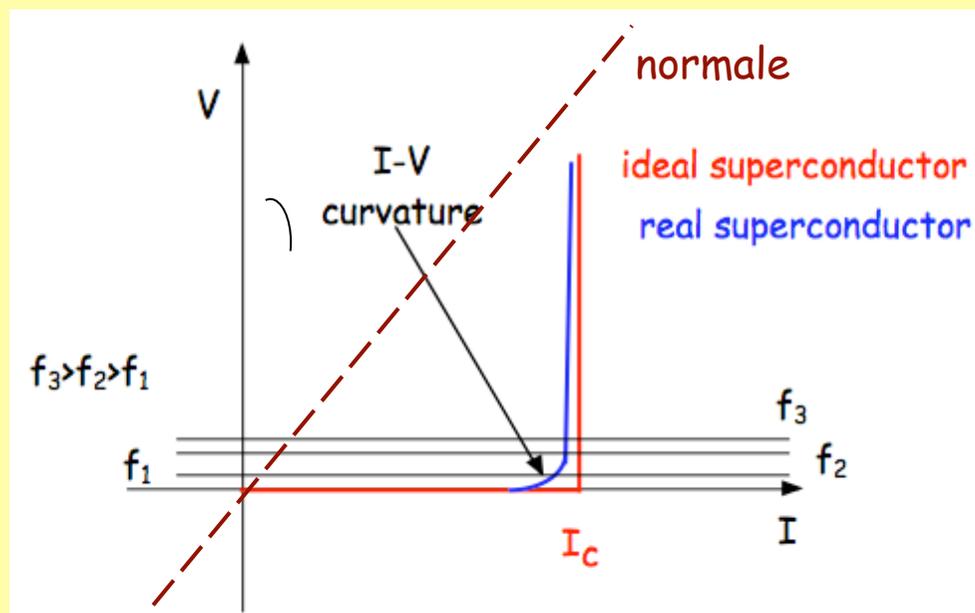


Significato della misura:

- La **parte reale e immaginaria della 3^a armonica** sono solo proporzionali ai soli **effetti non-lineari** dovuti alla **superconduttività**



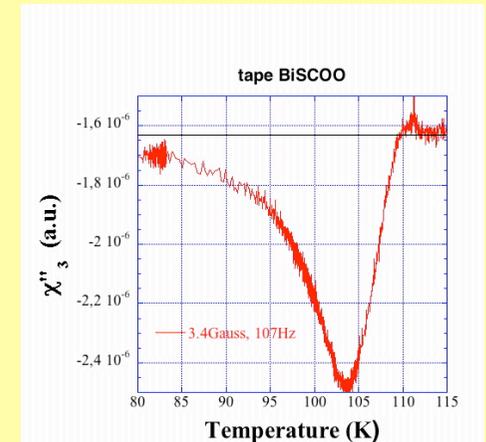
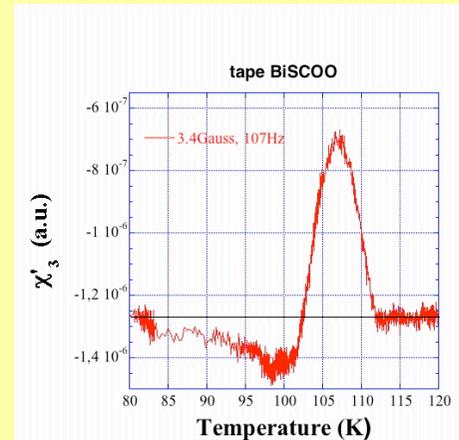
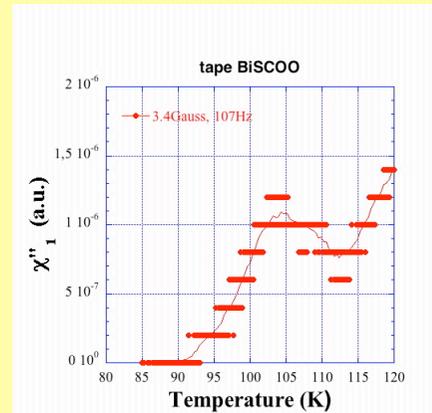
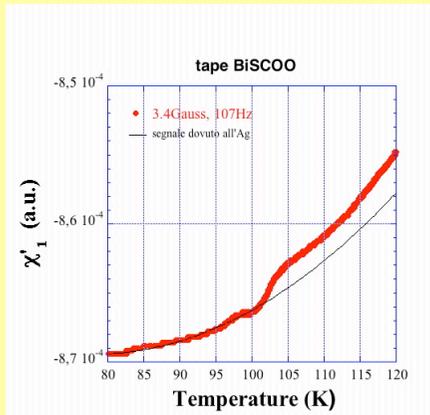
Significato della misura



- La caratteristica non lineare di un superconduttore e quella lineare di un resistore normale

Misura sul tape di BiSCCO:

interpretazione della misura reale



- La parte reale della prima armonica ha un segnale diamagnetico importante dovuto all'Ag sommato al segnale diamagnetico **improvviso** superconduttivo.
- La parte immaginaria della prima armonica visualizza sia le correnti di perdita di Foucault dovute alla resistenza elettrica dell'argento variabile in temperatura, sia il segnale dovuto alle supercorrenti superconduttrici
- La terza armonica presenta solo segnali dovute alla superconduttività dato che è un processo non lineare (la resistenza elettrica normale dà un contributo lineare ed è presente solo nella 1^a armonica)



Premi Nobel per la Superconduttività

Kamerlingh Onnes (1913)

‘Per le sue ricerche sulle proprietà della materia a basse temperature che ha condotto, inoltre, alla produzione dell’elio liquido’



Bardeen, Cooper and Schrieffer (1972)

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



Giaever and Josephson (1973)

‘Per le sue previsioni teoriche delle proprietà di una supercorrente attraverso una barriera tunnel, in particolare quei fenomeni che sono generalmente noti come effetti Josephson’



Bednorz and Muller (1987)

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



Abrikosov, Ginzburg and Leggett (2003)

‘Per pionieristici contributi alla teoria della superconduttività e superfluidità’

