

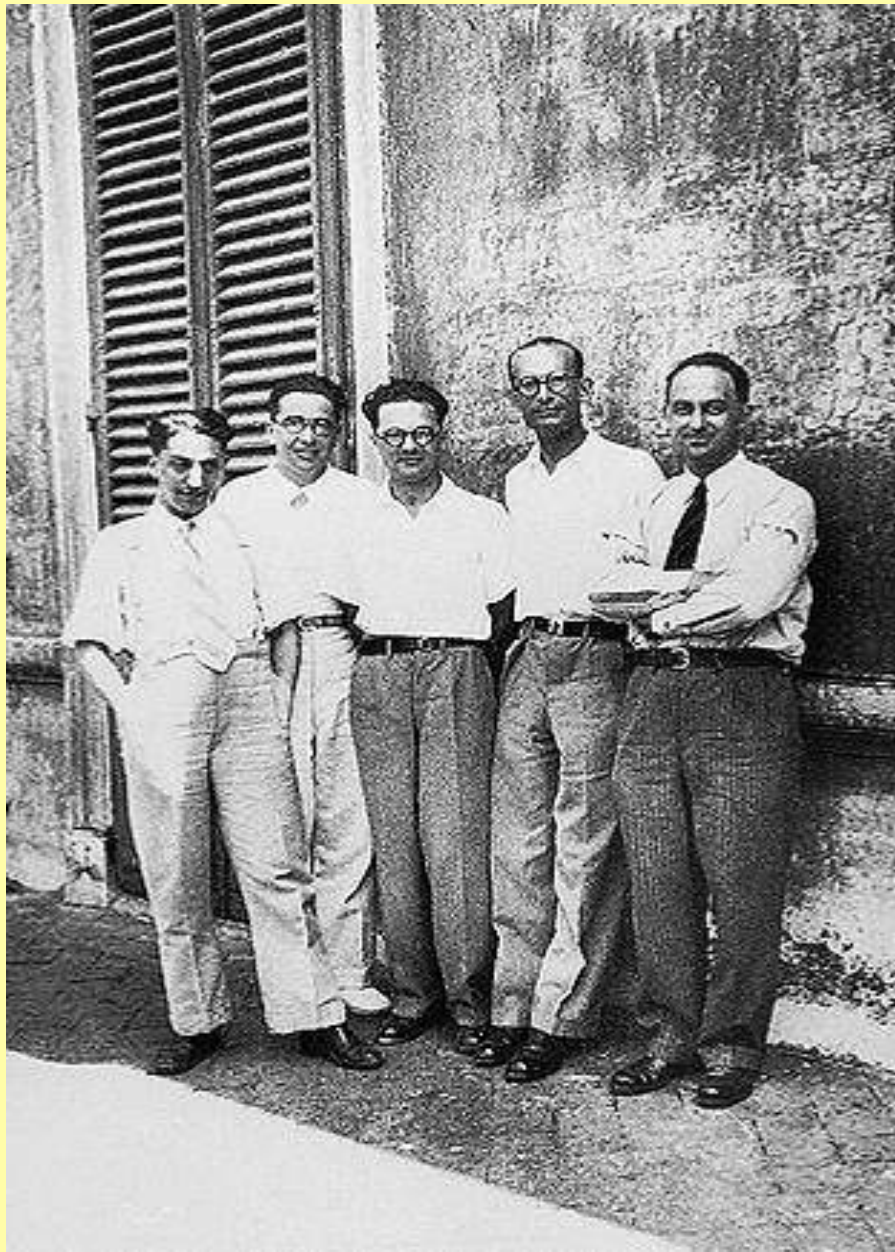


Laboratori Nazionali di Frascati



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



Gran Sasso



Frascati



Cascina



20 Sezioni
9 Gruppi collegati

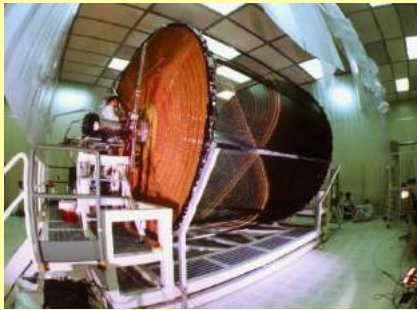
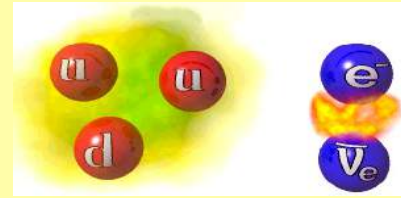
4 Laboratori Nazionali

Laboratori del Sud

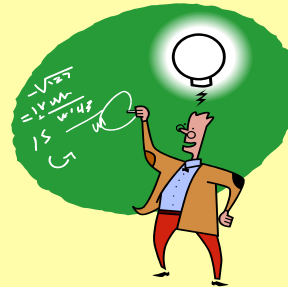


Attività dei LNF

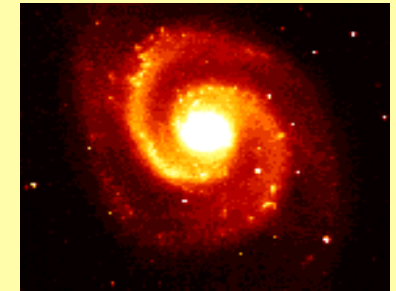
Studi sulla struttura
intima della materia



Elaborazione di
modelli teorici



Ricerca di onde
gravitazionali



Sviluppo e costruzione di
rivelatori di particelle

Studi di materiali
e ricerche
biomediche
con luce di
sincrotrone



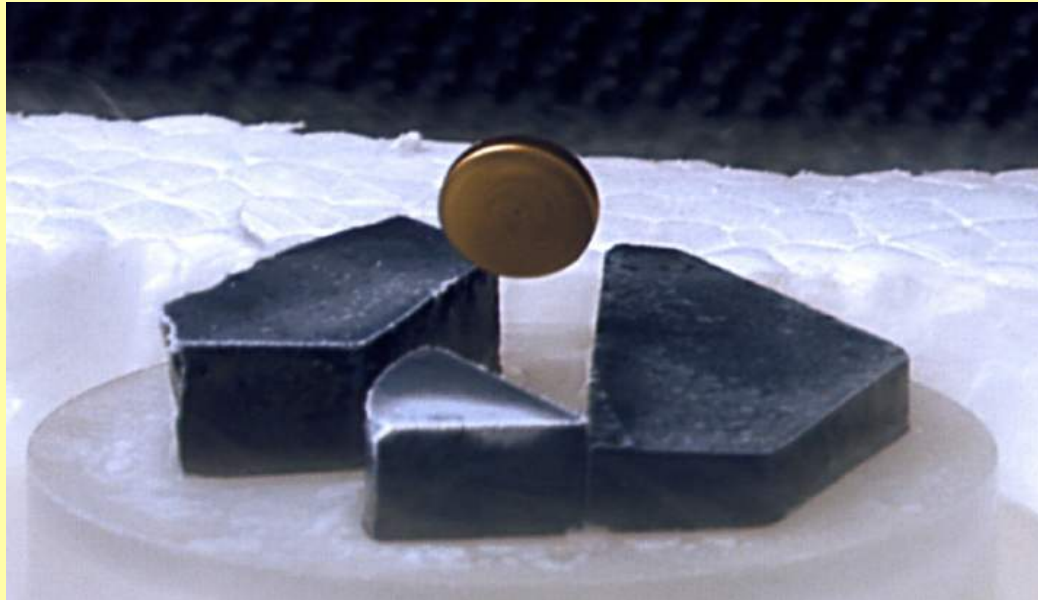
Sviluppo e
supporto di
sistemi di
calcolo
reti



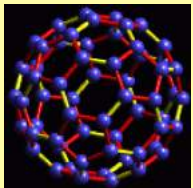
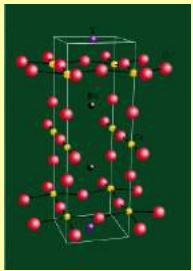
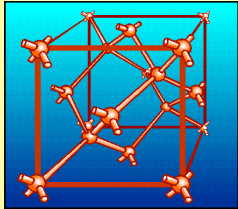
Studio e sviluppo di
tecniche
acceleratrici



Il fenomeno della Superconduttività



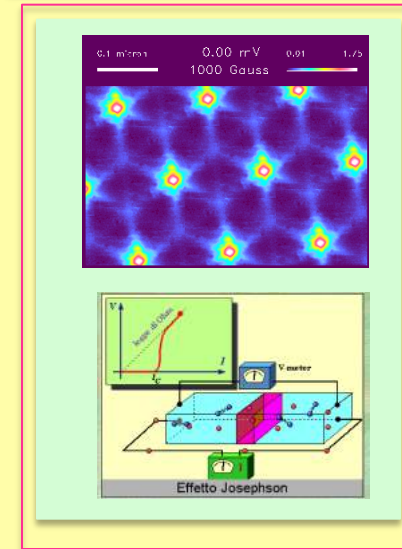
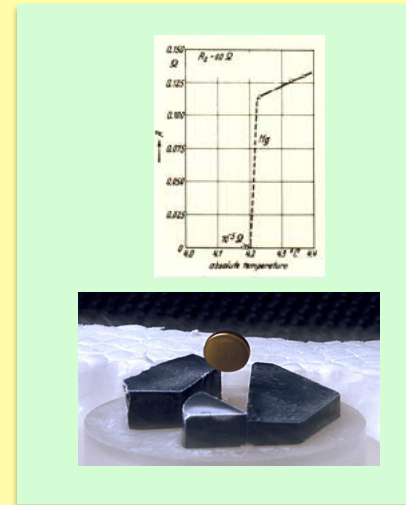
Dr. Daniele Di Gioacchino
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Laboratori Nazionali di Frascati



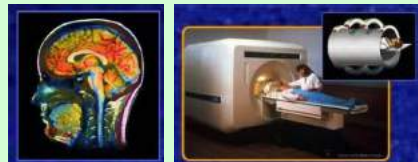
La Superconduttività è uno stato della materia con eccezionali proprietà elettriche e magnetiche.

- ◆ Evidenzia un comportamento della **fisica quantistica nei solidi.**
- ◆ Nasce da un comportamento collettivo degli elettroni.
- ◆ E' uno dei rarissimi effetti quantistici macroscopici (dispositivi&apparati)

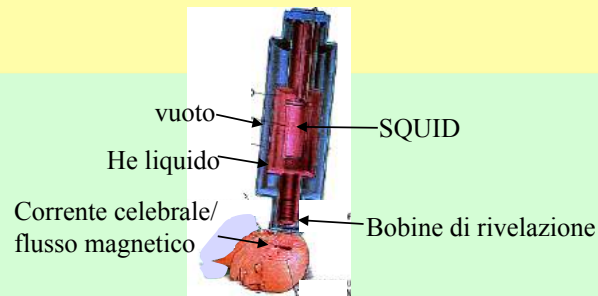
Fu scoperto da Onnes nel 1911



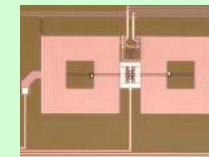
Treni veloci a levitazione magnetica



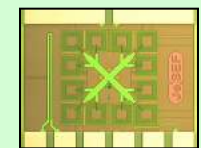
Potenti Magneti per MNR



Analisi biomagnetiche con SQUID



SQUID

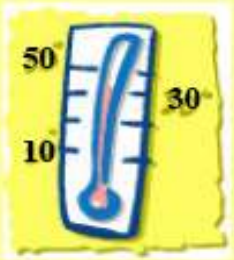


Giunzione Josephson

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



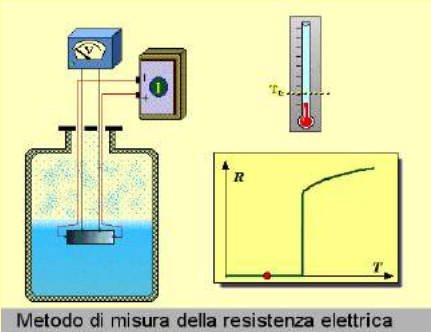
Il liquefattore di elio con cui Onnes il 10 Luglio 1908 fece diventare liquido il gas di elio a -269 C



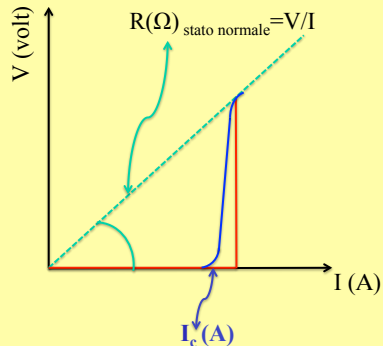
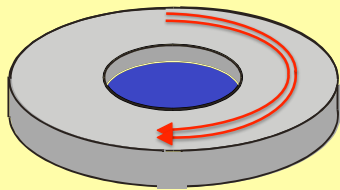
**Quel giorno
il suo laboratorio
divenne il luogo
più freddo della Terra!!**

Come si caratterizza?

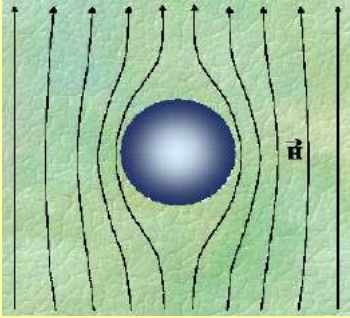
2. E' una fase della materia dove la elettricità fluisce senza resistenza:



- ✓ 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?

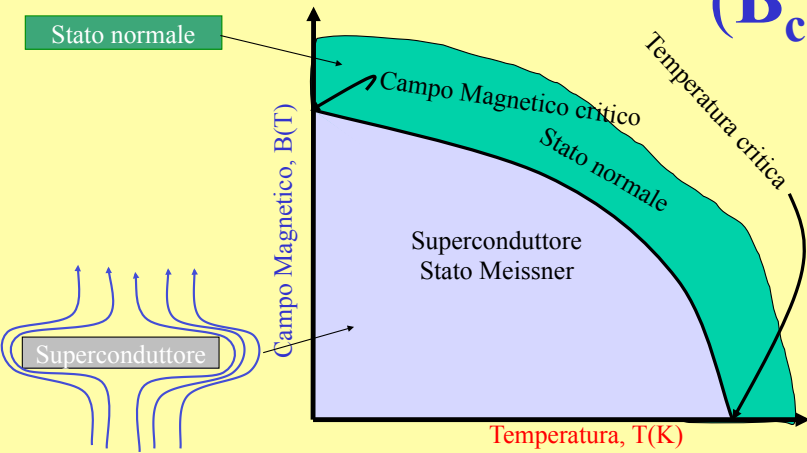


3. Il campo magnetico è espulso: diamagnetismo perfetto (effetto Meissner)

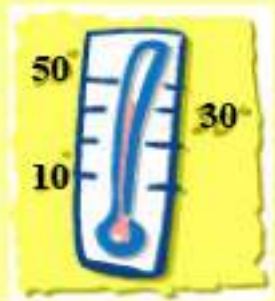


Levitazione magnetica di un magnetino (0.1 Tesla) su pezzi di YBCO materiale superconduttore ceramico. Foto LNF-INFN

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

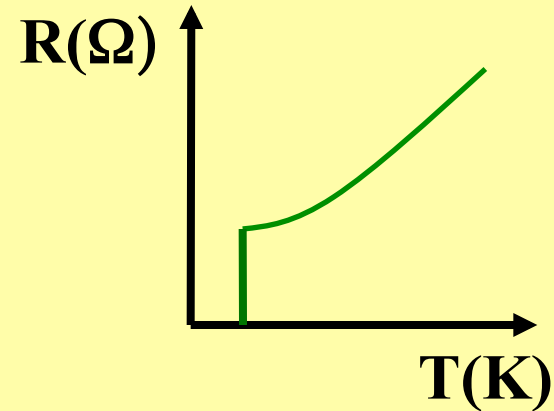


Osserviamo queste proprietà più da vicino



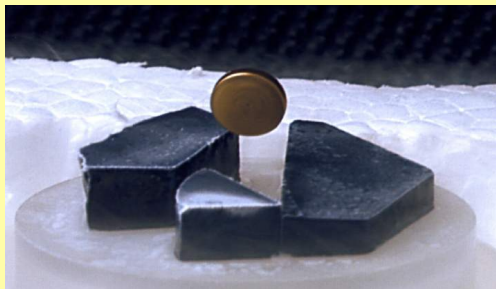
1. La superconduttività è un fenomeno a bassa temperatura

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



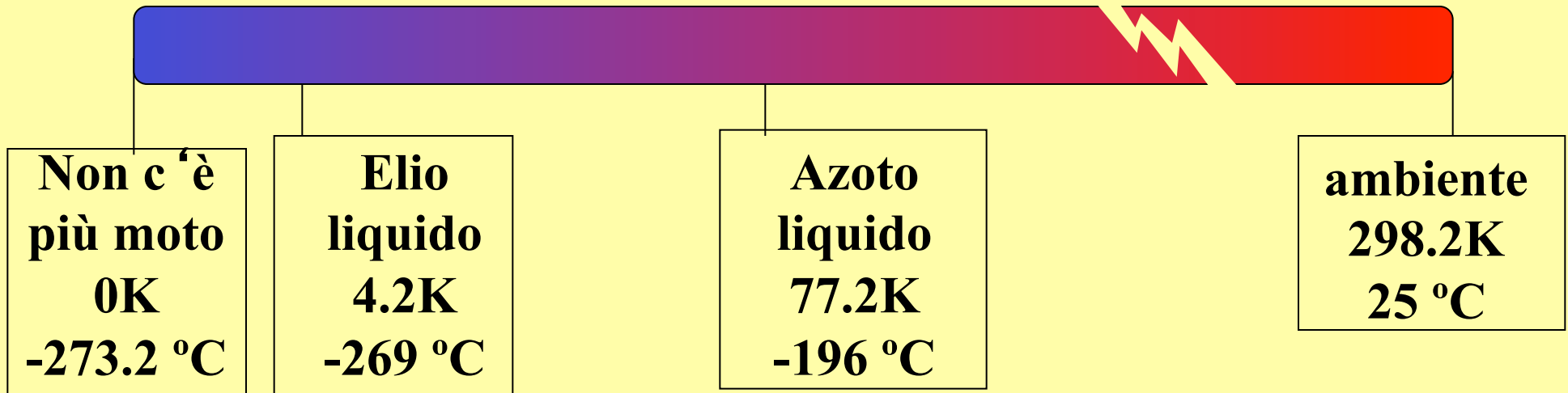
3. Superconduttori in presenza di un campo magnetico lo espellono completamente

Talvolta in parte

(effetto Meissner)

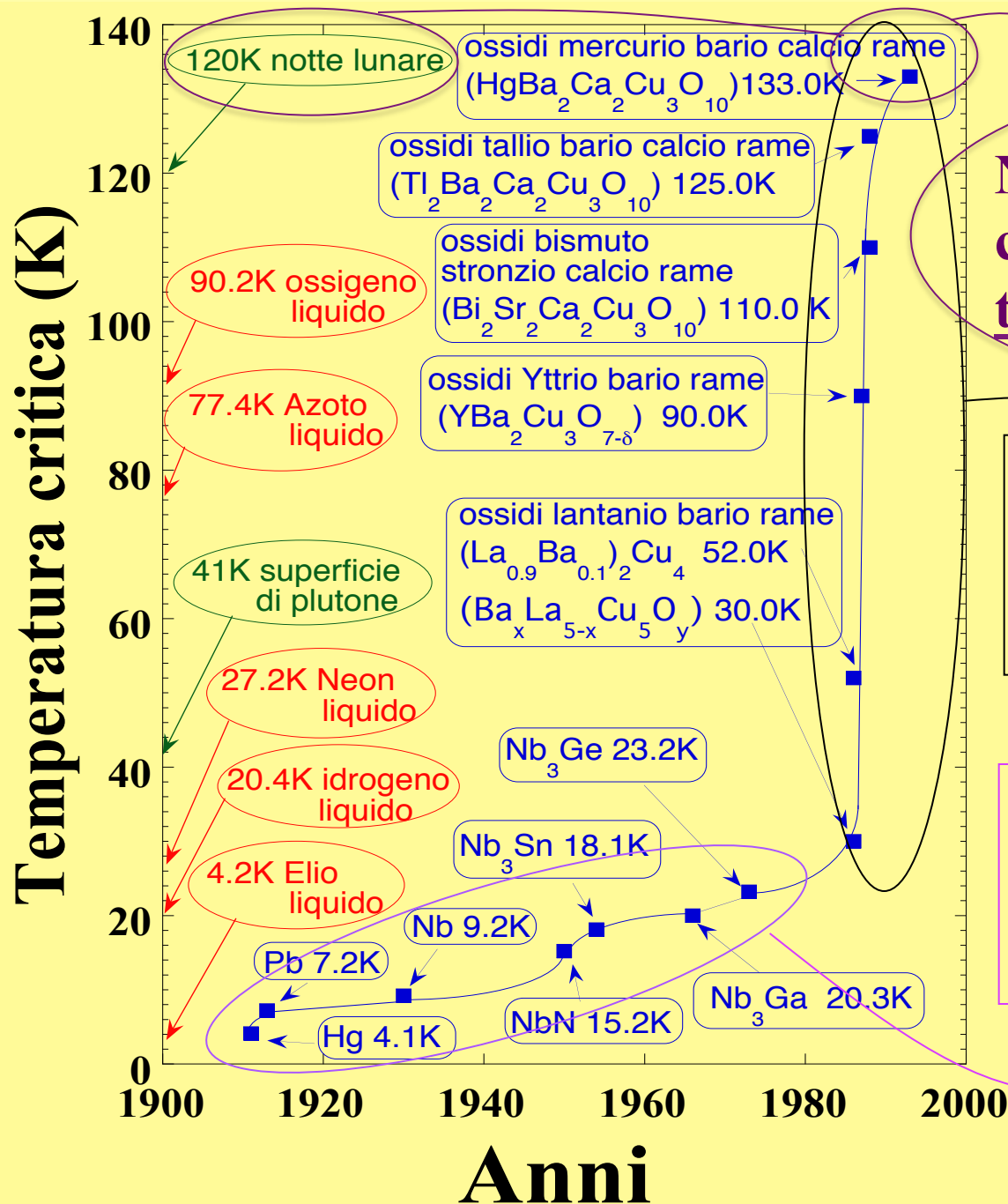
1. La superconduttività accade a bassa temperatura

una relativamente



Superconduttori “normali”
~ 0 – 23K

Superconduttori ad alta temperatura critica
30 – 138 K



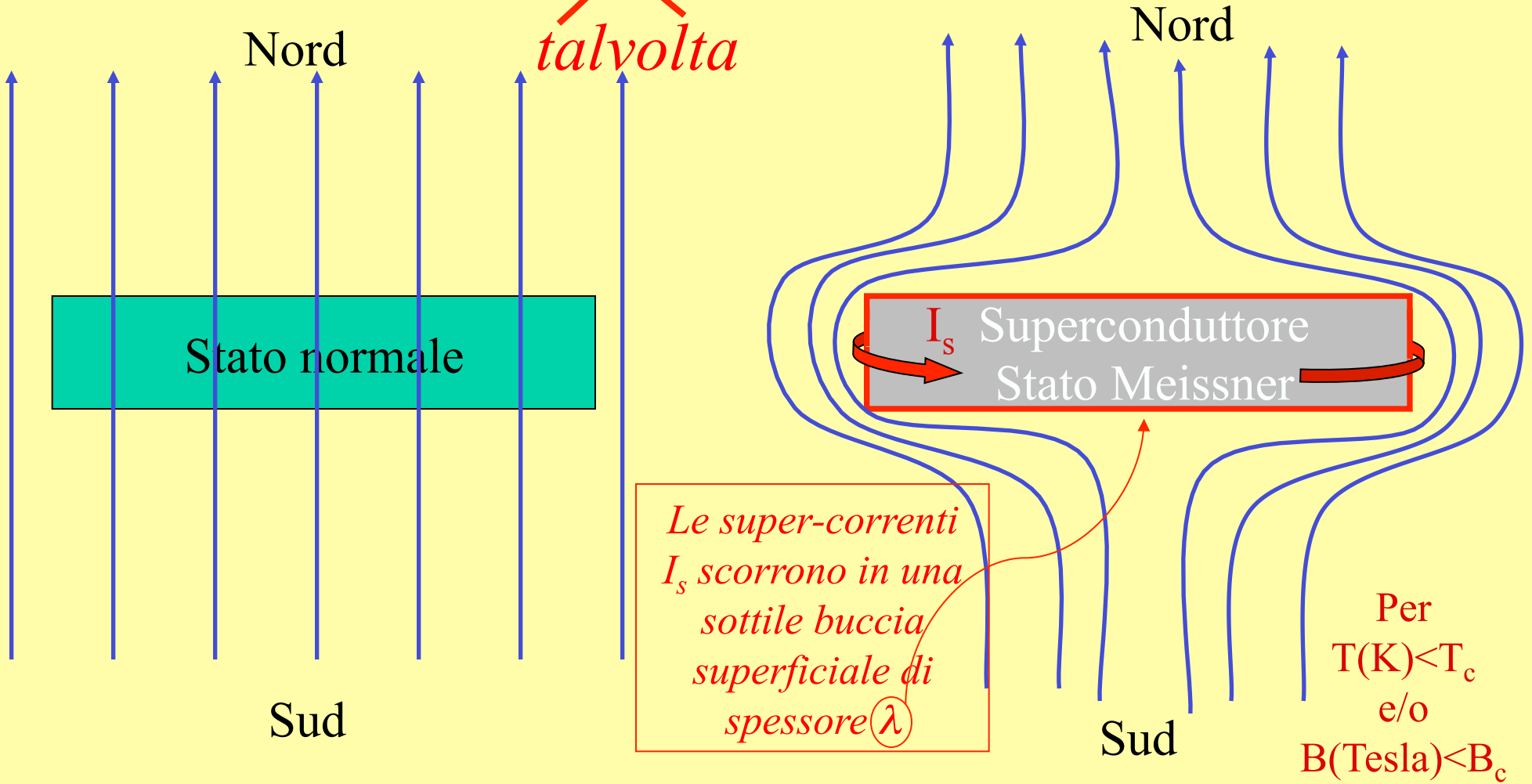
Non abbiamo bisogno di criogenia in 'dark side of the moon'

Superconduttori alta temperatura critica (ceramici)

Superconduttori Bassa temperatura critica (metallici)

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

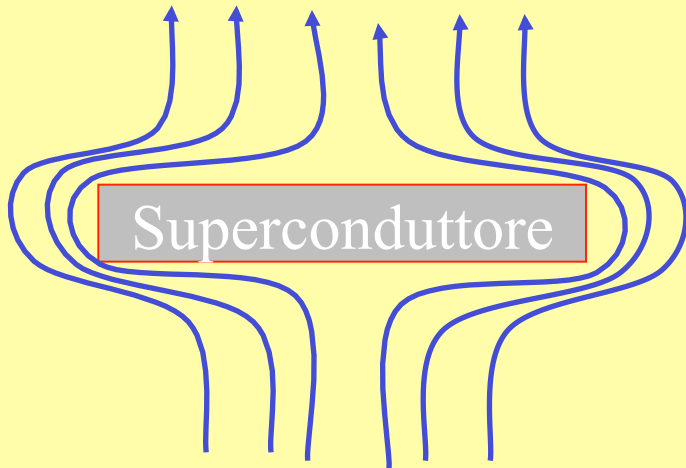
3. I Superconduttori espellono il campo magnetico



talvolta

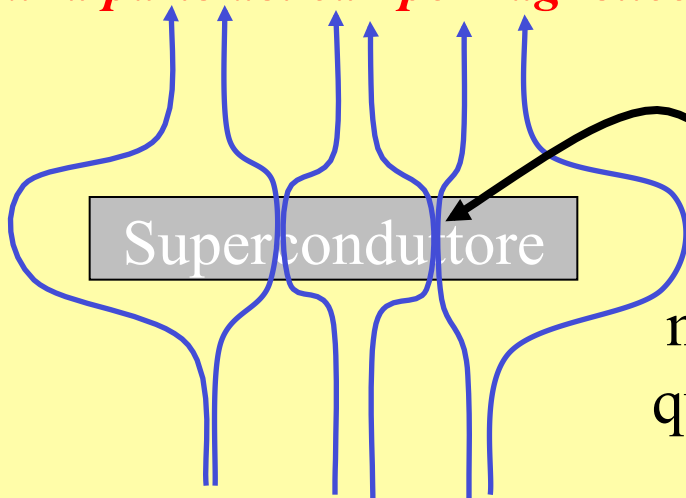
3. I Superconduttori *espellono* il campo magnetico

Vista dall'alto

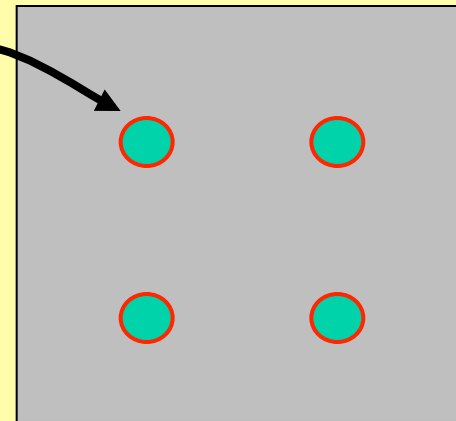


Superconduttori di tipo I

..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



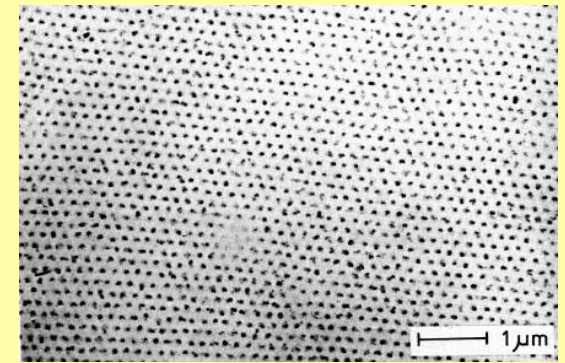
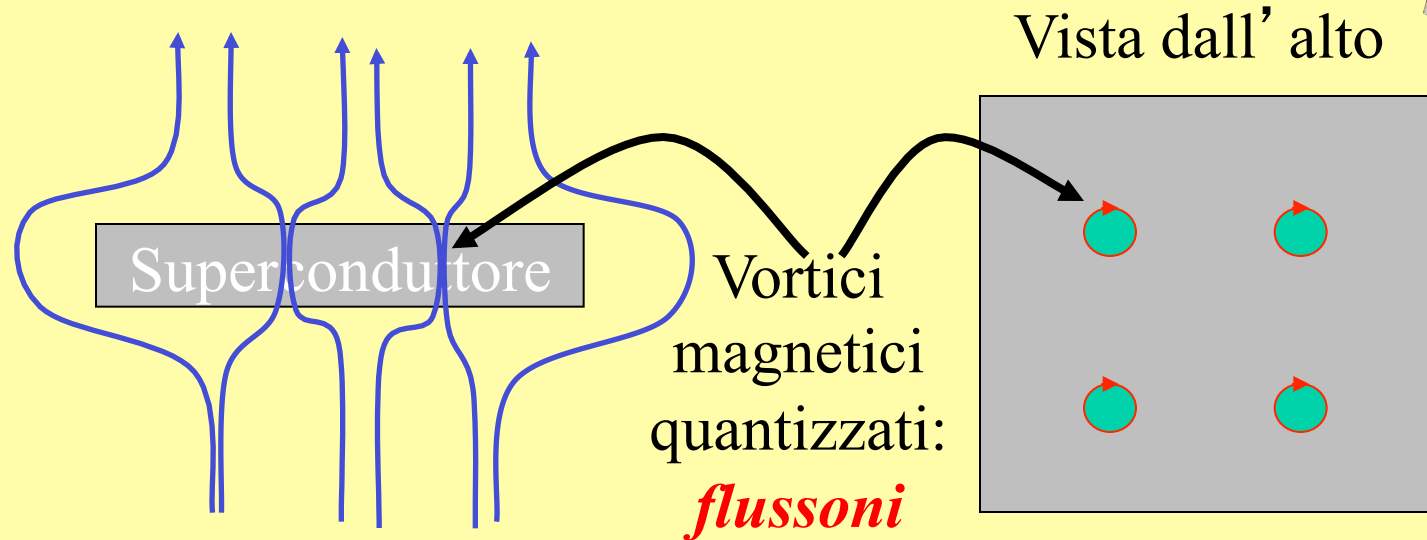
Vortici magnetici quantizzati



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!



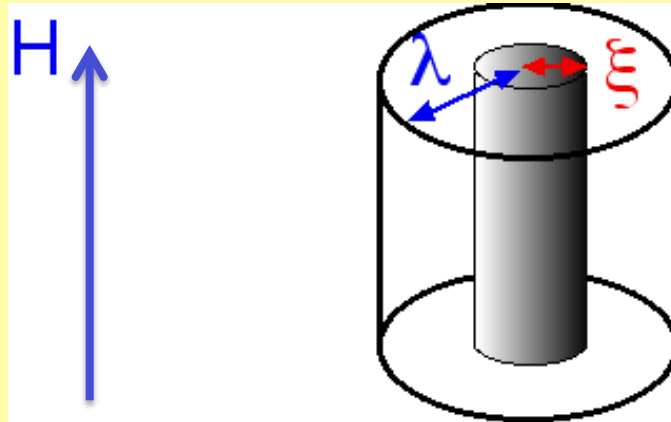
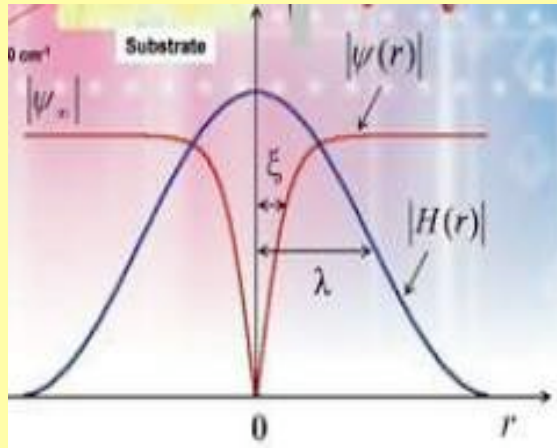
Reticolo di vortici in Niobio
U.Essmann (1967)

I flussoni consistono:

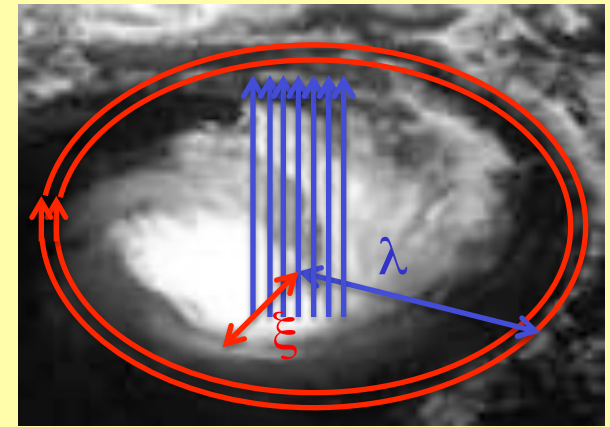
- in un nucleo di materiale normale dove è confinato il flusso di campo magnetico
- una buccia dove circola la supercorrente come in un vortice. Forma un contro campo magnetico che scherma il campo penetrato

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** ($\kappa > 1/\sqrt{2}$)
- I valori di queste due lunghezze vanno da migliaia di nanometri a qualche nanometro.

Diagramma di fase B-T Superconduttori di I tipo

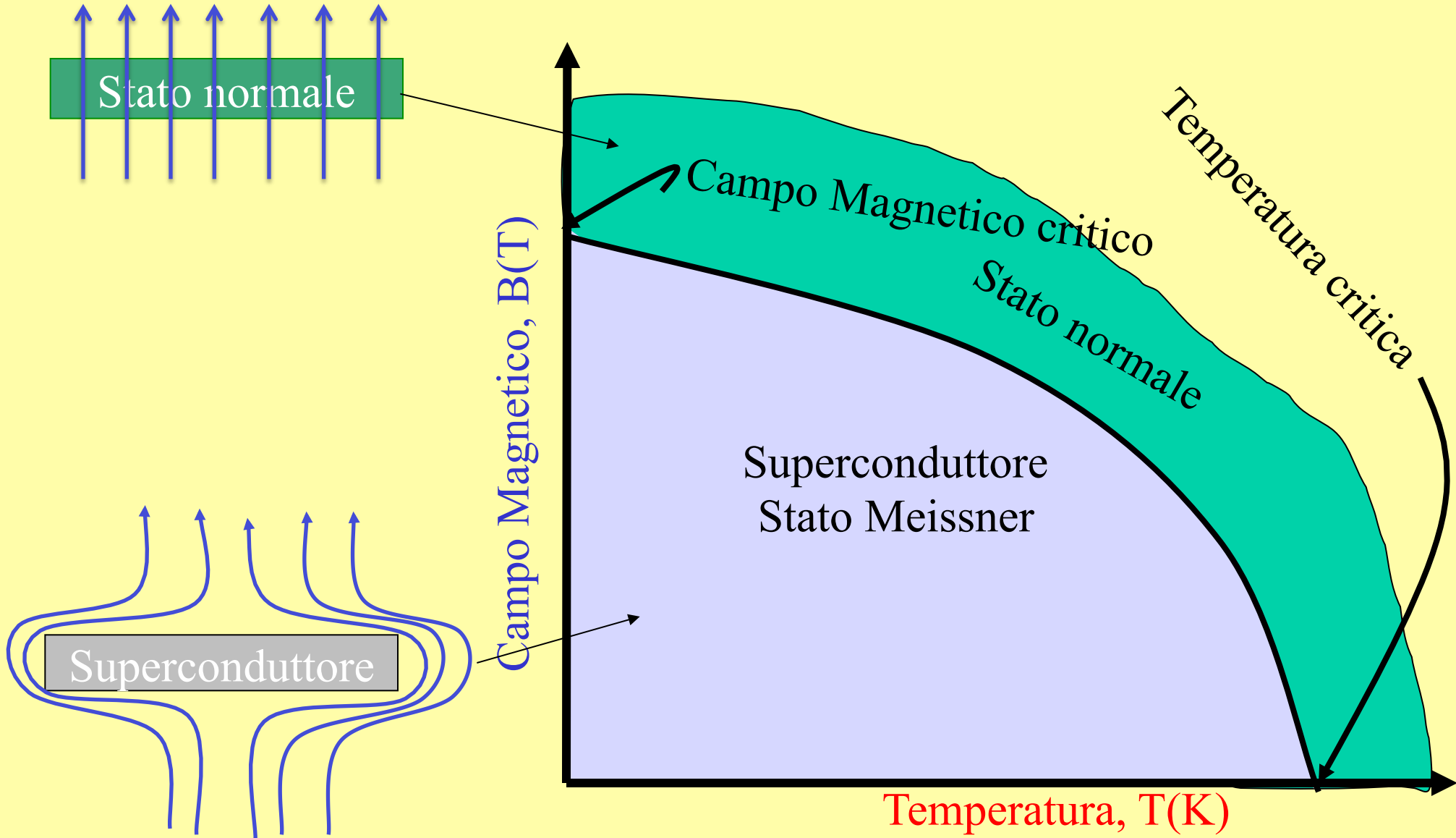
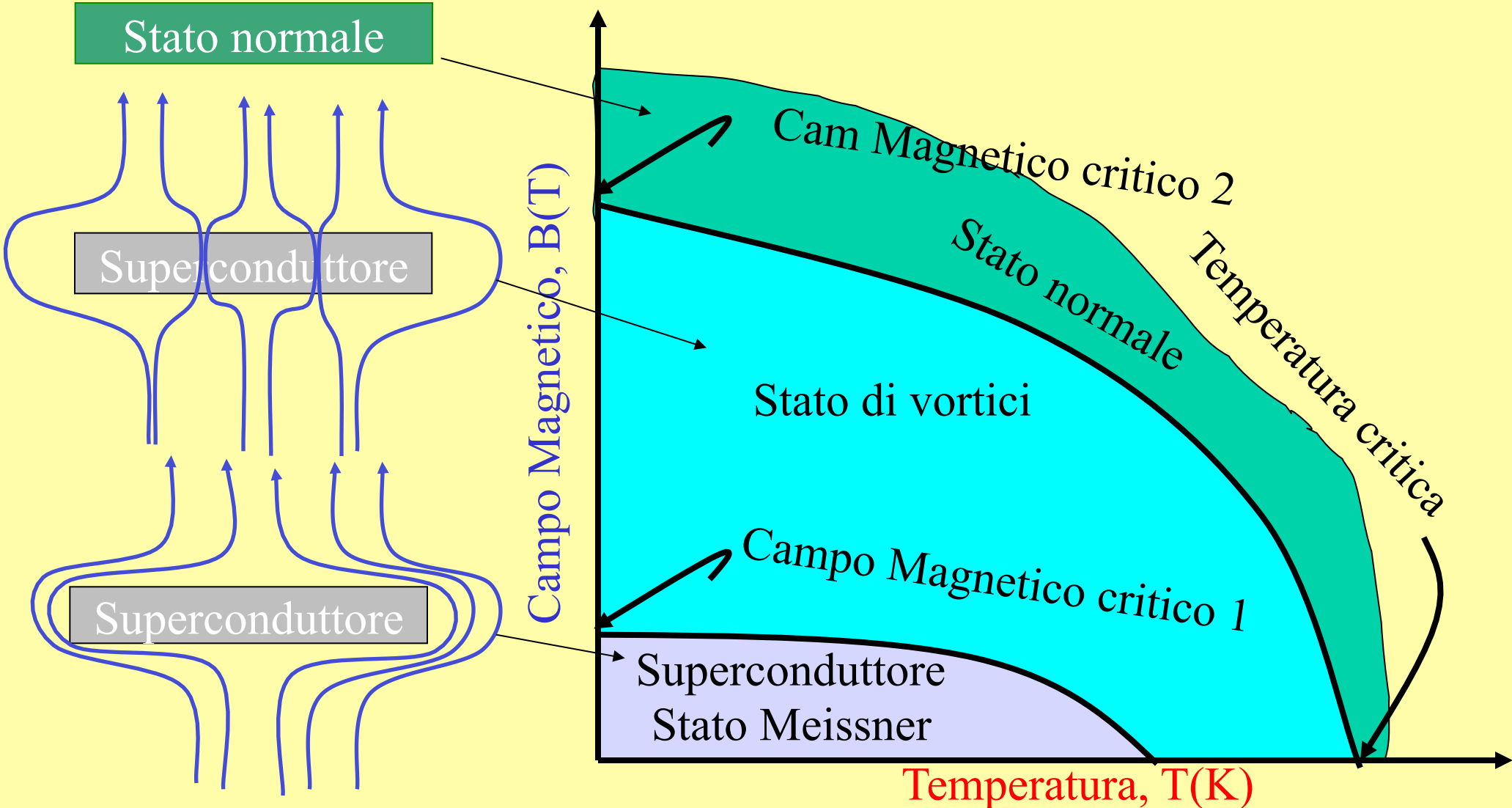


Diagramma di fase B-T Superconduttori di II tipo

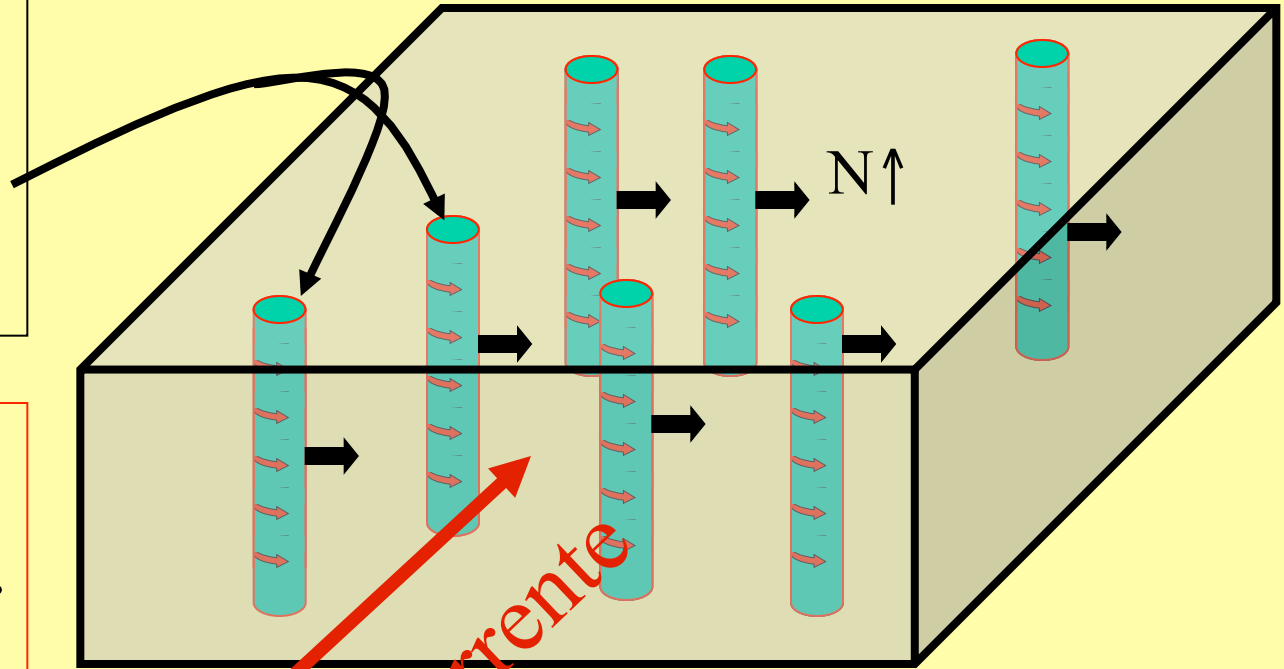


..... ora parliamo della 2^a proprietà'

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



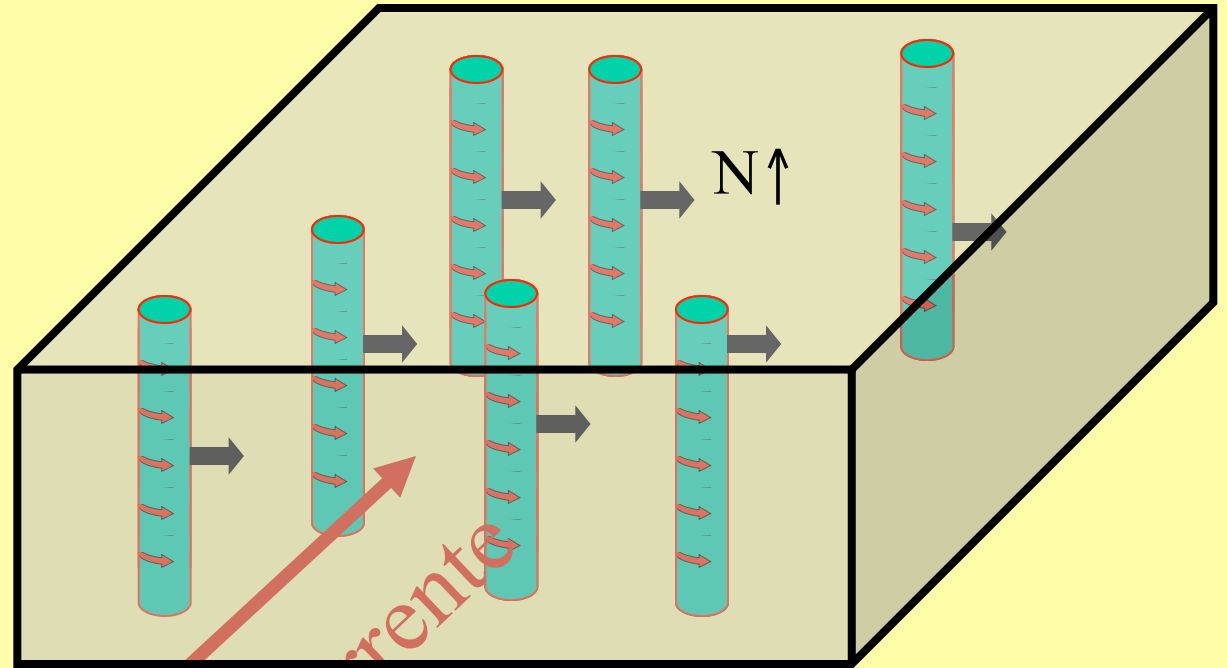
Super-corrente

Come può avvenire questo moto?

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

possono avere

- ..e i vortici possono fluire con una frizione

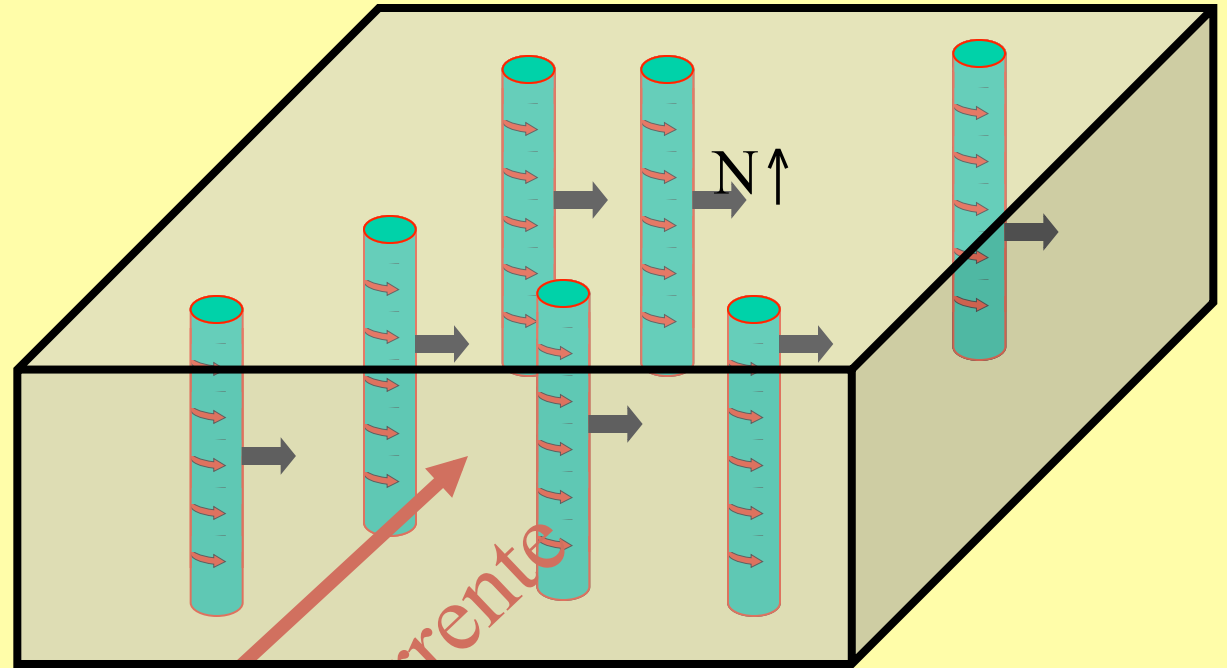


Super-corrente

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

possono avere

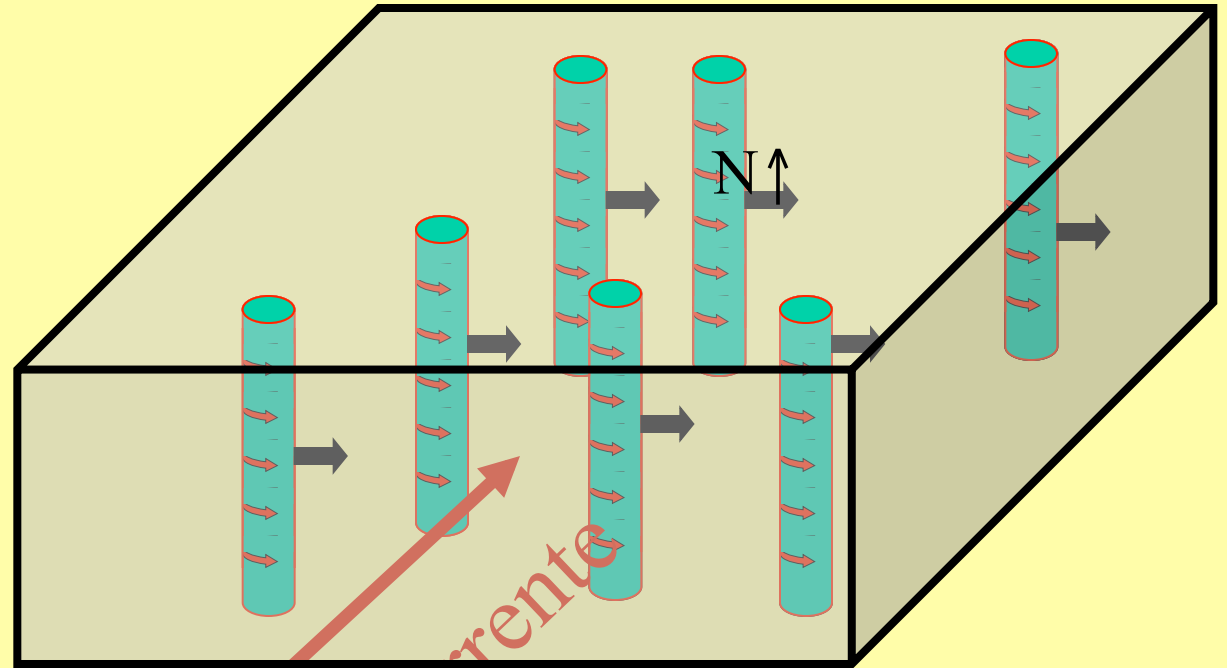
- ..e i vortici possono fluire con una frizione



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

possono avere

- ..e i vortici possono fluire con una frizione

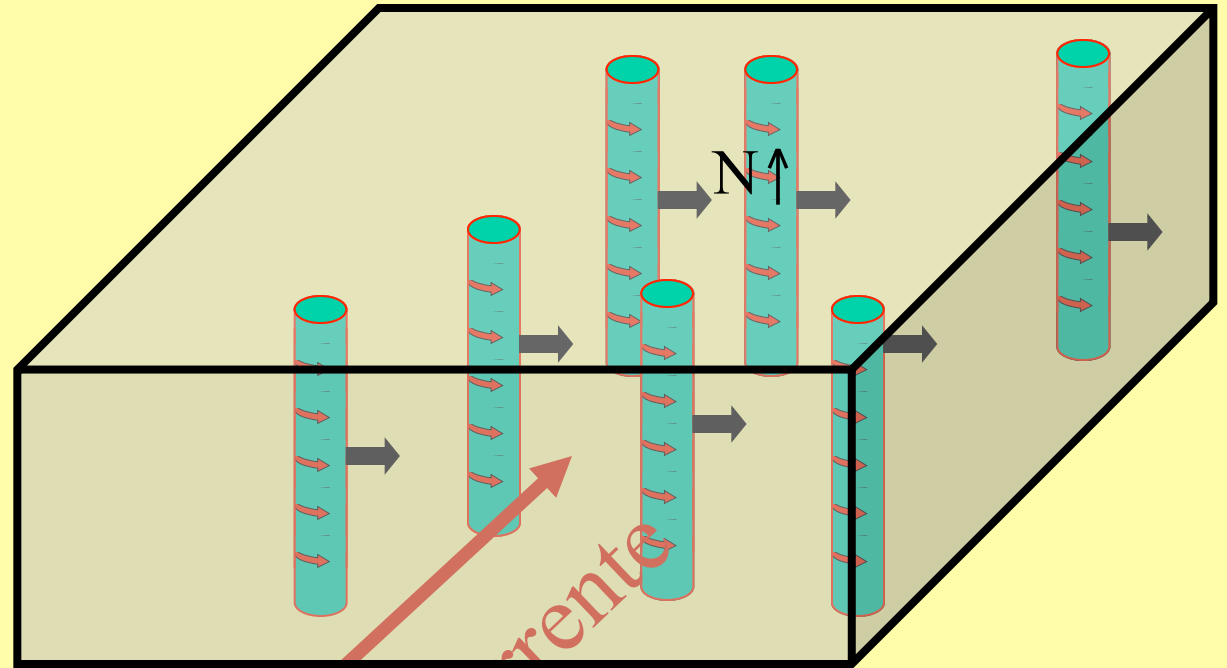


Super-corrente

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

possono avere

- ..e i vortici possono fluire con una frizione

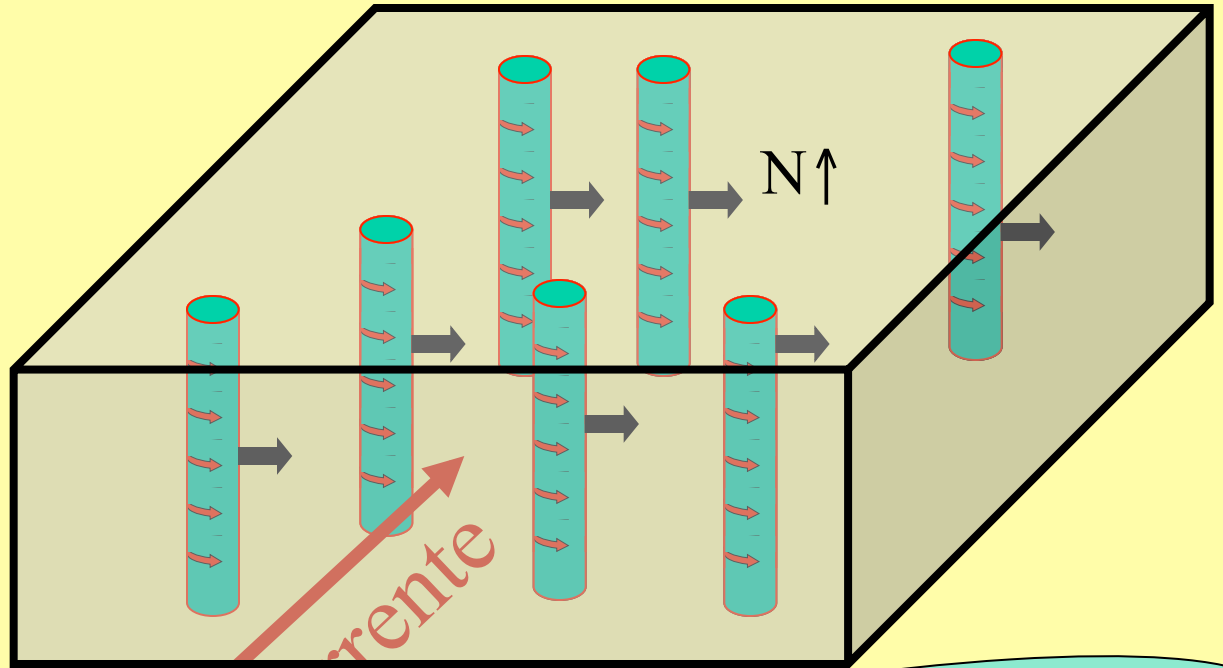


Super-corrente

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

possono avere

i "cuori normali"
e i flussoni in moto
danno resistenza
Elettrica
per effetto Joule



Super-corrente

il sistema transisce nello stato normale

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

possono avere

la natura è maligna.

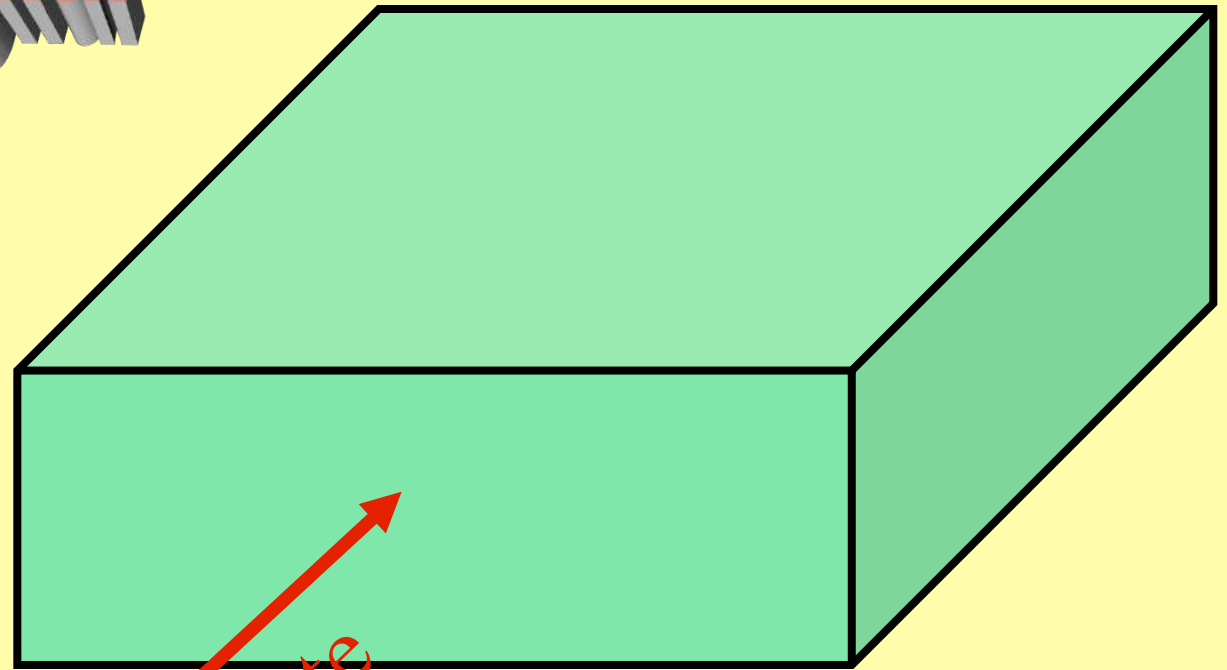
la stessa

supercorrente

fa transire

nello stato normale

superconduttore

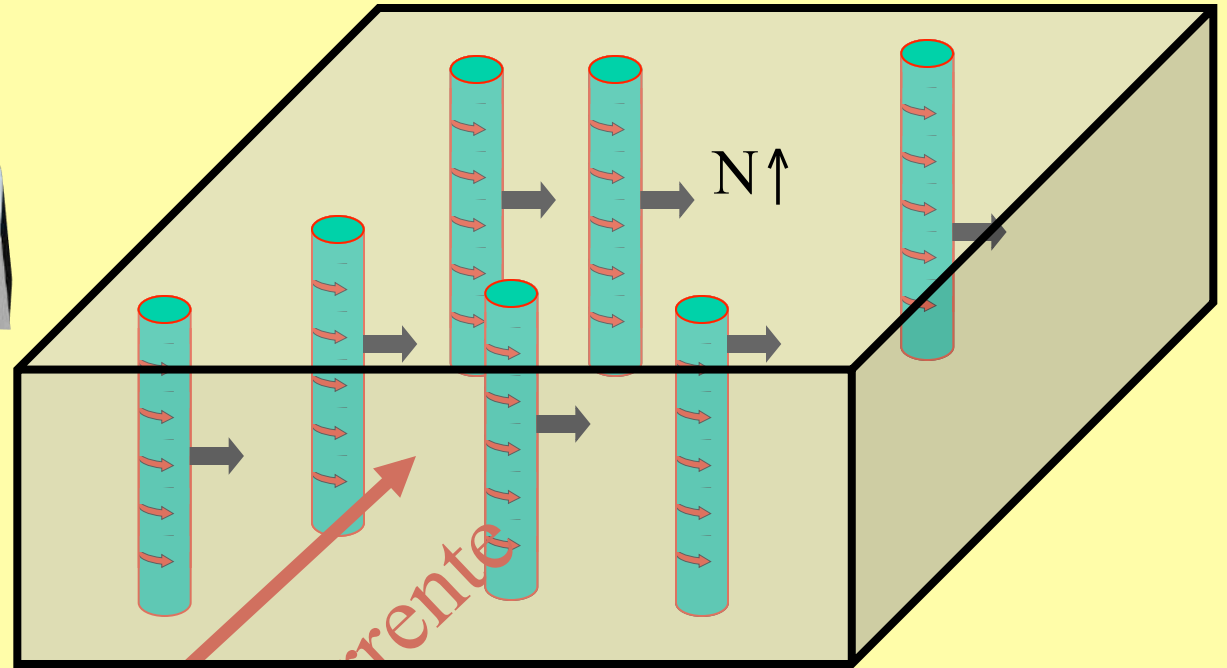


Corrente

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

possono avere

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

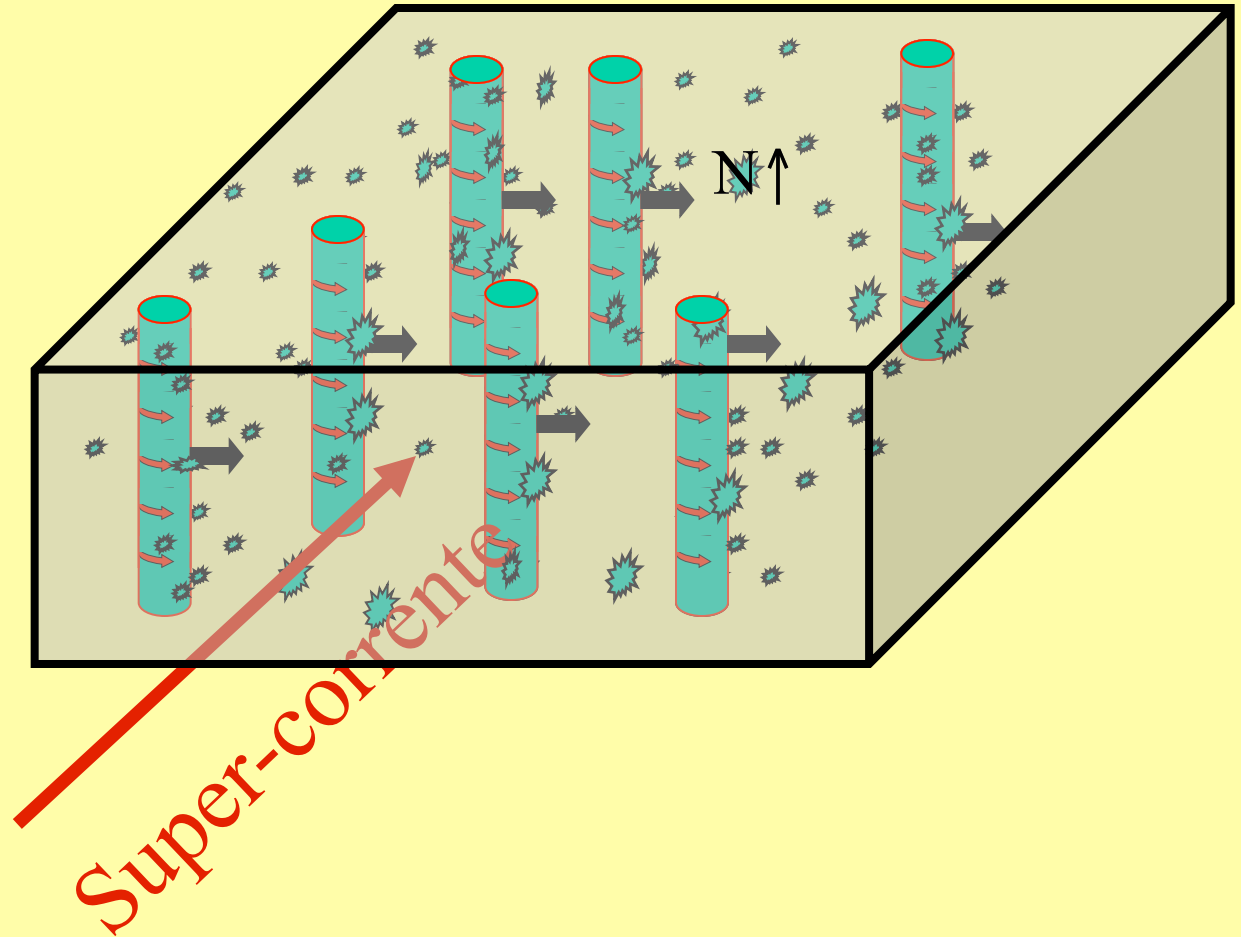


Super-corrente

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

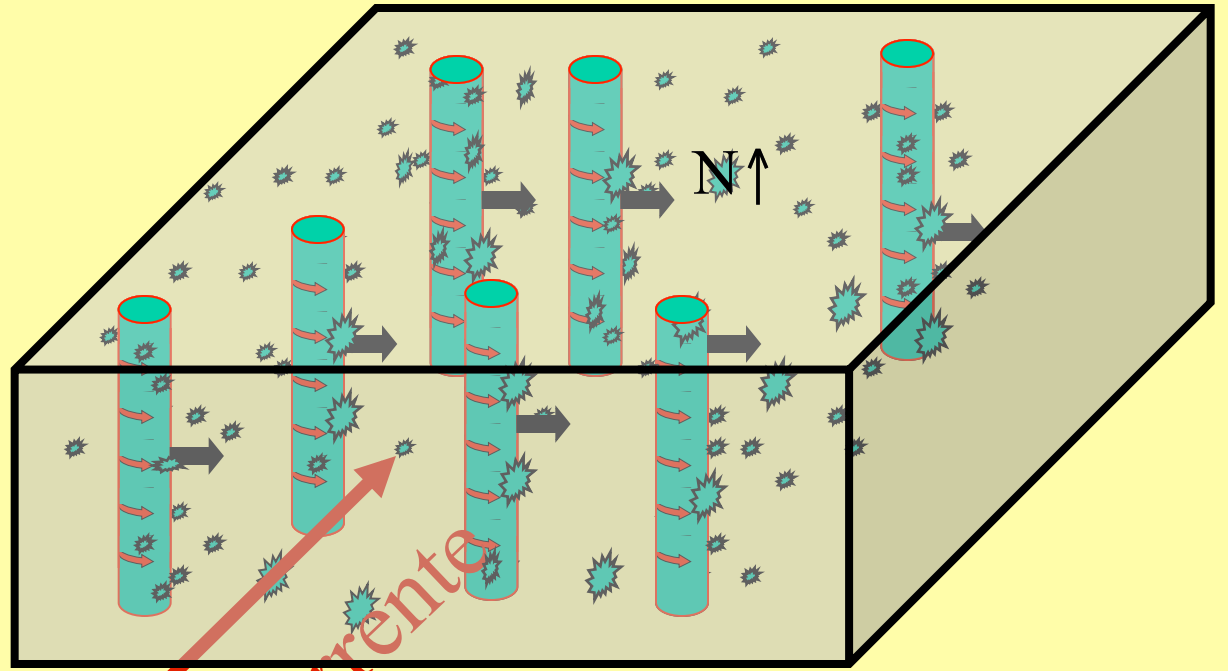
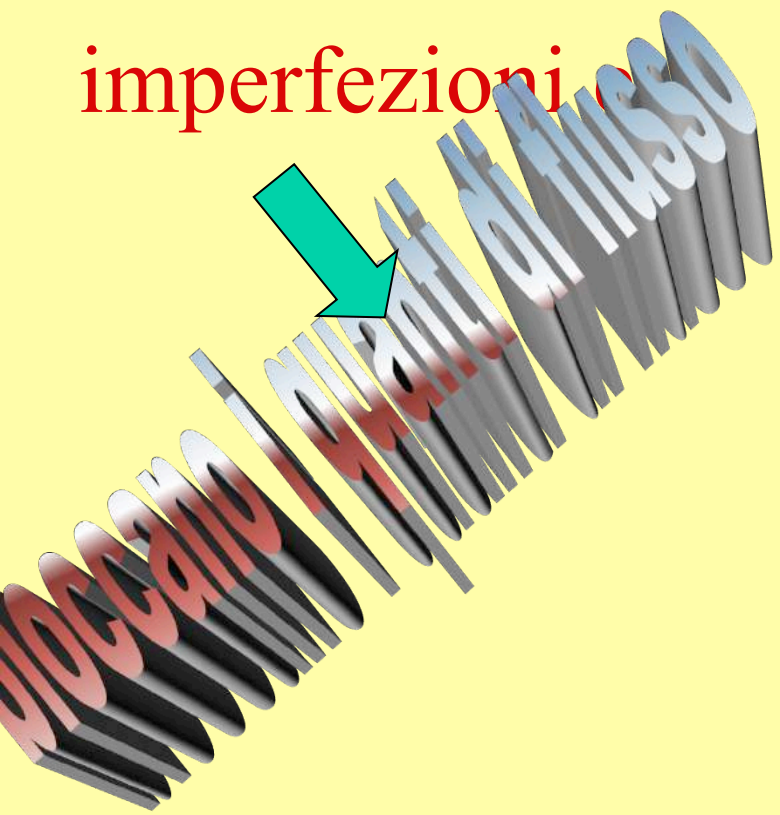
- esistono sempre disperse nel materiale :
imperfezioni,
inquinanti non
superconduttrici,

CHE SUCCESSO?



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

- I quanti di flusso vanno sulle imperfezioni

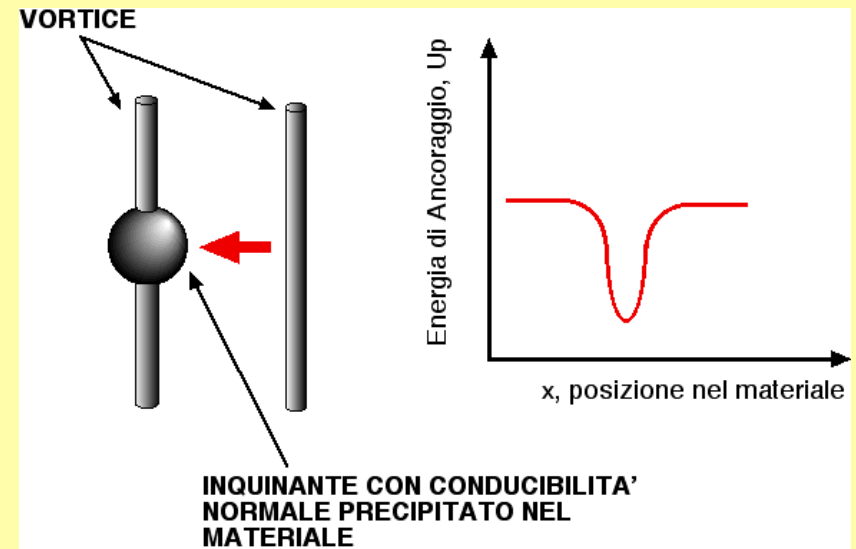


super-corrente

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

- Il cuori **normali** dei quanti di flusso vanno dove o non c'è la superconduttività o dove c'è una superconduttività 'rovinata' cioè sono attirati dalle imperfezioni e

➤ Ancoraggi

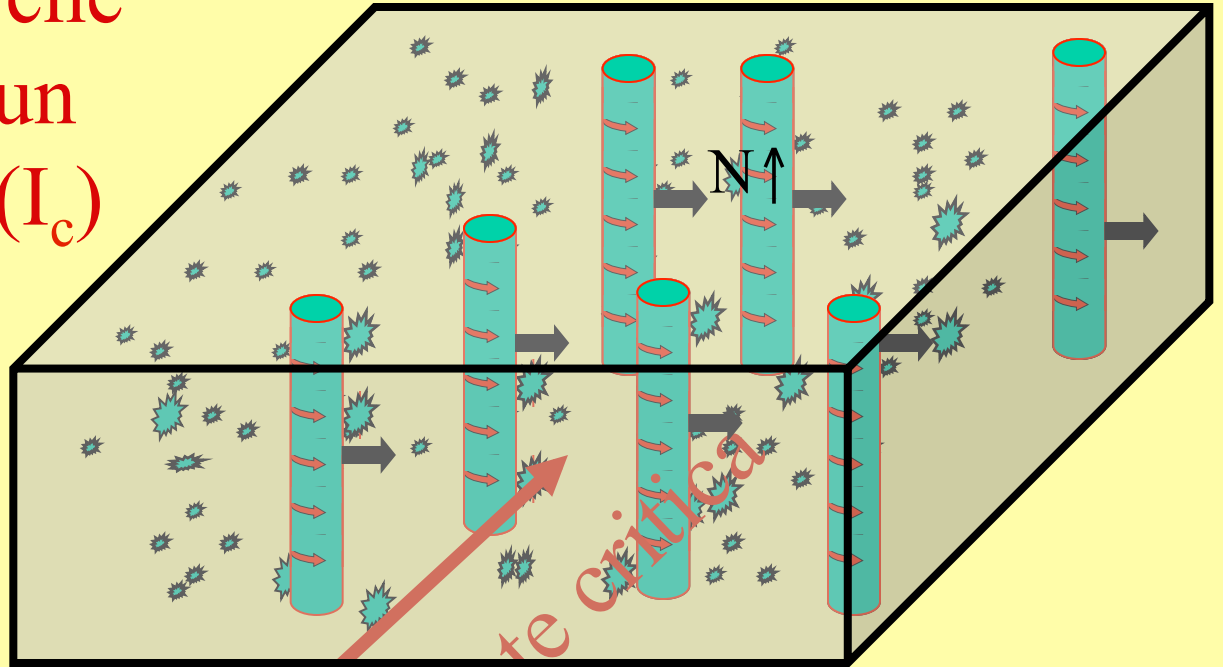
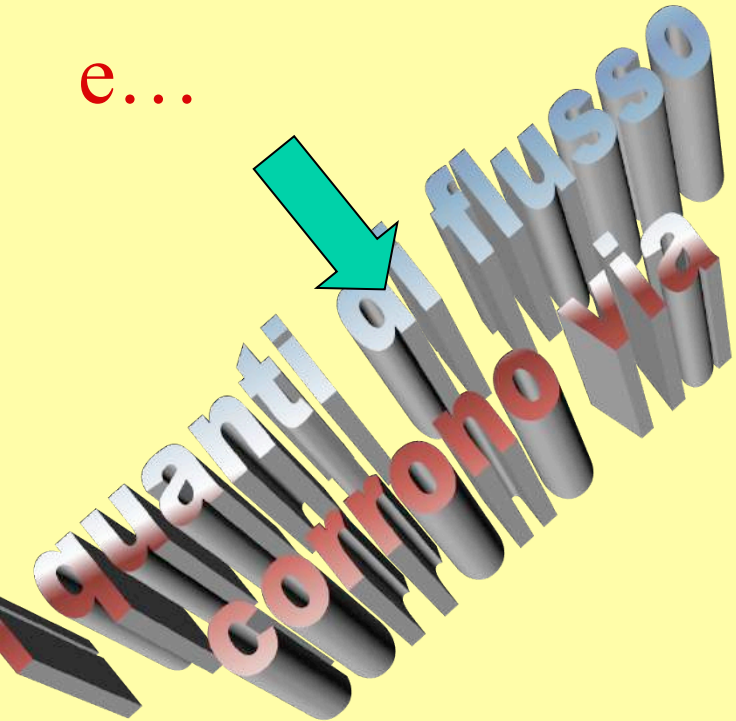


blocco dei quanti di flusso

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

possono avere

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

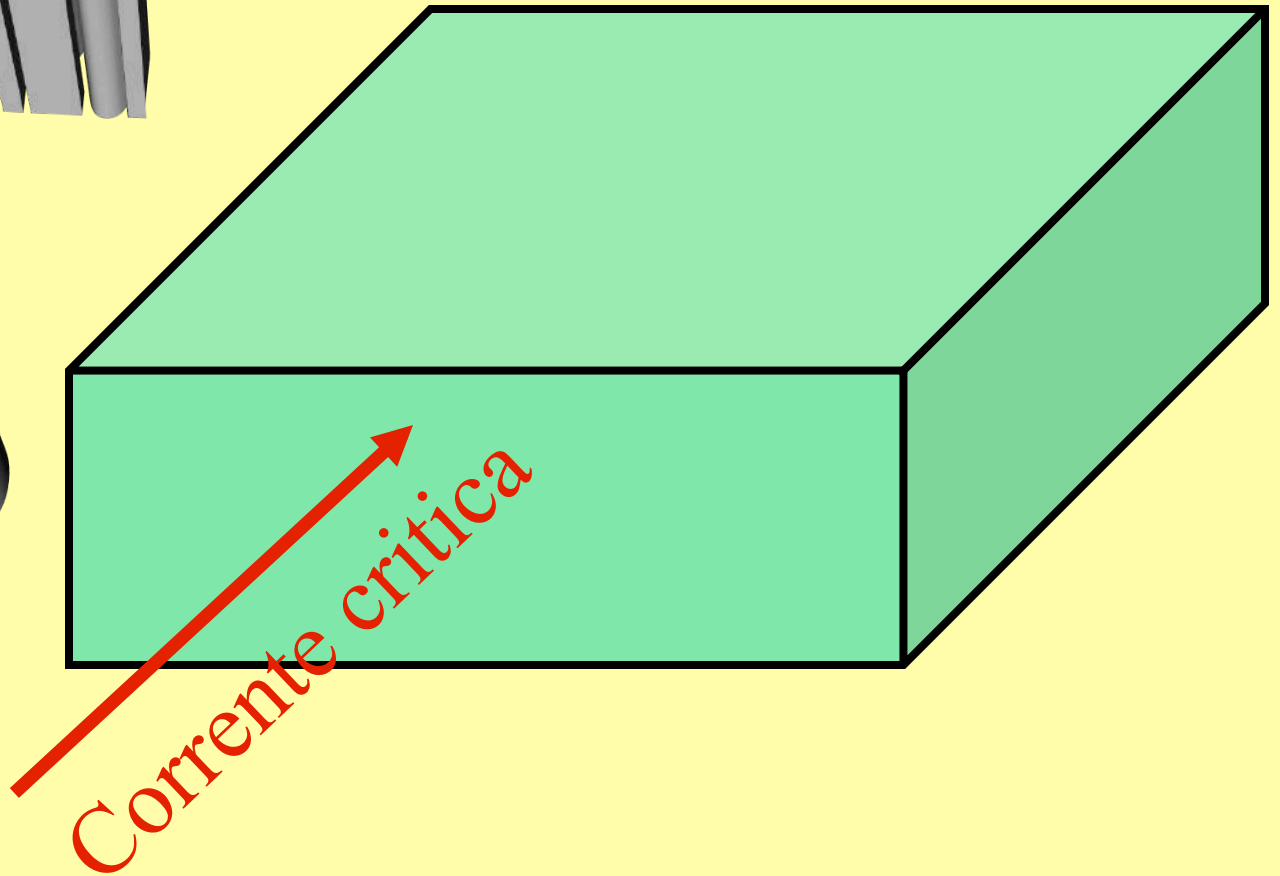


Super-corrente critica

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

possono avere

**e la sostanza
transisce
nello stato
normale**



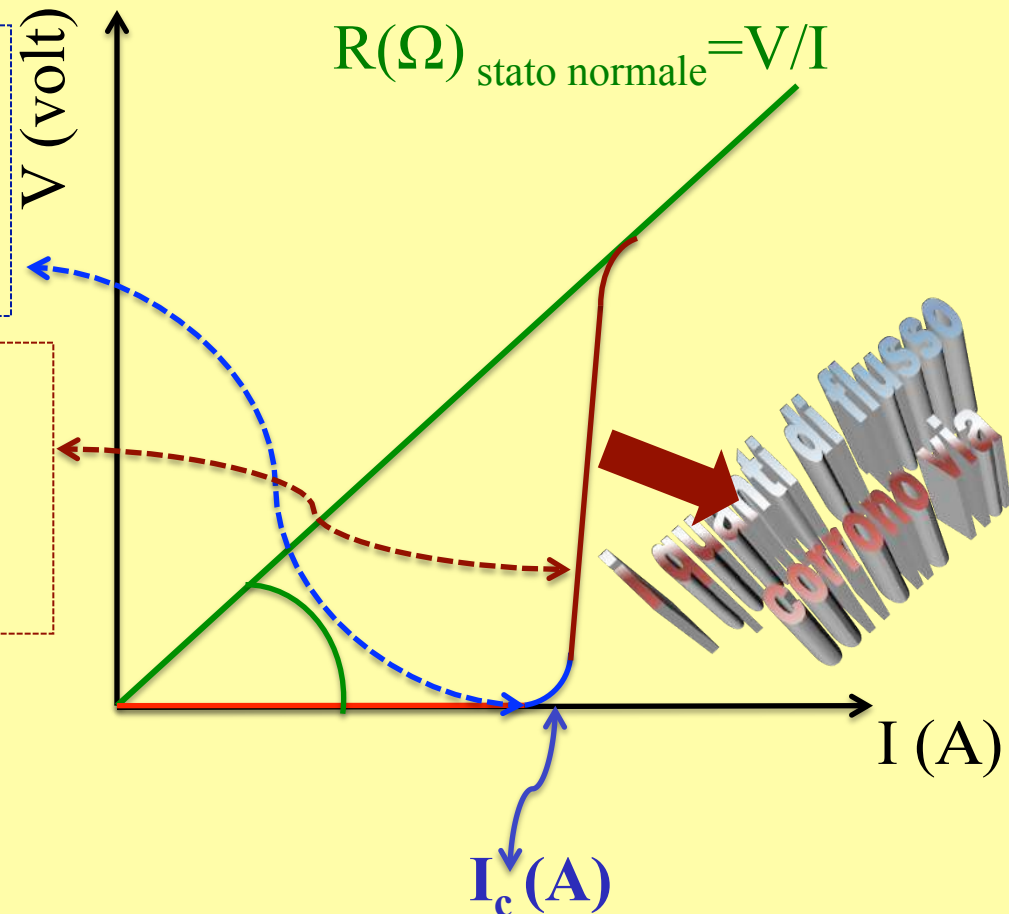
2. I superconduttori II ~~non hanno~~ resistenza *possono avere*

- Il 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 supercorrente

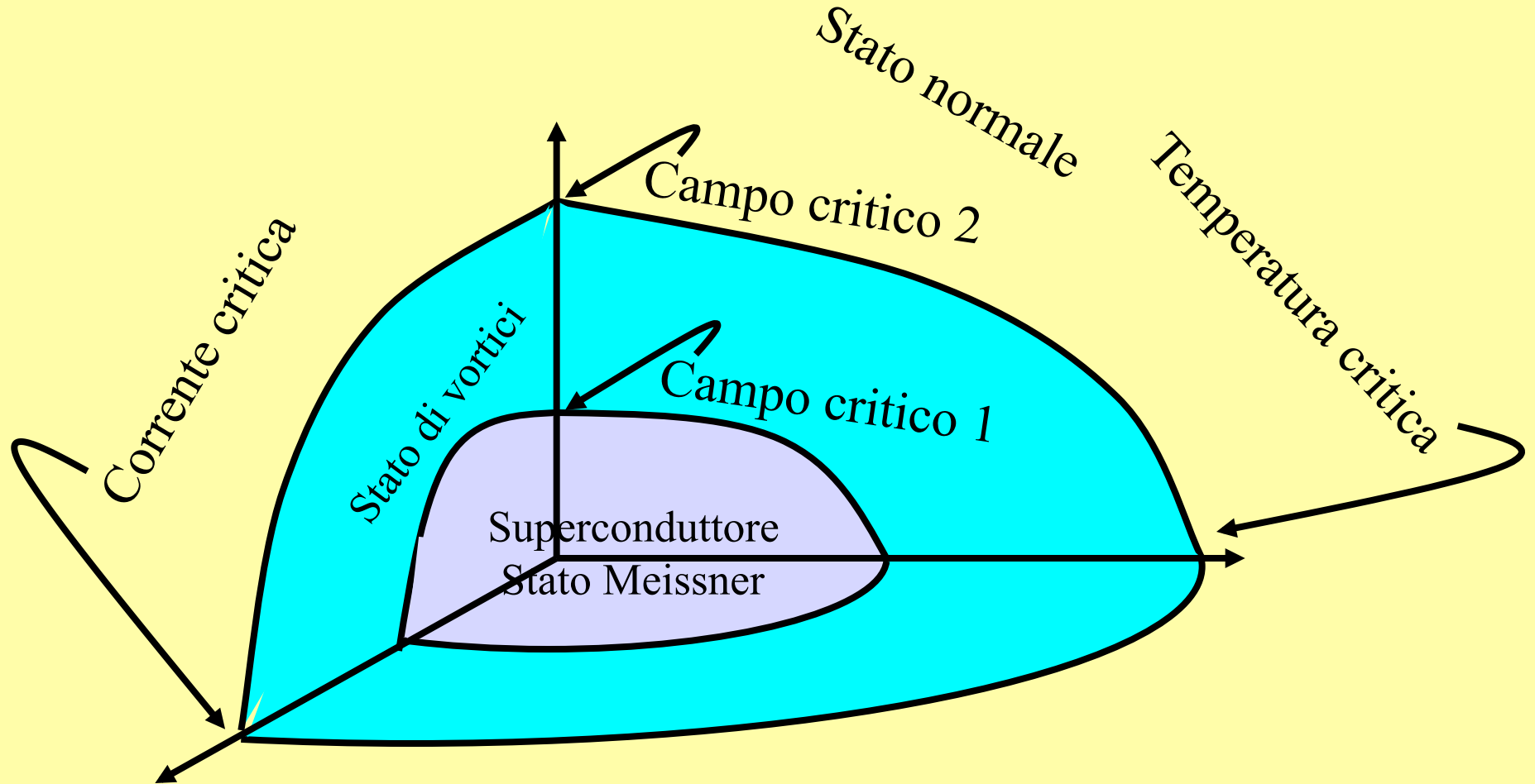
➤ **Alcuni dispositivi elettronici funzionano su questo principio**



Lo stato superconduttore è individuato da tre parametri:

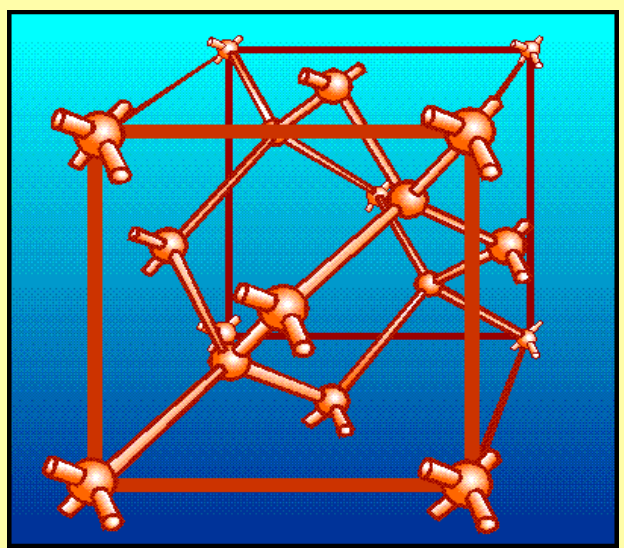
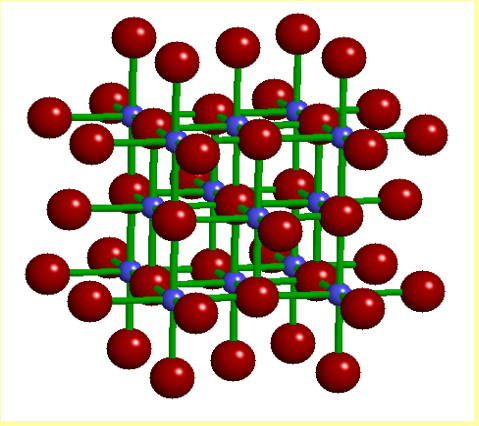
- Temperatura critica (T_c)
- Campo magnetico critico (B_c)
- corrente critica (I_c)

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

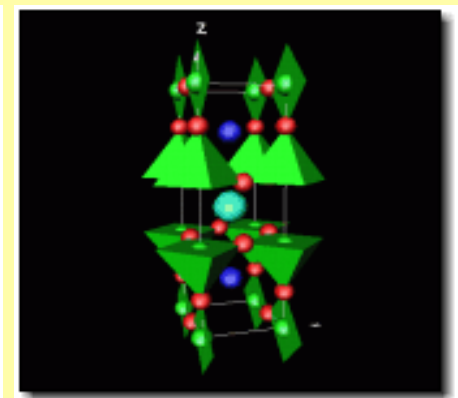
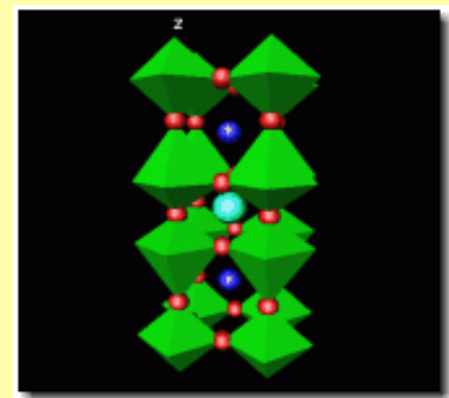
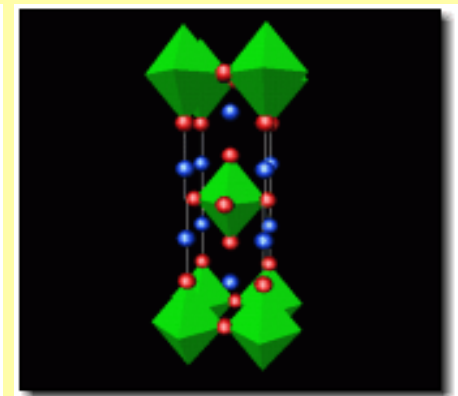
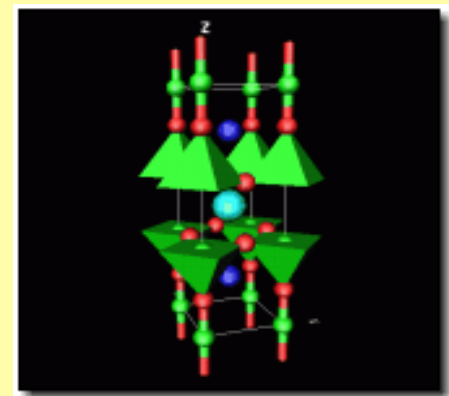


Strutture chimiche dei superconduttori

metallici bassa T_c
Struttura 3-Dimensionale



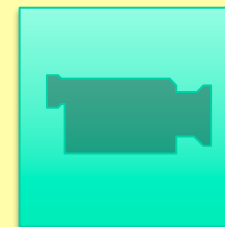
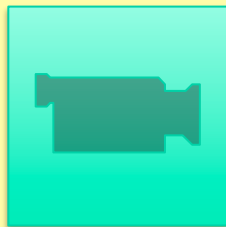
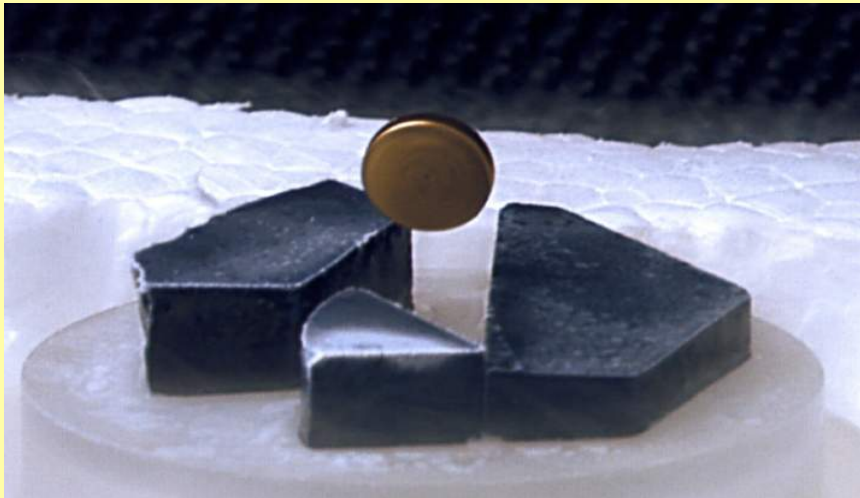
Ceramici alta T_c
Struttura 2-dimensionale
a strati



Un facile esperimento

I filmato

II filmato



una applicazione tecnologica



**..una ferrovia magnetica
di parallelepidi
NdFeB (Neodimio-Ferro-
Boro)forza di attrazione: 6Kg**



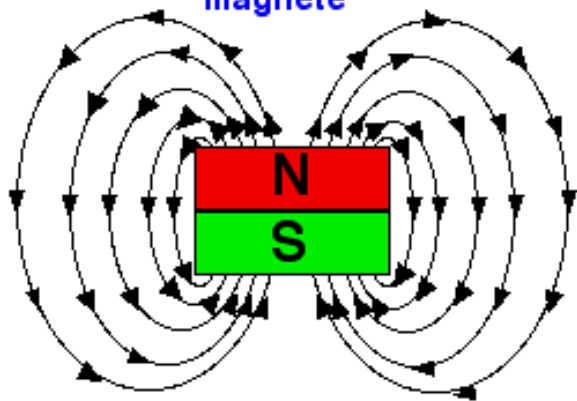
**.. una locomotiva, un vagone con serbatoi
di azoto liquido e superconduttori sulla base**



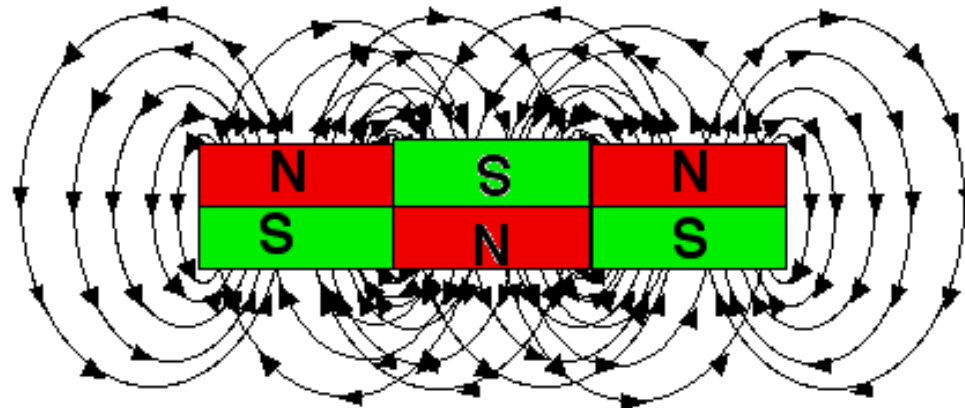
filmato



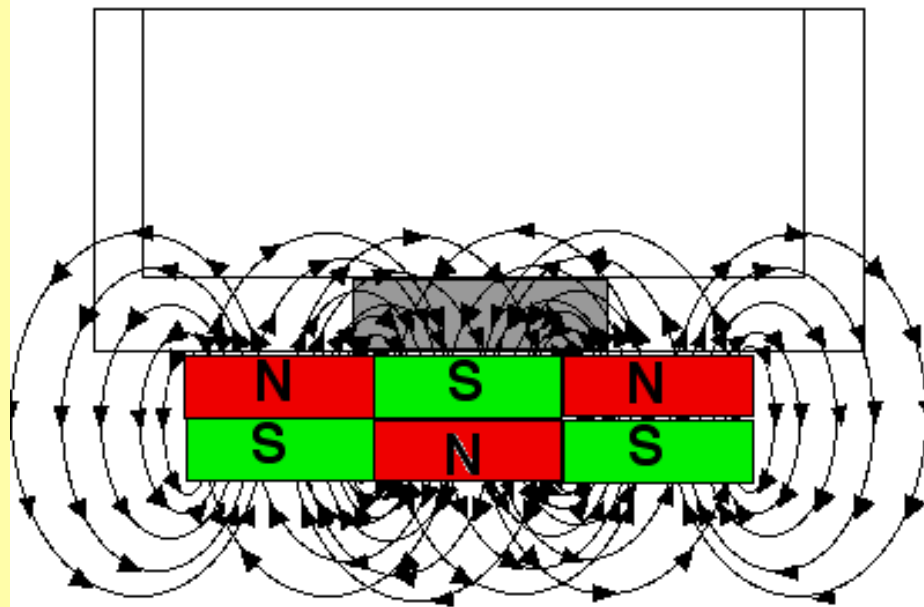
magnete



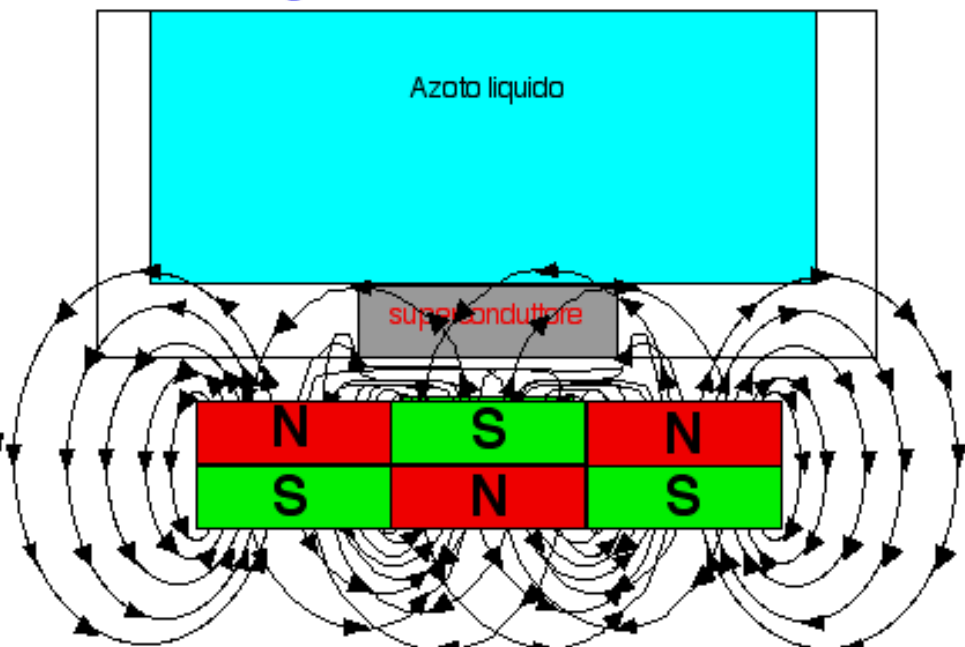
rotaia magnetica

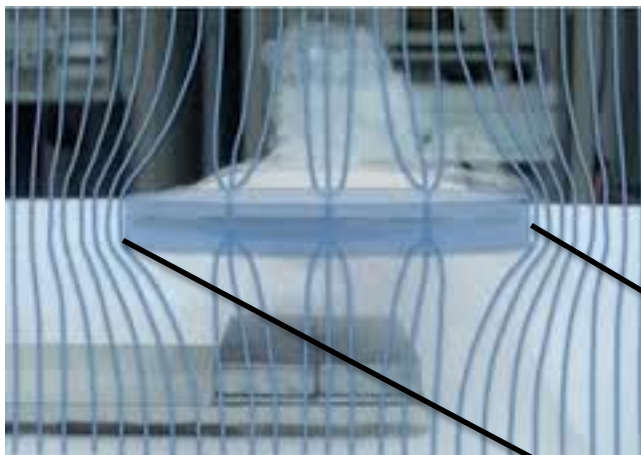


treno con materiale superconduttore in stato normale su rotaia magnetica $T(K) > T_c$

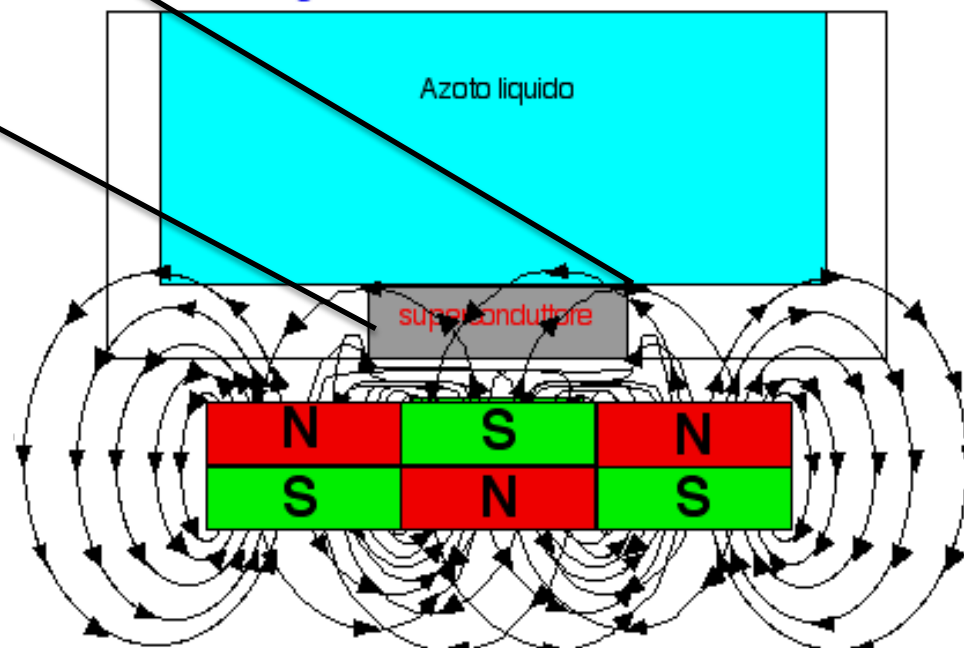


treno con stesso materiale in stato superconduttore su rotaia magnetica $T(K) < T_c$





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



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

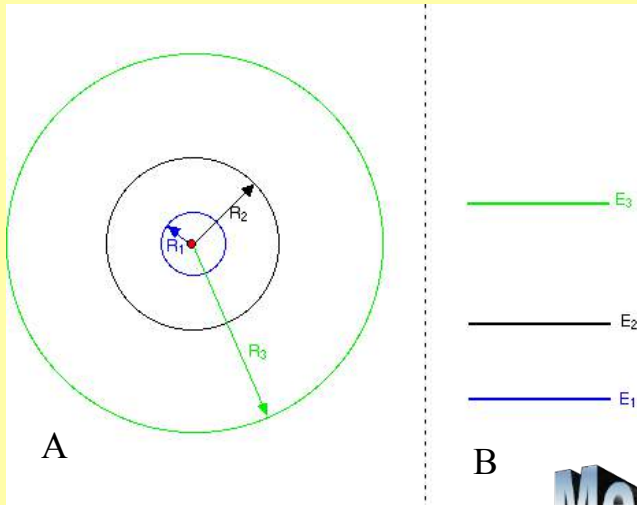
Nel 1957 tre fisici americani, John Bardeen, Leon Cooper e Robert Schieffer svilupparono una teoria basata sulla meccanica quantistica nella materia.

- In un superconduttore gli elettroni **condensano** in uno stato quantistico di 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

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

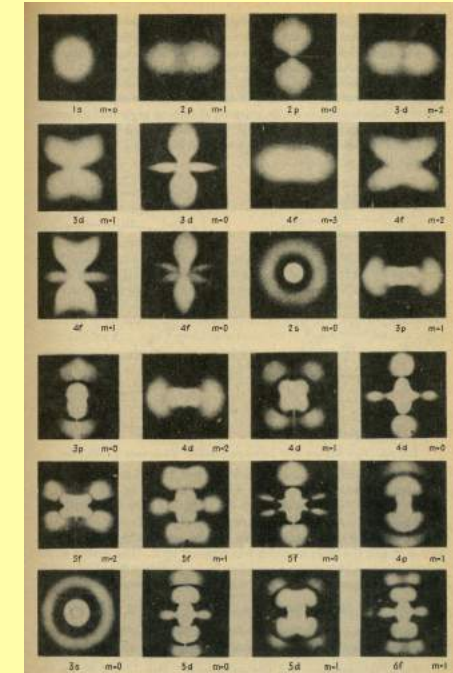
Come si rappresenta un atomo. *Atomi*



A) Orbite elettroniche in un atomo
B) Livelli energetici elettronici rispetto al nucleo

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

Meccanica quantistica.



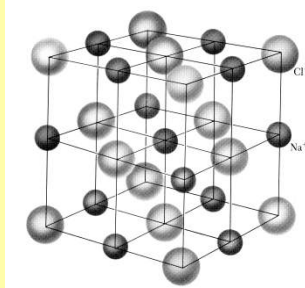
Orbitali elettronici di un atomo di idrogeno:

- ✓ $n=1$ (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

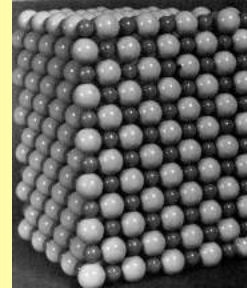
➤ Gli **Orbitali** sono descritti dal **quadrato della funzione d'onda** elettronica, Ψ , proporzionale alla **probabilità di presenza** in una data regione dello spazio

Solidi

Cosa avviene quando si avvicinano N atomi...



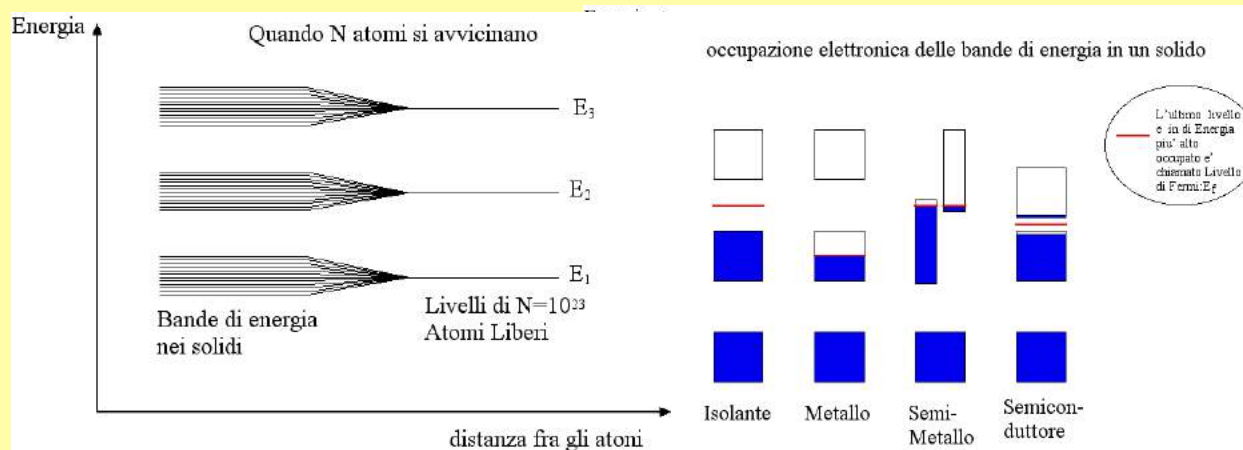
NaCl



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

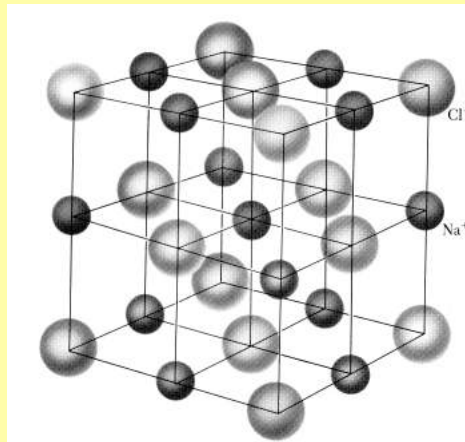


10^{23} elettroni riempiono le bande

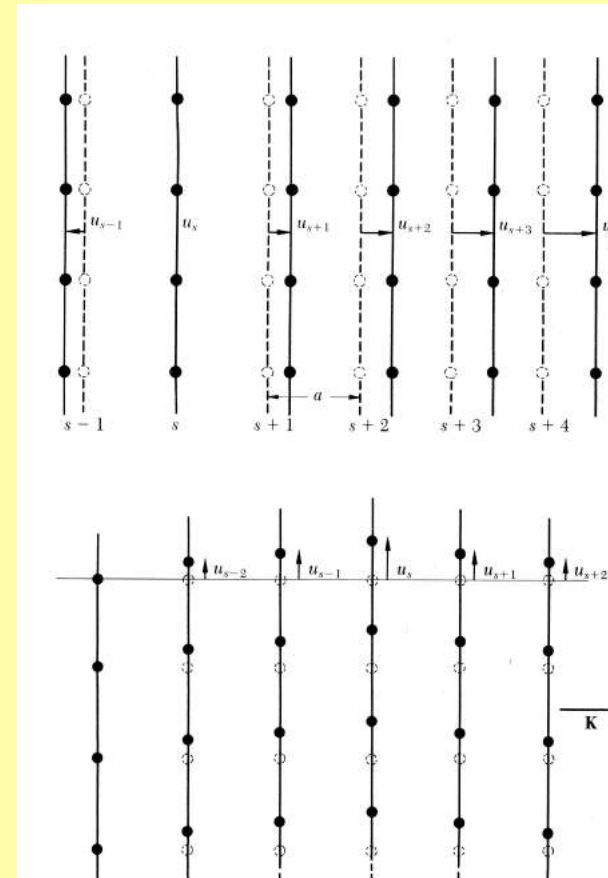
Solidi I reticoli di atomi vibrano.

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

NaCl



Moto (fononi)
longitudinali



Moto (fononi)
trasversali

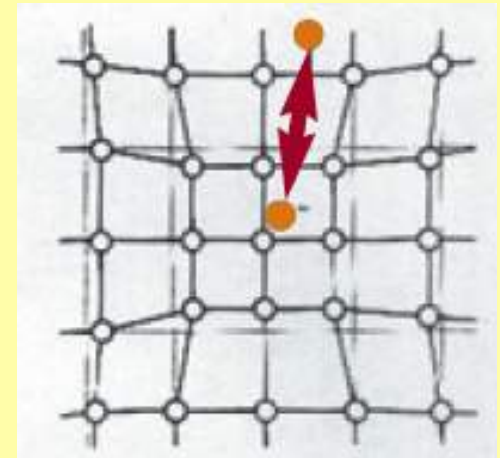
un po' di teoria...

-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

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

elettroni e fononi
le coppie di Cooper



interagiscono per dare...

un po' di teoria....

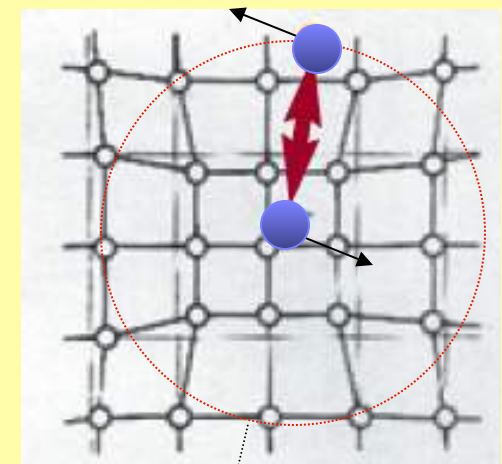
-BCS-

le coppie di Cooper

- Consideriamo due elettroni
- Il primo si stà muovendo e attrae (e poi rilascia) gli ioni intorno a se con una vibrazione reticolare
- 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)



Volume caratteristico

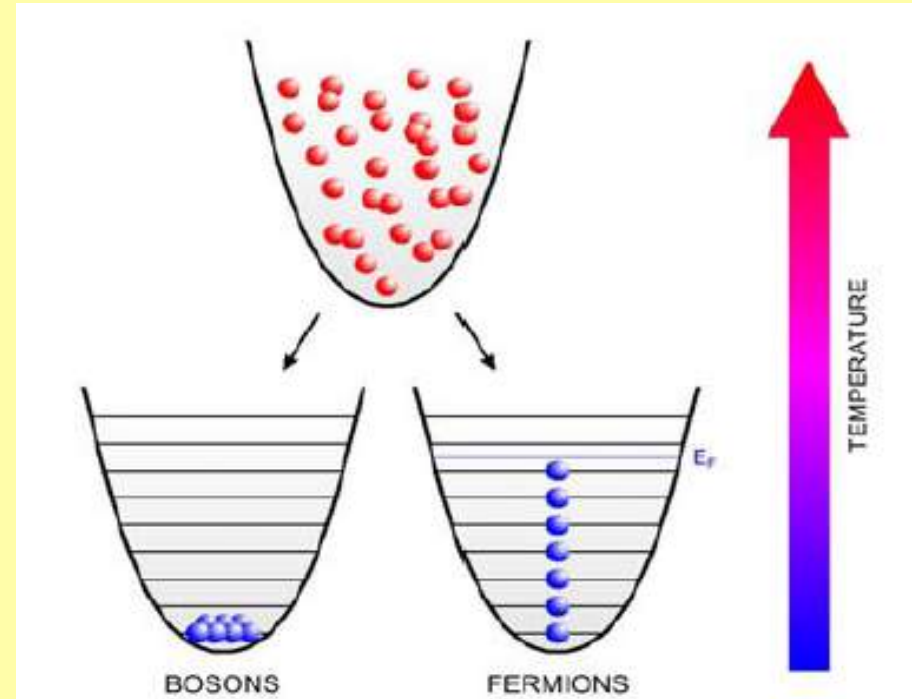
volume di coerenza

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

che gli elettroni si comportano in modo differente dalle coppie di Cooper

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 statistica

un po' di teoria.....:

-BCS-

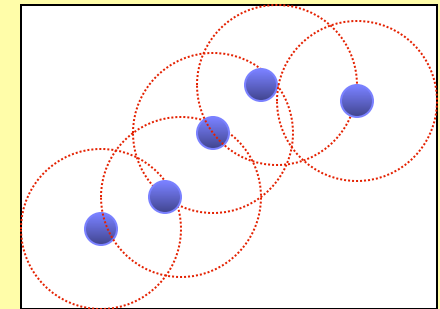
Gli elettroni sono in un solido un numero enorme: circa 10^{23}

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

il sistema è rigido

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:



tutto coerente

tutte le coppie si devono comportare allo stesso modo

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

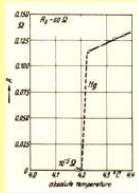
si muovono tutti insieme... senza attrito... > resistenza nulla



Premi Nobel per la Superconduttività

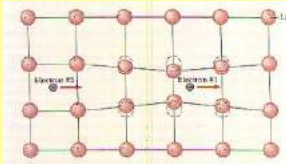
Kamerlingh Onnes (1913)

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



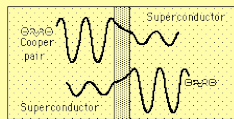
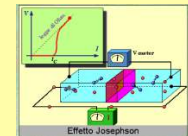
Bardeen, Cooper and Schrieffer (1972)

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



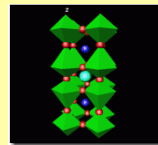
Giaever and Josephson (1973)

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



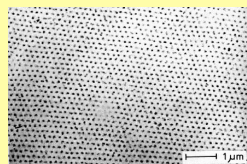
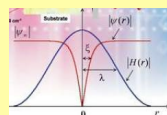
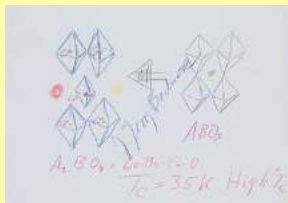
Abrikosov, Ginzburg and Leggett (2003)

Per pionieristici contributi alla teoria della superconduttività e superfluidità



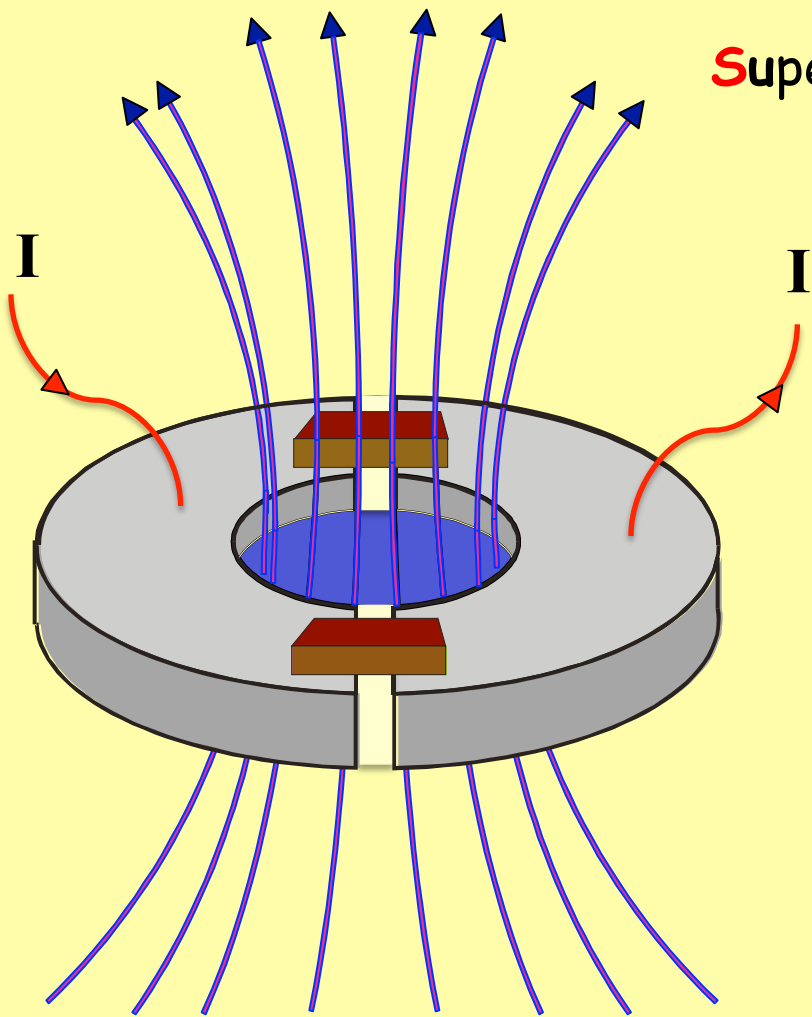
$$\mathbf{j} = \frac{2e}{m} \text{Re} \{ \psi^* (-i\hbar \nabla - 2e\mathbf{A}) \psi \}$$

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



Che cosa è lo SQUID?

Superconducting QUantum Interference Device
(SQUID)



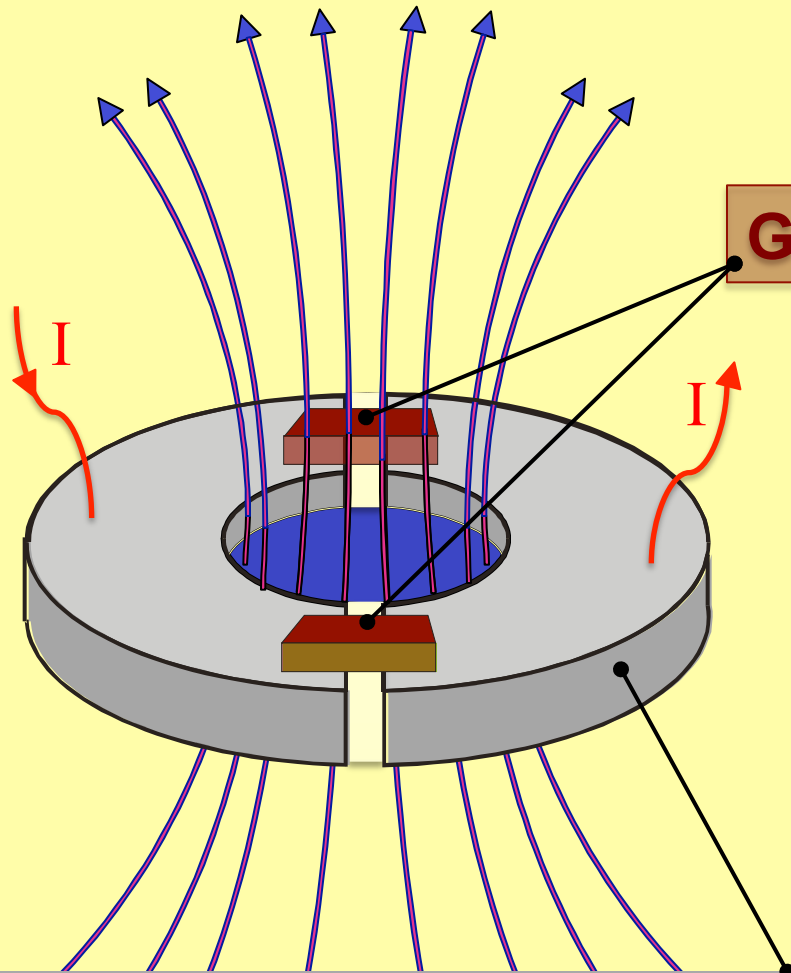
- È il più sensibile rivelatore di campo magnetico:

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

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

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

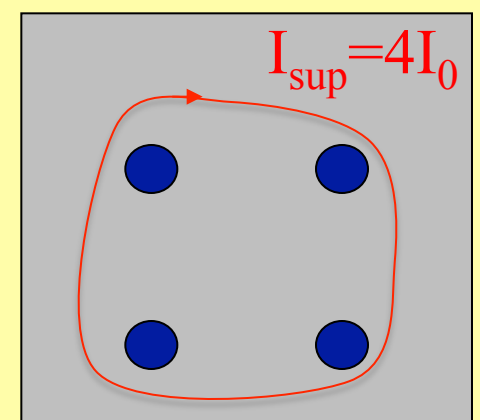
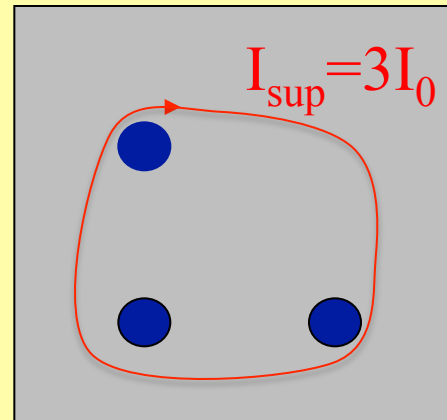
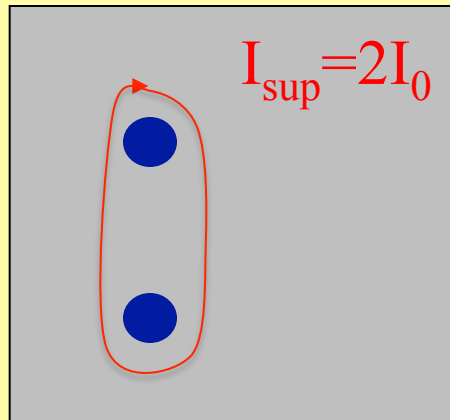
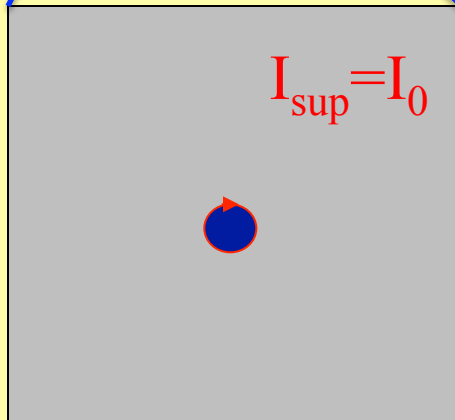
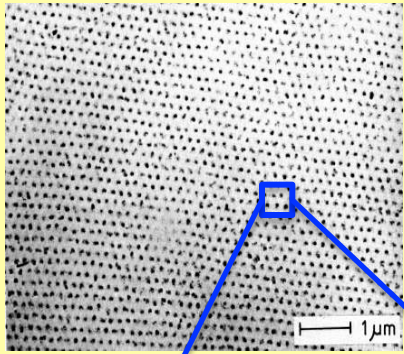
- Resistenza Zero
- Effetto Meissner
- Quantizzazione del campo magnetico
- Effetto Josephson (Tunnel Quanto-Meccanico)
- Interferenza fra le onde

Che cosa è lo SQUID?

La quantizzazione del flusso magnetico
in un anello superconduttore

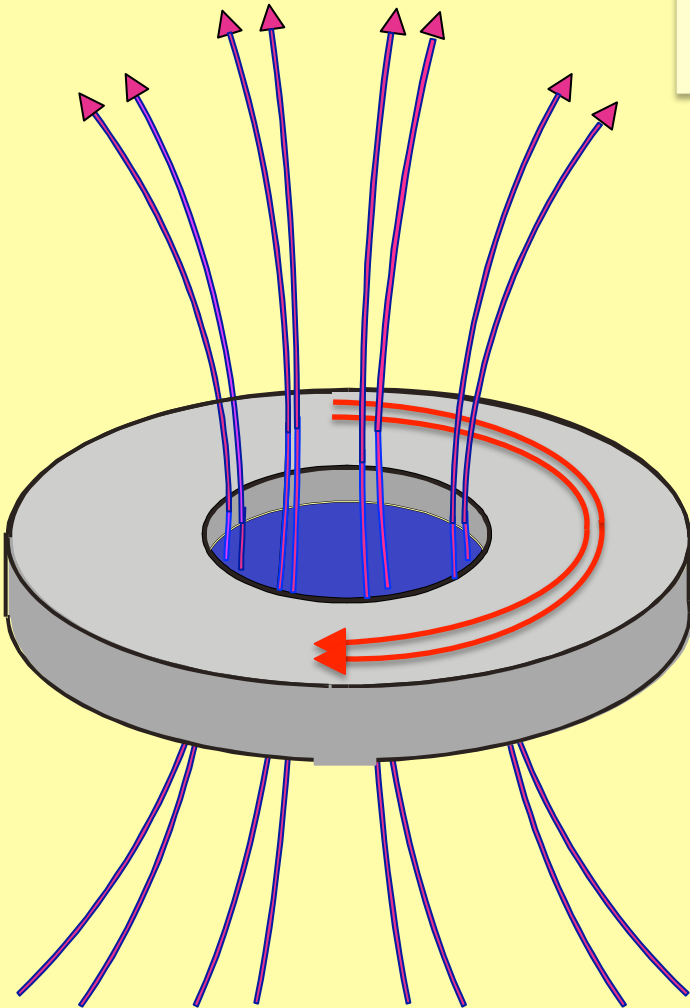
Alcuni chiarimenti:

- *Il valore della supercorrente che scorre intorno ai flussoni 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*

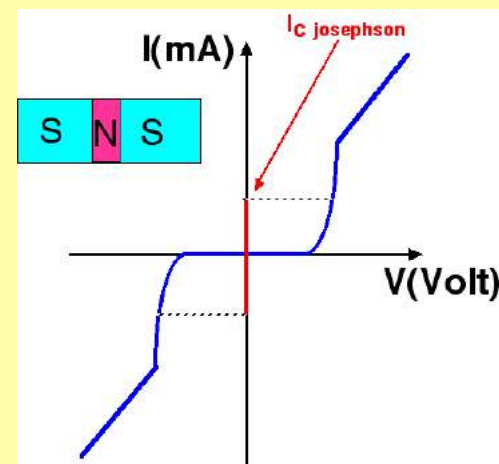
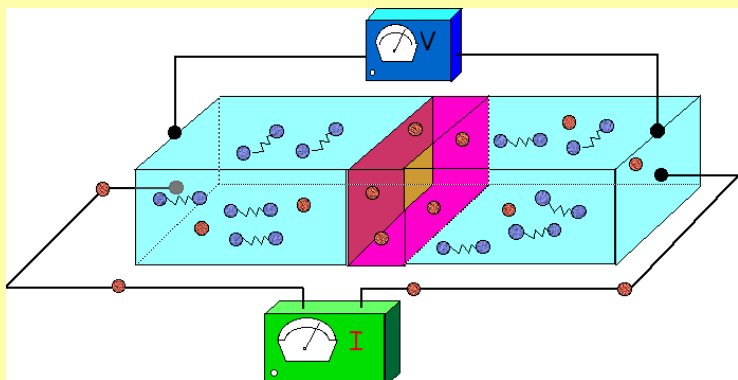
Che cosa è lo SQUID?

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

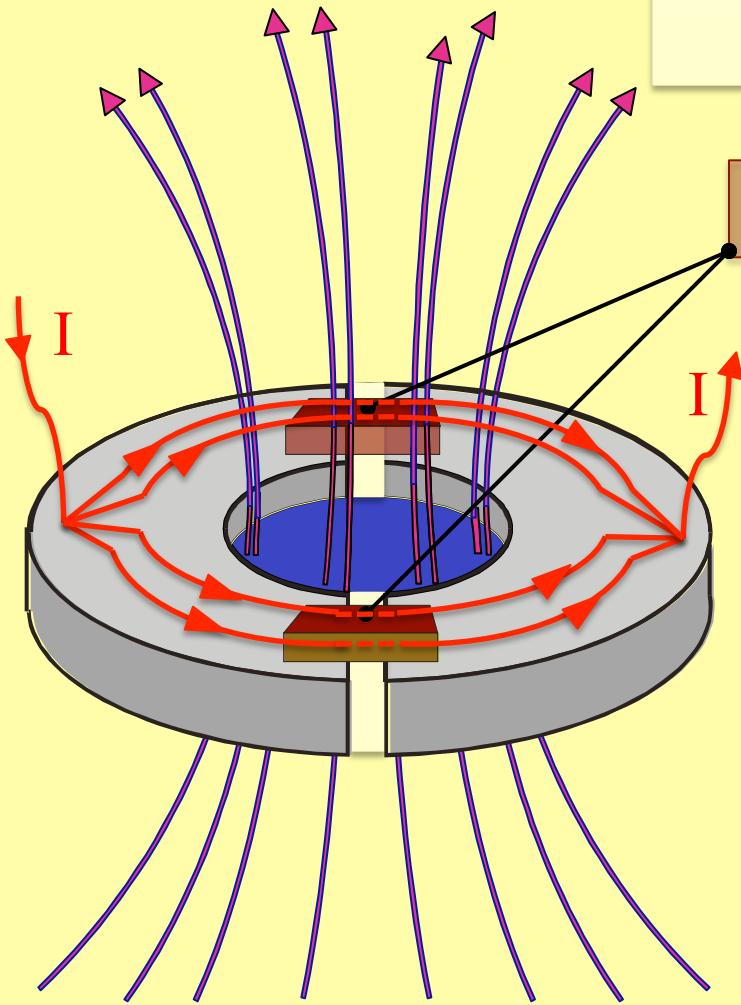
la corrente critica massima Josephson ha un valore più piccolo della corrente critica del superconduttore



Che cosa è lo SQUID?

Interferenza fra onde

Giunzioni Josephson (JJ)



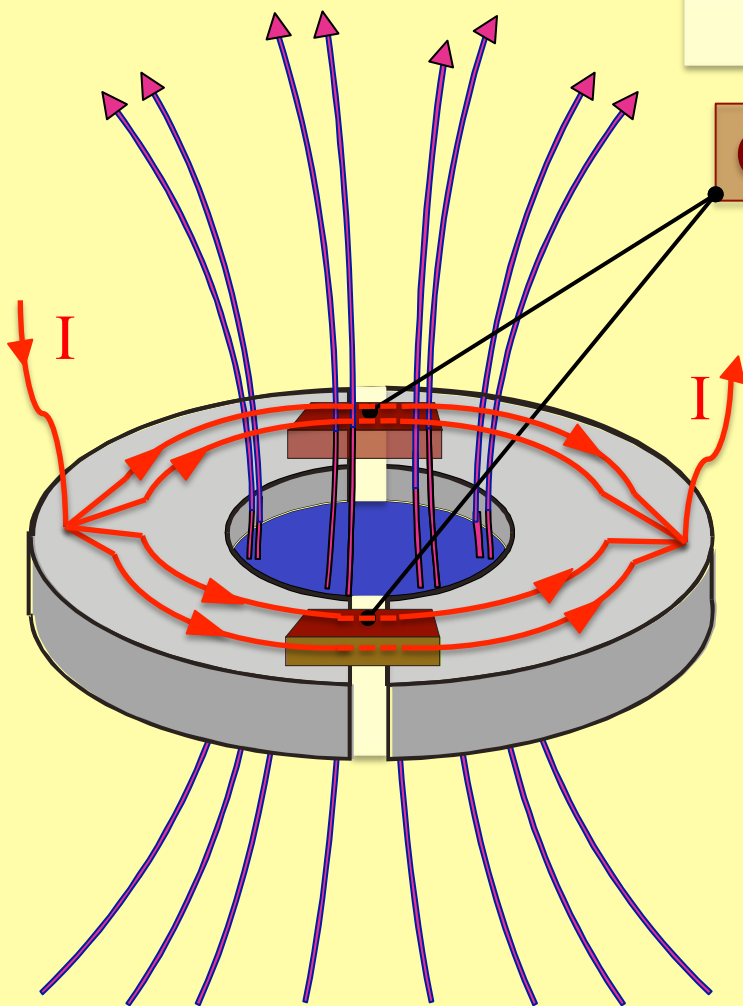
- le giunzioni sono la parte debole superconduttiva: I_c molto bassa
- Interferenza della corrente fra i due rami è costruttiva (le giunzioni influiscono poco)

➤ *Scorre indisturbata la supercorrente Josephson*

Che cosa è lo SQUID?

Interferenza fra onde

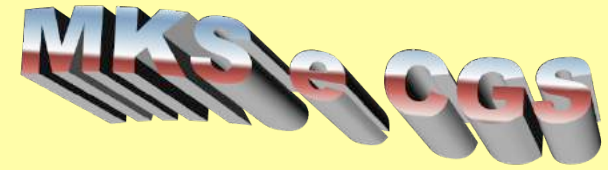
Giunzioni Josephson (JJ)



- 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

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



B=induzione magnetica o densità 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 unità di volume o peso o massa,
chiamata anche intensità 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 permeabilità magnetica

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

χ= suscettività 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 su criogenia e Superconduttività

Misura resistiva in funzione della temperatura di una resistenza a grani di carbone

Un resistore formato da grani di carbone aumenta la resistenza elettrica quando si abbassa la temperatura, perchè?

Scopo dell' esperienza:

Un semplice esperimento elettrico per conoscere fluidi criogenici, guanti, thermos, devar per contenere azoto liquido, un tipo di resistore elettrico, l' ohmetro, termometri, e come si lavora.

Una osservazione porta a una applicazione: realizzare dei termometri

L' esperimento consisterà fissare su una resistenza Allen-Bradley un termometro e leggerlo, misurare con un ohmetro la resistenza elettrica. Immergerlo in azoto liquido con l' uso di un contenitore di polistirolo e guanti, esporlo all' aria e prendere nel tempo la variazione della temperatura e resistenza

DESCRIZIONE ESPERIMENTO

La resistenza Allen-Bradley

Nastro adesivo di alluminio

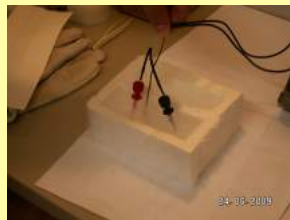
Termometro a termocoppia e lettore di temperatura

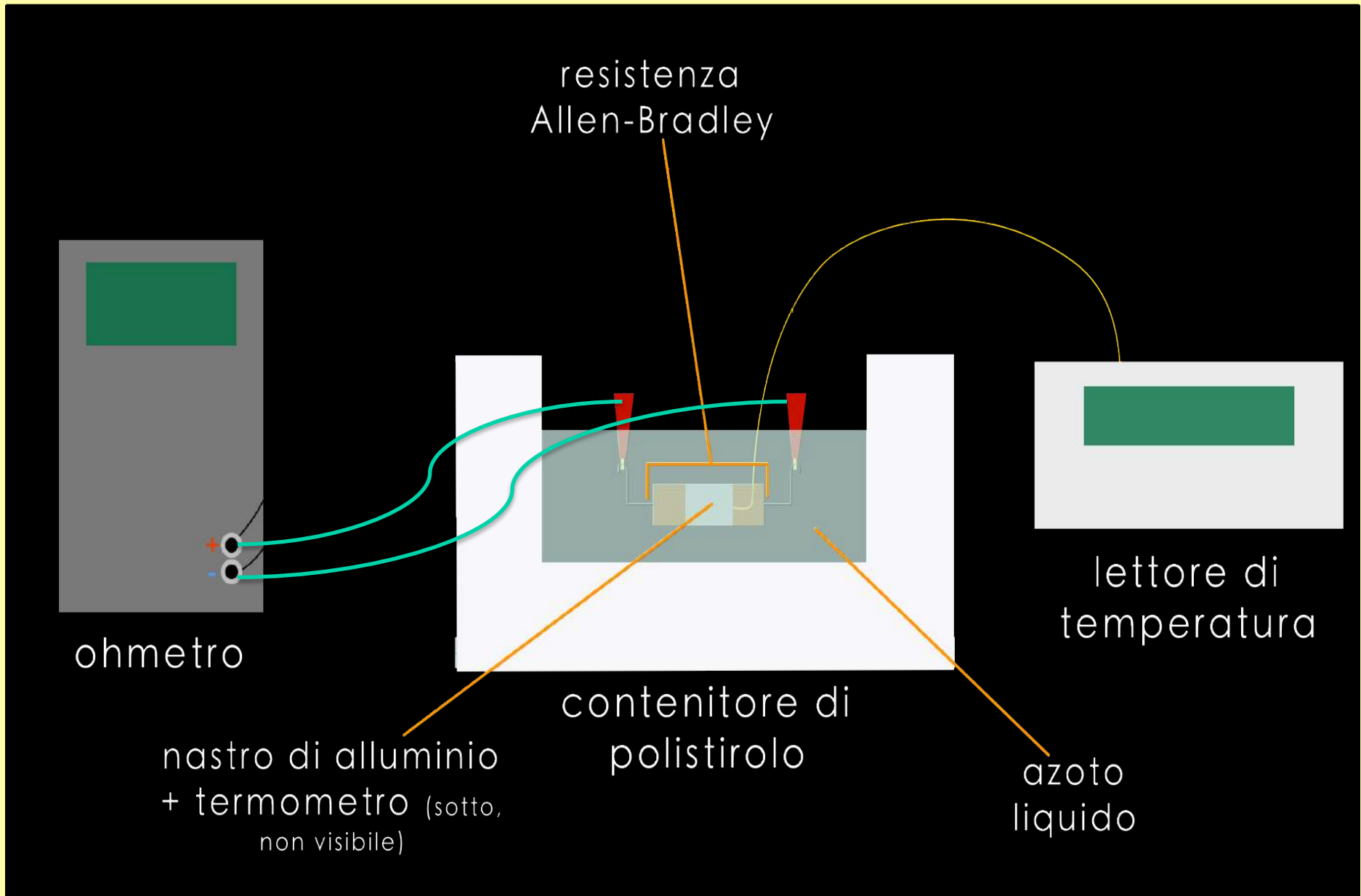
Ohmetro: lettore della resistenza elettrica

Contenitore di polistirolo

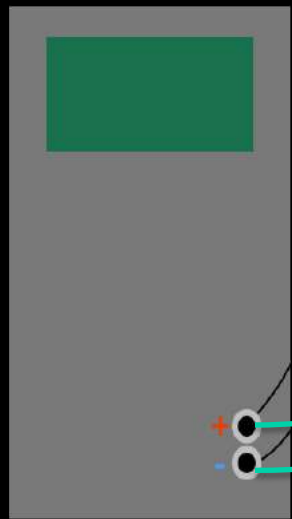
Esecuzione dell' esperienza

- Viene posto il termometro sulla resistenza e fissata con scotch di Alluminio
- Vengono collegati gli estremi della resistenza all' ohmetro
- Viene raffreddata la resistenza ponendola dentro una scatola di polistirolo con azoto liquido versato da un contenitore chiamato 'devar' e lasciata immersa in azoto liquido, (uso di guanti).
- Estratta la resistenza dall' azoto liquido
- Osservata la variazione resistiva fino a temperatura ambiente
- Grafico del valore resistivo in temperatura (carta millimetrata, relazione)

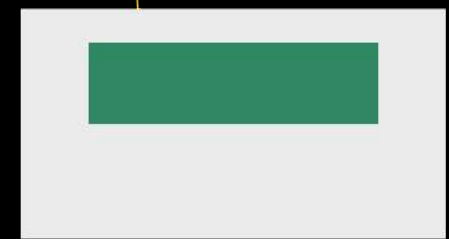




resistenza
Allen-Bradley



ohmetro



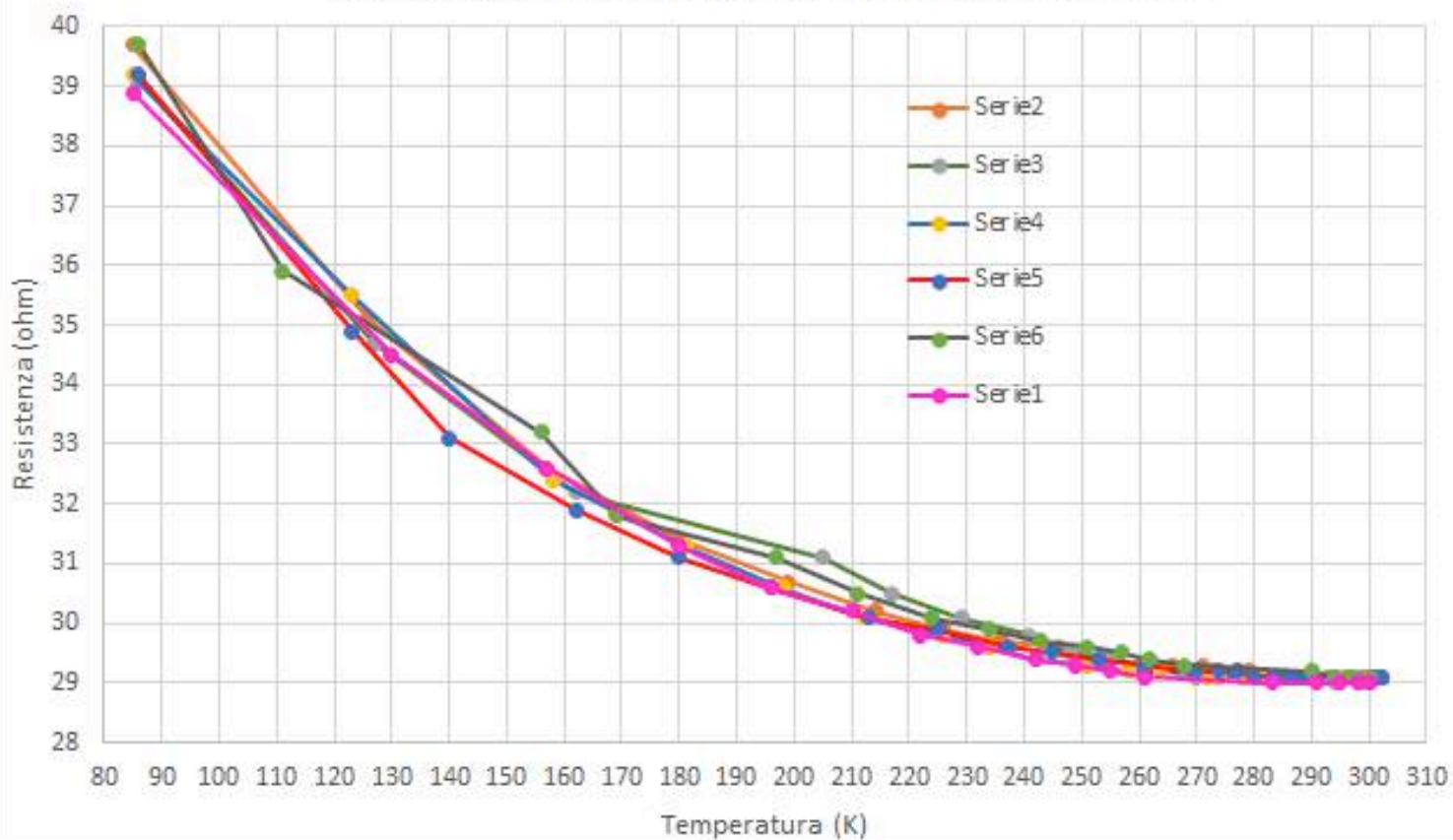
lettore di
temperatura

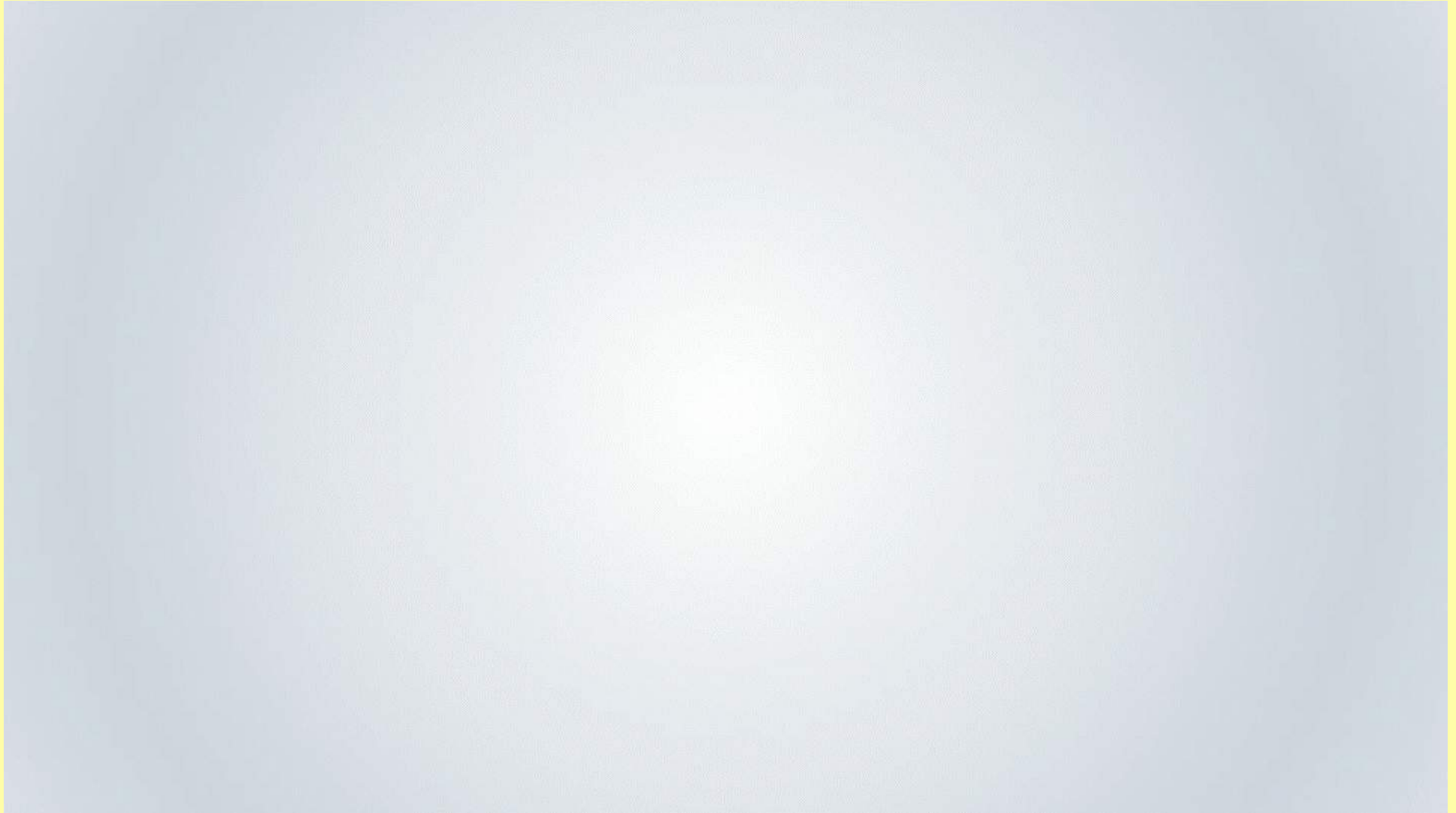
nastro di alluminio
+ termometro (sotto,
non visibile)

contenitore di
polistirolo

azoto
liquido

Esperimento con la resistenza in grani di carbonio





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



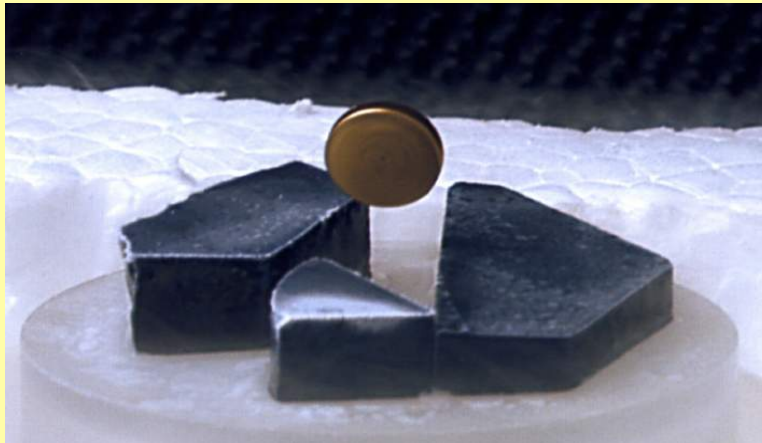
Azoto liquido

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:

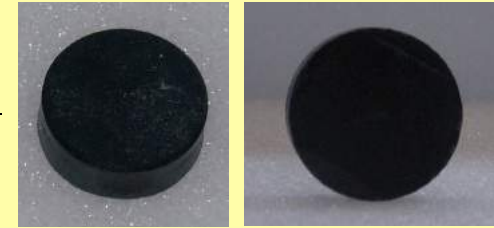
Si mostra in modo qualitativo un tipo di uso tecnologico dell'espulsione e/o esclusione del campo magnetico da parte di un superconduttore:

ecco l'idea base di TRASFERIMENTO TECNOLOGICO

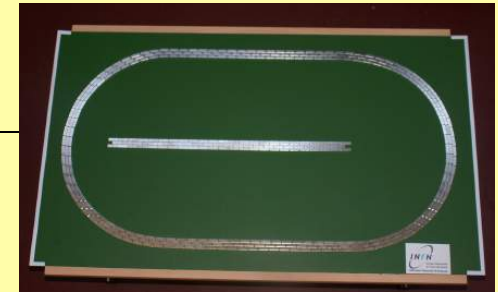
L'esperienza consisteva nel far fluttuare su una rotaia magnetica un trenino sulla cui base sono stati inseriti dei dischi di superconduttore ceramico a una temperatura sotto la temperatura critica superconduttiva

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

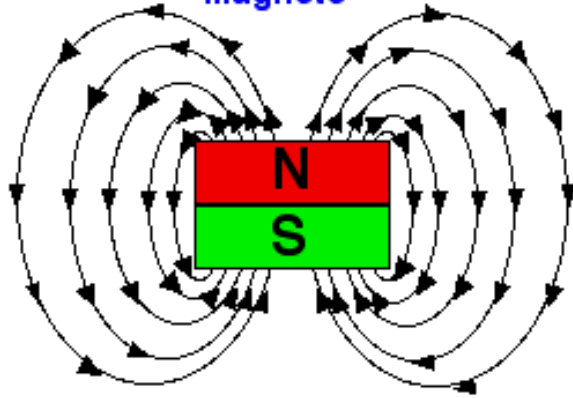
Esecuzione dell' esperienza

- 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

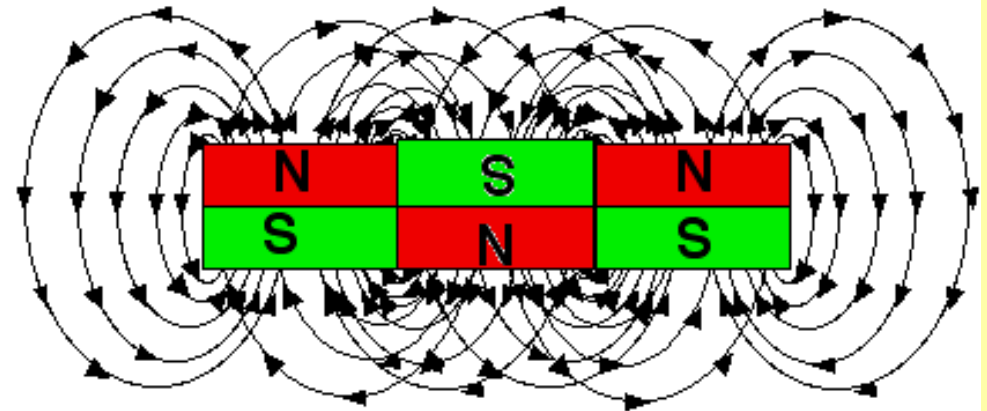


DESCRIZIONE ESPERIMENTO

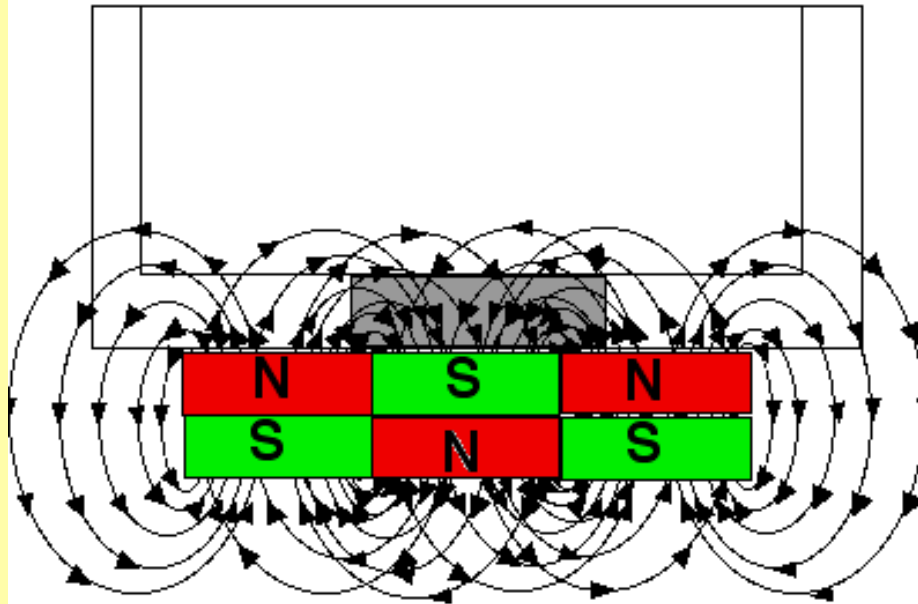
magnete



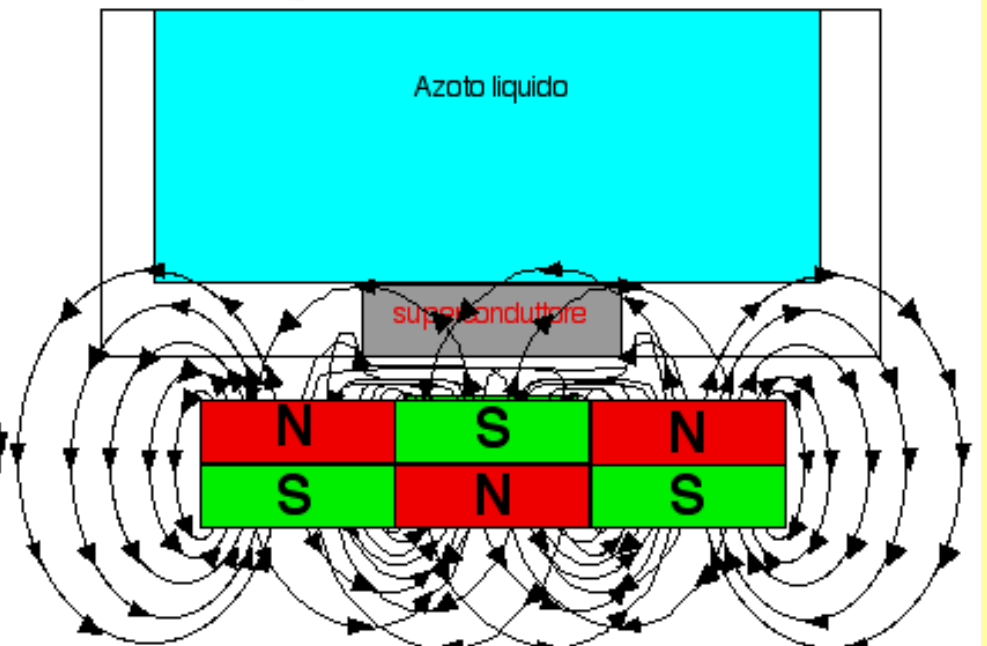
rotaia magnetica



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 a.c., 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 **suscettività** 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 $\neq 0\text{Volt}$) .

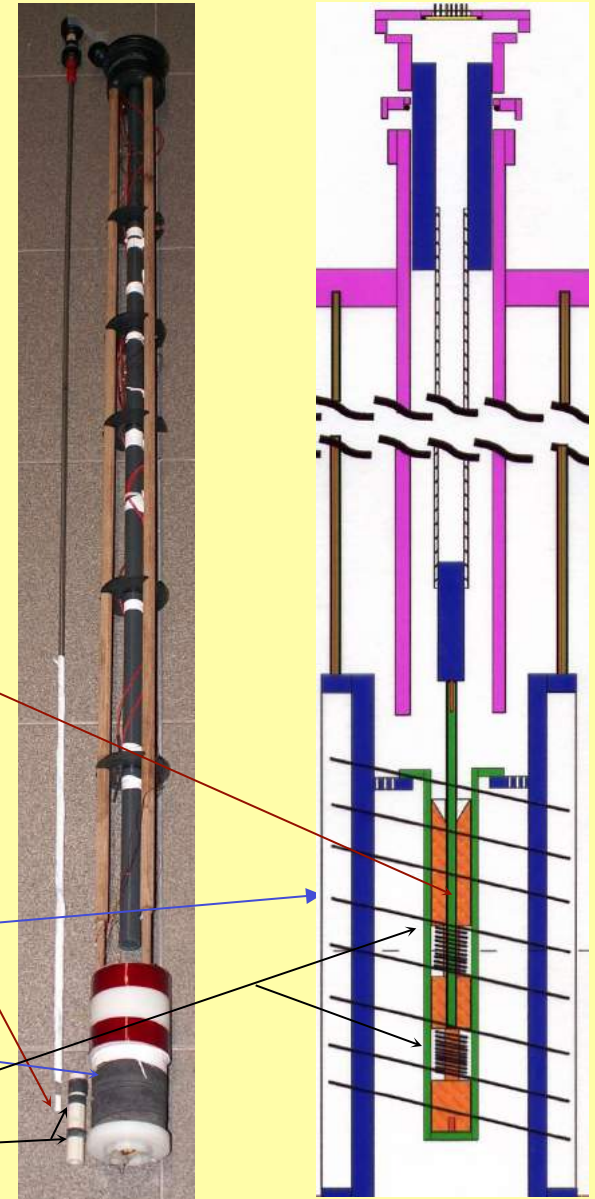
La **tensione** prodotta ai capi del ponte **viene misurata da** un volmetro particolarmente sensibile il **Lock-in**

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



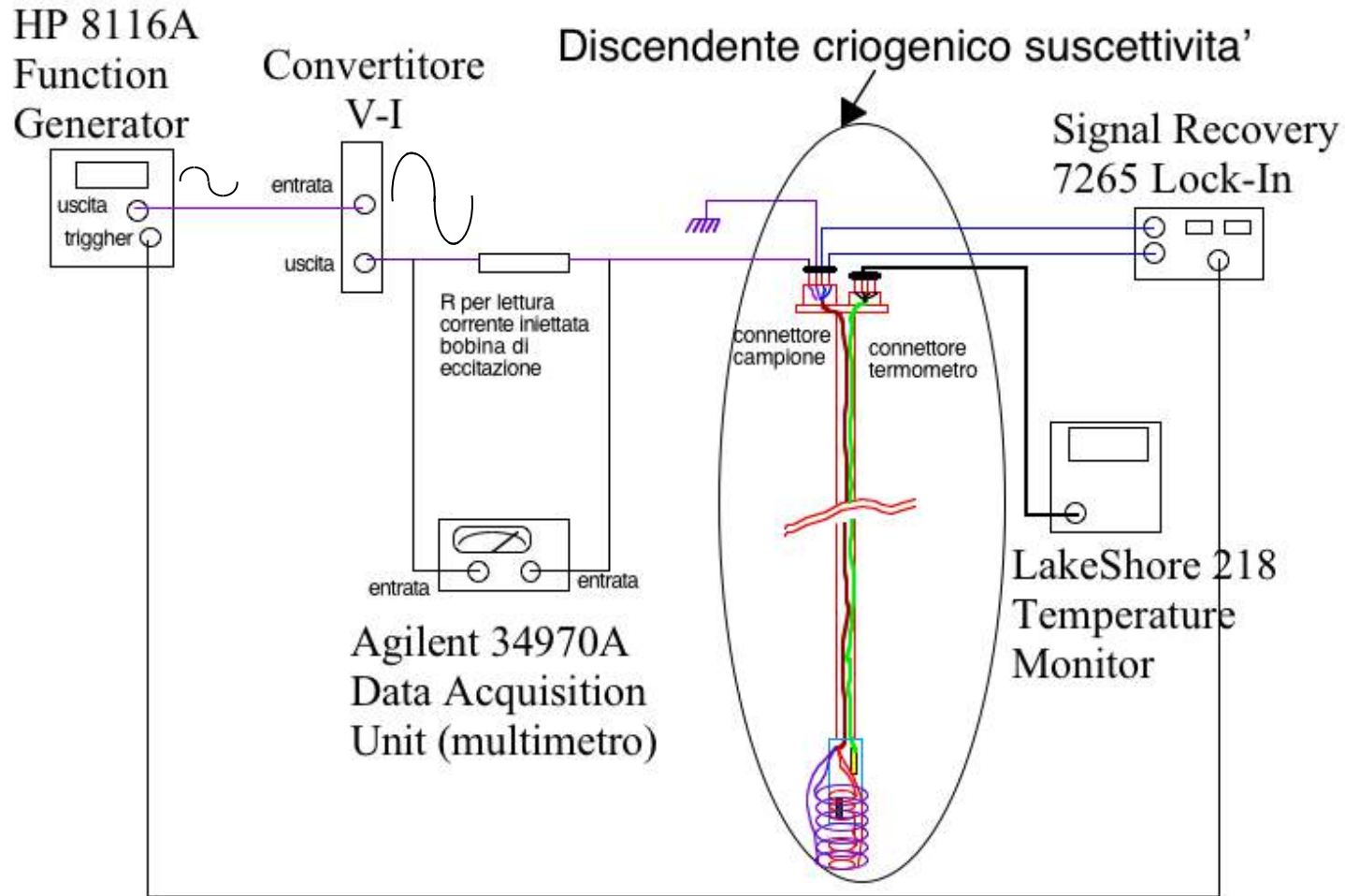
DESCRIZIONE ESPERIMENTO

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:
 - **$|H_{ac}|=0.1$ mTesla (10 Gauss) corrisponde a $V=5V$ sul generatore di forma d' onda**
 - **Forma d' onda : sinusoidale con frequenza=1070 Hz**

Esecuzione dell' esperienza:

- Procedura

- **discesa della temperatura senza campo magnetico in azoto liquido (77K=-196C)**
- **accensione del campo magnetico in stato superconduttore**
- **Misura con la temperatura in salita**

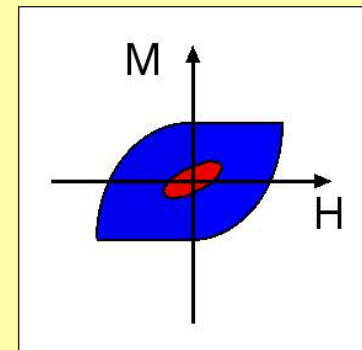
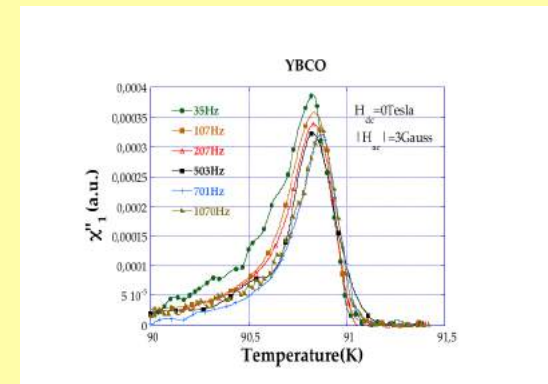
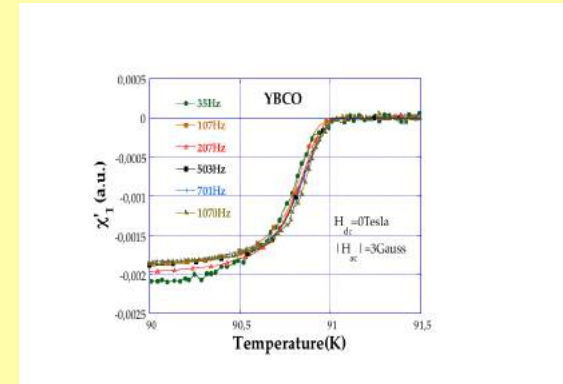
Esecuzione dell' esperienza:

- Note:

- ✓ Il campione viene raffreddato inserendo il discendente in un bagno di azoto liquido alla temperatura minima possibile ($T=77K$)
- ✓ 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

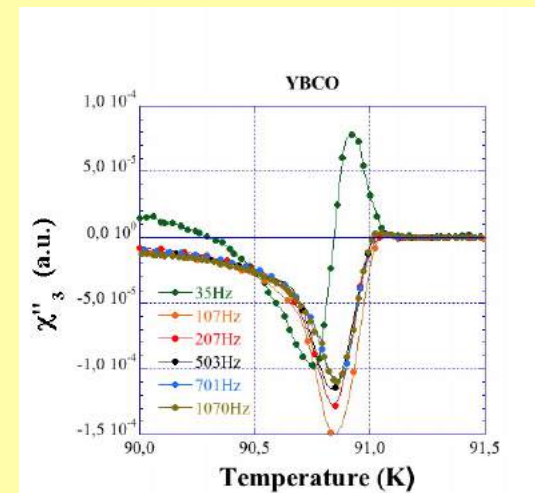
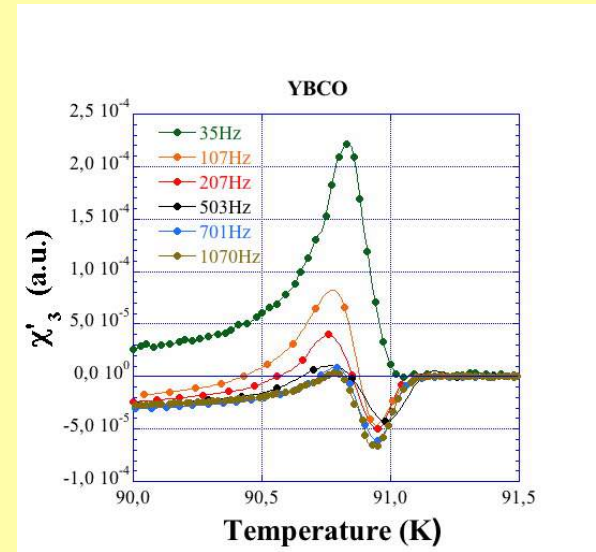
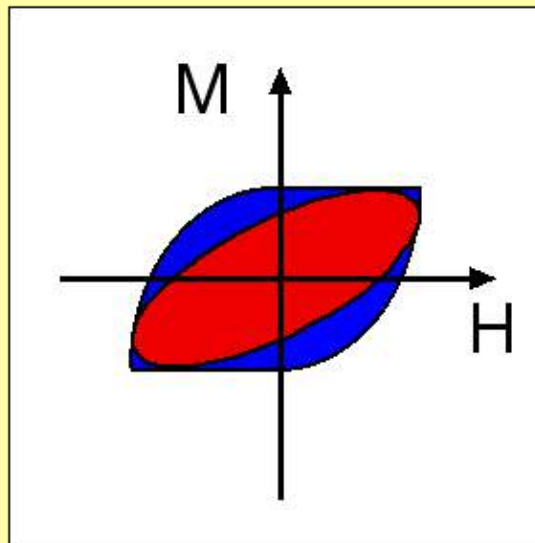
Significato della misura:

- La **parte reale della 1^a armonica** della suscettività, misura il **tipo di magnetismo** del campione:
 - ❑ da debolmente paramagnetico **positivo**, quando è 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 elissoide) alla temperatura critica si sovrappongono via via più alte **supercorrenti** indotte (area sempre più grande a foglia)

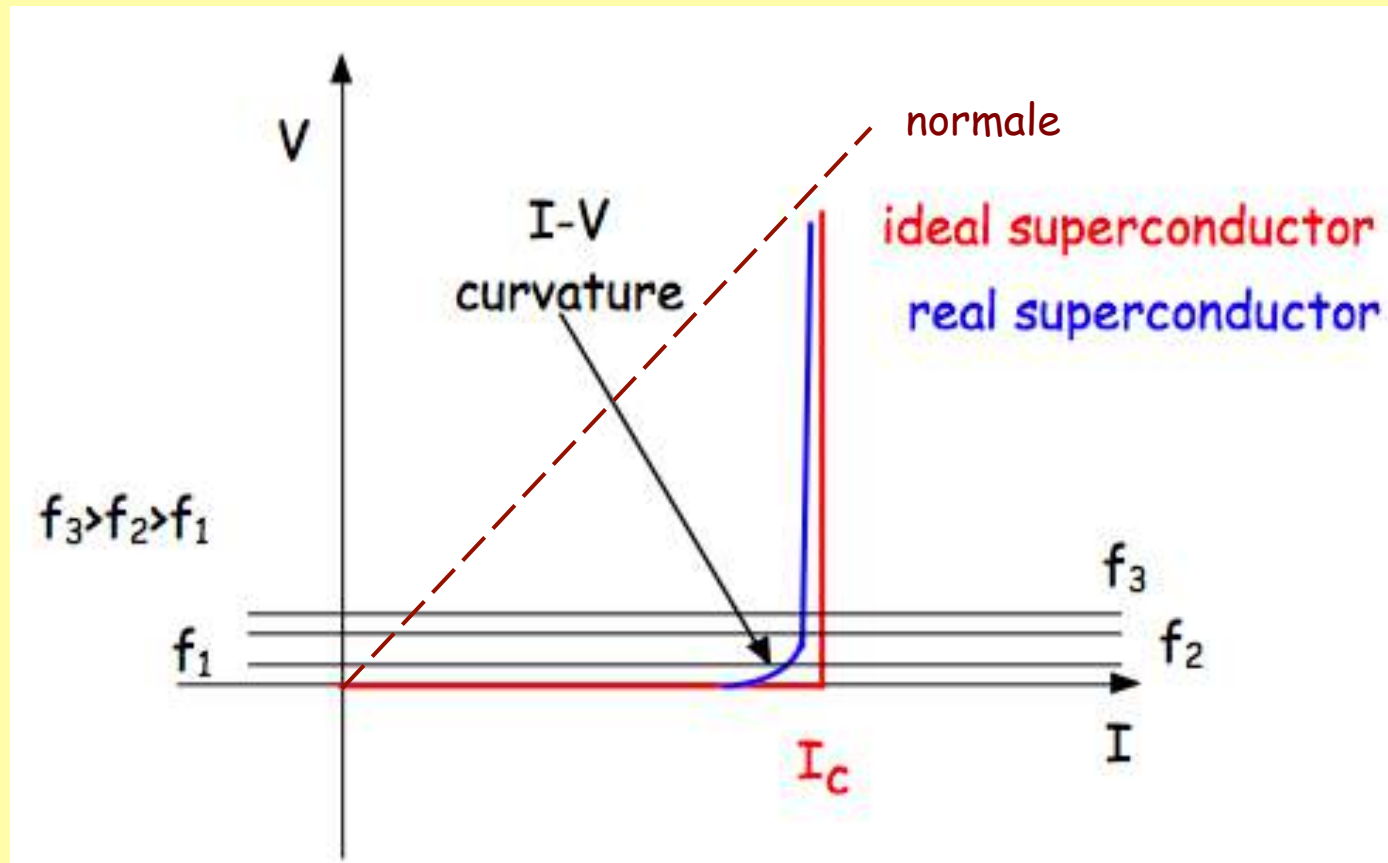


Significato della misura:

- La **parte reale e immaginaria della 3^a armonica** sono solo proporzionali ai soli **effetti non-lineari** dovuti alla **superconduttività**
- **Distorsioni del ciclo di isteresi rispetto all' ellisse**



Significato della misura



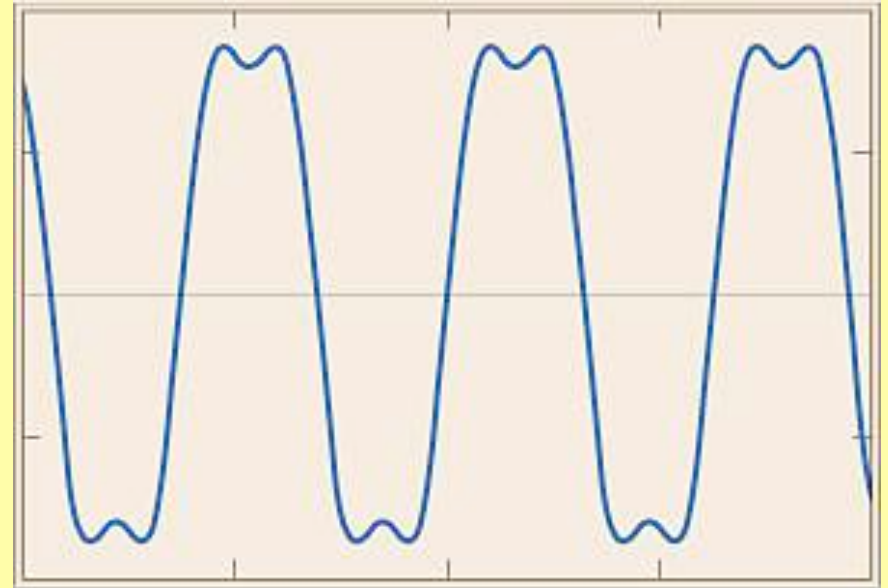
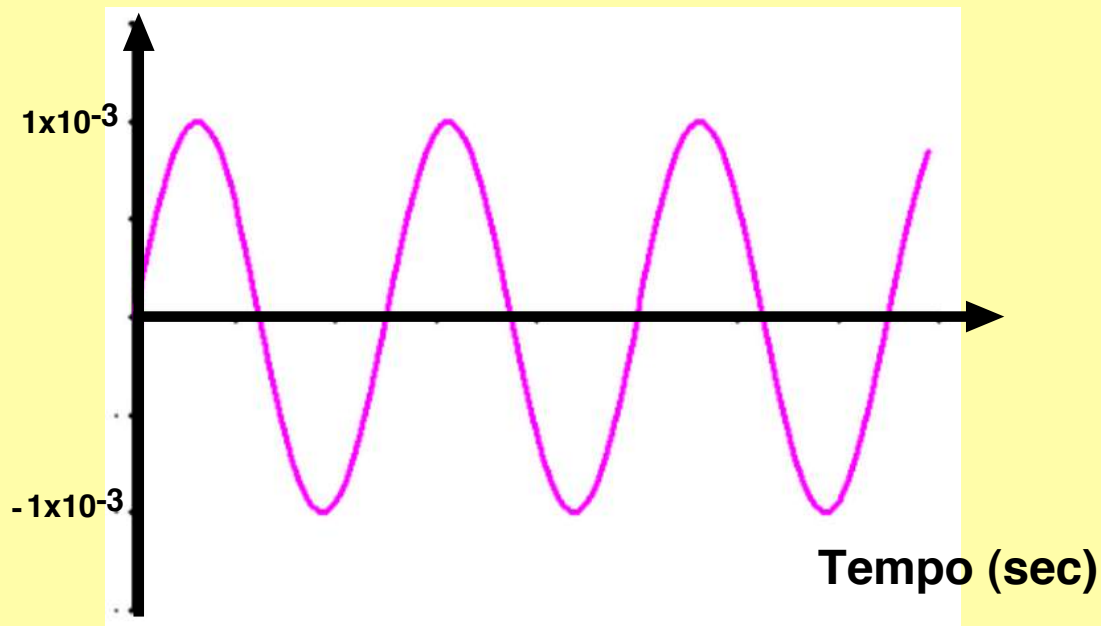
- La caratteristica non lineare di un superconduttore e quella lineare di un resistore normale

Significato della misura:

Campo magnetico prodotto dalla bobina di eccitazione armonica puramente sinusoidale

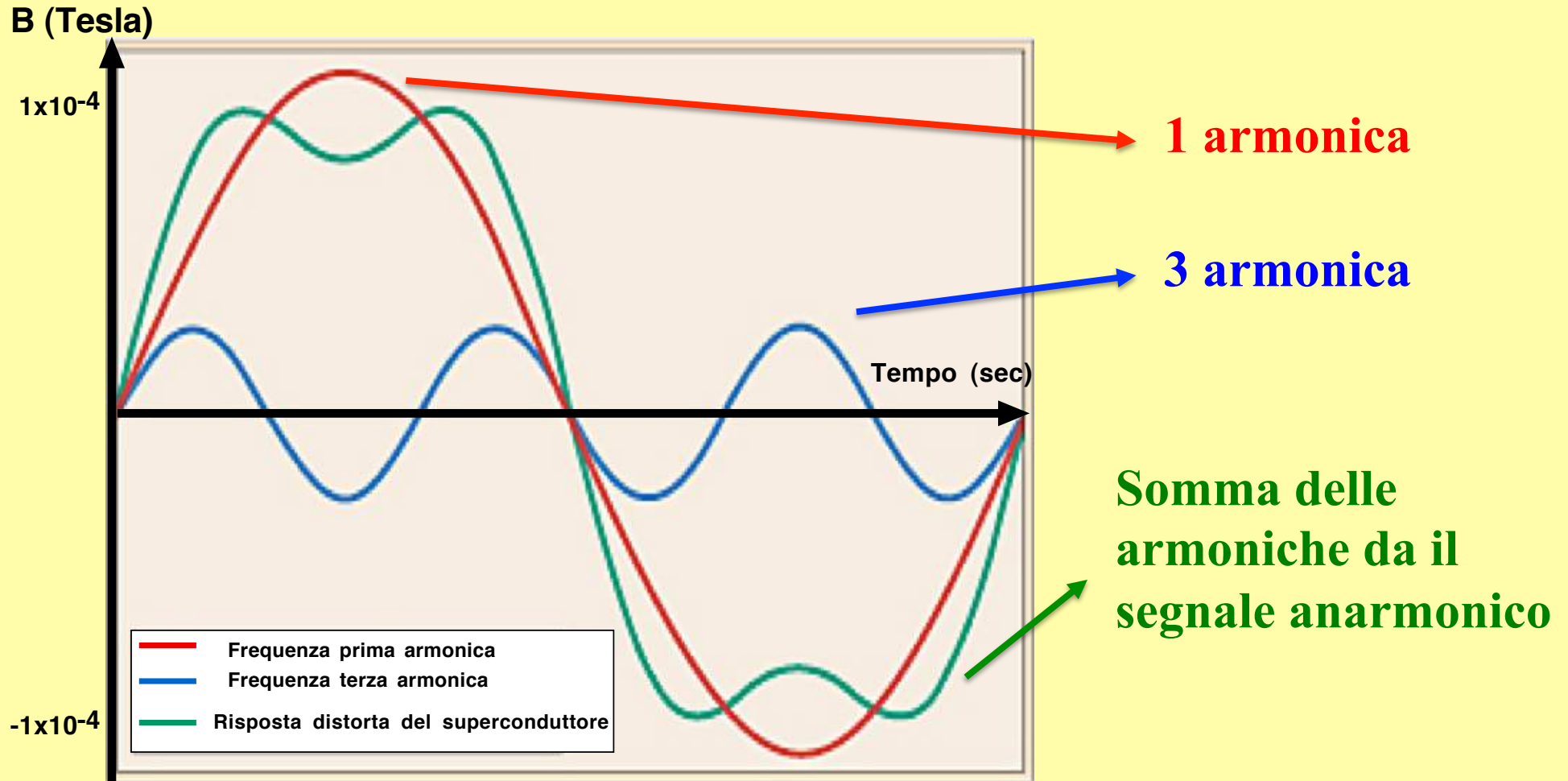
Campo magnetico misurato dal ponte di bobine di pick-up, il segnale è anarmonico

H_{ac} (Tesla)



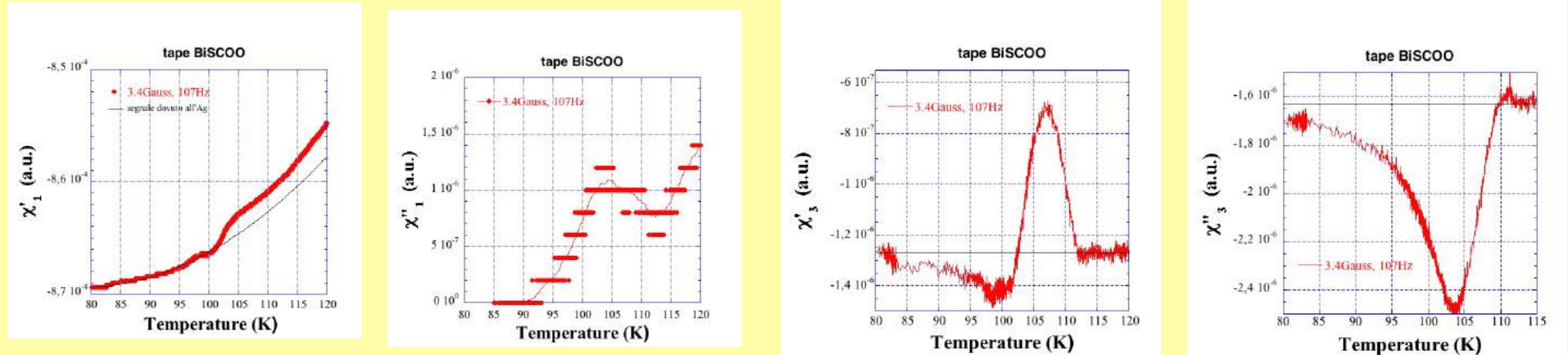
Significato della misura:

Sviluppo in armoniche superiori sinusoidali del segnale anarmonico del ponte di bobine (sviluppo in serie di Fourier)



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 da un contributo lineare ed è presente solo nella 1^a armonica)