

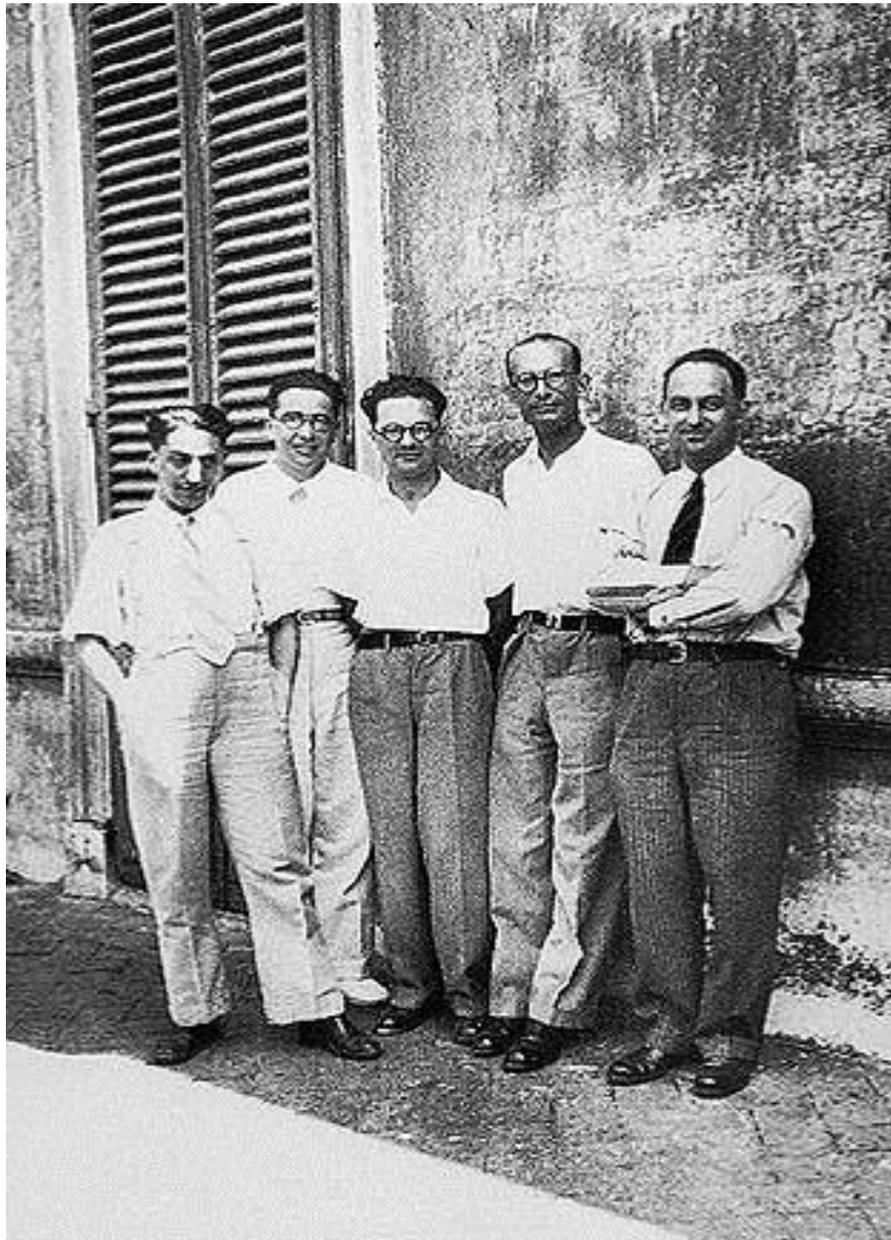


# Laboratori Nazionali di Frascati



# 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**



**20 Sezioni**

**9 Gruppi collegati**



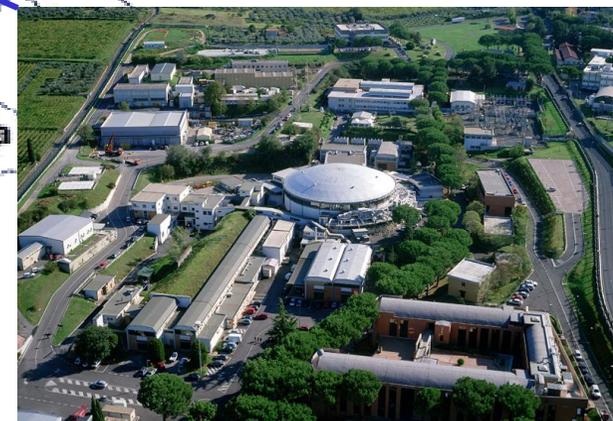
**Cascina**



**4 Laboratori Nazionali**



**Laboratori del Sud**



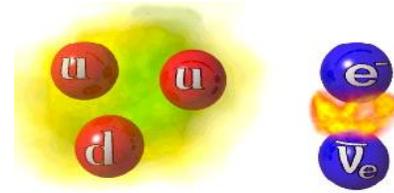
# Attività dei LNF

Studi sulla struttura  
intima della materia



Sviluppo e costruzione di  
rivelatori di particelle

Studi di materiali  
e ricerche  
biomediche  
con luce di  
sincrotrone



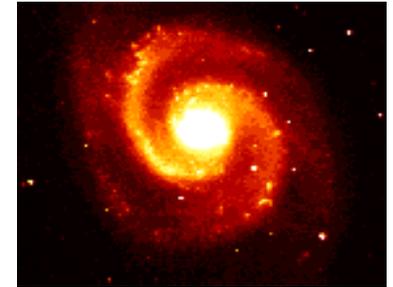
Elaborazione di  
modelli teorici



Sviluppo e  
supporto di  
sistemi di  
calcolo  
reti



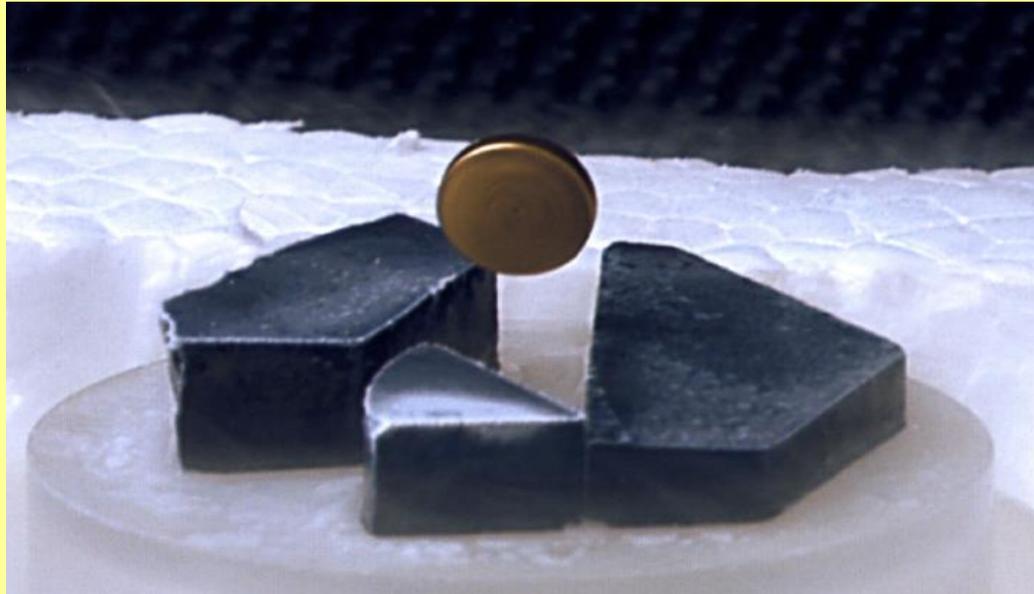
Ricerca di onde  
gravitazionali



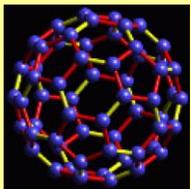
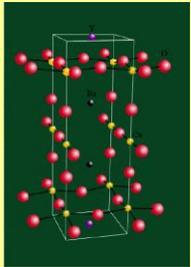
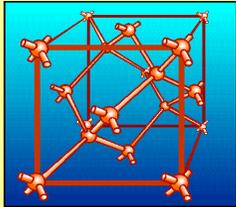
Studio e sviluppo di  
tecniche  
acceleratrici



# *Il fenomeno della Superconduttività*

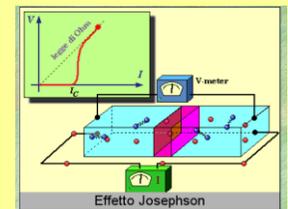
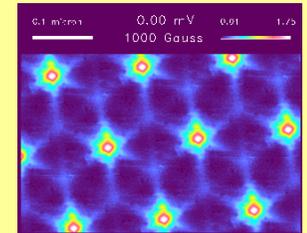
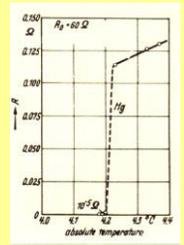


**Dr. Daniele Di Gioacchino**  
**Istituto Nazionale di Fisica Nucleare**  
**Laboratori Nazionali di Frascati**



**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.**

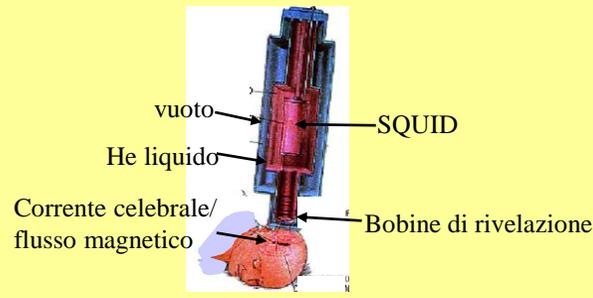
**Fu scoperto da Onnes nel 1911**



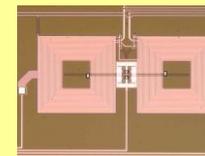
Treni veloci a levitazione magnetica



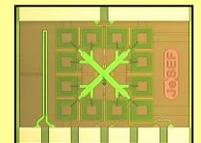
Potenti Magneti per MNR



Analisi biomagnetiche con SQUID



SQUID

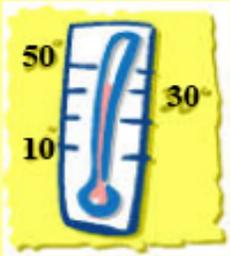


Giunzione Josephson

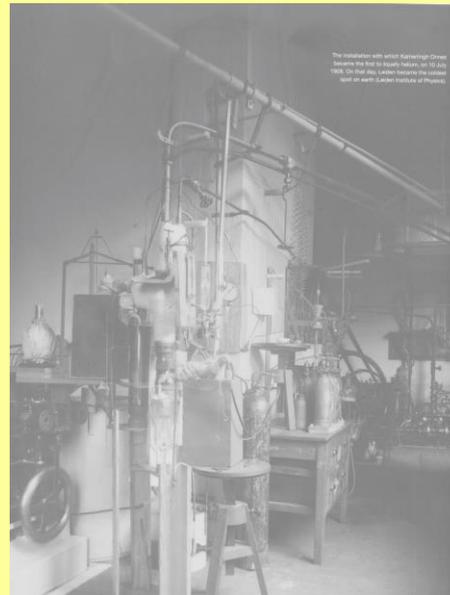
# *Come si caratterizza?*

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

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



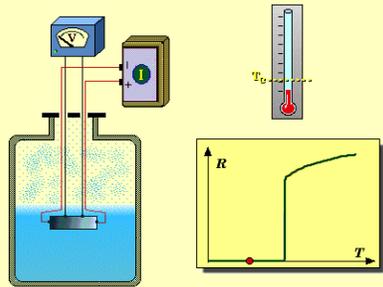
Il liquefattore di elio con cui Onnes il 10 Luglio 1908 fece diventare liquido il gas di elio a  $-269\text{ C}$



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

# Come si caratterizza?

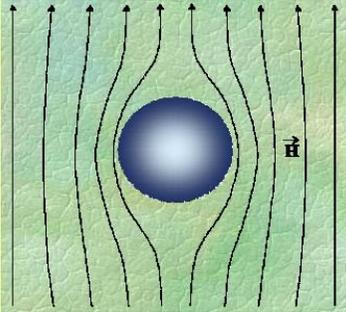
## 2. E' una fase della materia dove la elettricità fluisce senza resistenza:



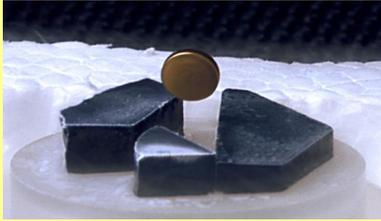
Metodo di misura della resistenza elettrica

- ✓ 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?



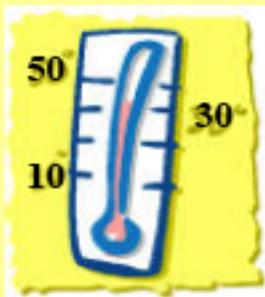
## 3. Il campo magnetico è espulso: diamagnetismo perfetto (effetto Meissner).



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

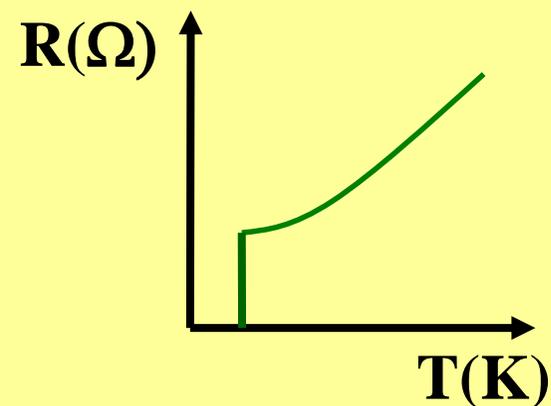
- ✓ Esiste un valore critico del campo magnetico ( $B_c$ ) sopra il quale il materiale torna normale

# Osserviamo queste proprietà più da vicino



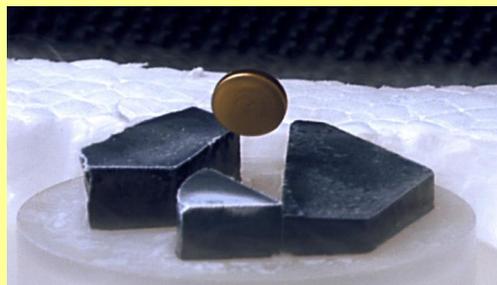
1. La superconduttività è un fenomeno a bassa temperatura

~~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~~



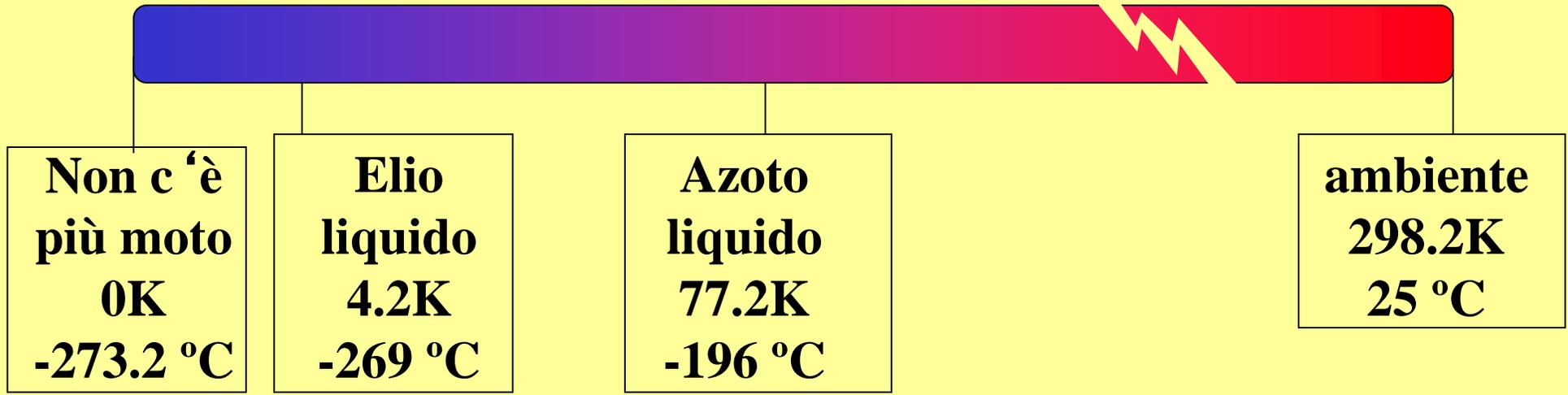
3. Superconduttori in presenza di un campo magnetico lo espellono completamente

~~Talvolta~~

(effetto Meissner)

# 1. La superconduttività accade a bassa temperatura

*una relativamente*

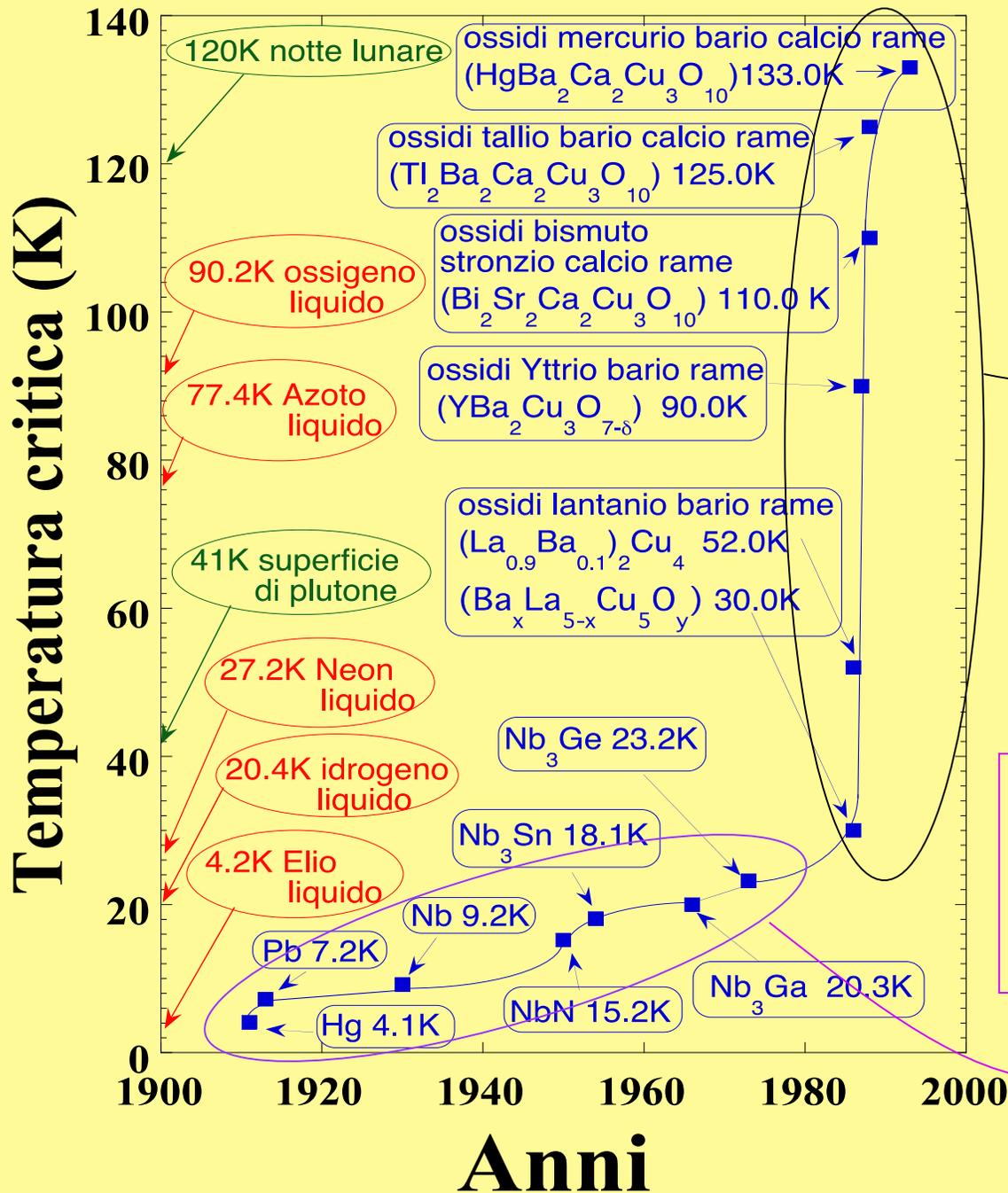


Superconduttori "normali"

~ 0 – 23K

Superconduttori ad alta temperatura critica

30 – 138 K

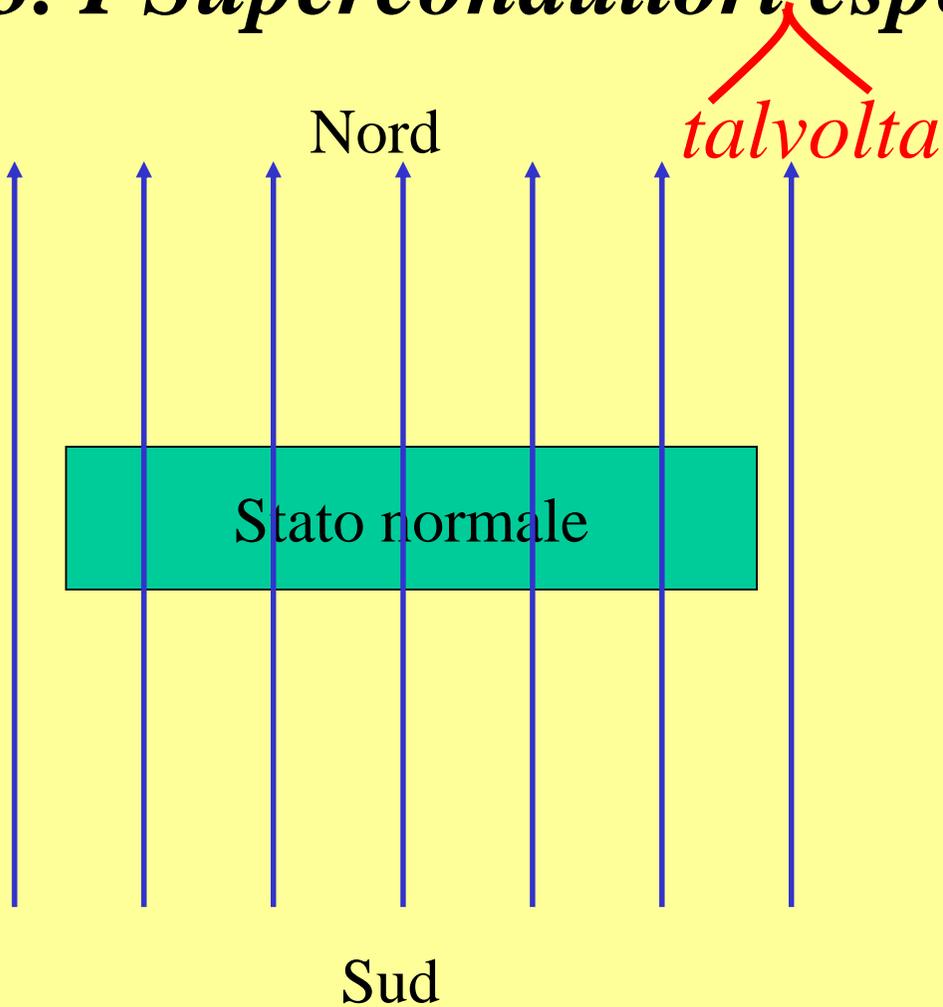


**Superconduttori alta temperatura critica (ceramici)**

**Superconduttori Bassa temperatura critica (metallici)**

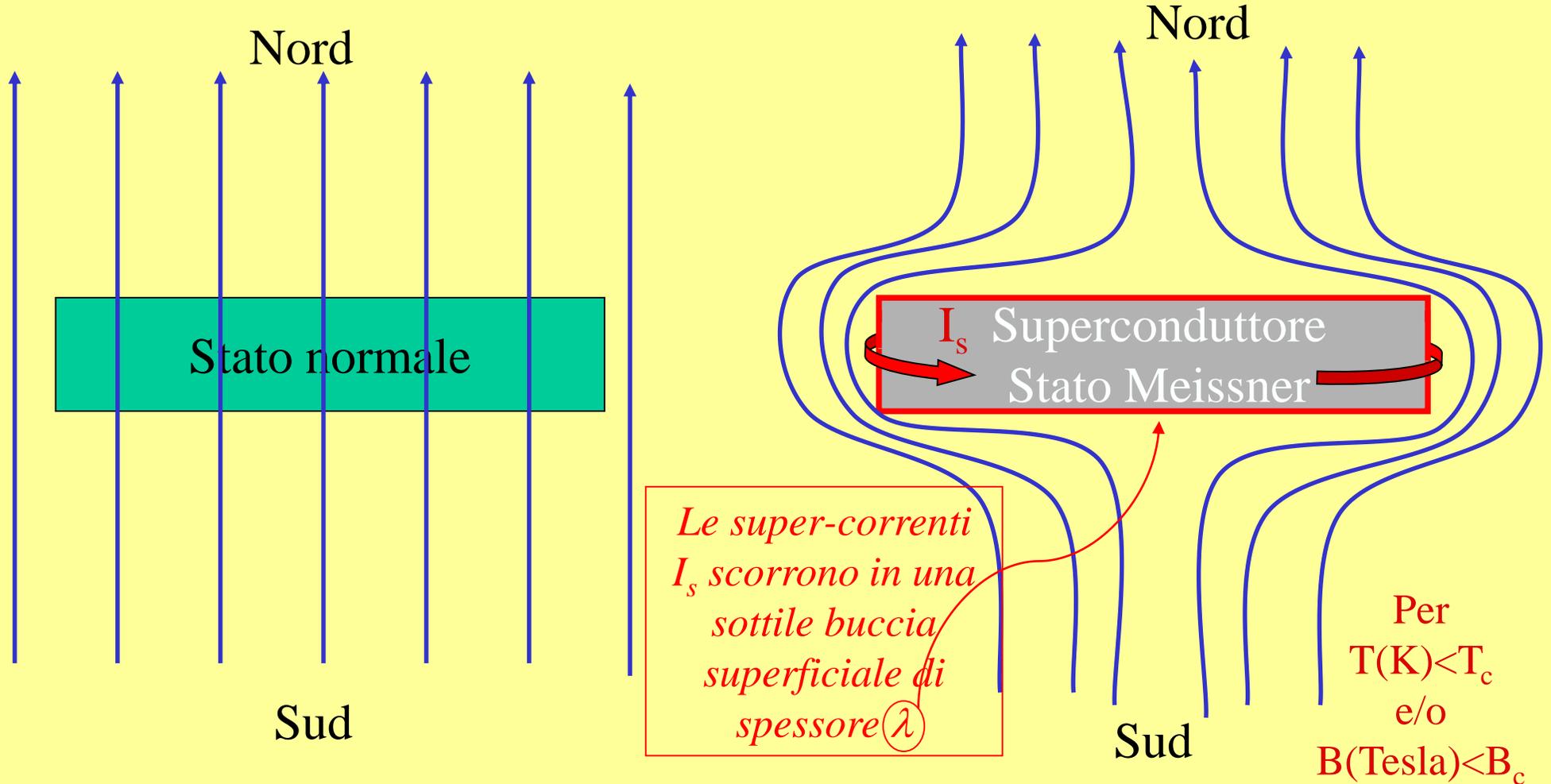
.....parliamo ora della 3<sup>a</sup> proprietà (prima della 2<sup>a</sup> seconda)

### *3. I Superconduttori espellono il campo magnetico*



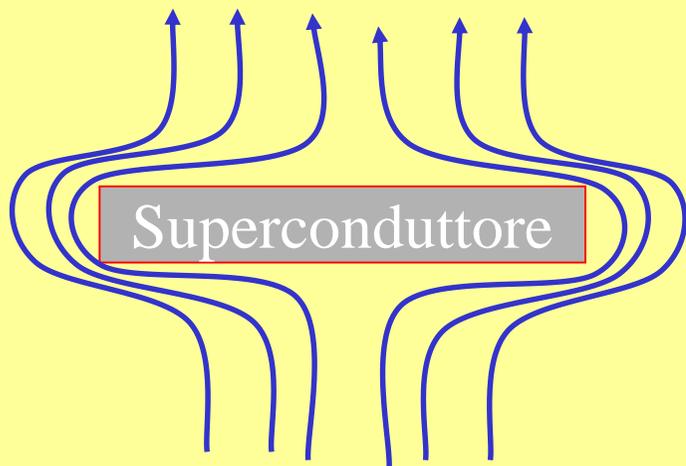
*talvolta*

### 3. I Superconduttori espellono il campo magnetico



*talvolta*

### 3. I Superconduttori *espellono* il campo magnetico

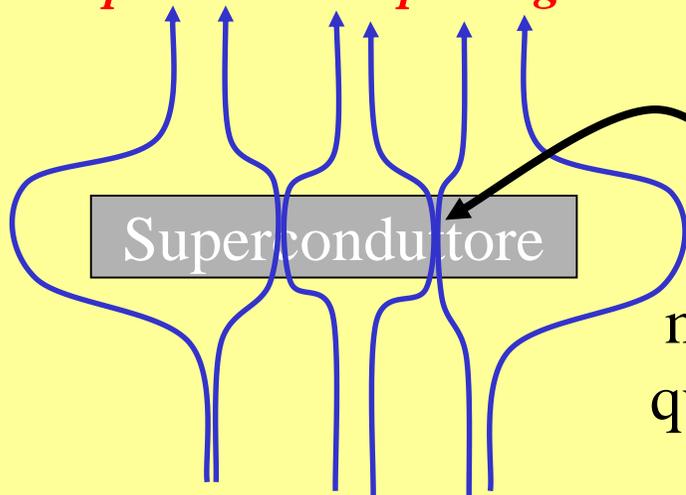


Vista dall'alto

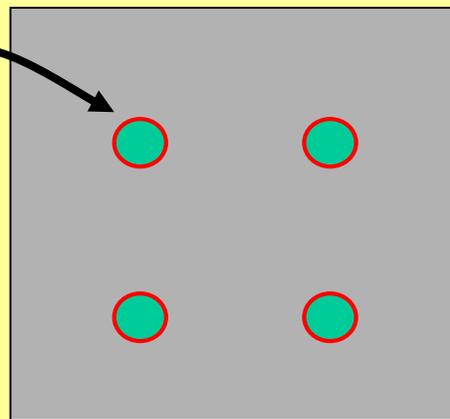


Superconduttori di tipo I

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

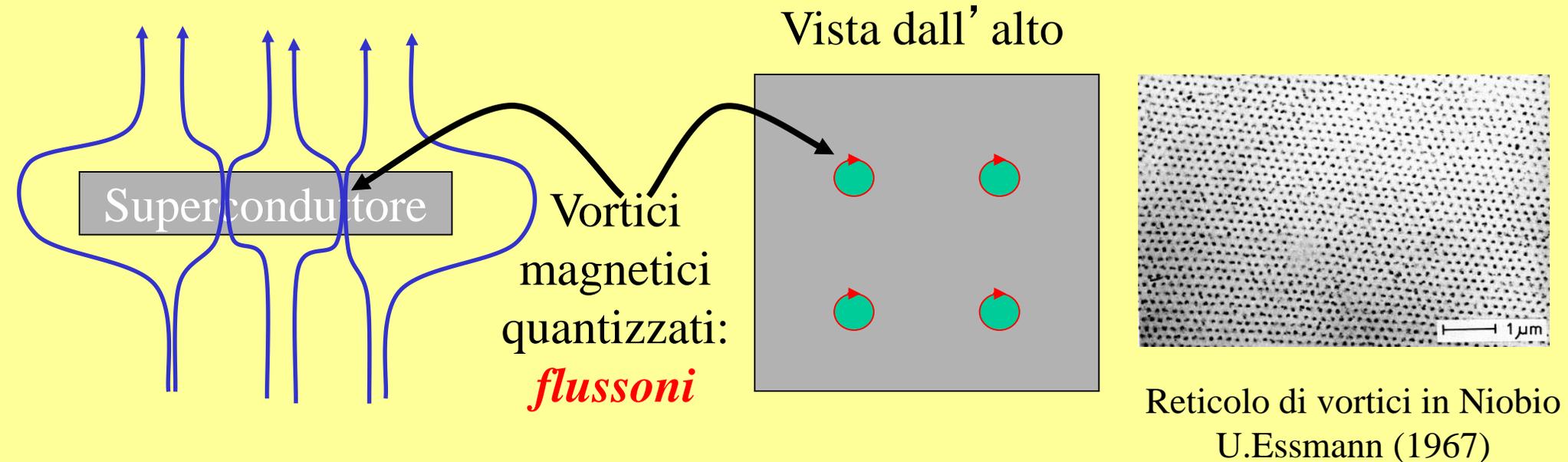


Vortici magnetici quantizzati



Superconduttori di tipo II

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

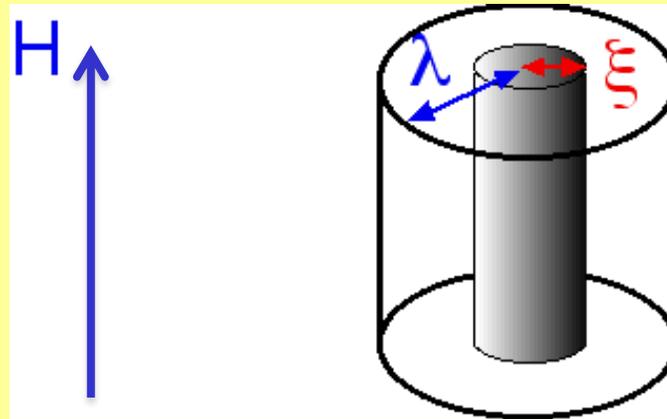
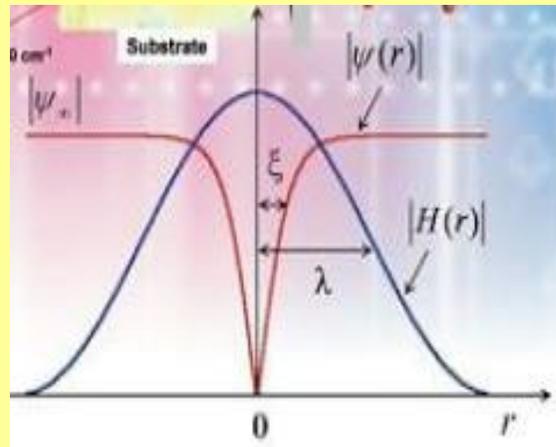


I flussoni consistono:

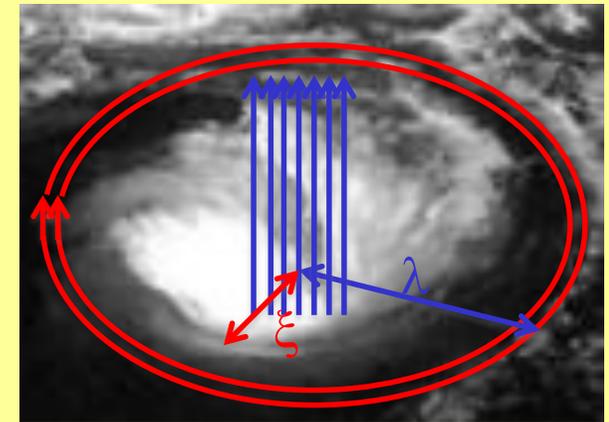
- in un nucleo di materiale normale dove è confinato il flusso di campo magnetico
- una buccia dove circola la supercorrente come in un vortice. Forma un contro campo magnetico che scherma il campo penetrato

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

## Quanto di Flusso magnetico



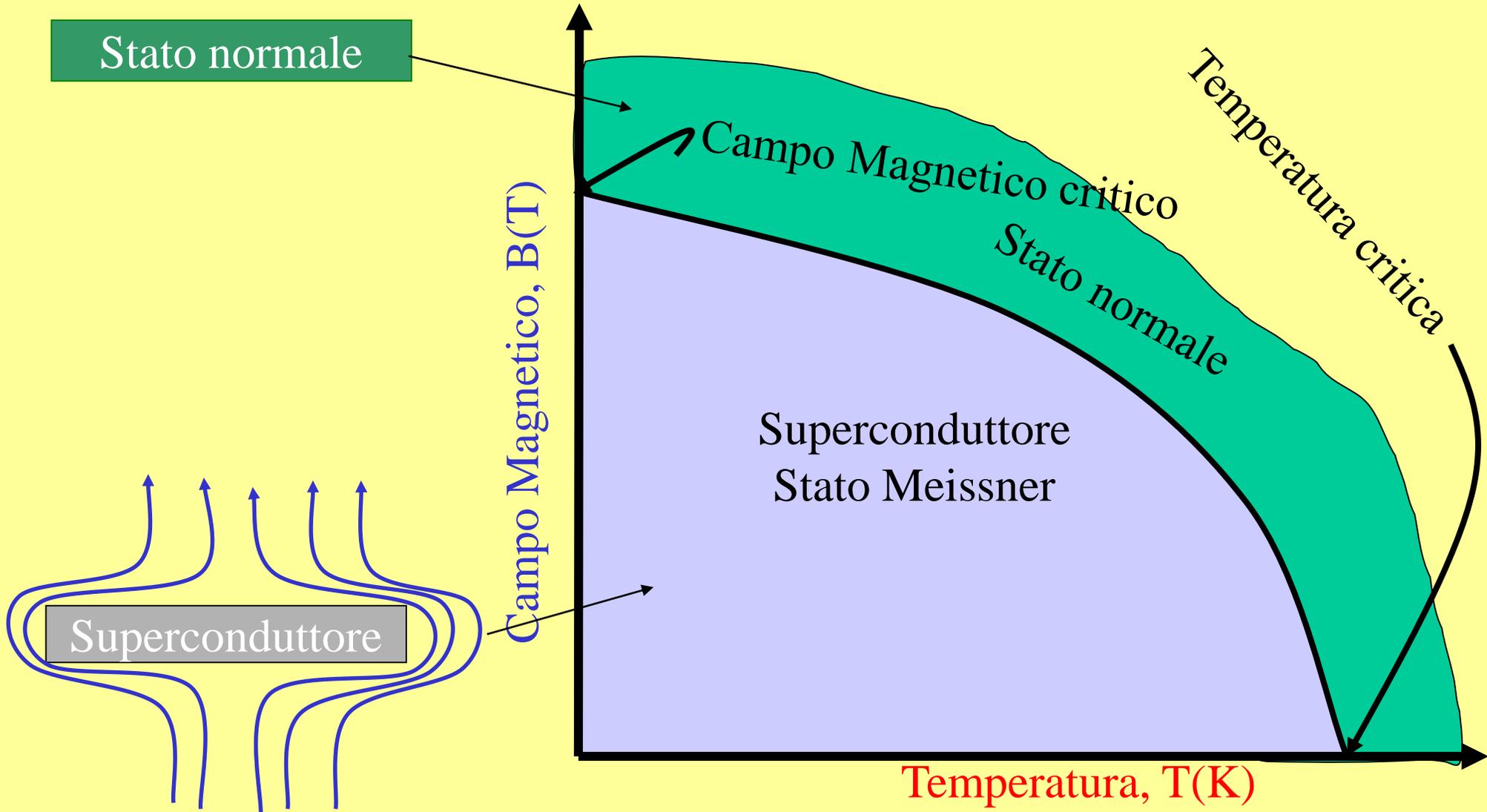
Campo magnetico



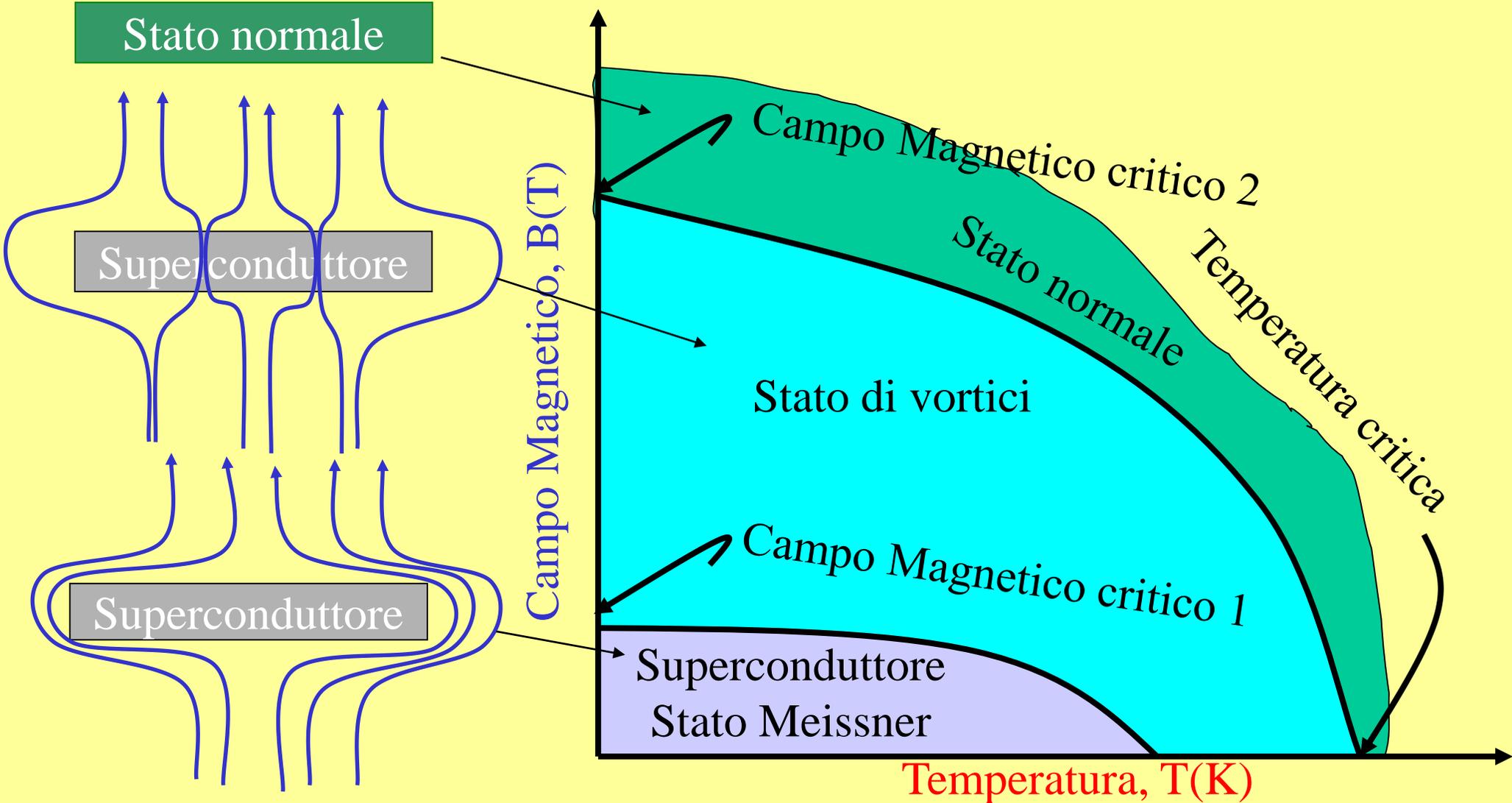
supercorrenti

- Due dimensioni lo definiscono:  
 **$\xi$  (lunghezza di coerenza)** e  **$\lambda$  (lunghezza di penetrazione campo magnetico)**
- Flusso di quanto magnetico  $\Phi_0 = h/2e = 2 \times 10^{-15}$  weber (tesla x metro<sup>2</sup>)

# Diagramma di fase B-T Superconduttori di I tipo



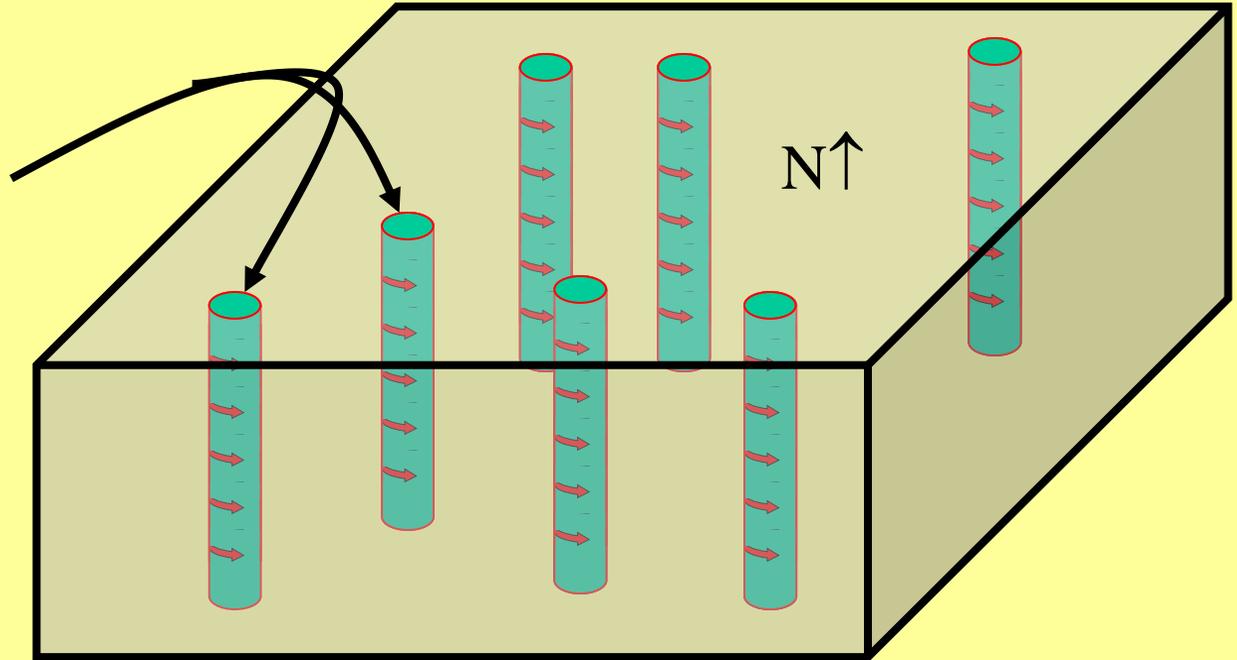
# Diagramma di fase B-T Superconduttori di II tipo



..... ora parliamo della 2<sup>a</sup> 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

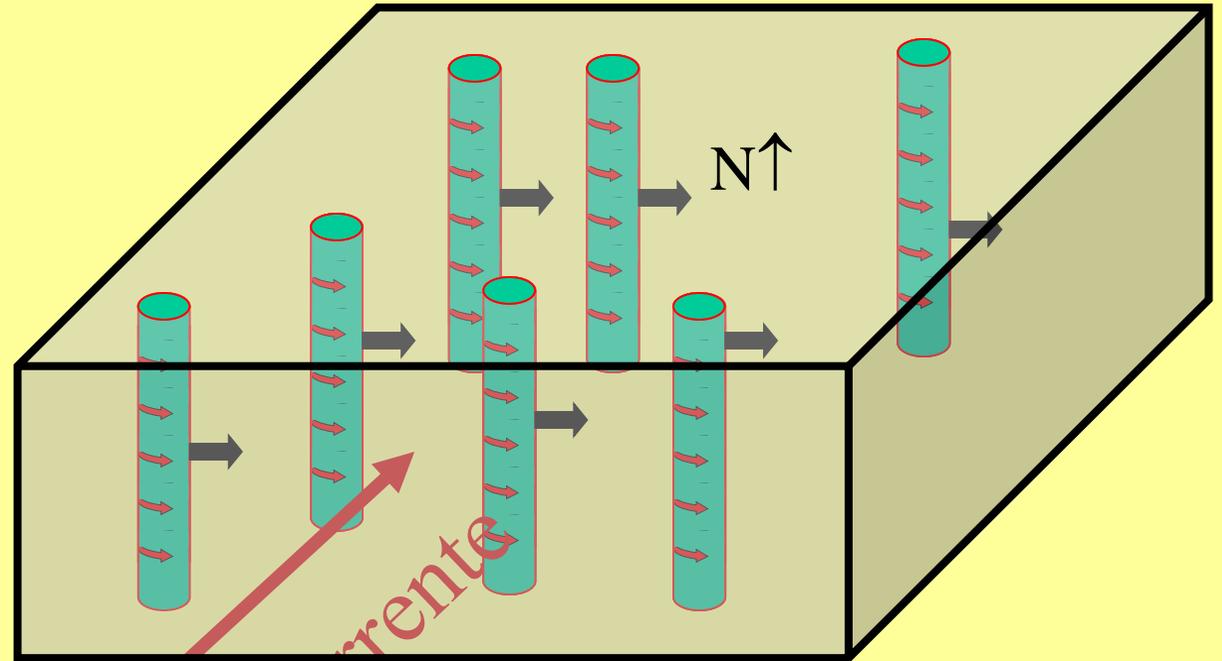


Come può avvenire questo moto?

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

*possono avere*

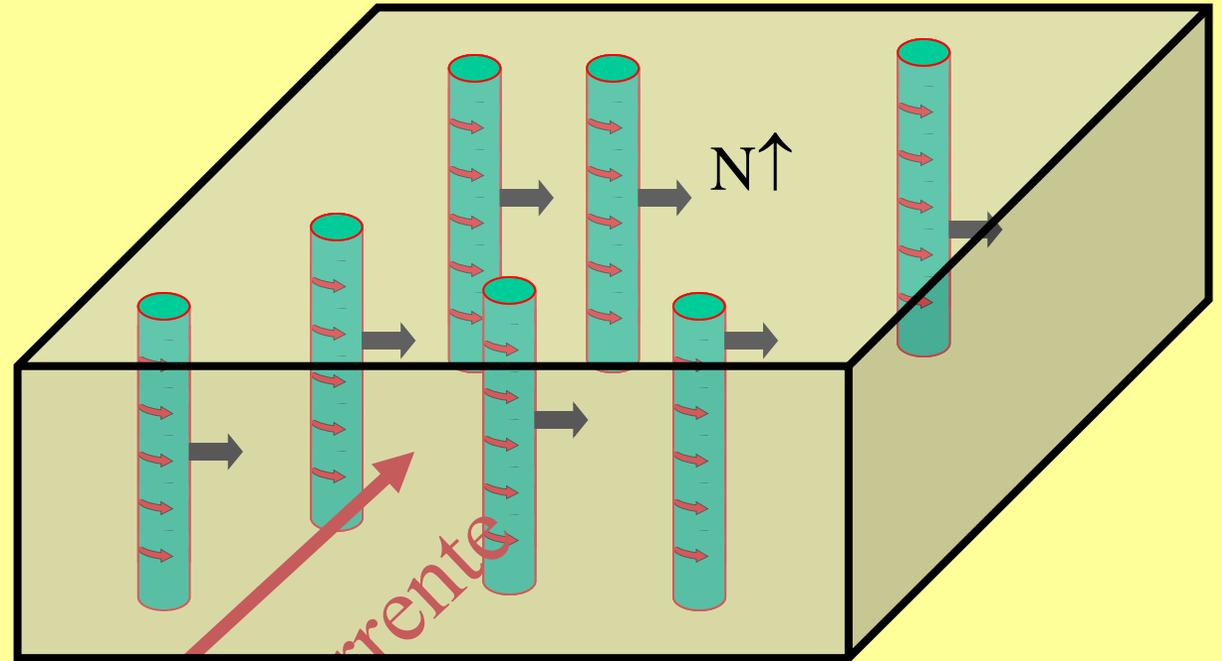
- L'applicazione di una supercorrente elettrica fa nascere una *forza* sui vortici magnetici



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

*possono avere*

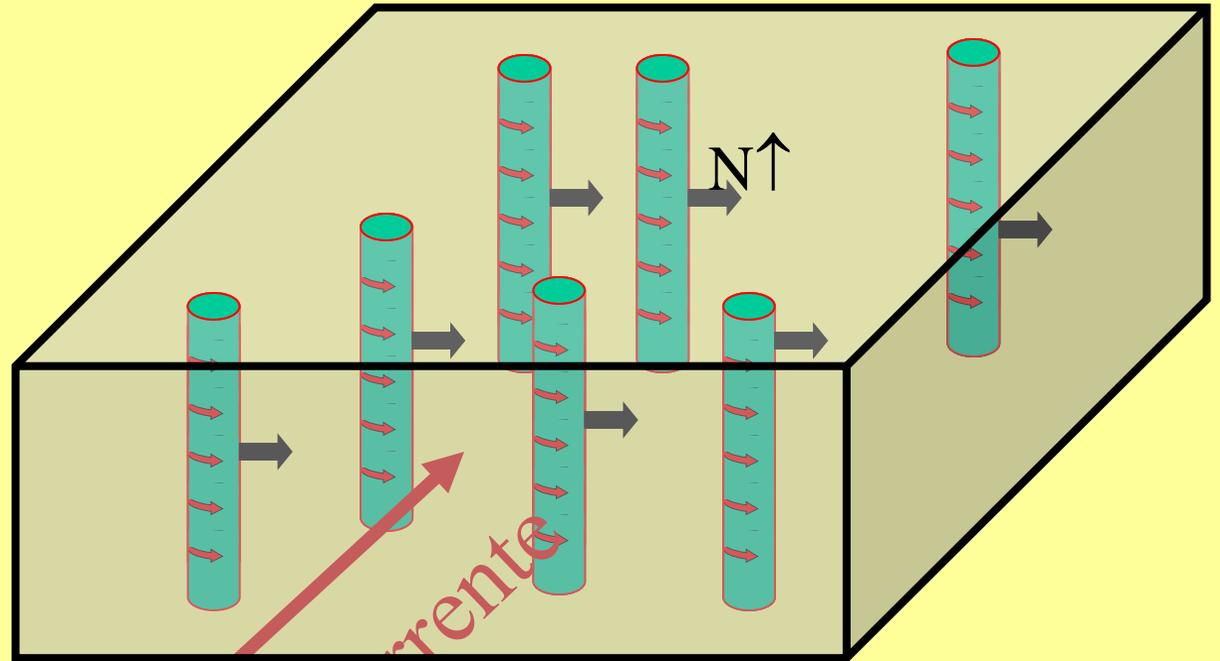
- ..e i vortici possono fluire con una frizione



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

*possono avere*

- ..e i vortici possono fluire con una frizione

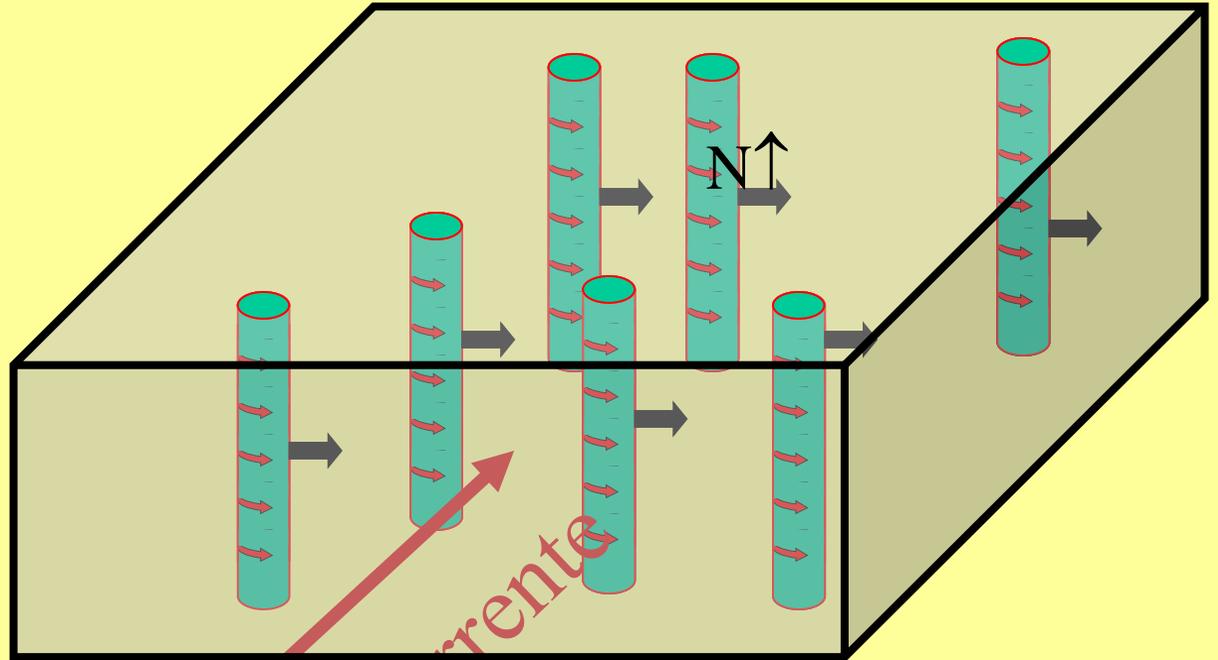


*Super-corrente*

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

*possono avere*

- ..e i vortici possono fluire con una frizione

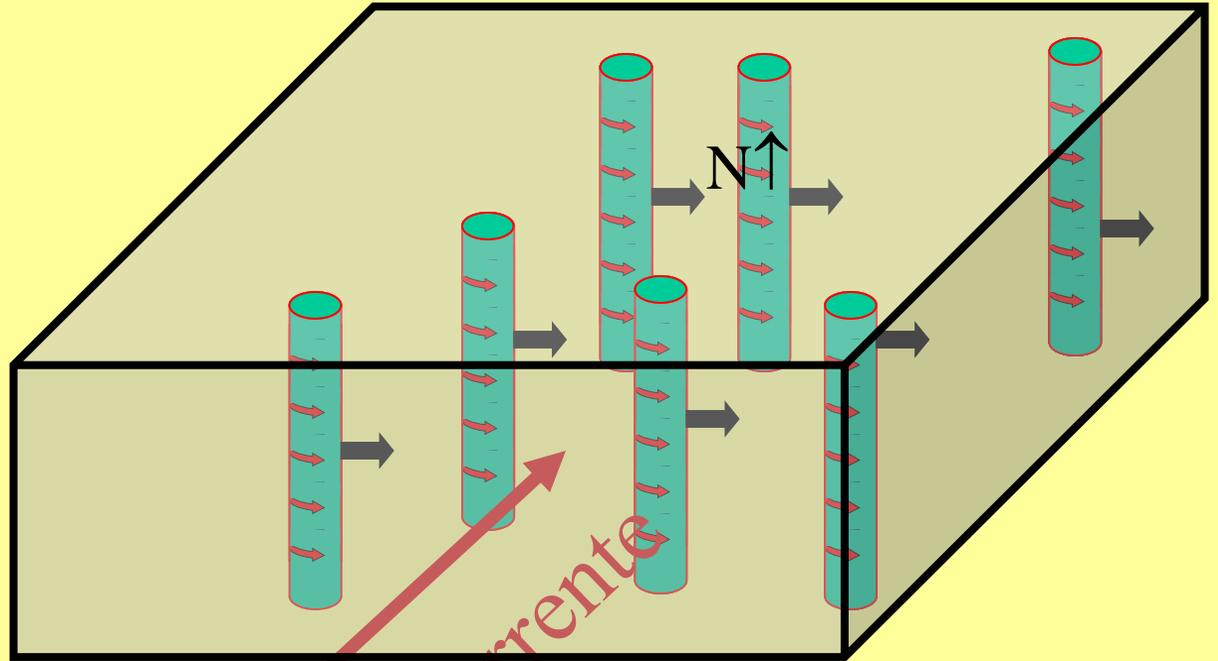


*Super-corrente*

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

*possono avere*

- ..e i vortici possono fluire con una frizione

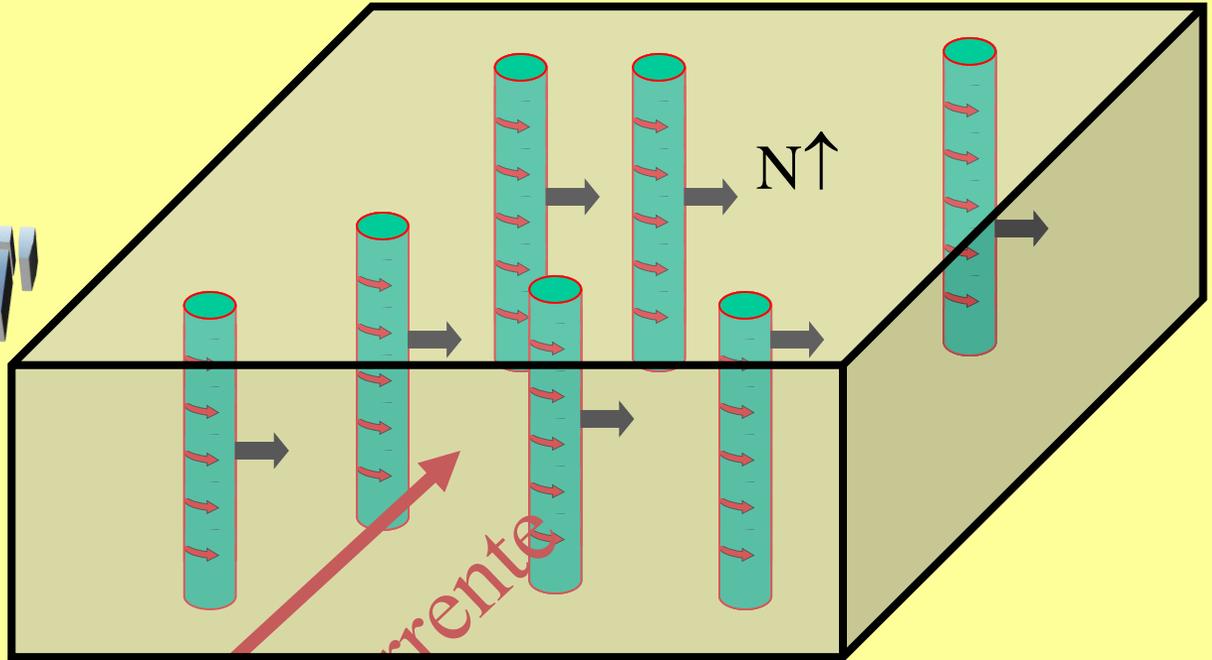


*Super-corrente*

## 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 è maligna:**

**la stessa**

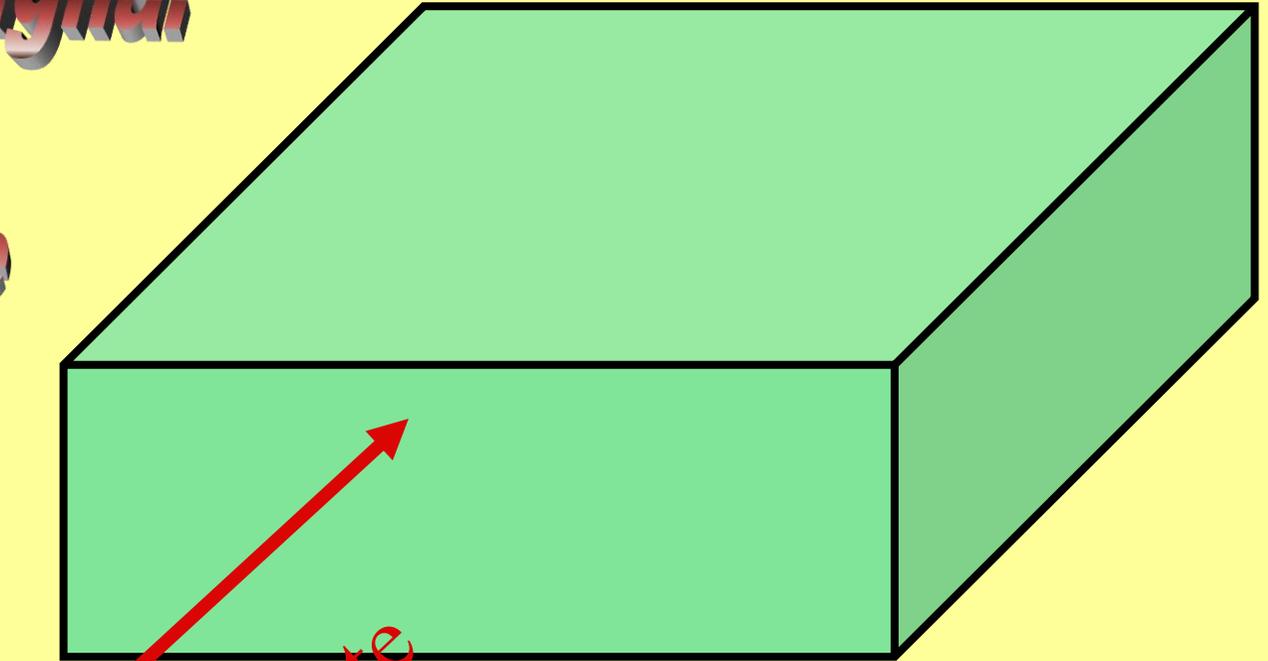
**super-corrente**

**fa transire**

**nello stato normale**

**il**

**superconduttore**

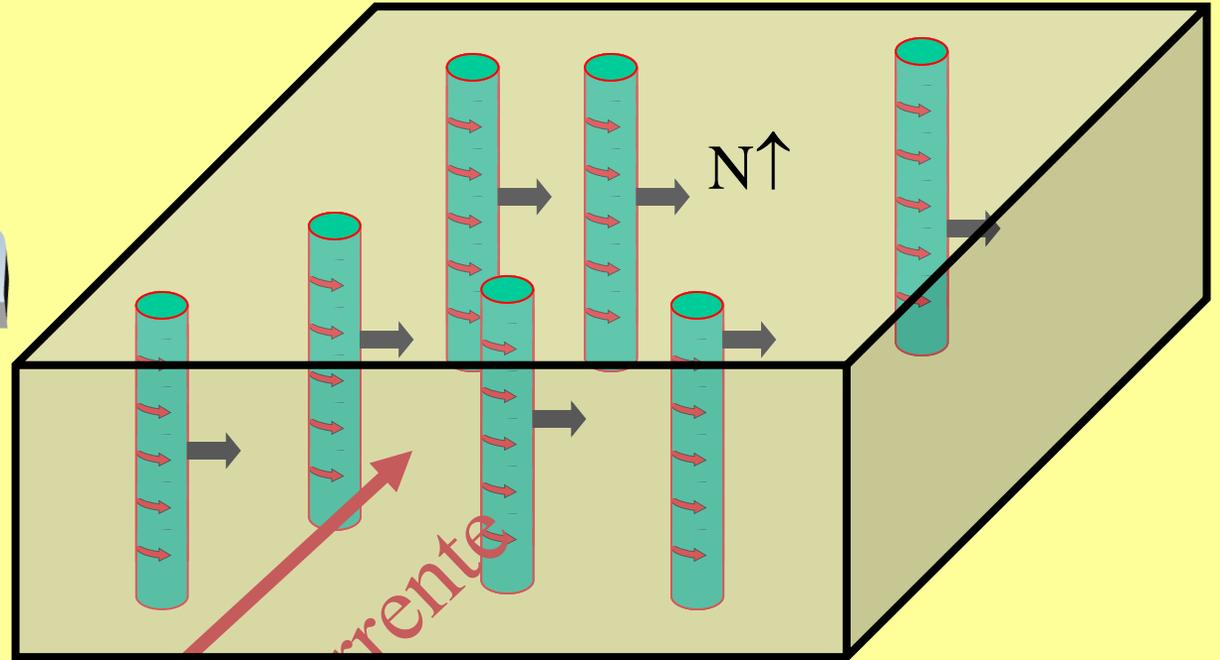


**Corrente**

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

*possono avere*

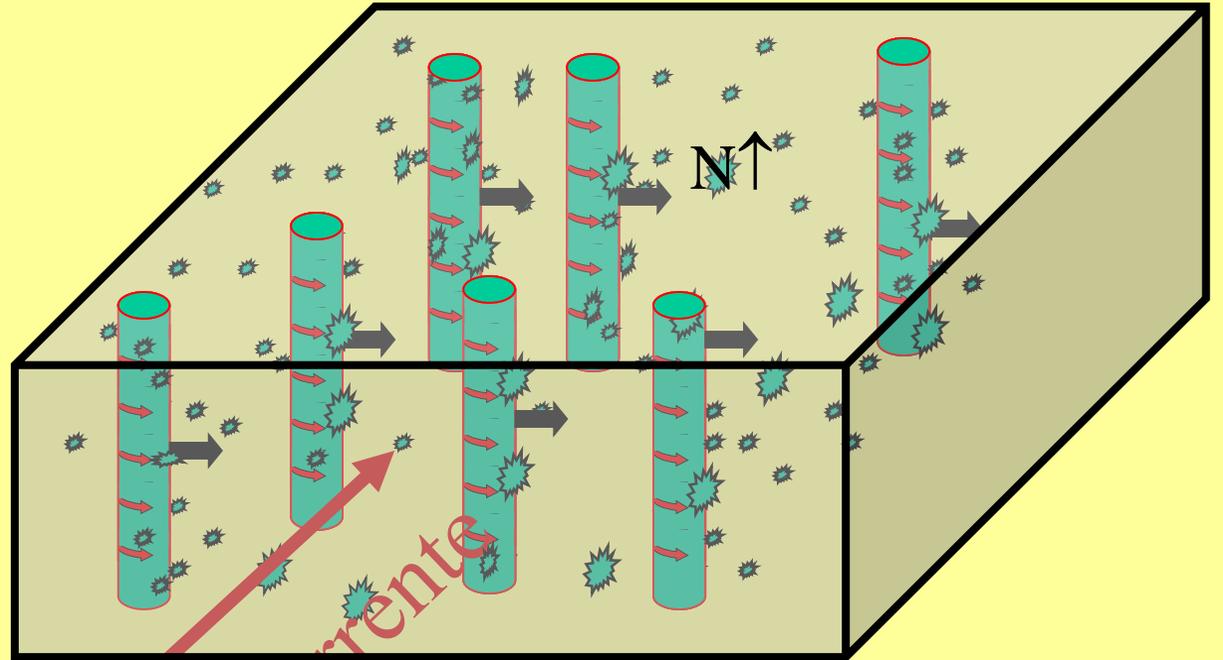
La situazione  
non e' cosi' disperata  
la stessa natura  
ci viene il aiuto



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

*possono avere*

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

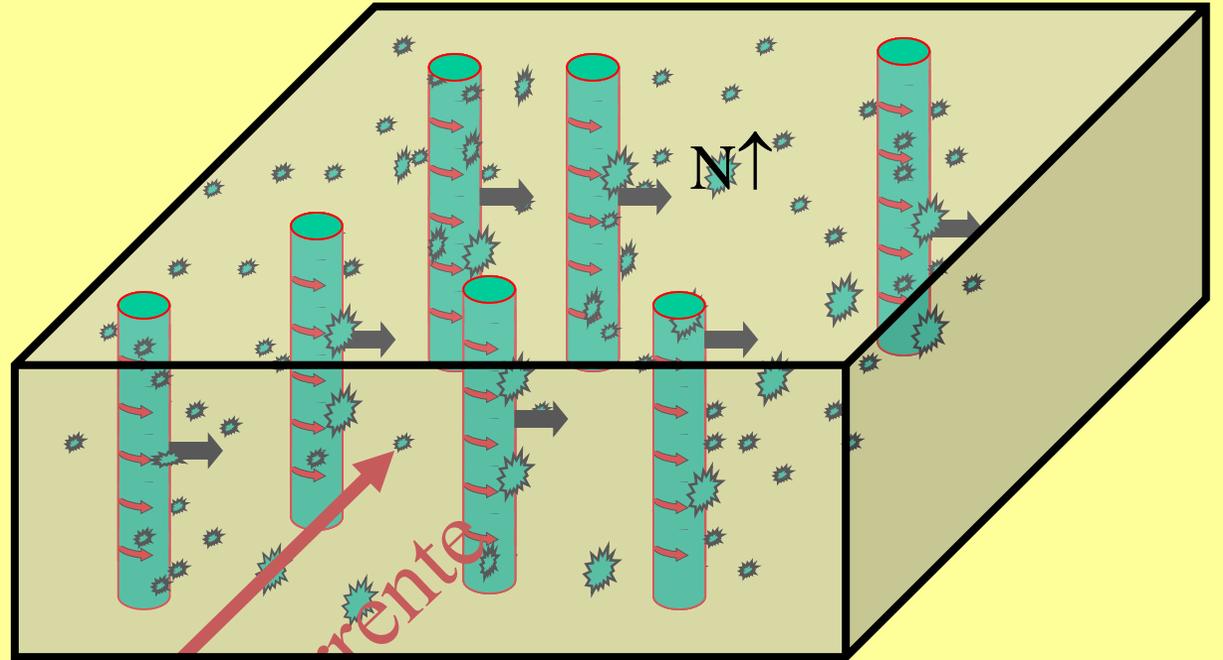
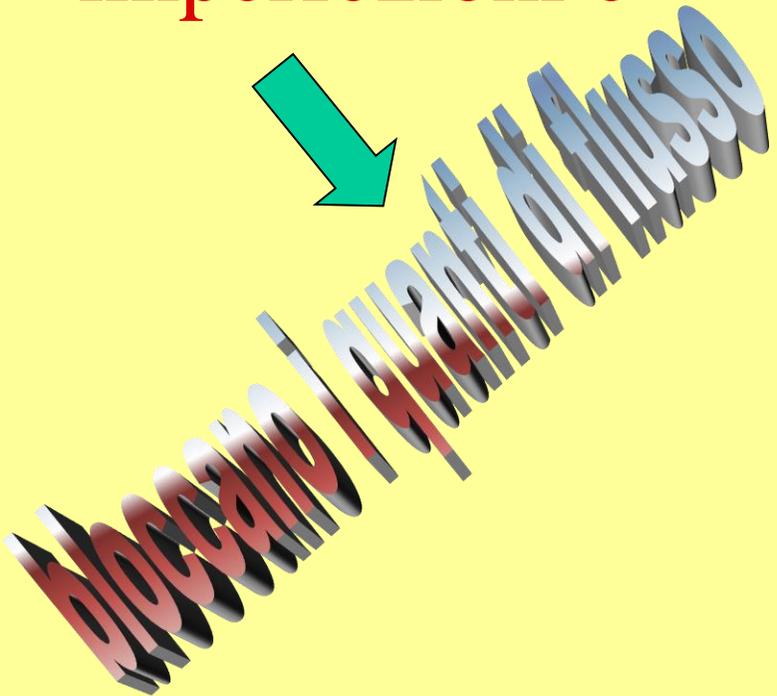


*che succede?*

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

*possono avere*

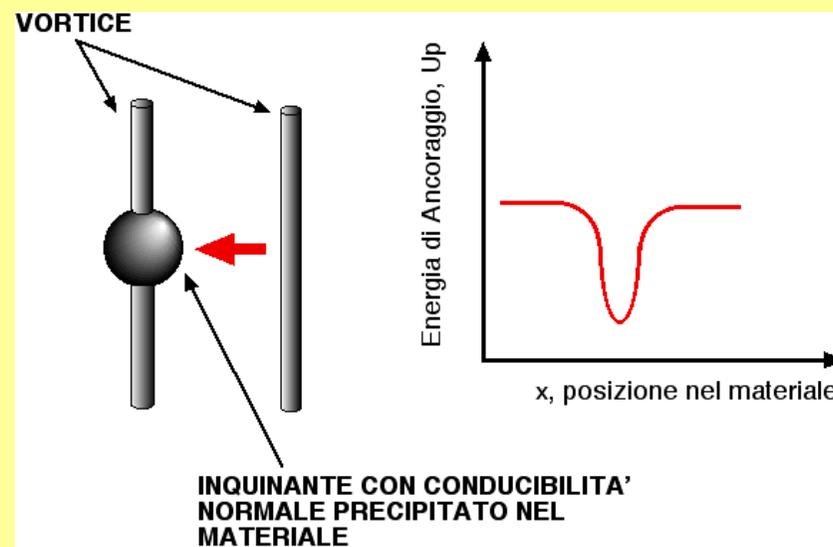
- I quanti di flusso vanno sulle imperfezioni e



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

- I quanti di flusso vanno sulle imperfezioni e

### ➤ Ancoraggi



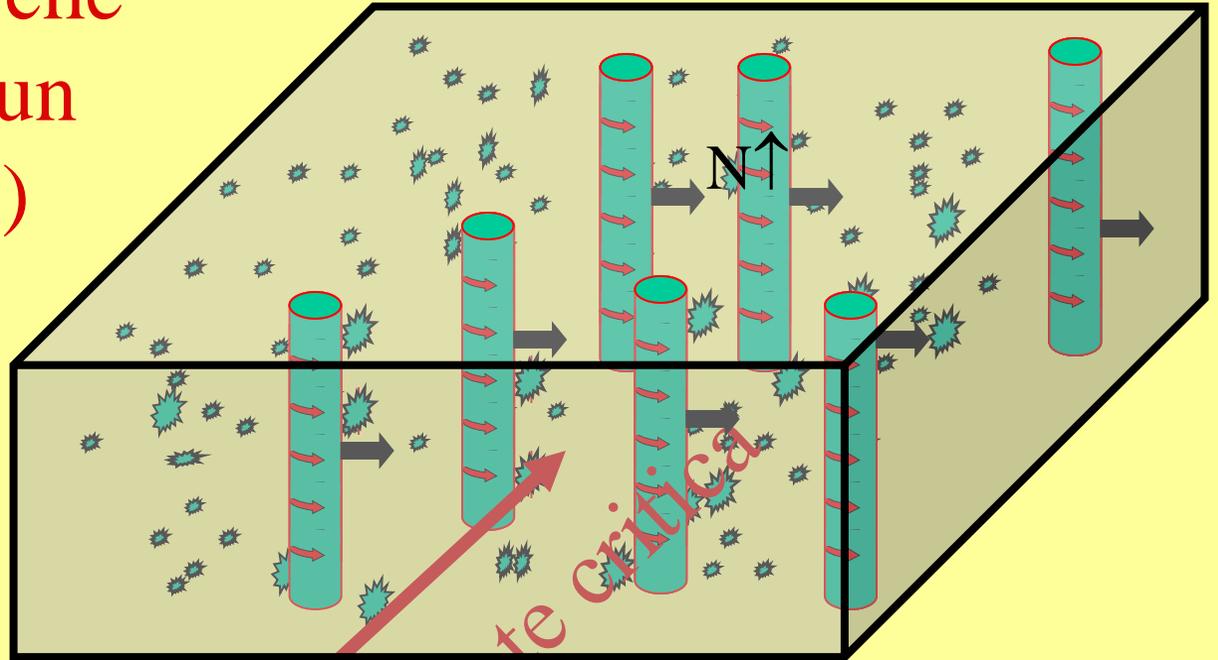
**Ancoraggio I quanti di flusso**

## 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

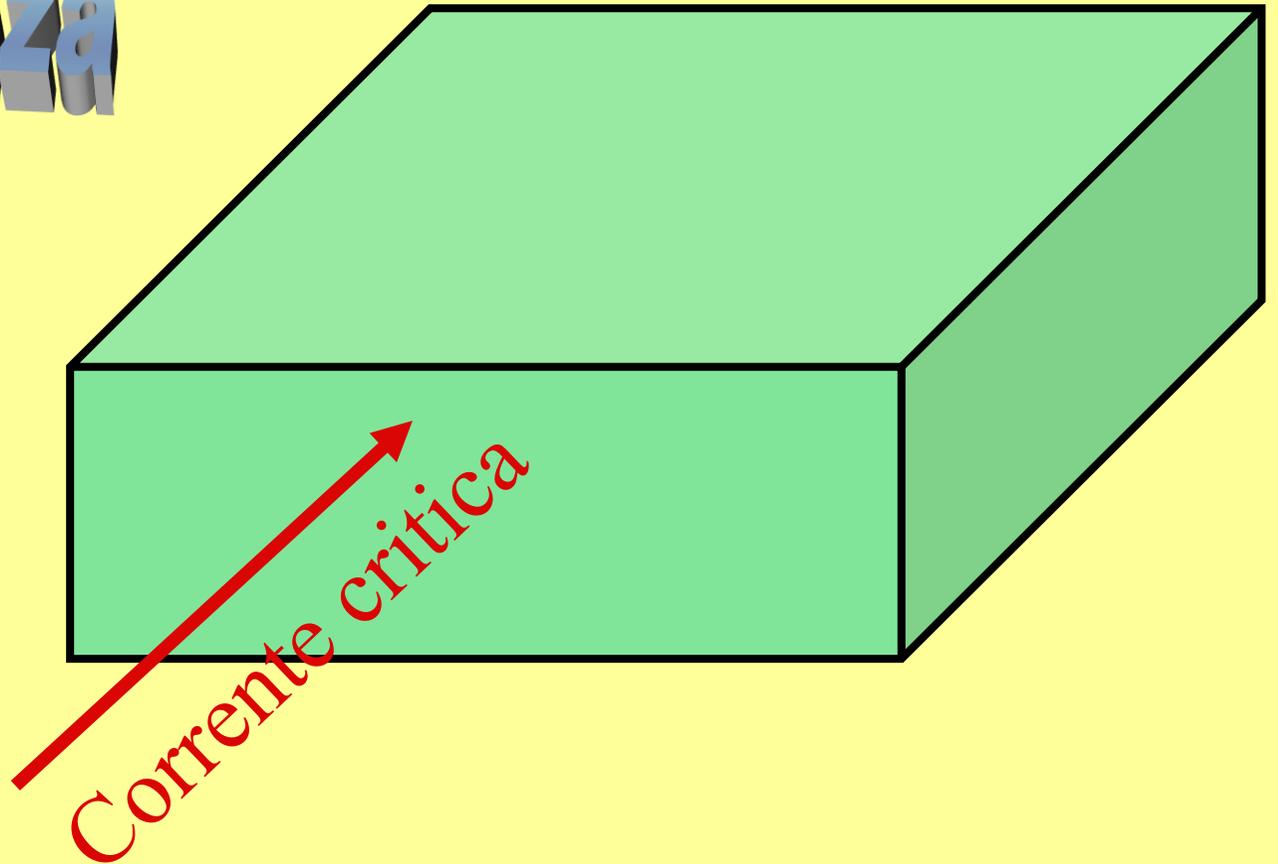


Super-corrente critica

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

*possono avere*

«e la sostanza  
transisce  
nello stato  
normale

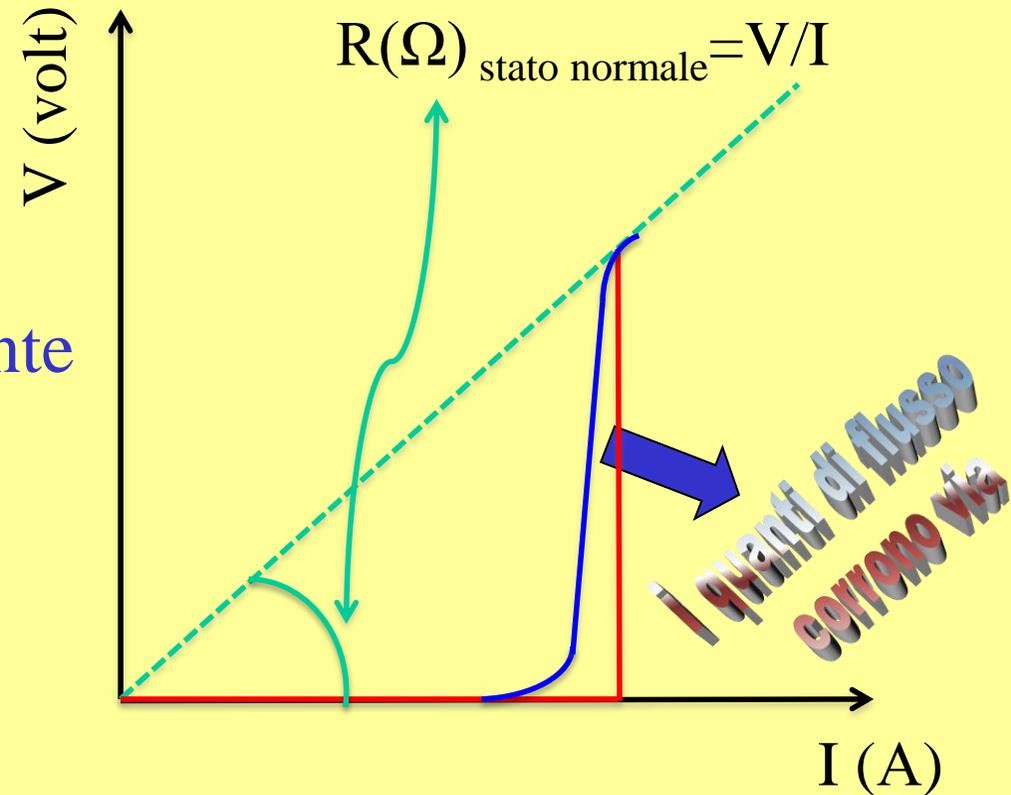


## 2. I superconduttori ~~II non hanno~~ resistenza *possono avere*

- Questo stato di moto è chiamato 'Flux flow'

◆ Il materiale è ancora un superconduttore e mostra una resistenza elettrica che varia velocemente con la supercorrente

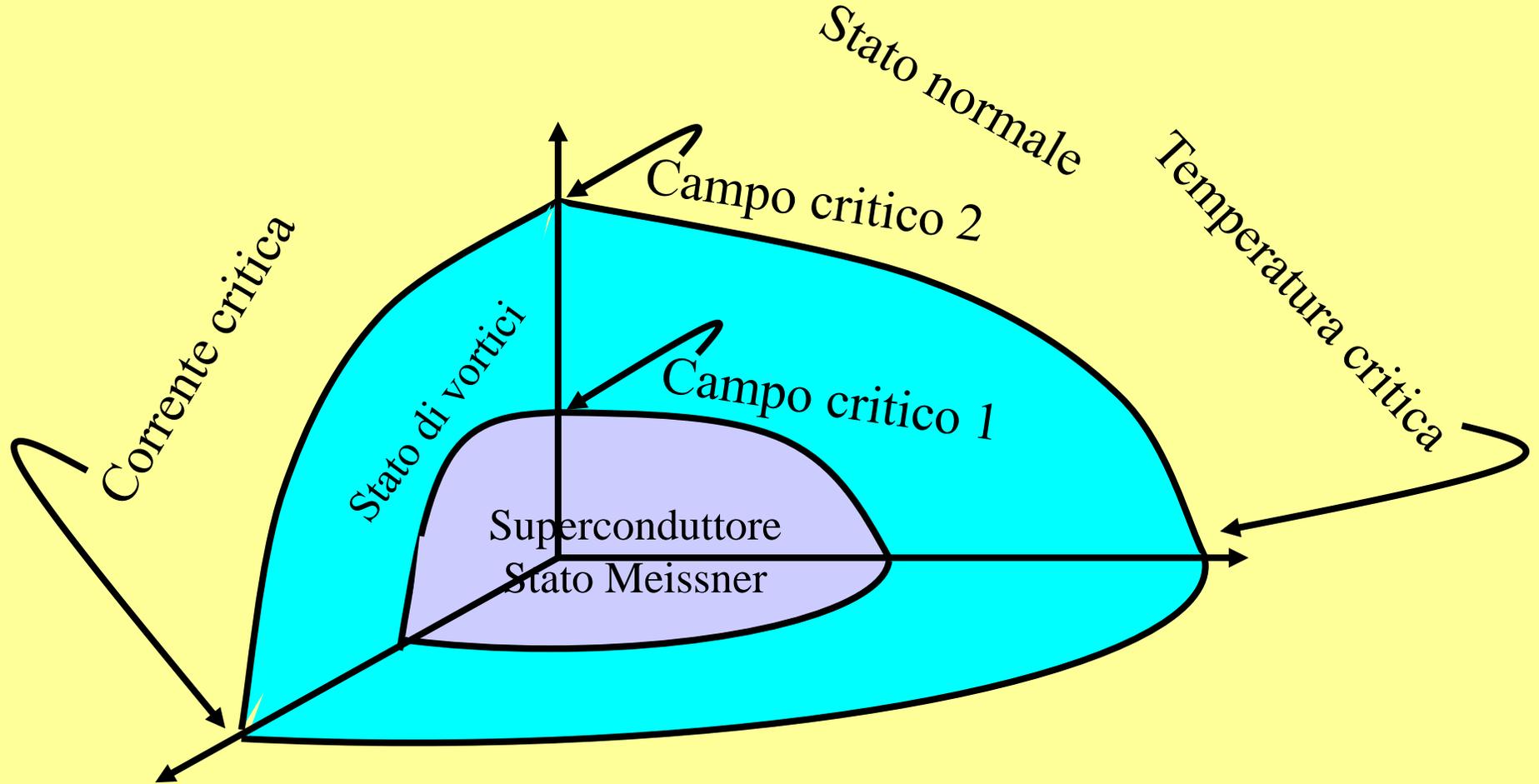
➤ **dispositivi elettronici funzionano su questo principio**



*Lo stato superconduttore è individuato da tre parametri:*

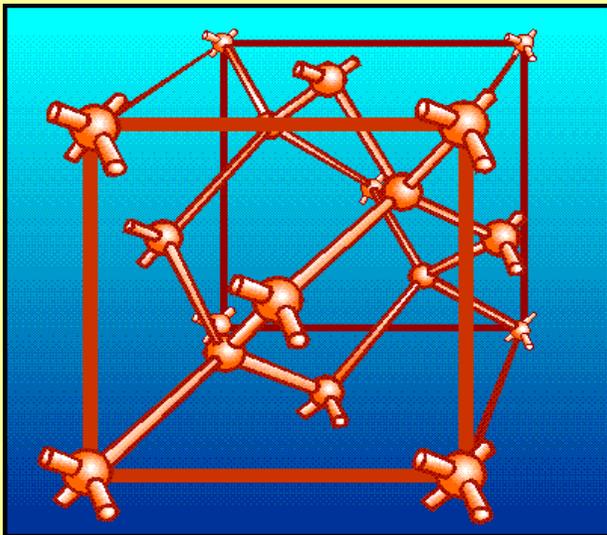
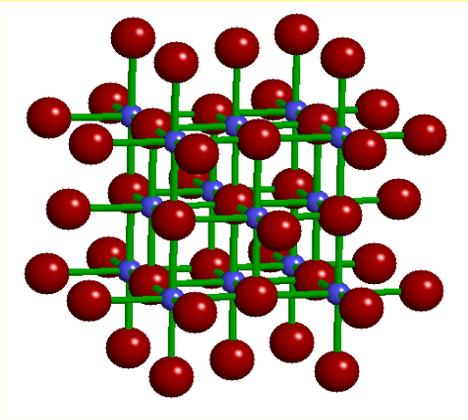
- Temperatura critica ( $T_c$ )
- Campo magnetico critico ( $B_c$ )
- corrente critica ( $I_c$ )

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

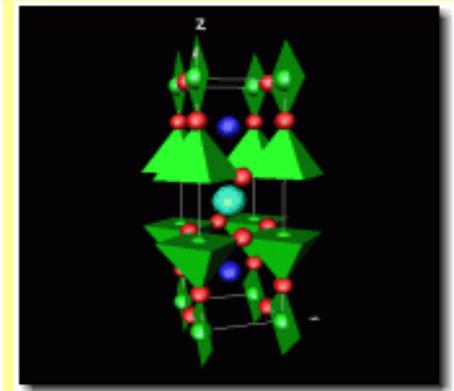
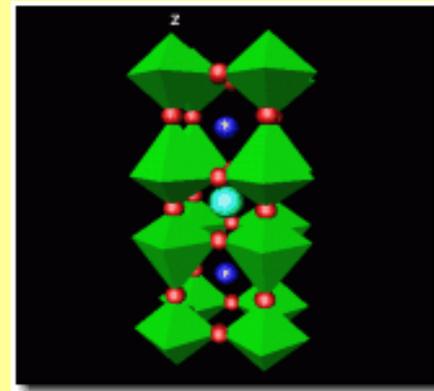
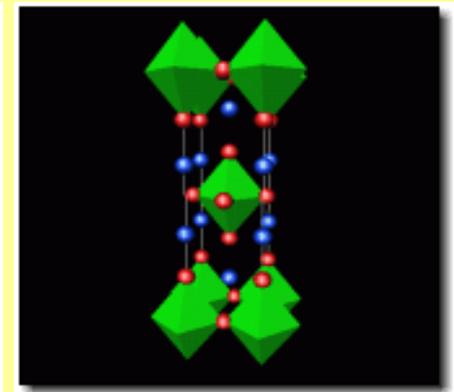
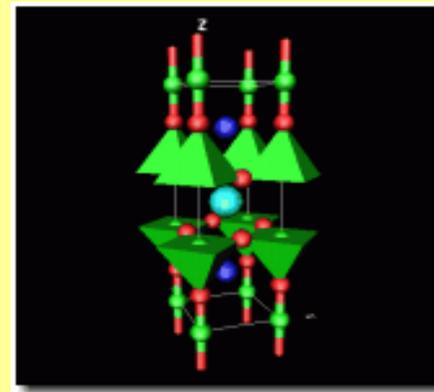


# Strutture chimiche dei superconduttori

metallici bassa  $T_c$   
Struttura 3-Dimensionale

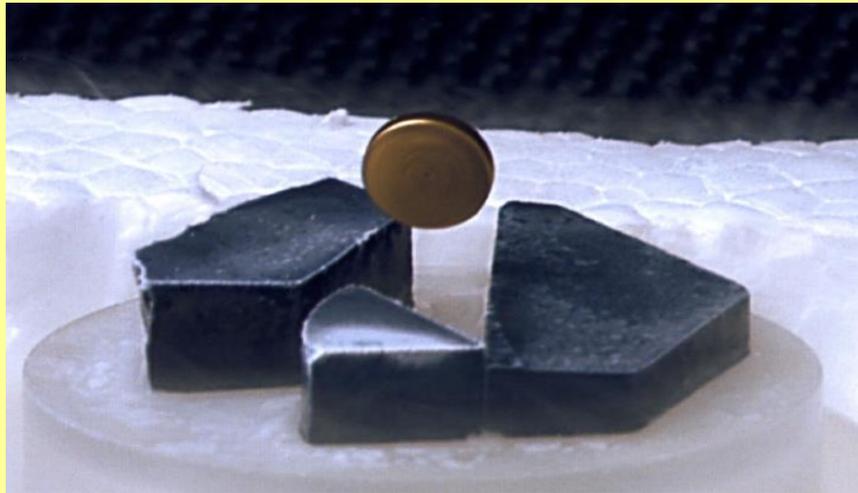


Ceramici alta  $T_c$   
Struttura 2-dimensionale  
a strati

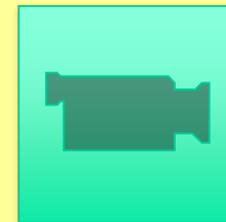
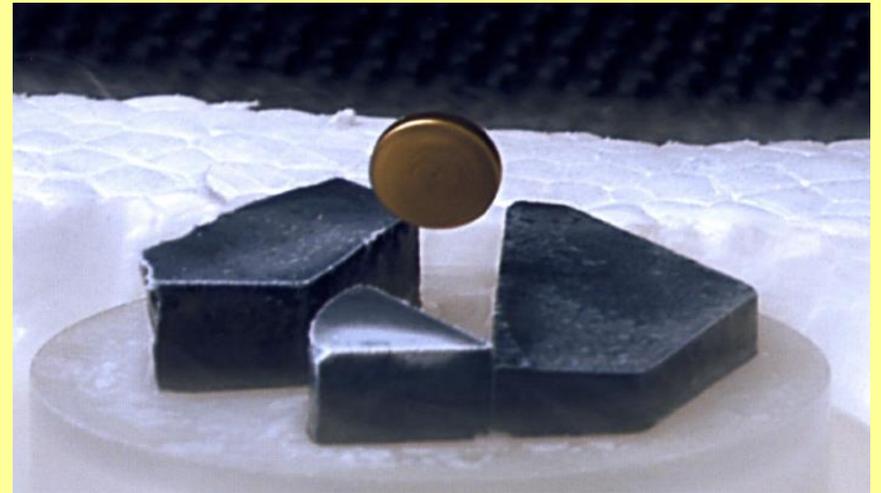


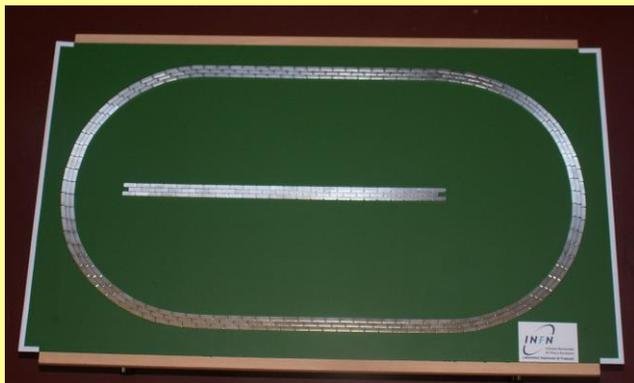
# *un facile esperimento*

**I filmato**



**II filmato**





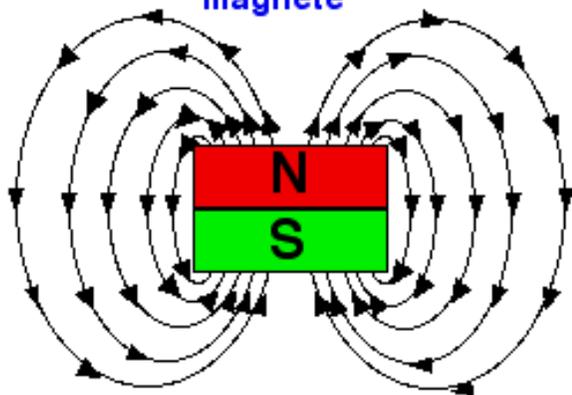
**..una ferrovia magnetica  
di parallelepipedi  
NdFeB (Neodimio-Ferro-Boro)**



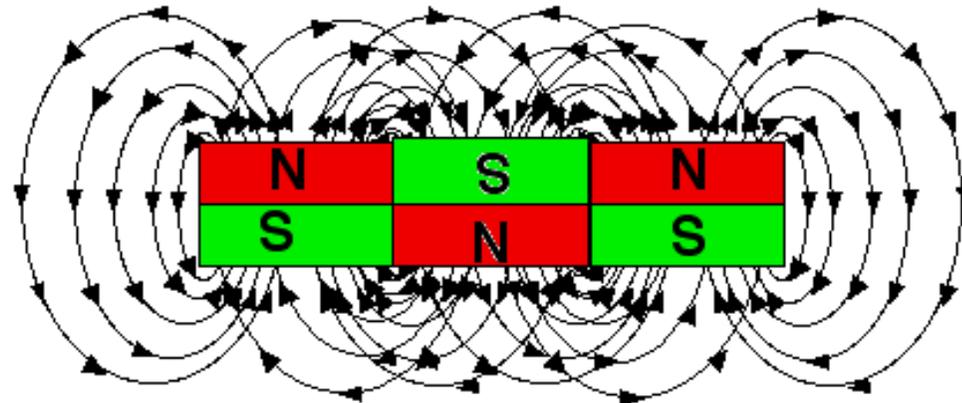
**.. una locomotiva, un vagone con serbatoi  
di azoto liquido e superconduttori sulla base**



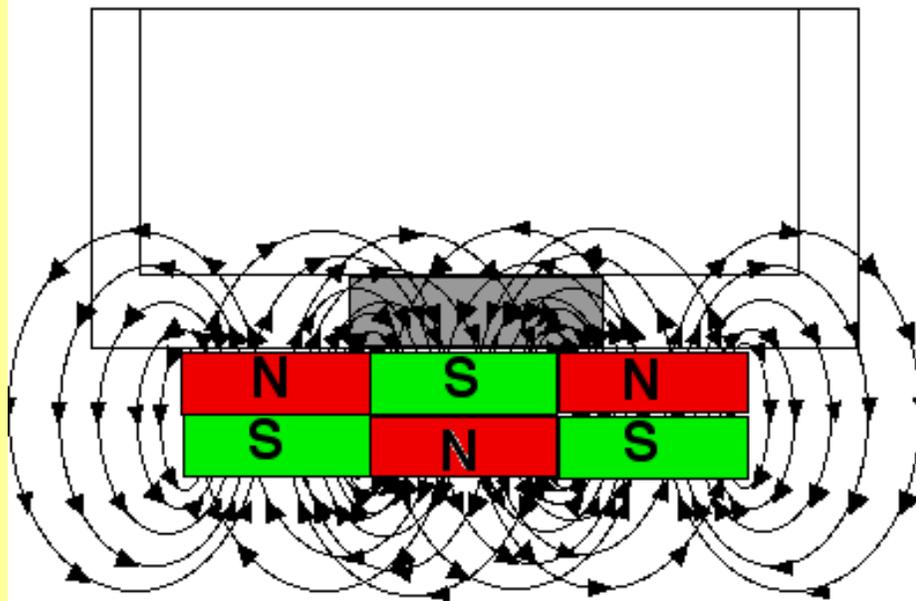
magnete



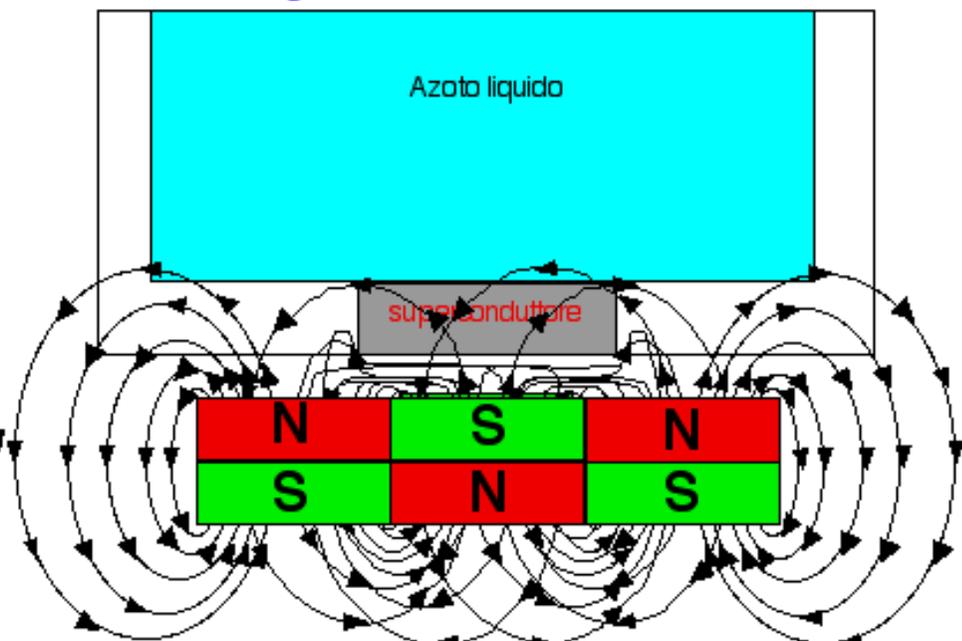
rotaia magnetica



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



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



# 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.

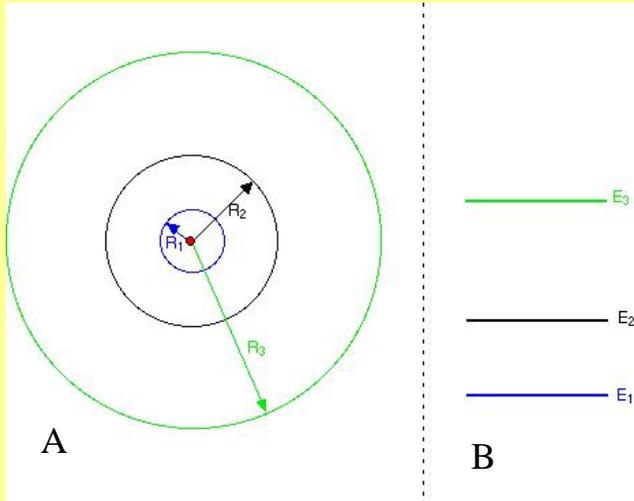
In un superconduttore gli elettroni **condensano** in uno stato quantistico di energia minima e si muovono **collettivamente e coerentemente** senza incontrare resistenza in coppie (coppie di Cooper).

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

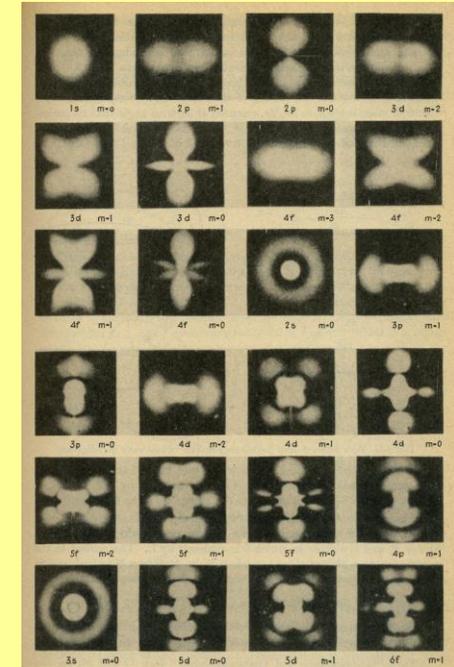
# Atomi

## Come si rappresenta un atomo...?



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

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



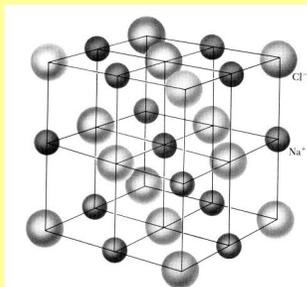
### Orbitali elettronici di un atomo di idrogeno:

- ✓  $n=1$  (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

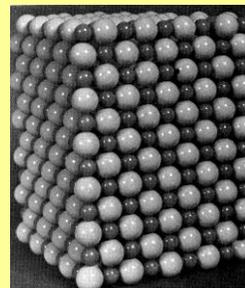
➤ Gli **Orbitali** sono descritti dal **quadrato della funzione d'onda** elettronica,  $\Psi$ , proporzionale alla **probabilità** di presenza in una data regione dello spazio

# Solidi

## Cosa avviene quando si avvicinano N atomi...?

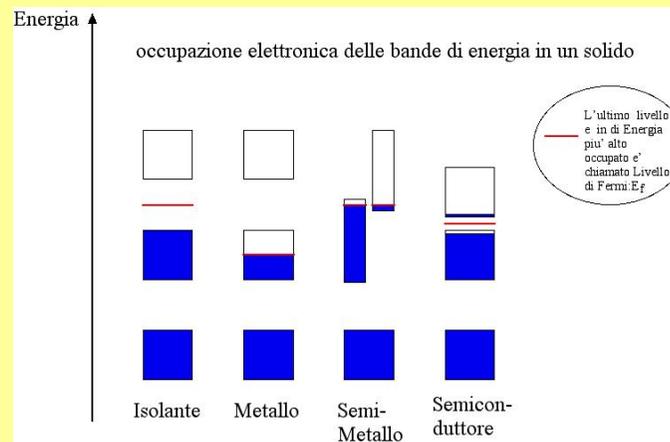
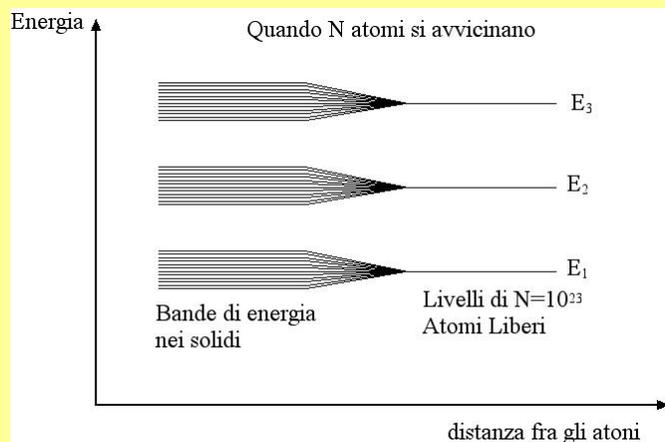


NaCl



I livelli energetici degli elettroni negli atomi singoli si sovrappongono:

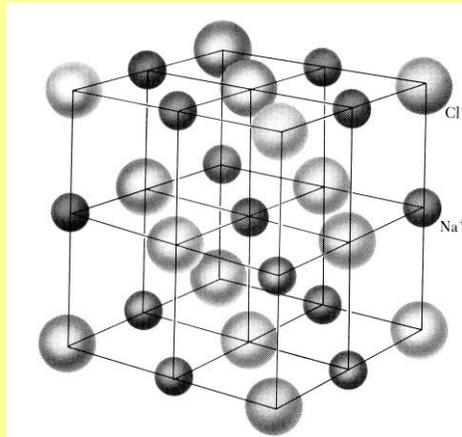
## si formano delle bande di energia con N livelli



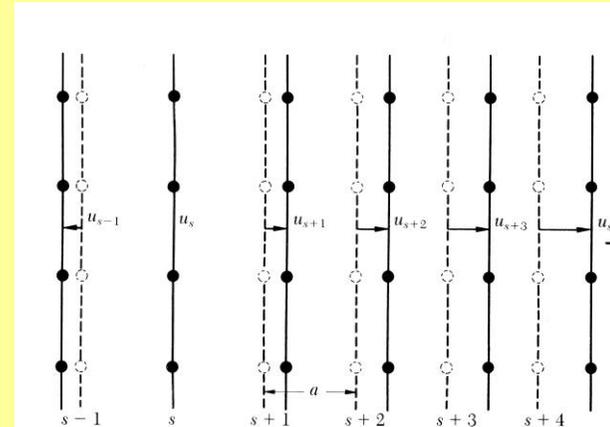
# Solidi

## reticoli di atomi vibrano...?

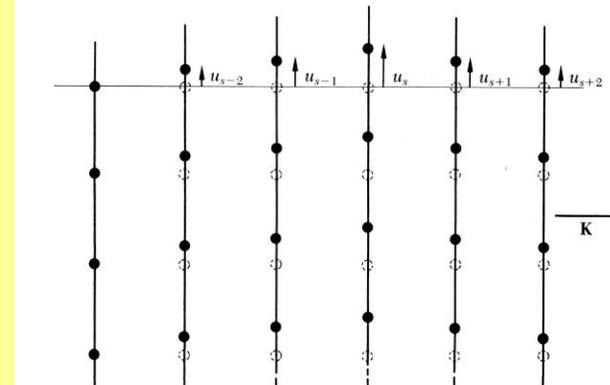
Il reticolo di atomi ha delle vibrazioni stazionarie intorno al loro punto di equilibrio: **fononi**



Moto (fononi) longitudinali



Moto (fononi) trasversali

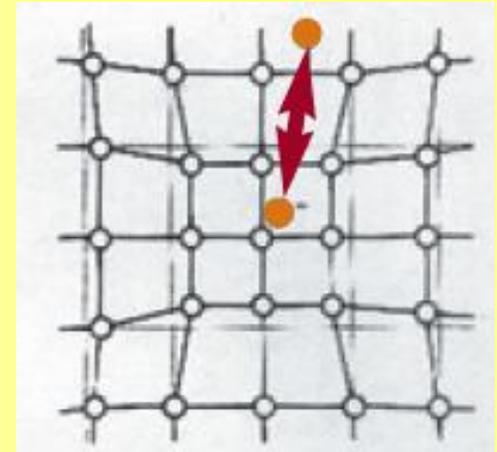


# un po' di teoria..... -BCS-

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



interagiscono per dare.....

# un po' di teoria.....:

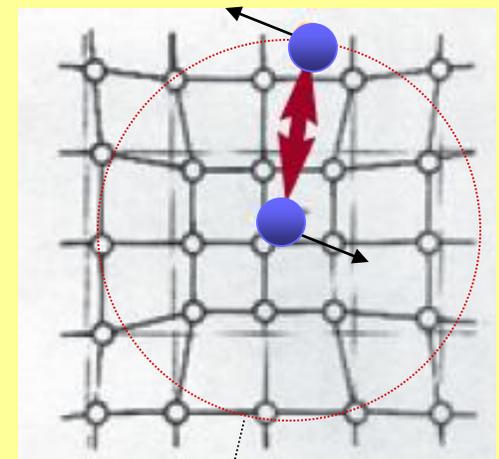
## -BCS-

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)

le coppie di Cooper



Volume caratteristico

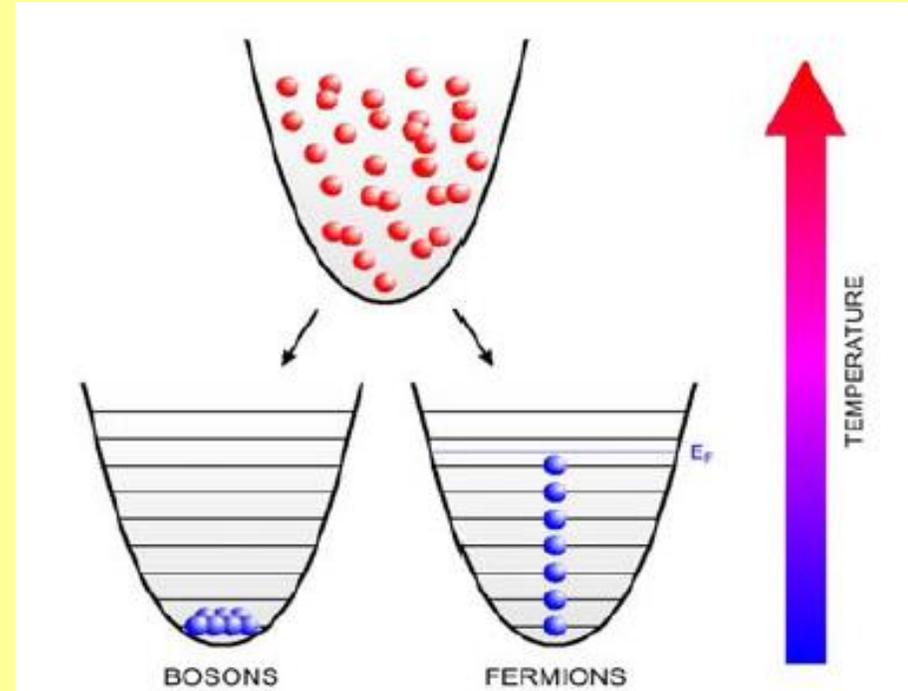
volume di coerenza

# 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 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

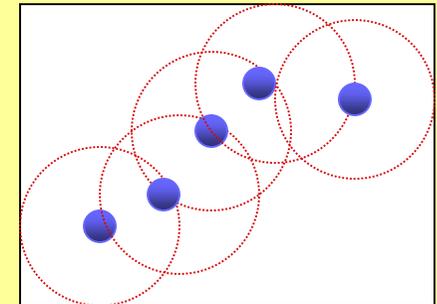
**Dimostriamo che tutto il materiale è in uno stato superconduttore:**

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

C'è 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 è 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...

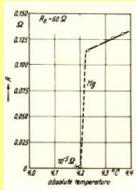
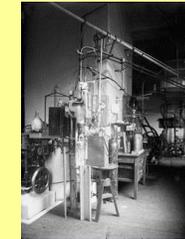
senza attrito → resistenza nulla



## Premi Nobel per la Superconduttività

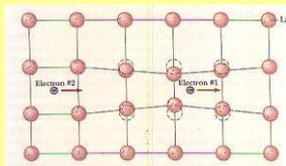
### Kamerlingh Onnes (1913)

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



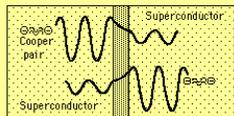
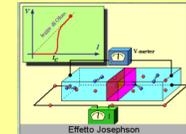
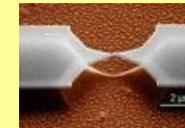
### Bardeen, Cooper and Schrieffer (1972)

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



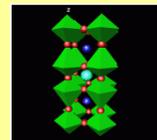
### Giaever and Josephson (1973)

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



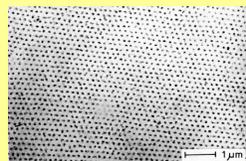
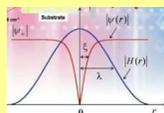
### Abrikosov, Ginzburg and Leggett (2003)

Per pionieristici contributi alla teoria della superconduttività e superfluidità



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

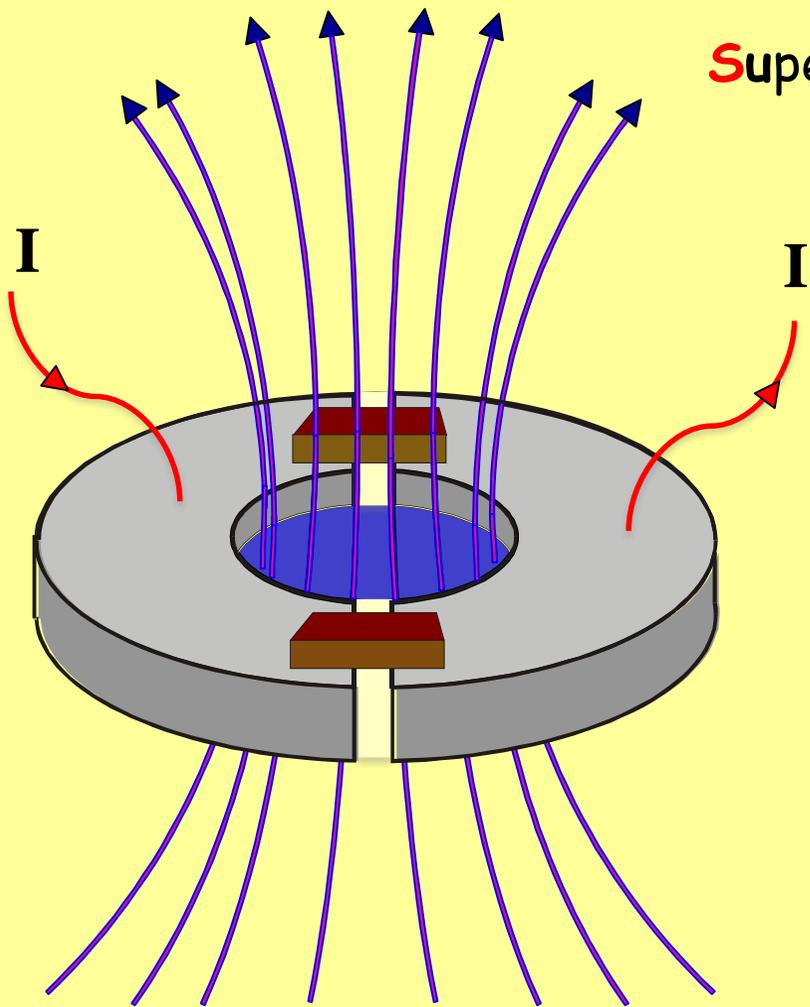
$$\lambda = \sqrt{\frac{m}{4\mu_0 e^2 \psi_0^2}}$$





# Che cosa è lo SQUID?

Superconducting QUantum Interference Device  
(SQUID)



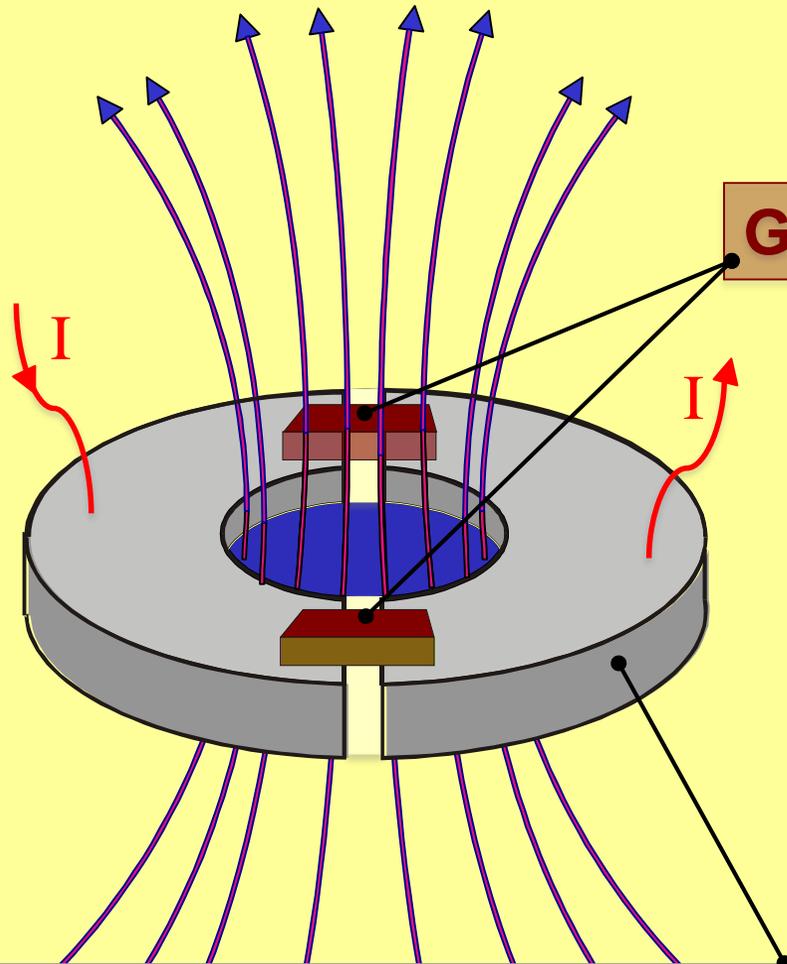
- È il più sensibile rivelatore di campo magnetico:

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

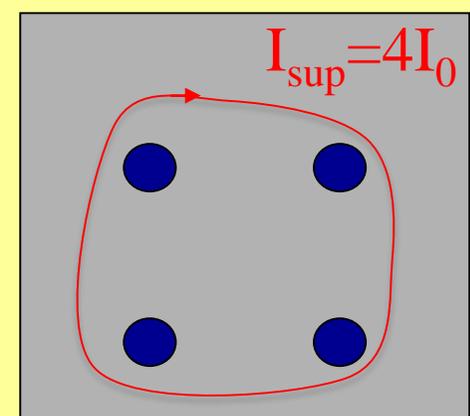
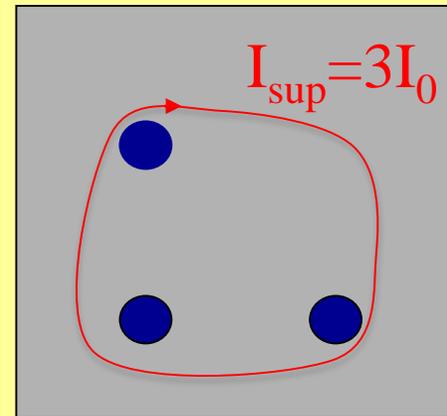
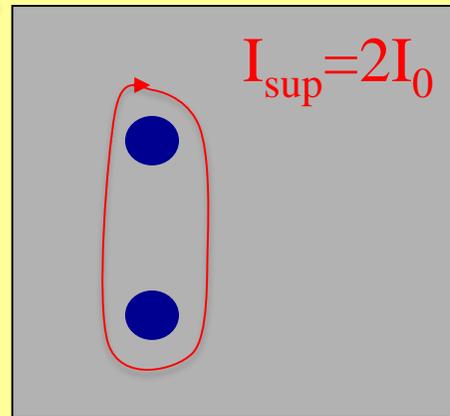
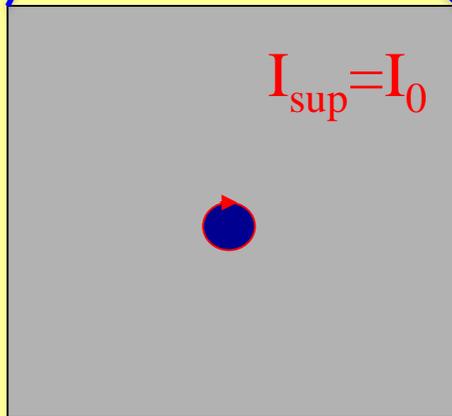
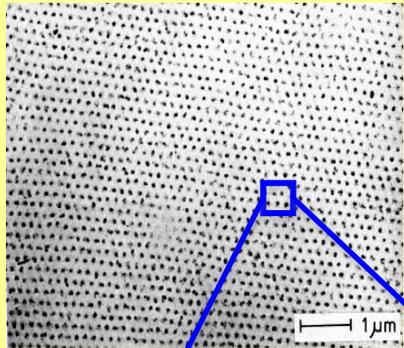
# Che cosa è lo SQUID?

La quantizzazione del flusso magnetico in un anello superconduttore

Alcuni chiarimenti:

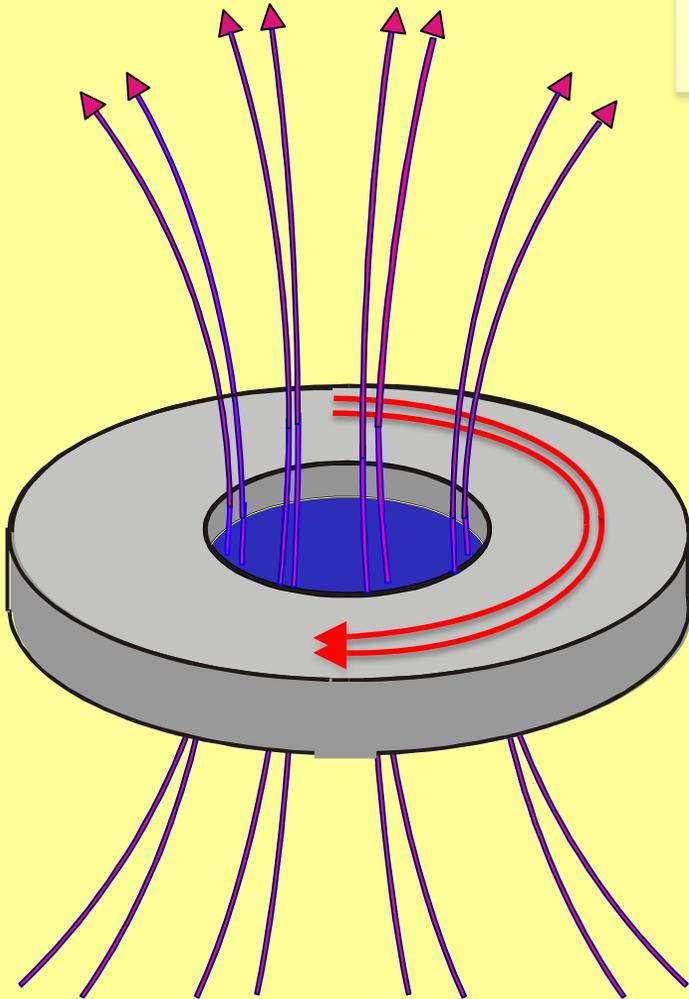
➤ *Il valore della supercorrente che scorre intorno ai flussoni è proporzionale al numero dei quanti di flusso*

➤ *Il cuore normale è assimilabile a un foro*



# Che cosa è lo SQUID?

La quantizzazione del flusso magnetico in un anello superconduttore



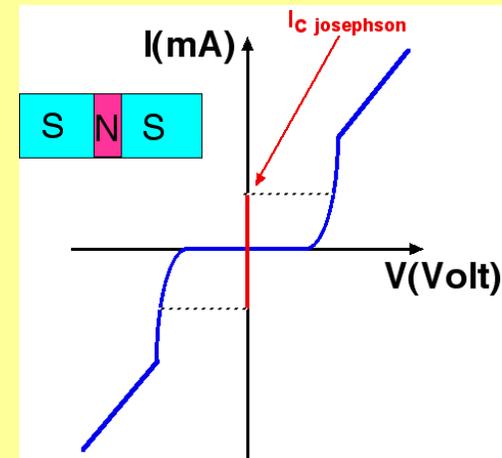
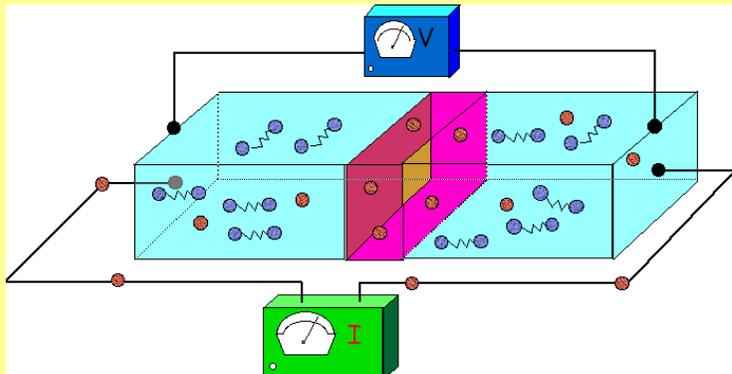
Stessa cosa nella situazione capovolta:

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

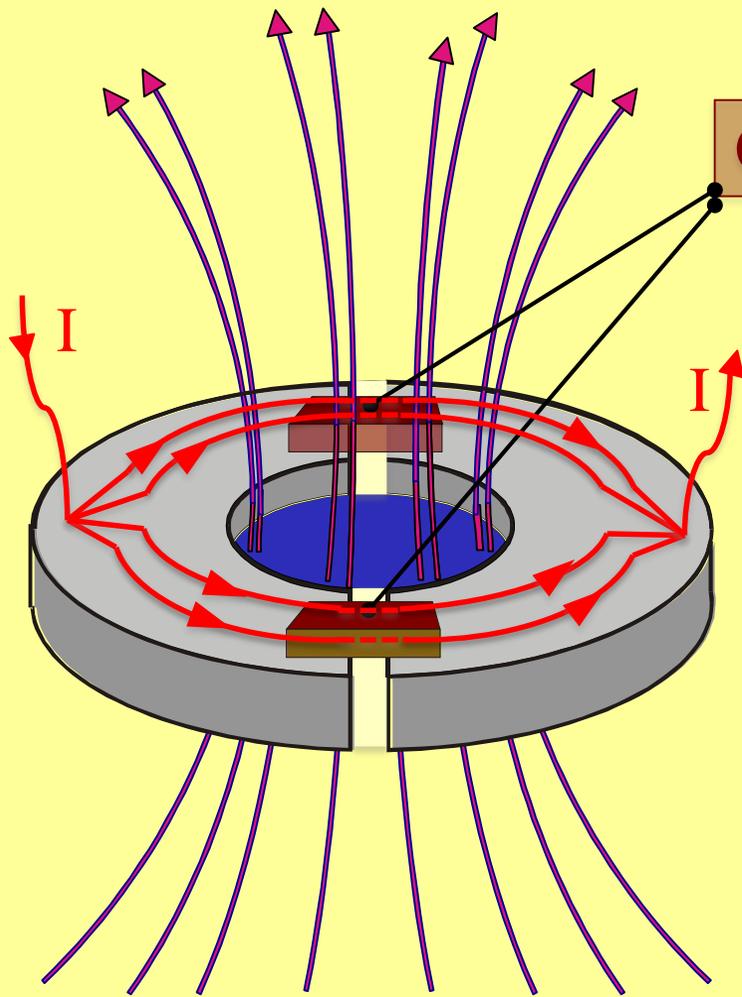
# Che cosa è lo SQUID?

L' Effetto Josephson (Tunnel Quanto-Meccanico)

Se un superconduttore (S) è rotto 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)



# Che cosa è lo SQUID?

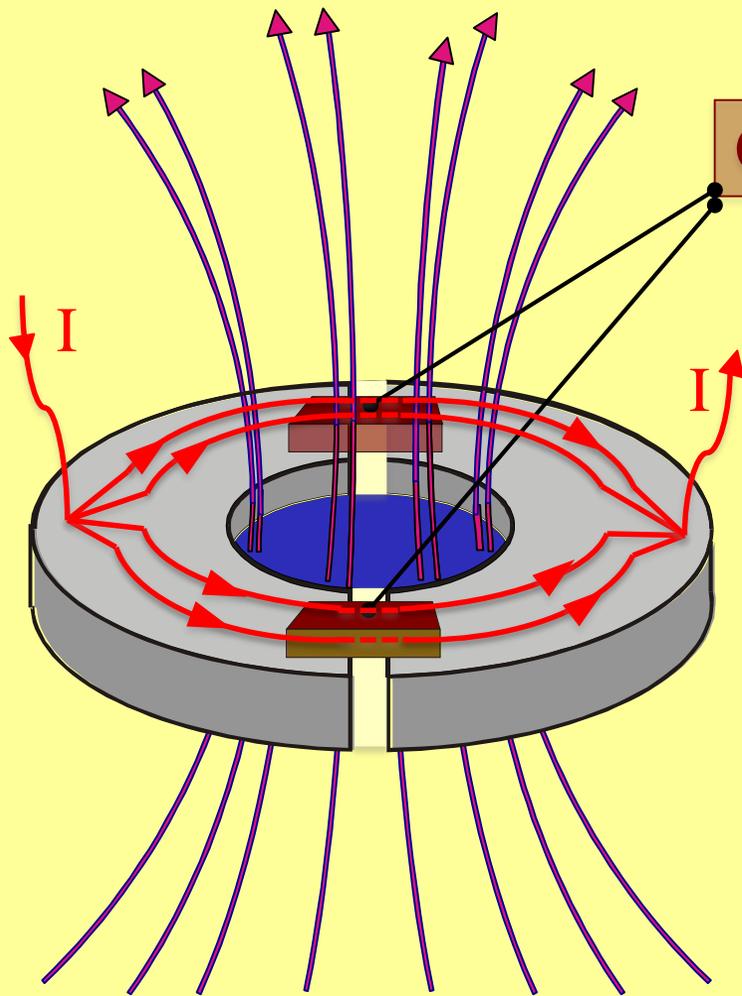


Giunzioni Josephson (JJ)

- 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?



## Giunzioni Josephson (JJ)

- Per ogni 'quanto di flusso magnetico' che sta entra attraverso la giunzione
- Abbiamo un alterazione delle supercorrenti che scorrono nei due rami correnti
- 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/m<sup>2</sup>=tesla MKS]

B=1 tesla=10<sup>4</sup>Gauss [Gauss CGS]

E' comunemente usata nelle applicazioni

M=momento magnetico per unità di volume o peso o massa,  
chiamata anche intensità di magnetizzazione

[weber/m<sup>2</sup>=tesla MKS]

ma attenzione

M= 1 tesla=1/4π x10<sup>4</sup> Gauss=7.96x10<sup>4</sup> G [Gauss CGS]

H= campo magnetico applicato

[Ampere/metro MKS]

1A/m= 4πx10<sup>-3</sup> Oe [Oested=Gauss CGS]

μ<sub>0</sub>= 4πx10<sup>-7</sup> H/m permeabilità magnetica

del vuoto MKS .....ma attenzione: μ<sub>0</sub>= 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

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

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

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