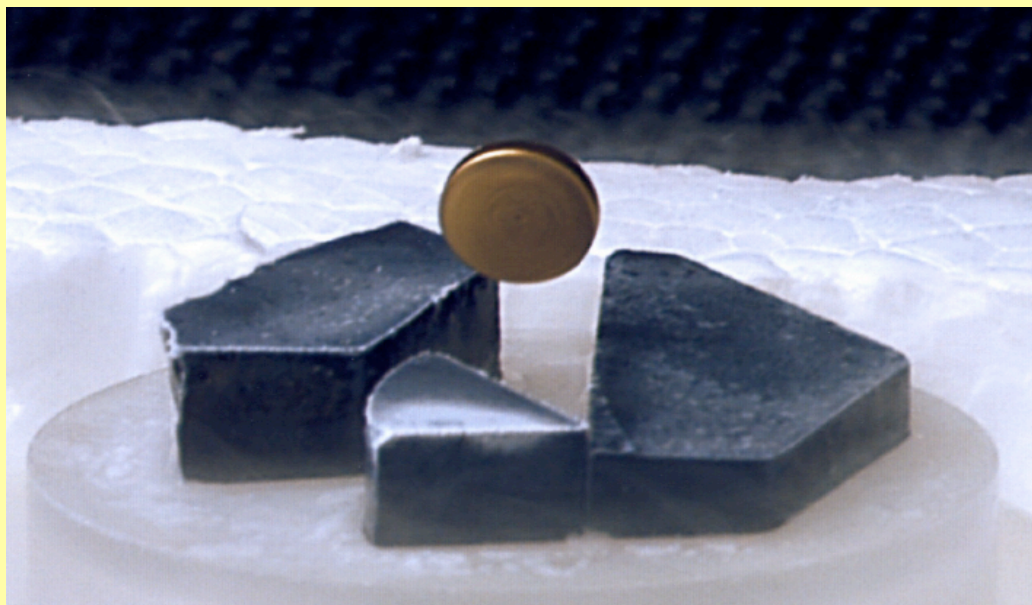
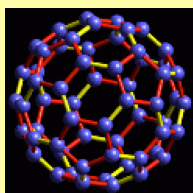
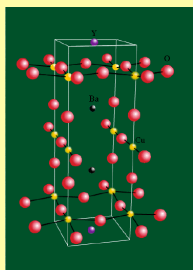
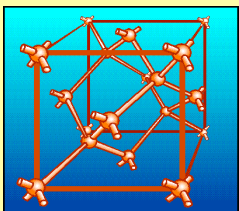


# *Il fenomeno della Superconduttività*



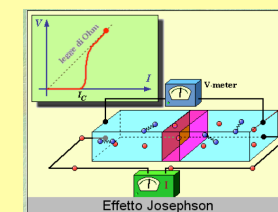
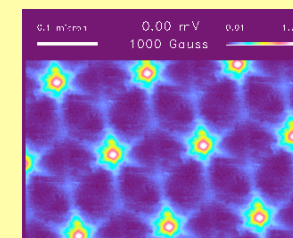
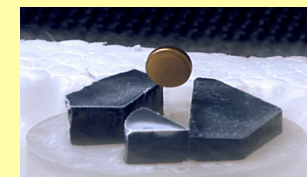
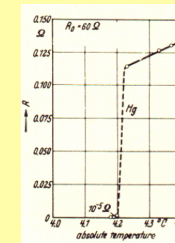
**Dr. Daniele Di Gioacchino**  
**Istituto Nazionale di Fisica Nucleare**  
**Laboratori Nazionali di Frascati**



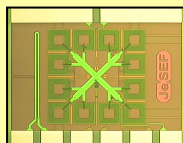


La Superconduttività è uno stato della materia con eccezionali proprietà elettriche e magnetiche. Evidenzia un comportamento della fisica quantistica nei solidi. E' uno dei rarissimi effetti quantistici macroscopici.

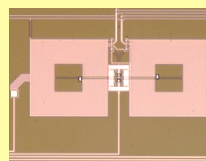
Fu scoperto da Onnes nel 1911



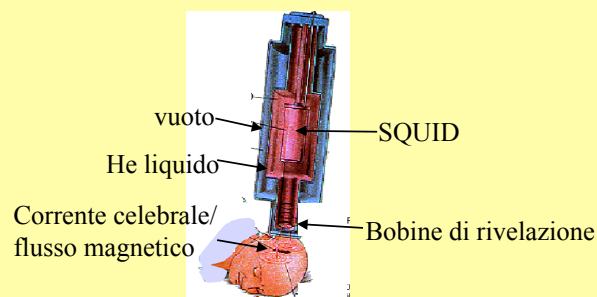
Treni veloci a levitazione magnetica



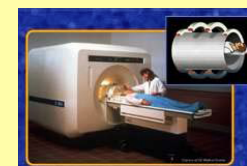
Giunzione Josephson



SQUID



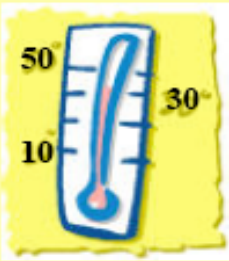
Analisi biomagnetiche con SQUID



Potenti Magneti per MNR



# *Come si caratterizza?*



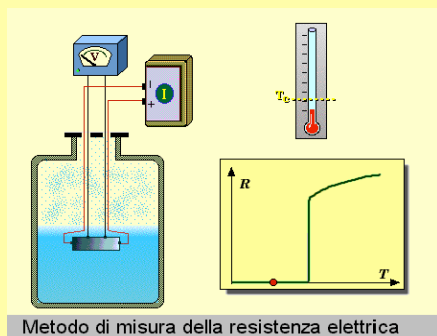
## **1. La superconduttività è un fenomeno che accade a bassa temperatura :**

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



# *Come si caratterizza?*

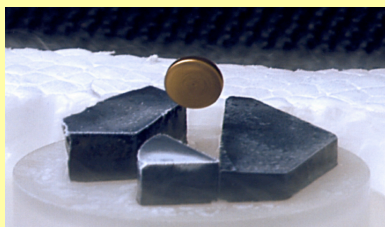
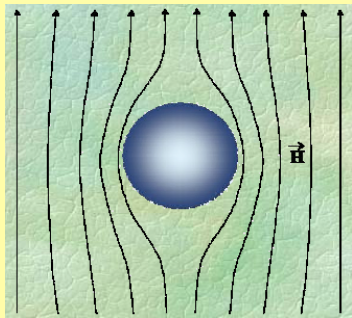
## **2. E' una fase della materia dove la elettricità' fluisce senza resistenza:**



- ✓ Si può trasportare corrente elettrica a qualsiasi distanza senza perdite.
- ✓ Se la corrente scorre in un filo chiuso nello stato superconduttore fluisce 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?*



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

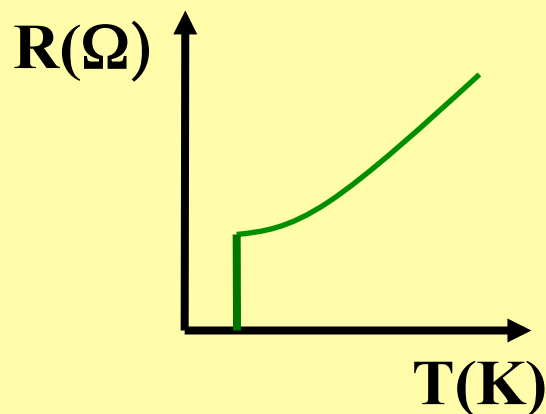


# Osserviamo queste proprietà più da vicino



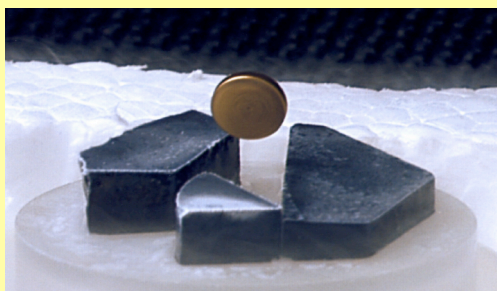
1. La superconduttività è un fenomeno a bassa temperatura

*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

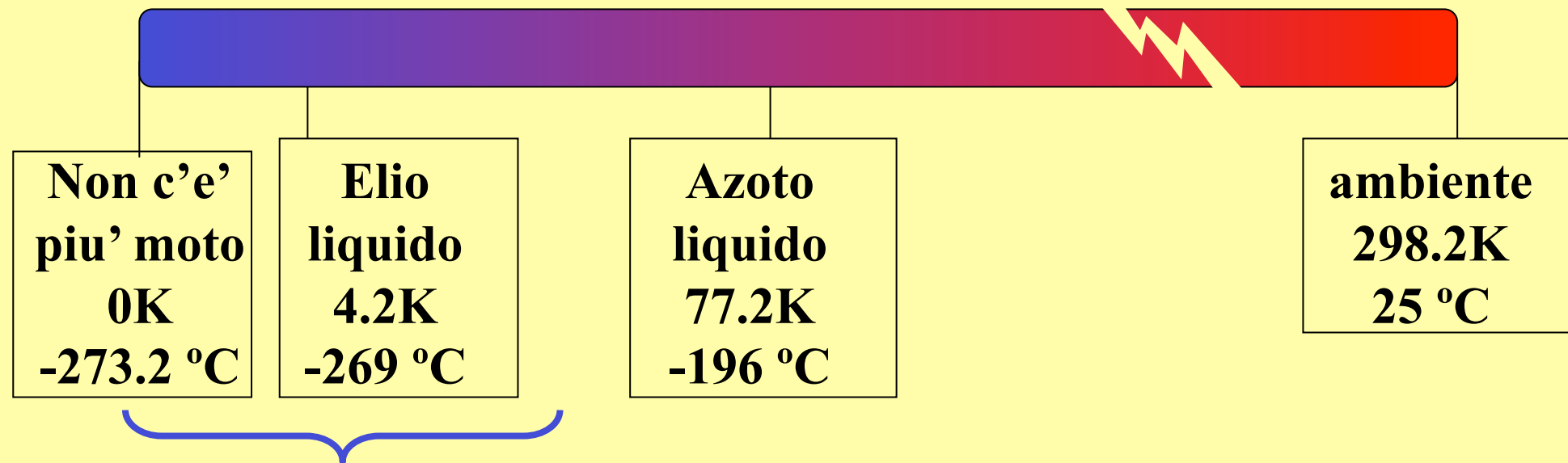
*Talvolta*

(effetto Meissner)



# *1. La superconduttività accade a bassa temperatura*

*una relativamente*



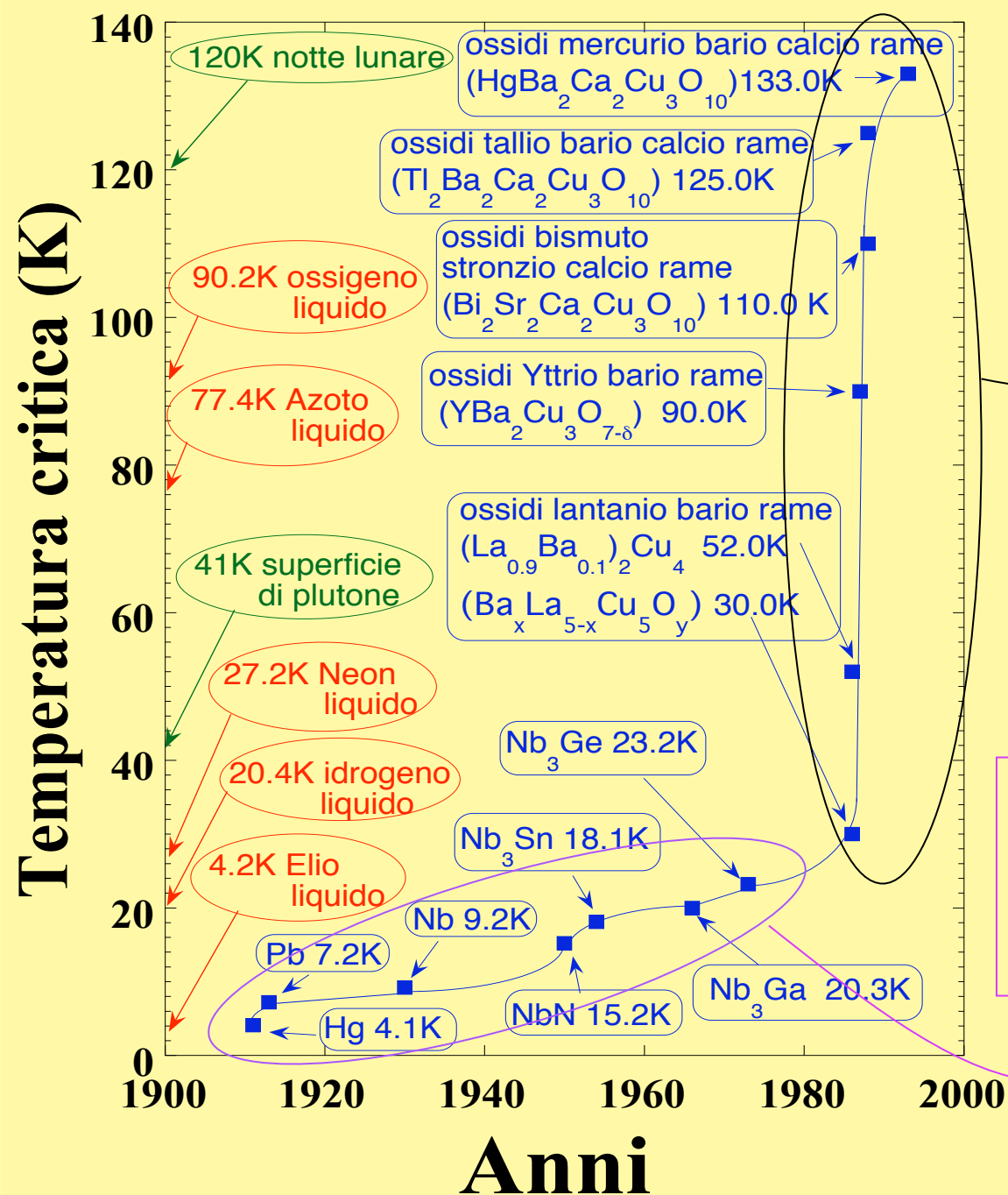
**Superconduttori “normali”**

**~ 0 – 23K**

**Superconduttori ad alta temperatura critica**

**30 – 138 K**





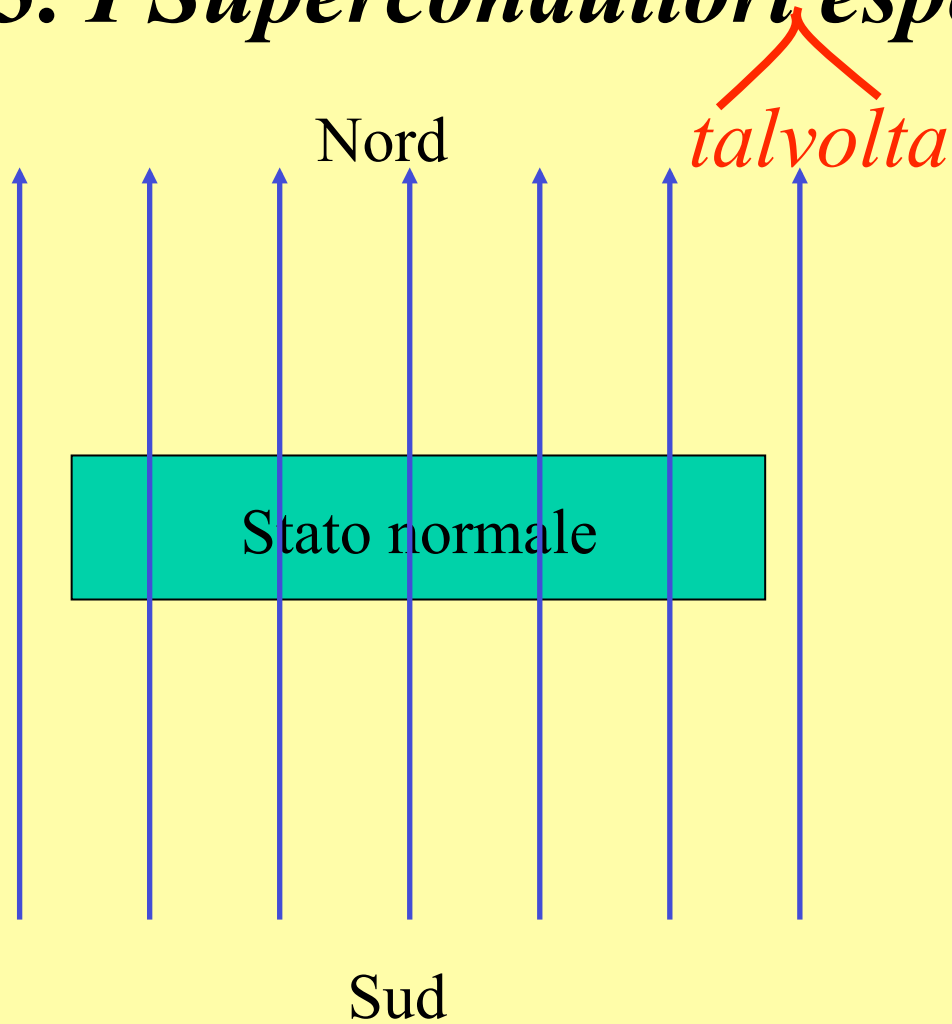
**Superconduttori alta temperatura critica (ceramici)**

**Superconduttori Bassa temperatura critica (metallici)**



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

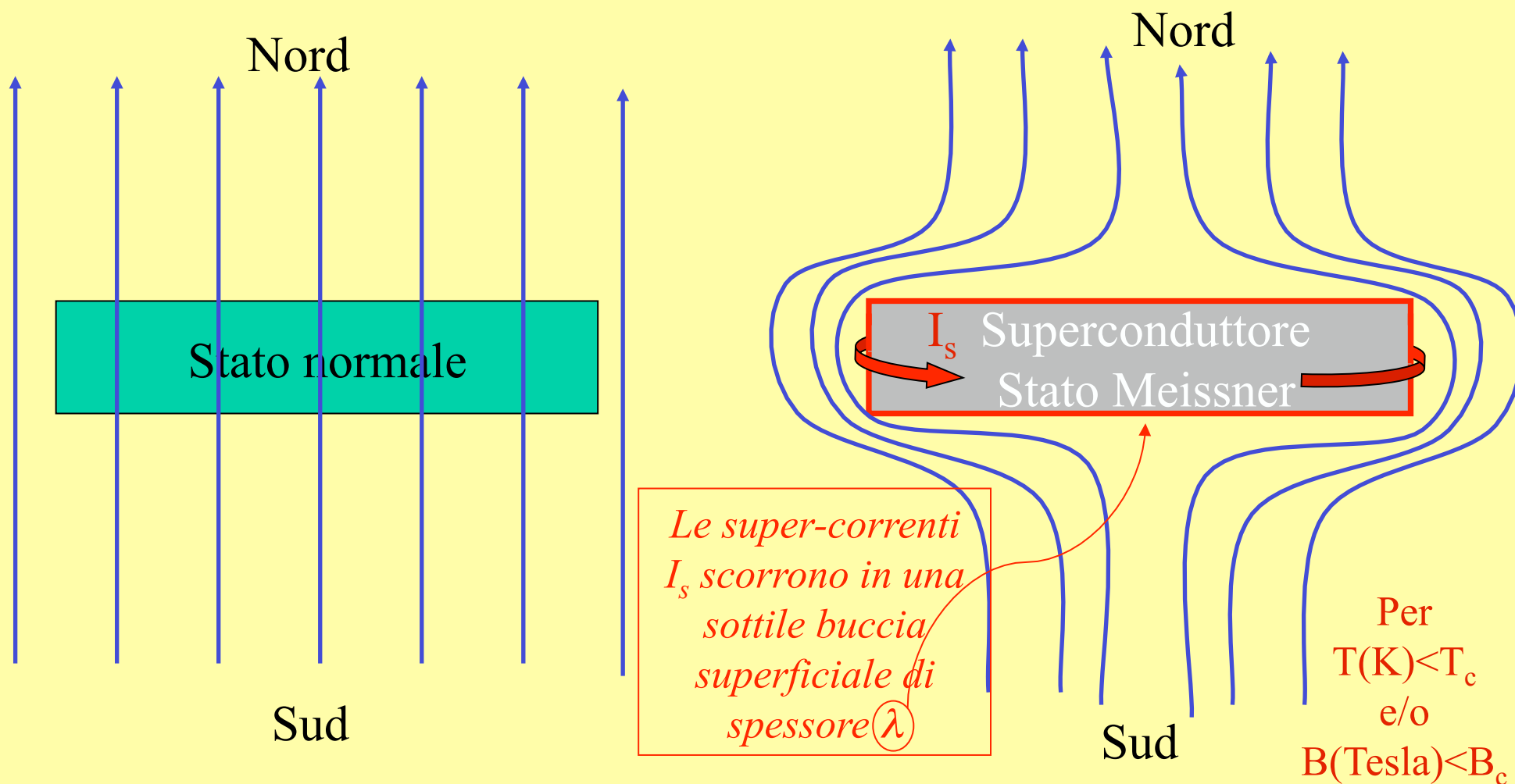
### ***3. I Superconduttori espellono il campo magnetico***





*talvolta*

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

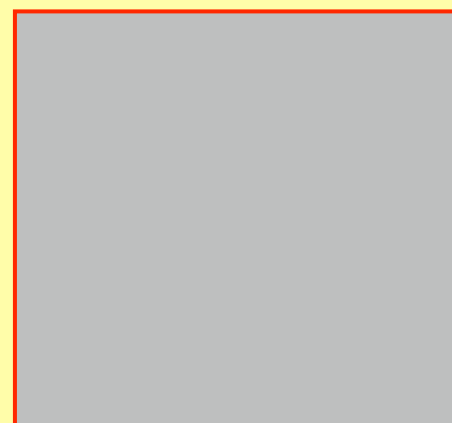
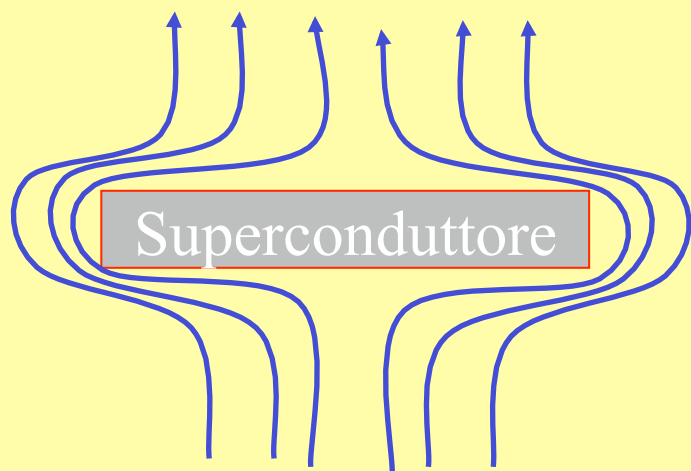




*talvolta*

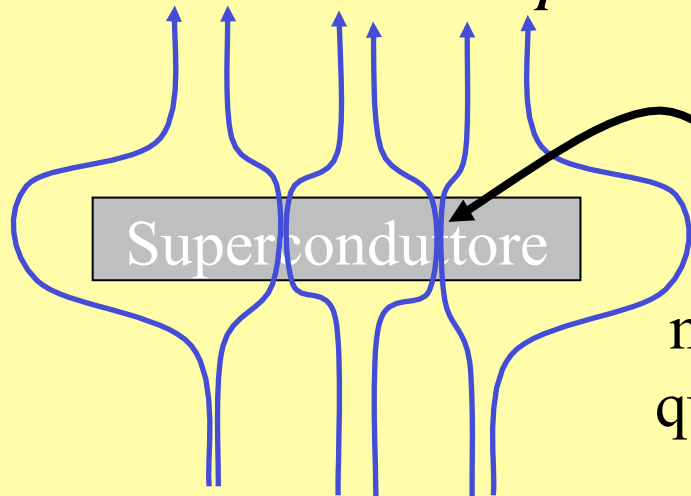
### 3. *I Superconduttori espellono il campo magnetico*

Vista dall'alto

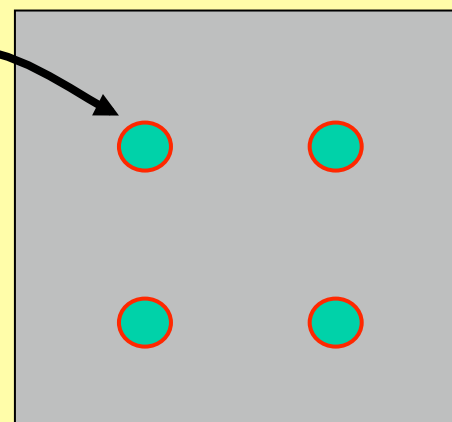


Superconduttori  
di tipo I

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



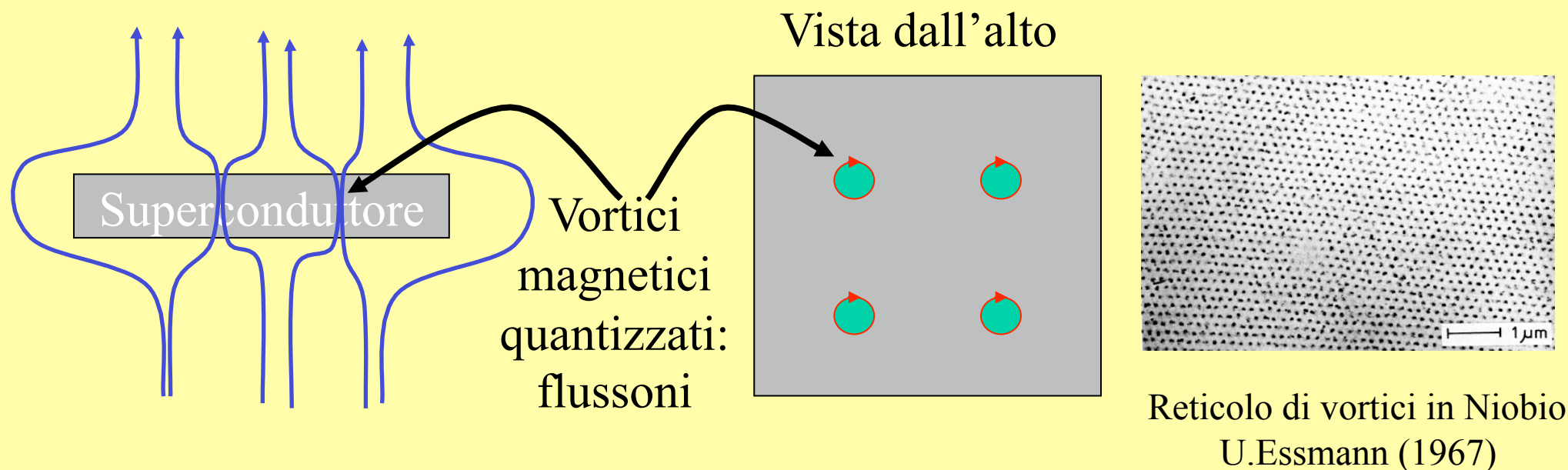
Vortici  
magnetici  
quantizzati



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



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

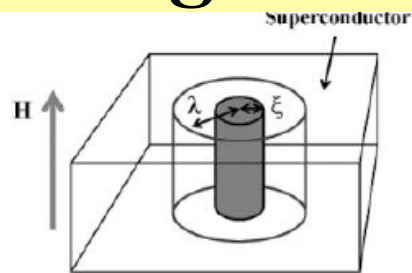


Figure 1.12 Virtually invaded external magnetic field  $H$  in the superconductor. The order parameter is lost locally in the  $\xi$  radius area and the condensation energy increases there, whereas the magnetic field penetrates in the  $\lambda$  radius area and the magnetic energy is decreased.

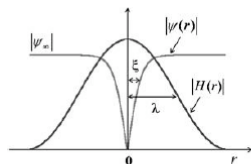
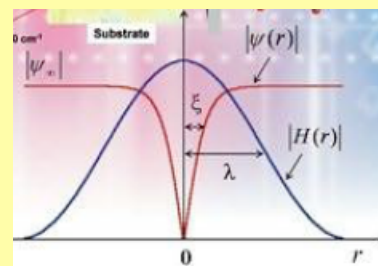
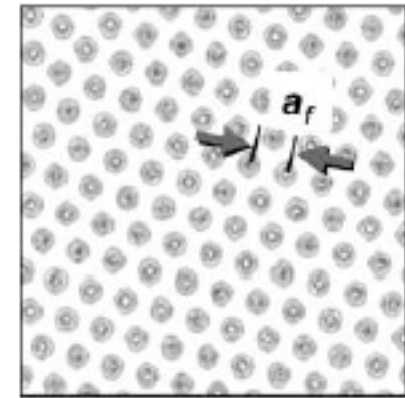


Figure 1.15 Schematic diagram of the vortex structure in a type II superconductor. The vortex has a normal conducting core with radius  $\xi$  and is surrounded by a magnetic field with a radius of  $\lambda$ . The confined magnetic flux is quantized, and its value is  $\phi_0 = 2.07 \times 10^{-15}$  Wb.



Figure 1.14 Vortices in the natural world: (a) a tornado in the United States and (b) the Naruto whirlpool in the Naruto strait in Japan.

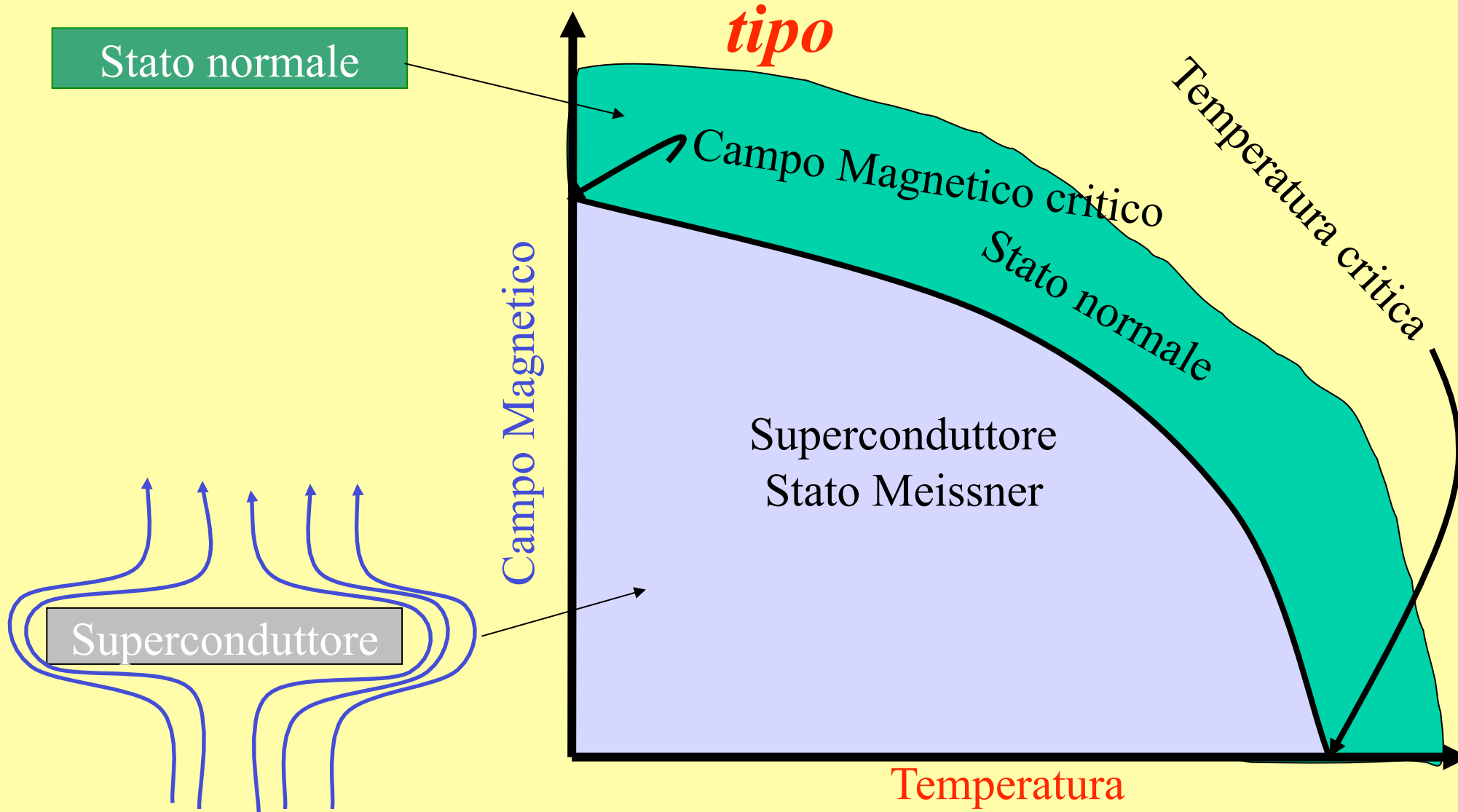


I flussoni consistono:

- 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

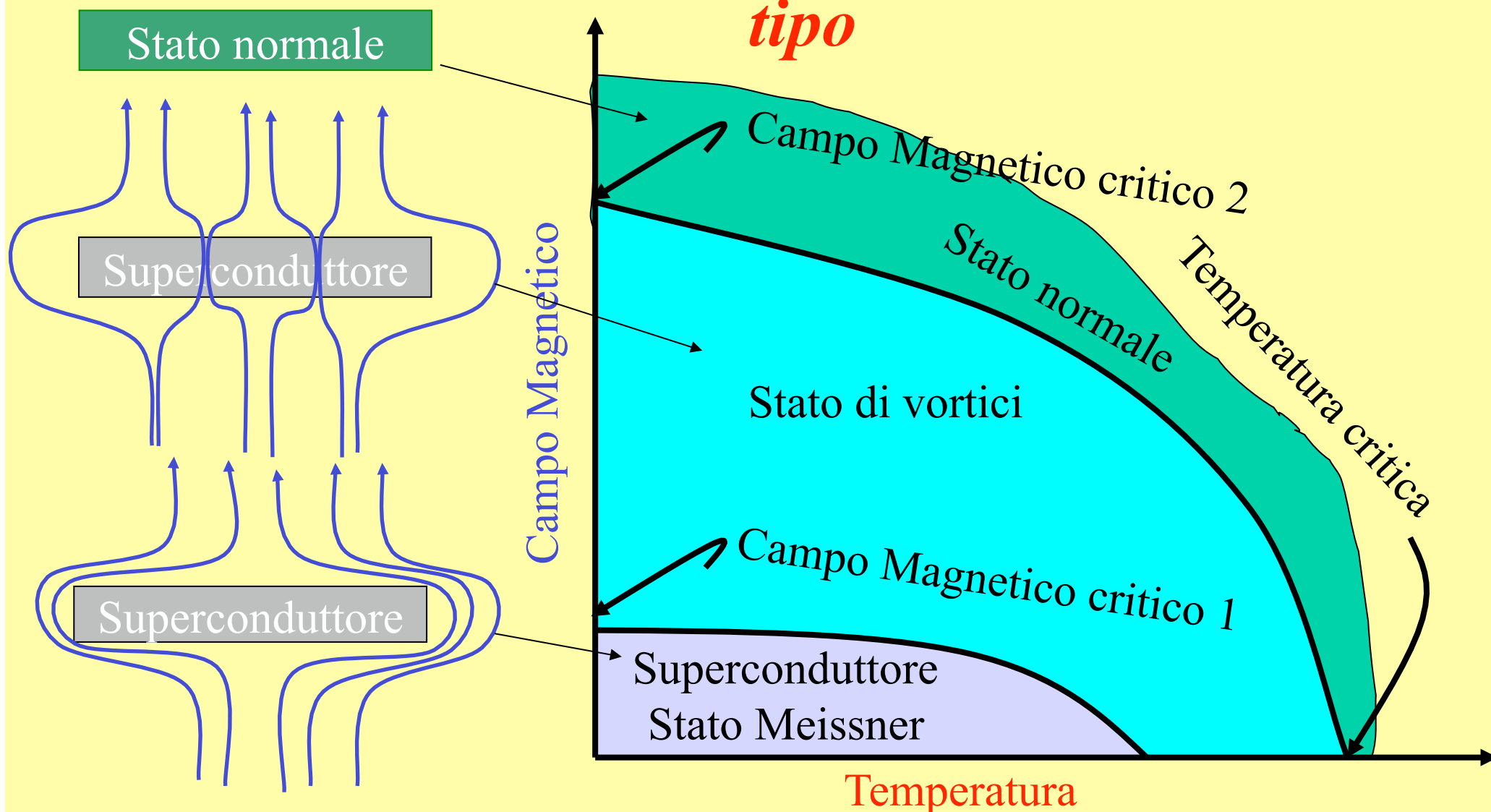


# Diagramma di fase $B$ - $T$ per i Superconduttori di I tipo





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

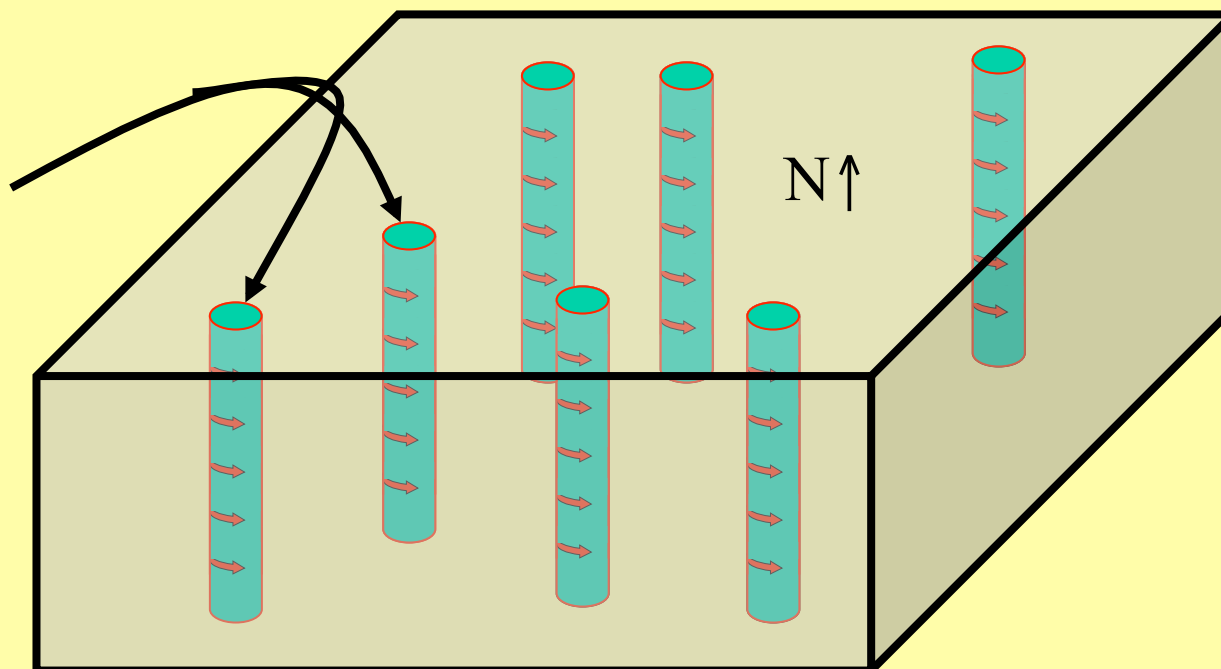




..... ora parliamo della 2<sup>a</sup> proprietà'

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

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

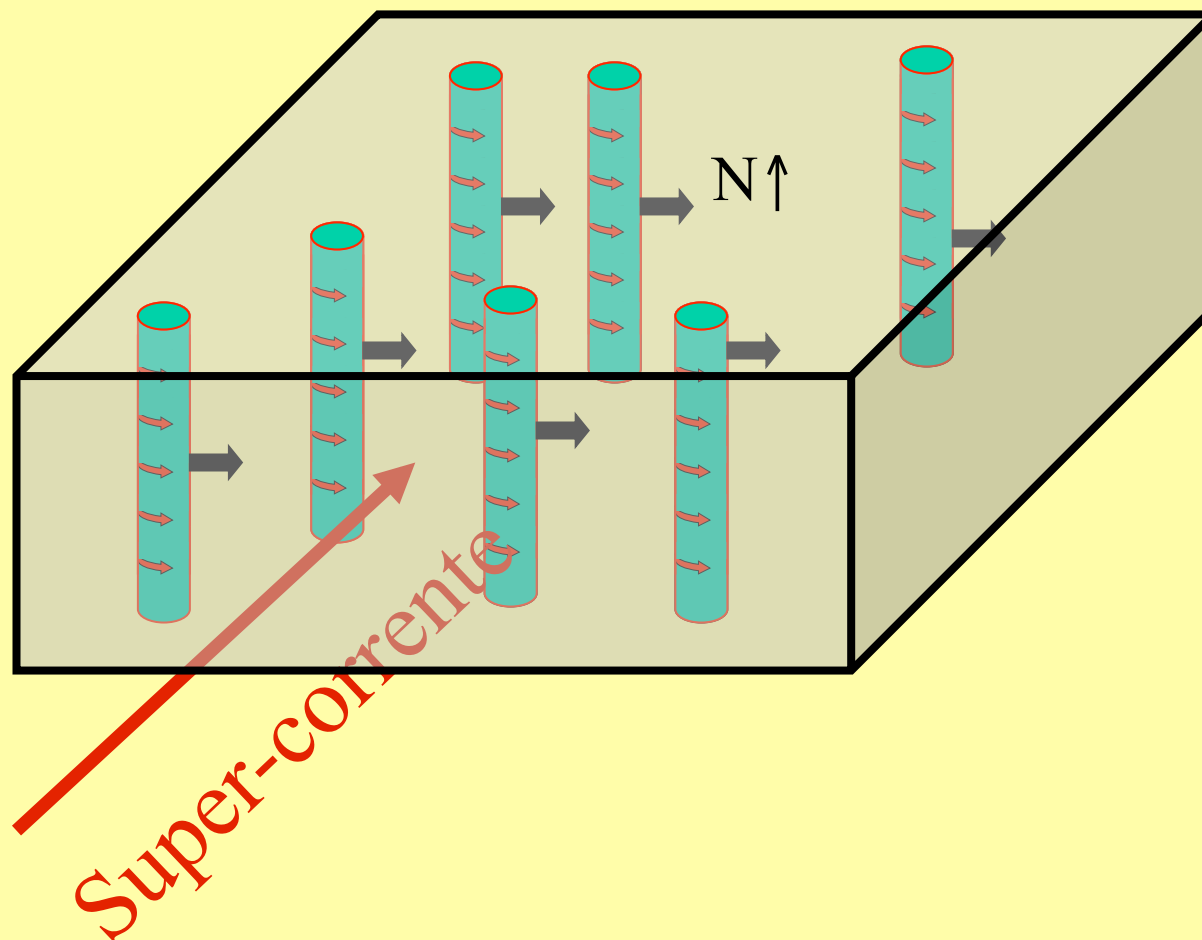


Come puo' avvenire questo moto?



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

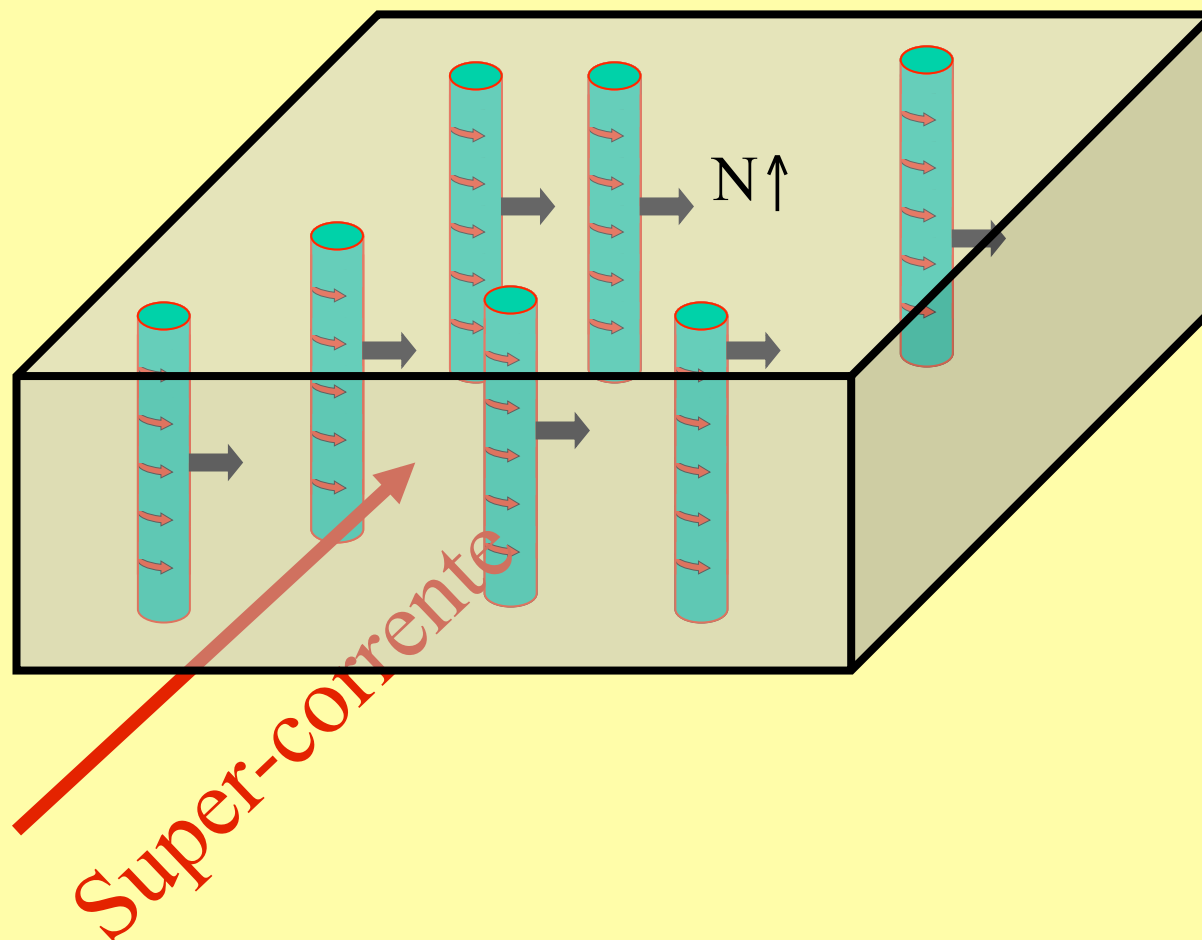
- L'applicazione di una super-corrente elettrica fa nascere una *forza* sui vortici magnetici





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

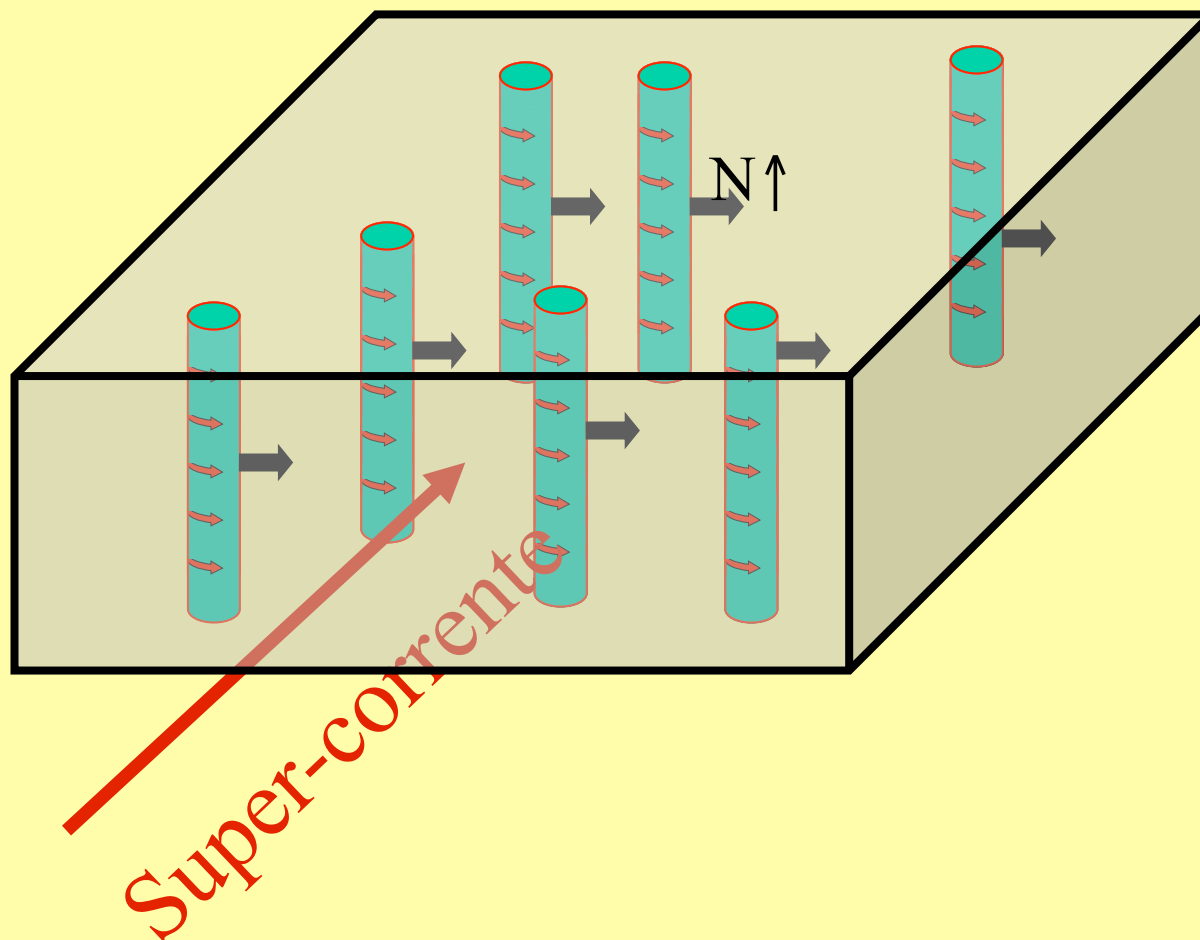
- ..e i vortici  
possono fluire  
con una frizione





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

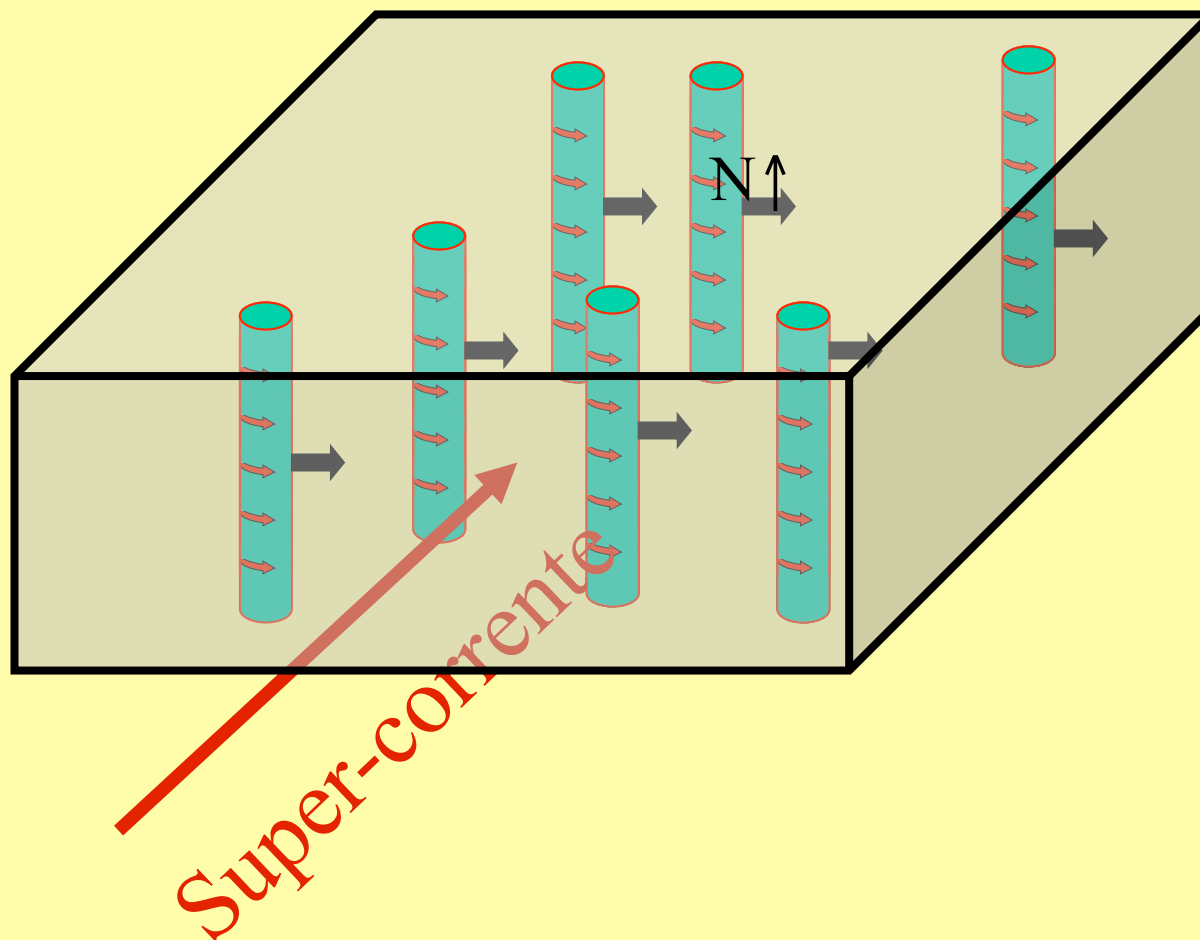
- ..e i vortici  
possono fluire  
con una frizione





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

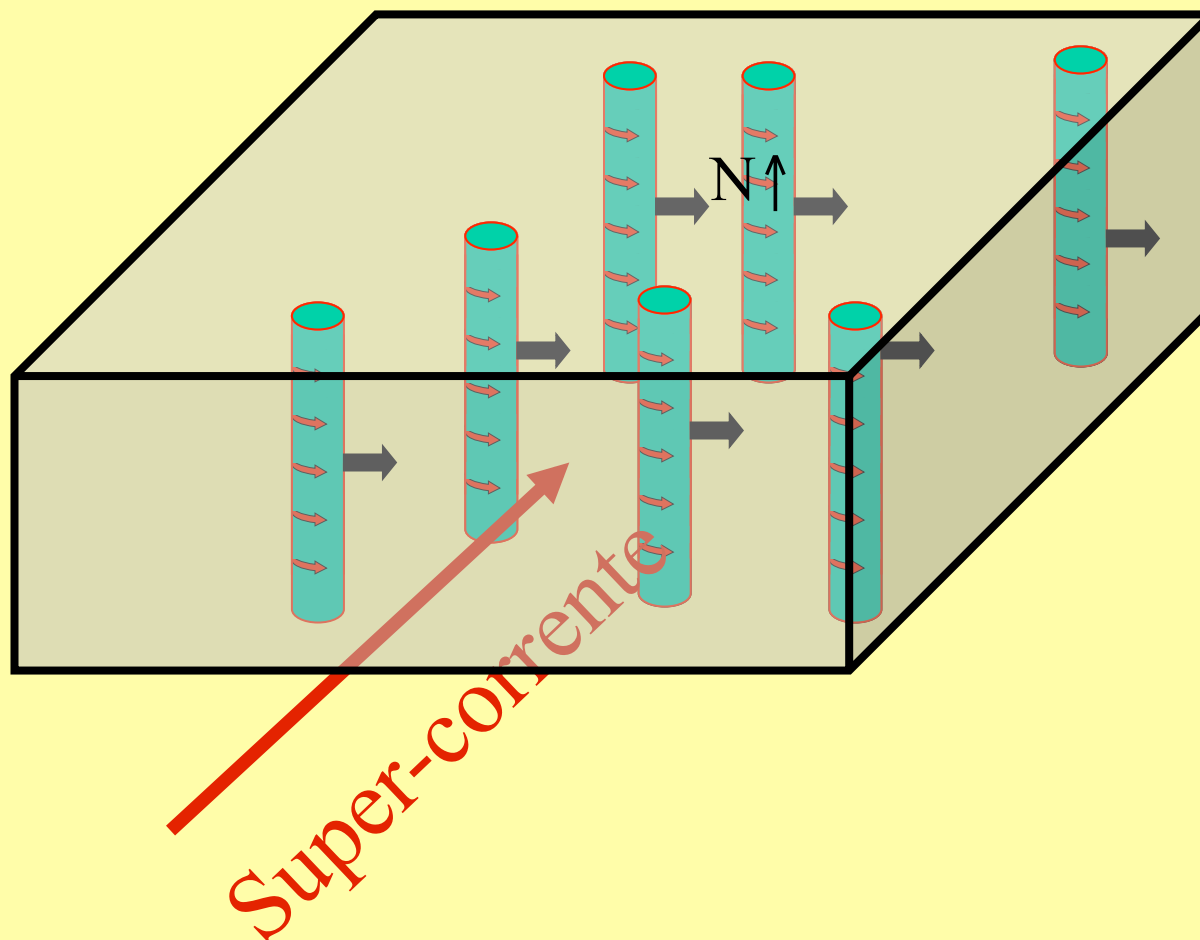
- ..e i vortici  
possono fluire  
con una frizione





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

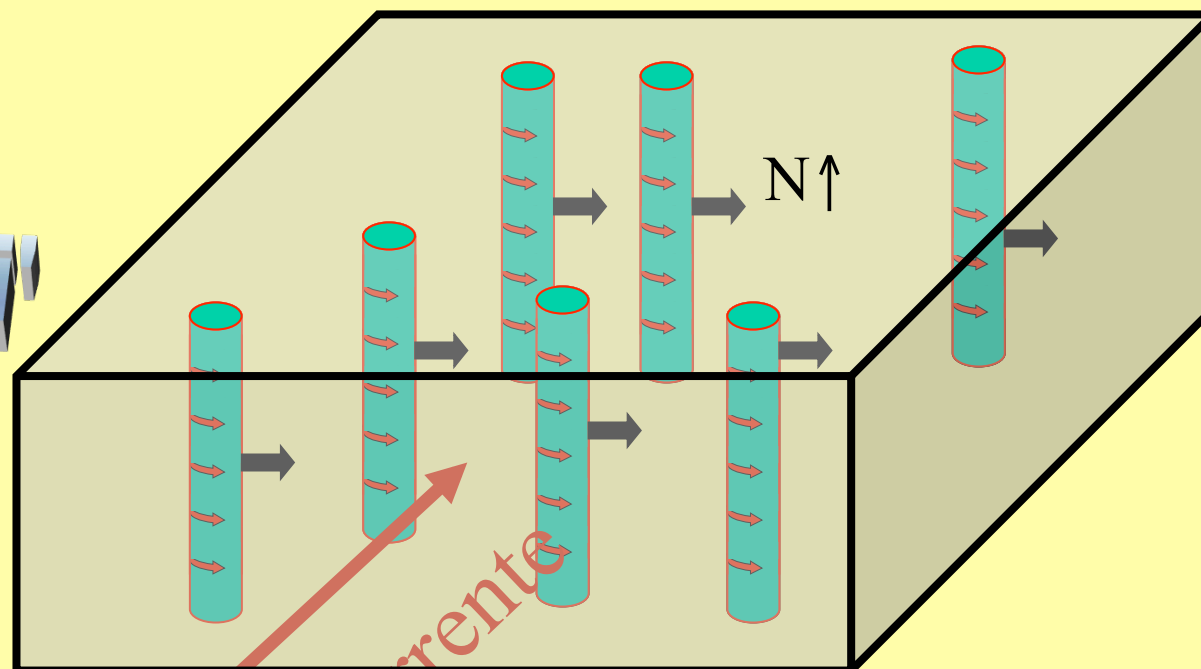
- ..e i vortici  
possono fluire  
con una frizione





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

**i '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***

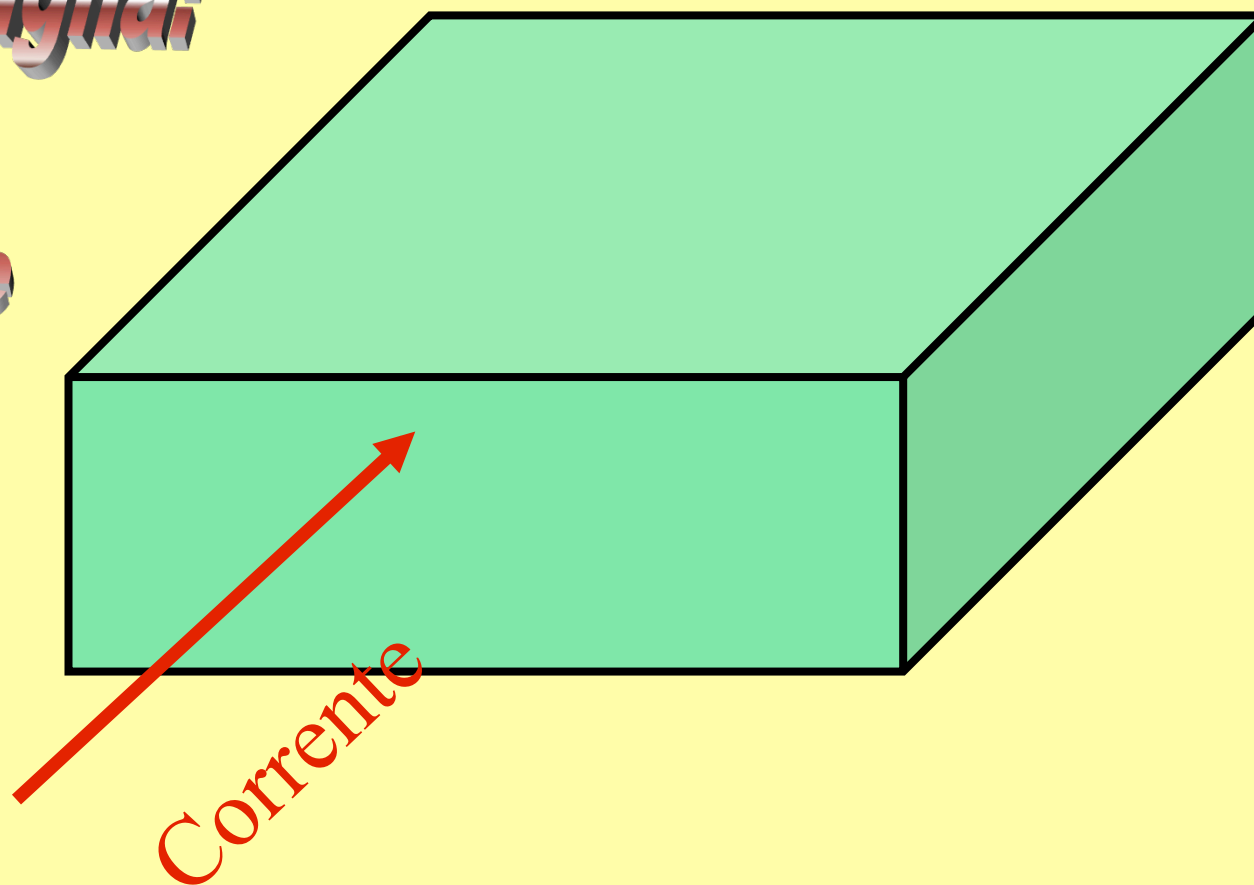
***super-corrente***

***fa transire***

***nello stato normale***

***il***

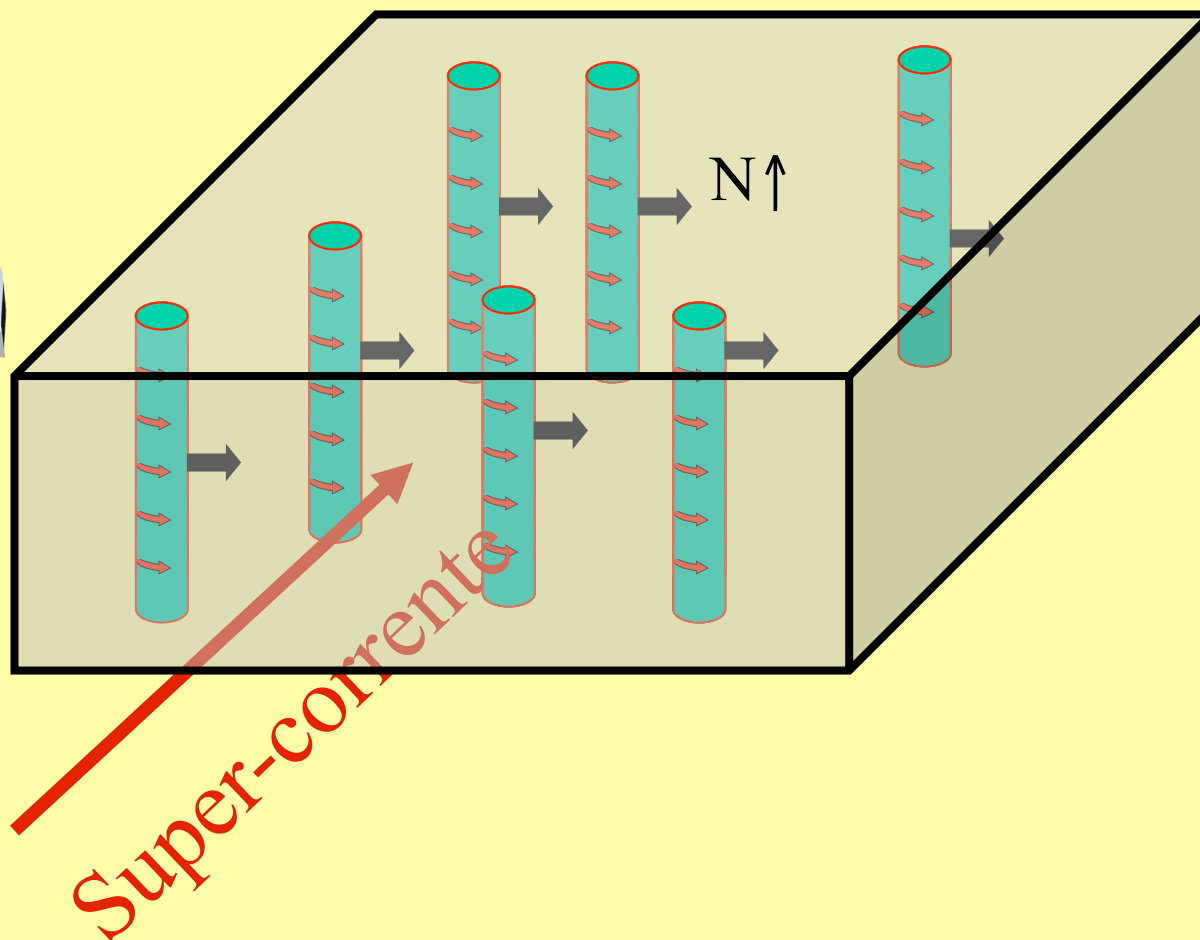
***superconduttore***





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

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



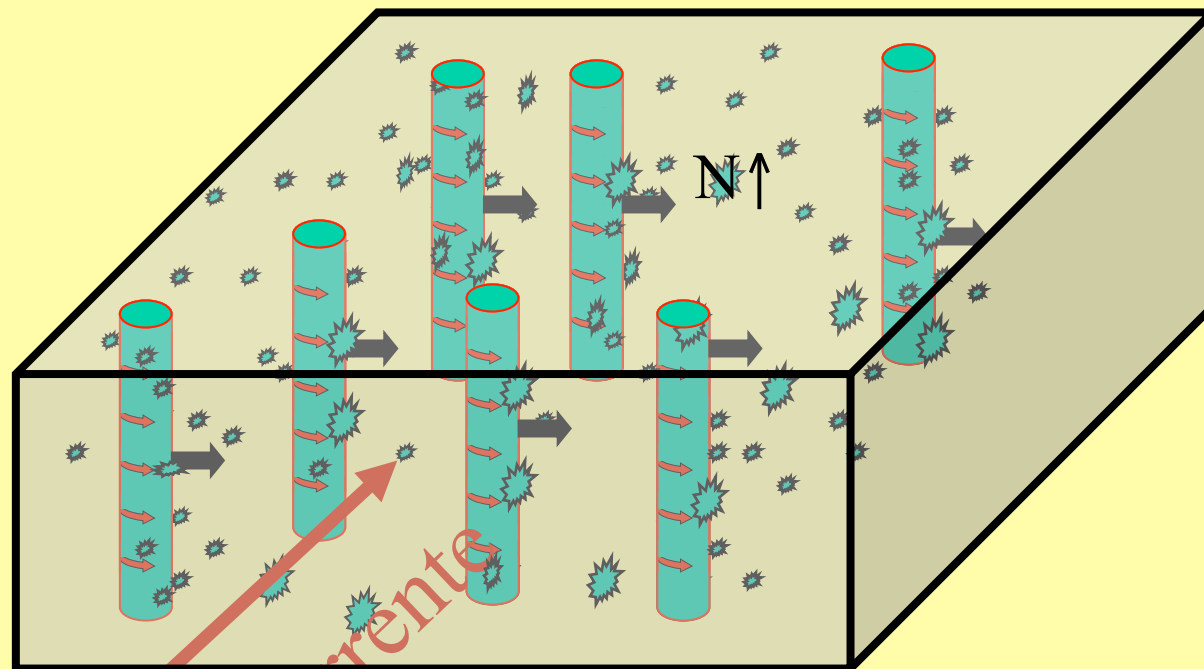


## 2. *I superconduttori II ~~non hanno~~ resistenza*

*possono avere*

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

*che succede?*

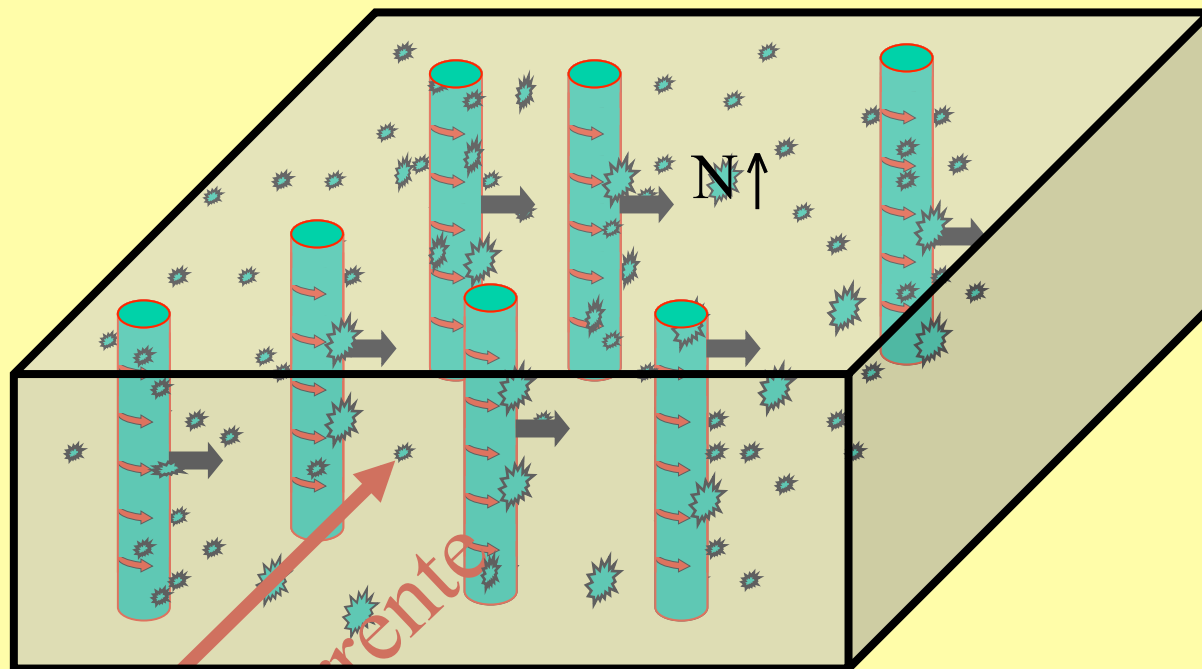
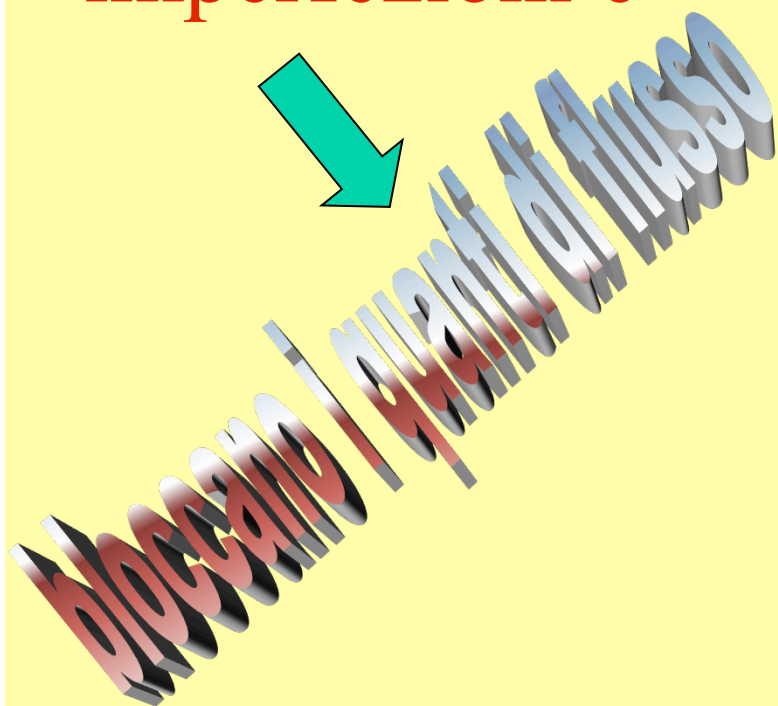


*Super-corrente*



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

- I quanti di flusso vanno sulle imperfezioni e

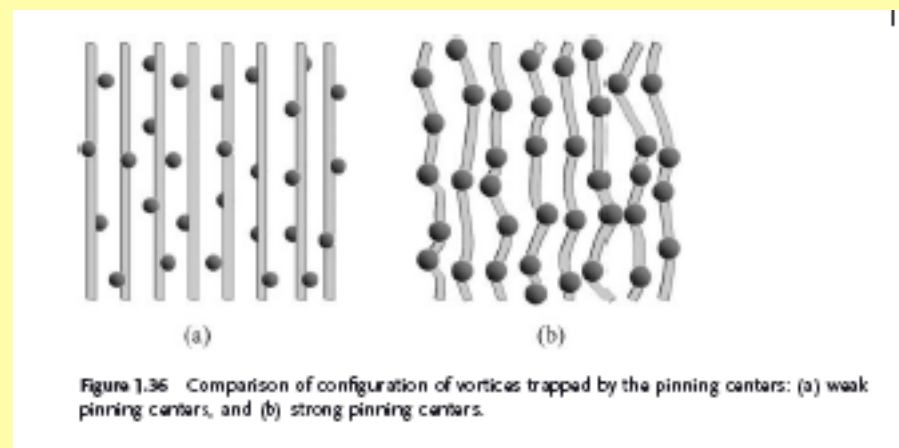
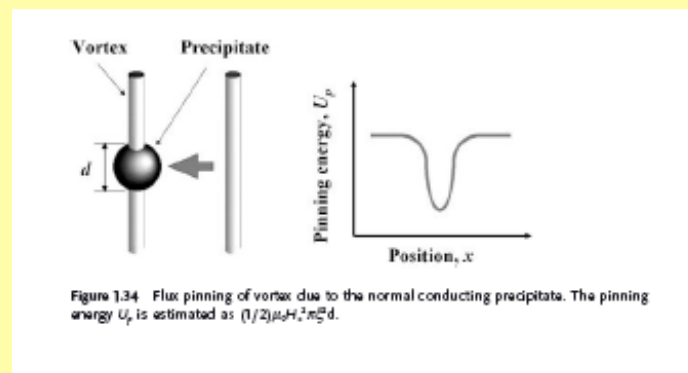
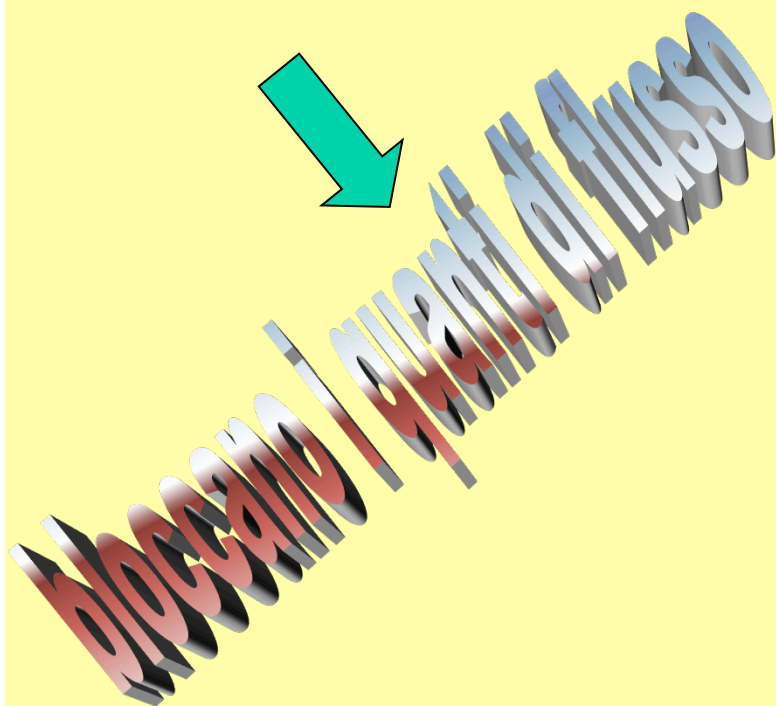


super-corrente



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

- I quanti di flusso vanno sulle imperfezioni e



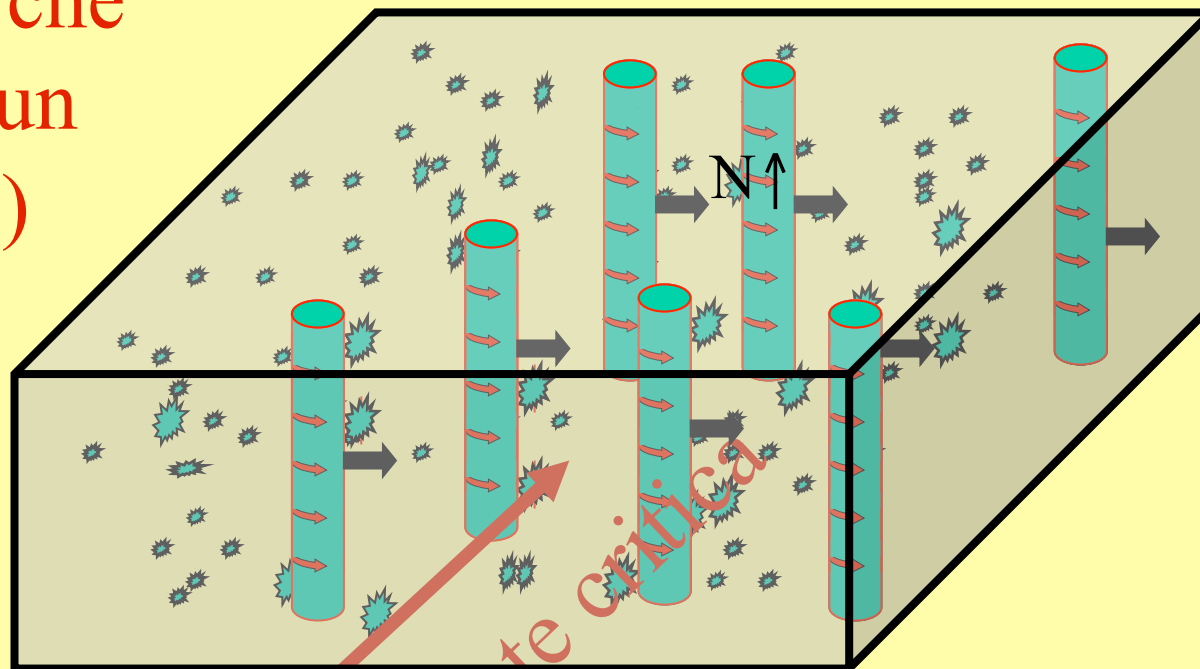


## 2. *I superconduttori II ~~non hanno~~ resistenza*

*possono avere*

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

↓  
I quanti di flusso  
corrono via



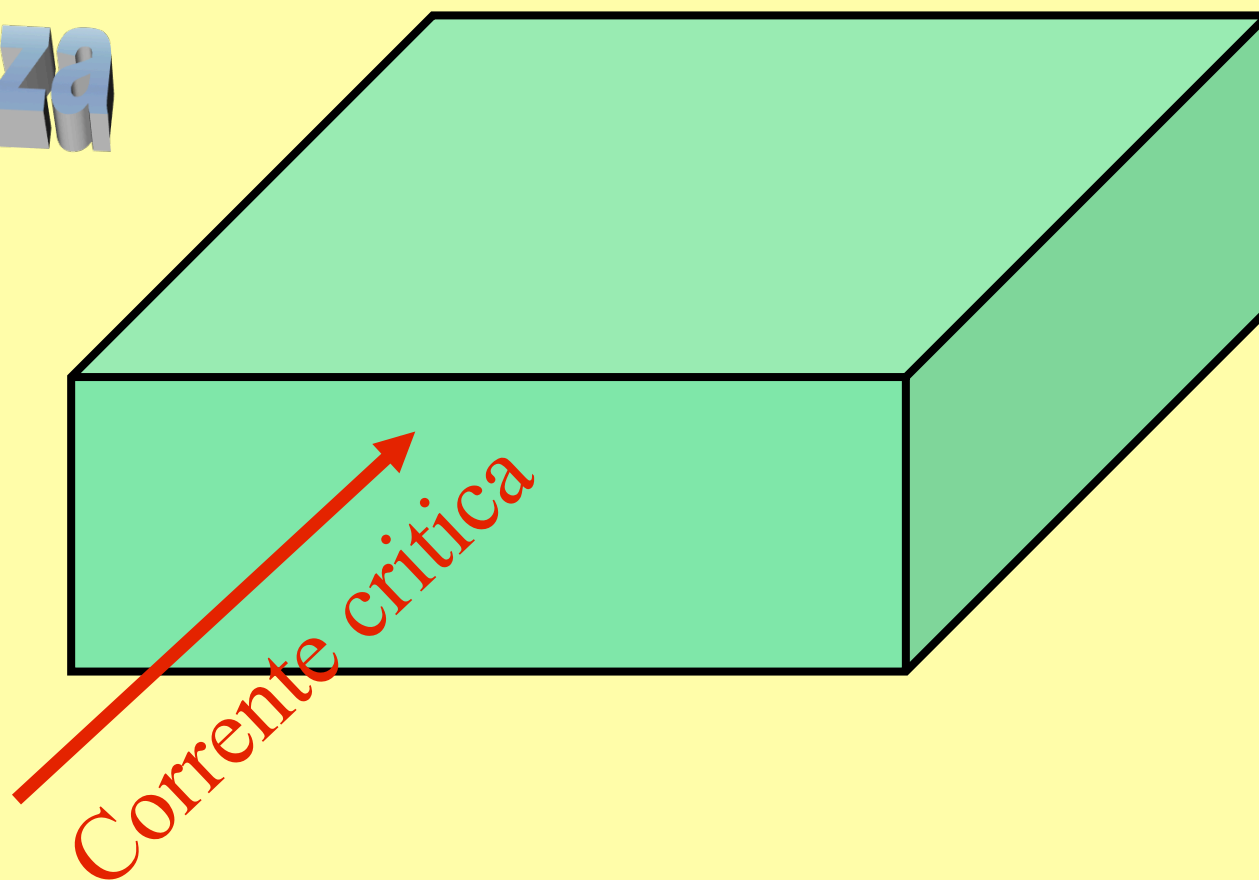
Super-corrente critica



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

*possono avere*

„e la sostanza  
transisce  
nello stato  
normale



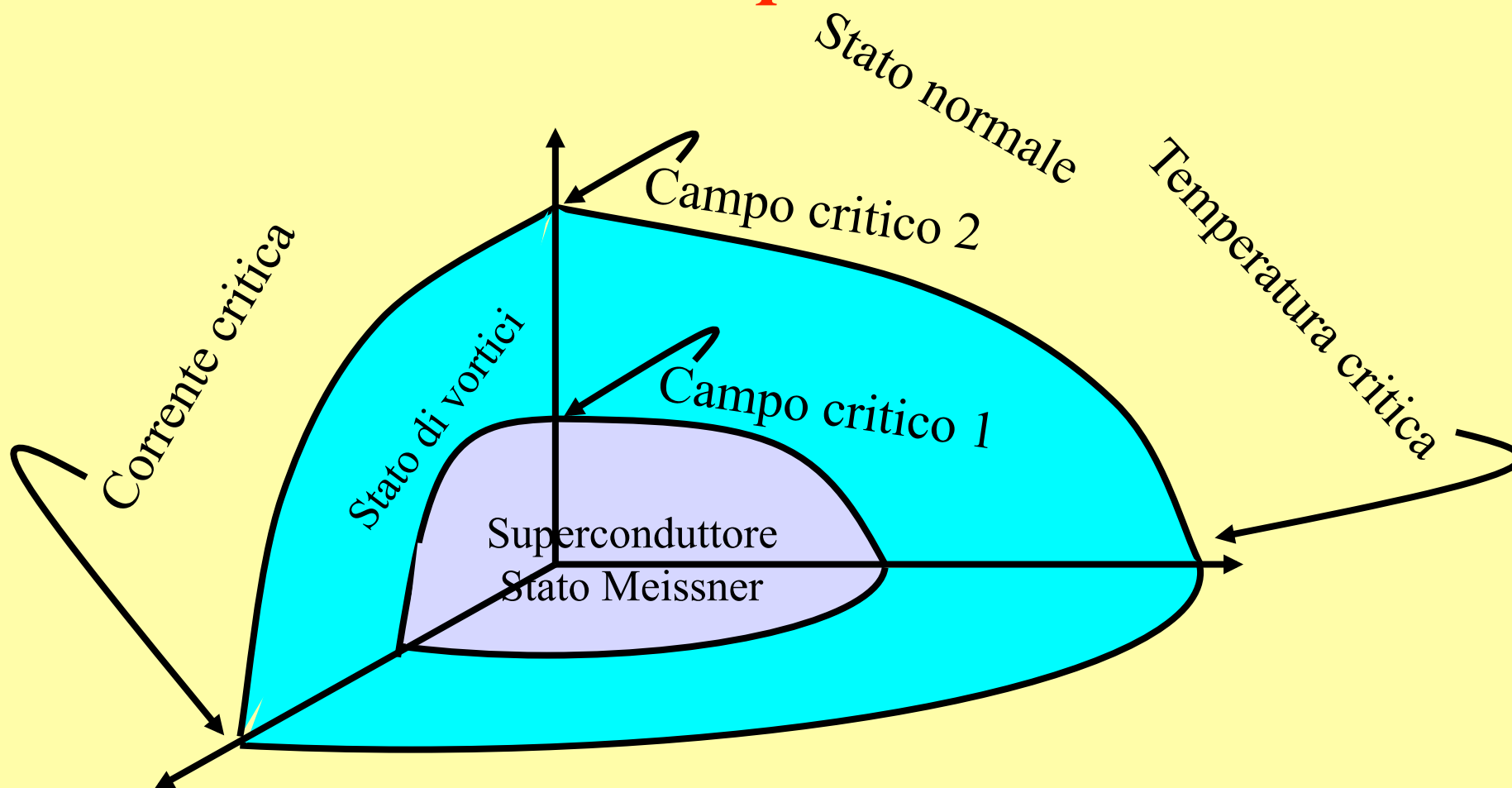


*Lo stato superconduttore e' individuato da tre parametri:*

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



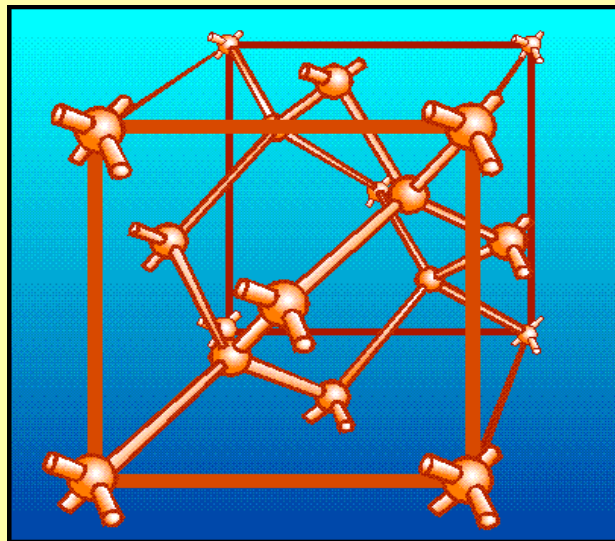
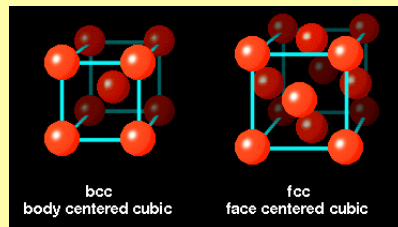
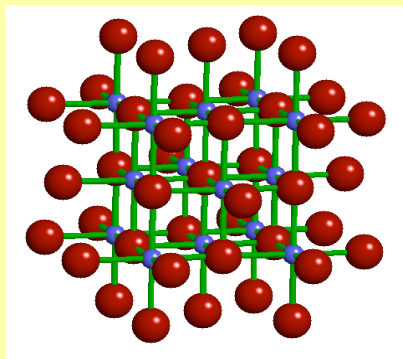
# Diagramma di fase $B$ - $T$ - $I$ per i Superconduttori di II tipo



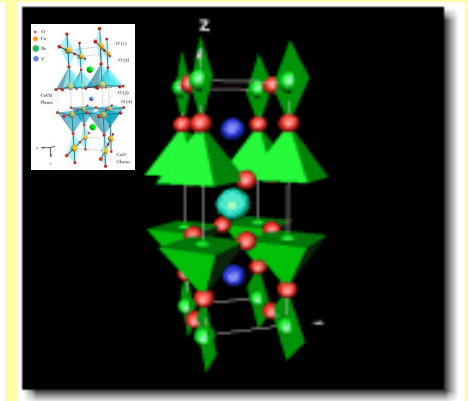
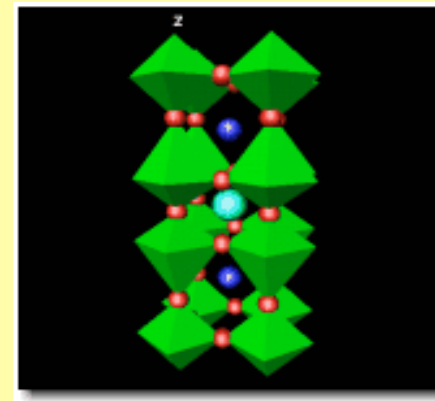
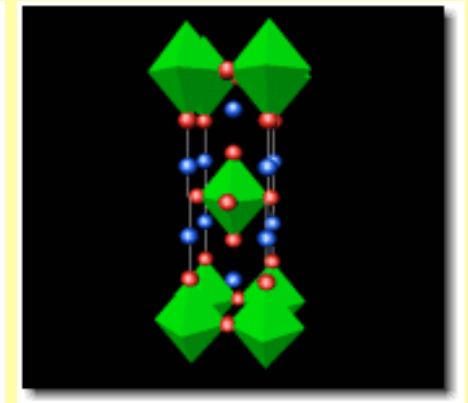
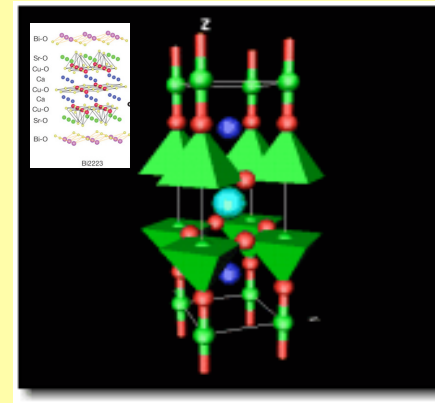


# Strutture chimiche dei superconduttori

metallici bassa  $T_c$   
Struttura 3-Dimensionale



Ceramici alta  $T_c$   
Struttura 2-dimensionale  
a strati





# *un facile esperimento*

**I filmato**

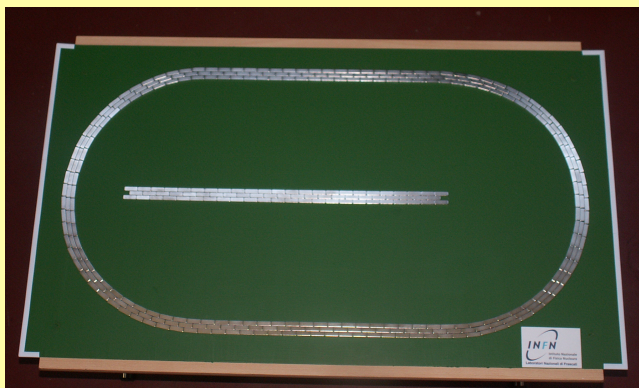


**II filmato**

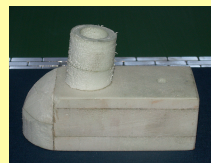




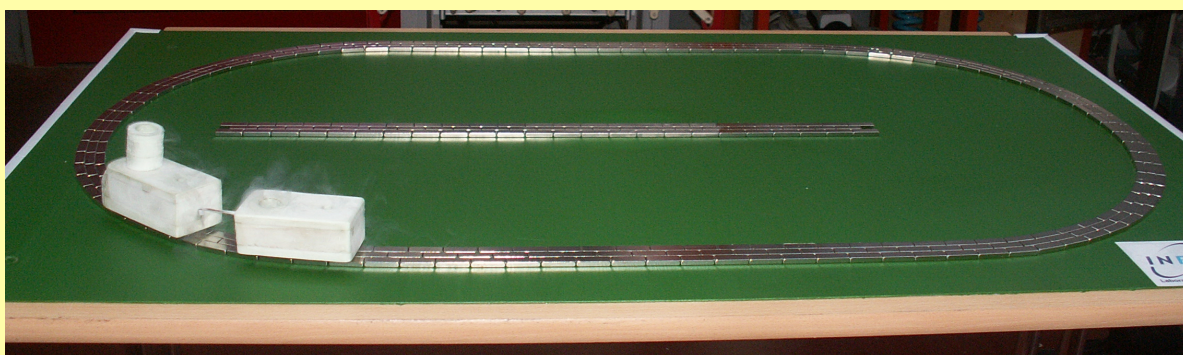
# *una applicazione tecnologica*



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



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





# 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).

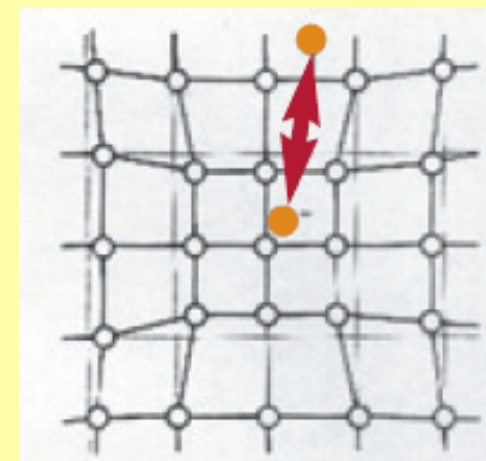
Teorie precedenti: Modello a due fluidi (London, Gorter e Casimir) e primo modello quantistico di Ginzburg-Landau



# 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  $10^8 \text{ cm/sec}$  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.....



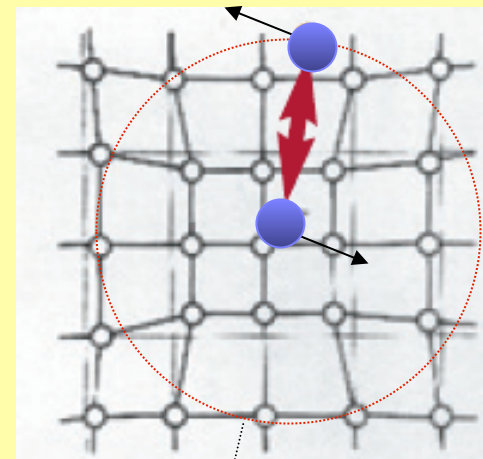
# un po' di teoria..... -BCS-

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

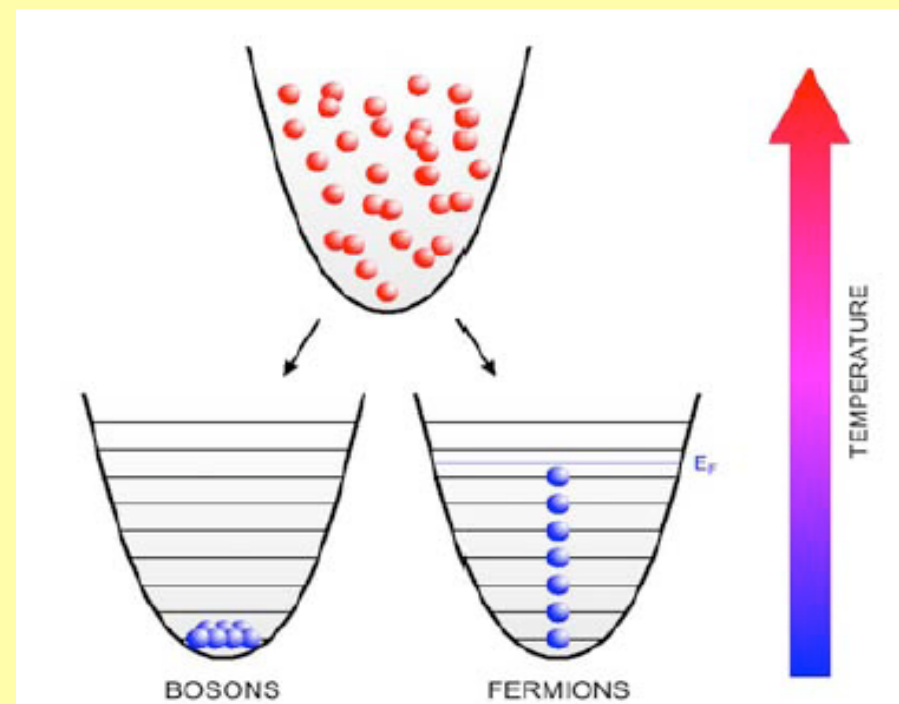
volume di coerenza



# 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 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

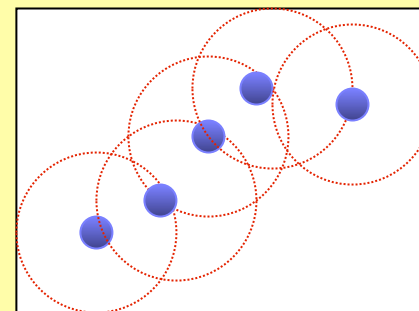
**Dimostriamo che tutto il materiale e' in uno stato superconduttore:**

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/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 unita' di volume o peso o massa,  
chiamata anche intensita' di magnetizzazione

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

ma attenzione

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

H= campo magnetico applicato

[Ampere/metro MKS]

1A/m= 4 $\pi$ x10<sup>-3</sup> Oe [Oested=Gauss CGS]

$\mu_0$ = 4 $\pi$ x10<sup>-7</sup> H/m permiabilita' magnetica

del vuoto MKS .....ma attenzione':  $\mu_0$ = 4 $\pi$  [Gauss CGS]

$\chi$ = suscettivita' magnetica

**MKS e CGS**

Correlazione fra B,M,H

In MKS

$$B= M+\mu_0 H$$

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

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

In Gauss CGS

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

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

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





## 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"



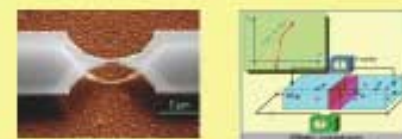
### Bardeen, Cooper and Schrieffer (1972)

"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 quel 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"



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

$$\xi = \sqrt{\frac{\hbar^2}{4m|\alpha|}}, \quad \lambda = \sqrt{\frac{m}{4\mu_0 e^2 \psi_0^2}}$$

