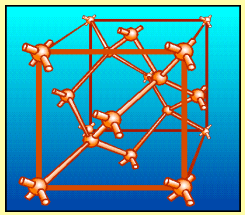
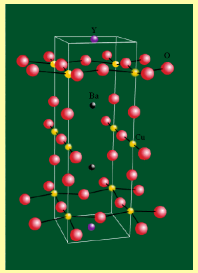
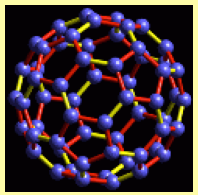
Il fenomeno della Superconduttivita'

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

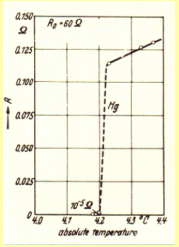


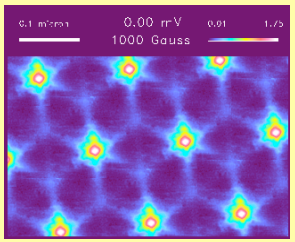


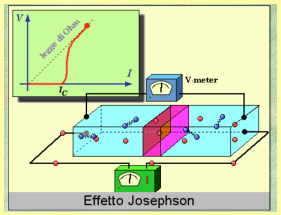


La Superconduttivita' e' uno stato della materia con eccezionali proprieta' elettriche e magnetiche. Evidenzia un comportamento della fisica quantistica nei solidi. E' uno dei rarissimi effetti quantistici macroscopici.

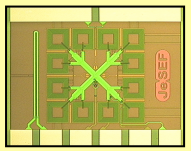
Fu scoperto da Onnes nel 1911



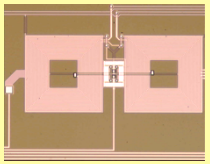




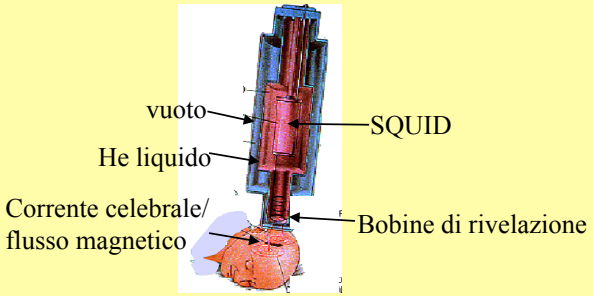
Treni veloci a levitazione magnetica



Giunzione Josephson



SQUID



Analisi biomagnetiche con SQUID

Potenti Magneti per MNR

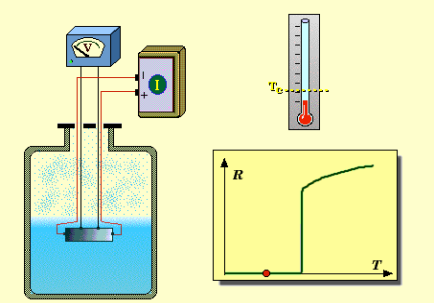
Come si caratterizza?

1. La superconduttivita e' un fenomeno che accade a bassa temperatura :

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

Come si caratterizza?

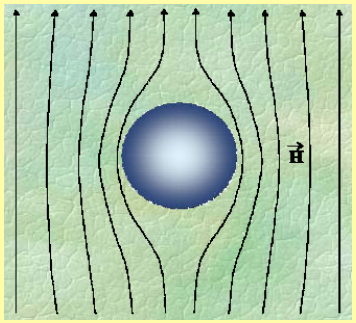
2. E' una fase della materia dove la elettricita' fluisce <u>senza resistenza:</u>



Metodo di misura della resistenza elettrica

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

Come si caratterizza?



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

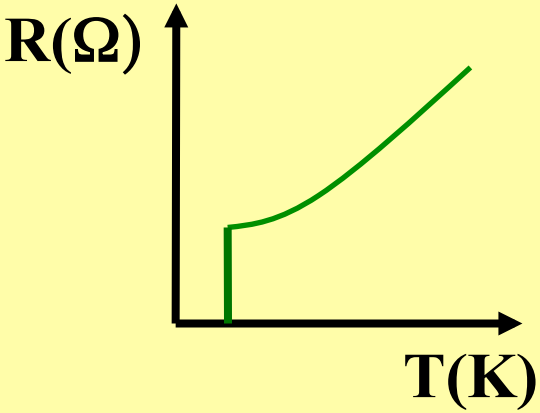
3. Il campo magnetico e' espulso: diamagnetismo perfetto (effetto Meissner).

✓Esiste un valore critico del campo magnetico ($\mathbf{B_c}$) sopra il quale il materiale torna normale

Osserviamo queste proprieta' piu' da vicino

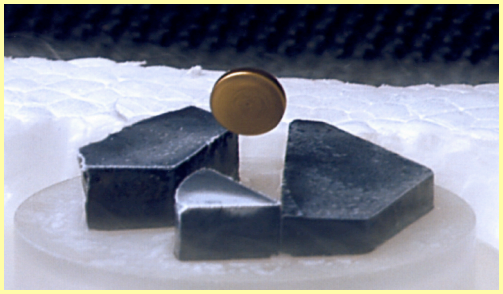
1. La superconduttivita e' un fenomeno a bassa temperatura

forse non e' proprio cosi' . . .



2. I superconduttori sono una fase della materia dove la elettricita fluisce <u>senza resistenza</u>

. . . in certi casi non e' cosi' esatto

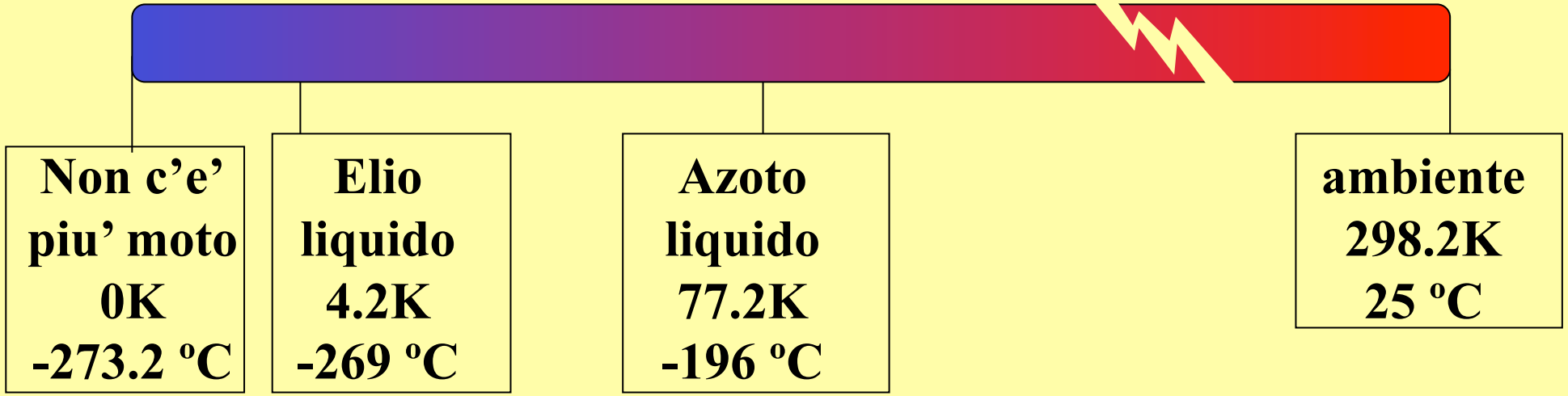


3. Superconduttori in presenza di un campo magnetico lo espellono completamente

Talvolta (effetto Meissner)

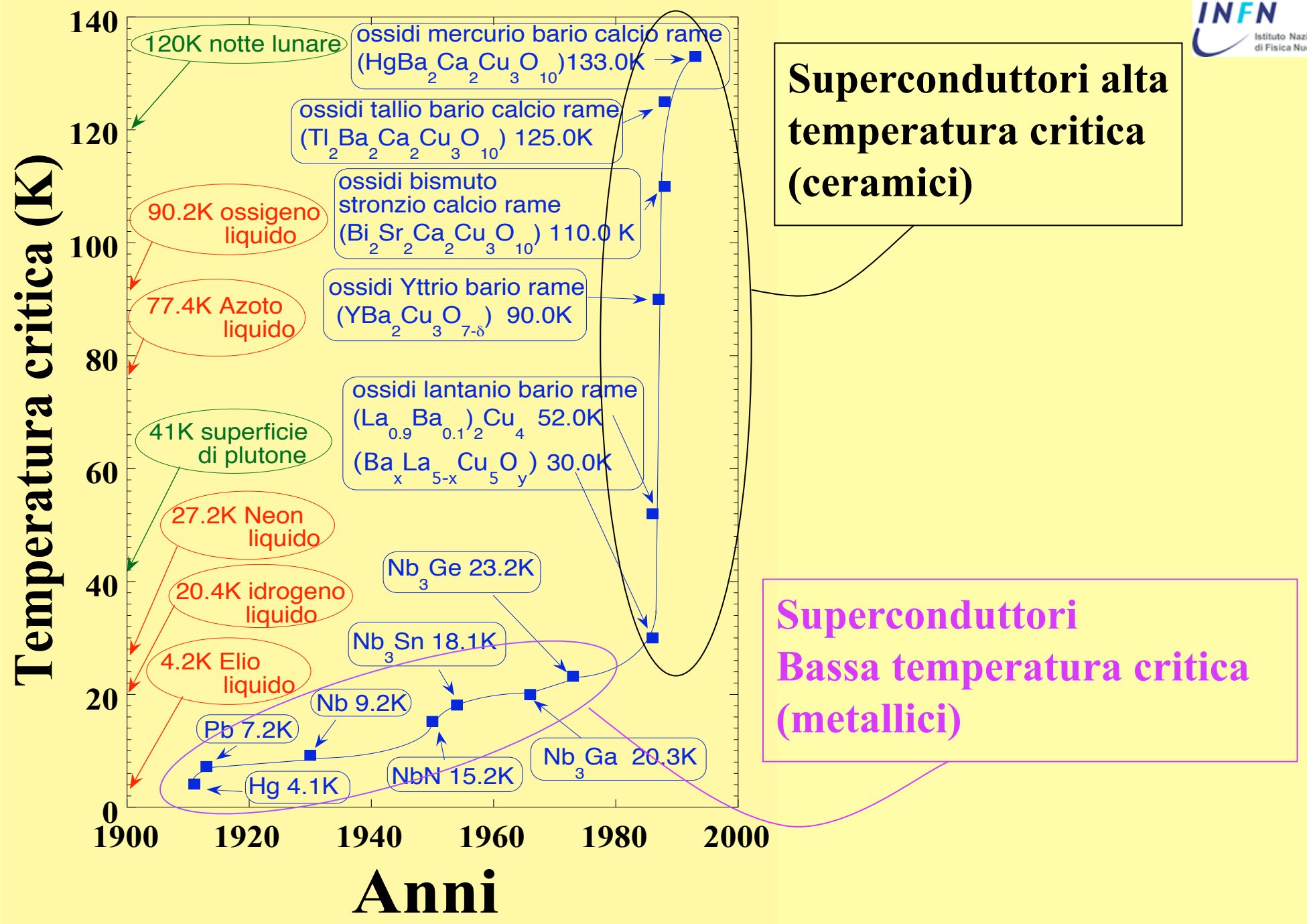
1. La superconduttivita' accade a bassa temperatura

una relativamente



Superconduttori "normali" ~ 0 – 23K

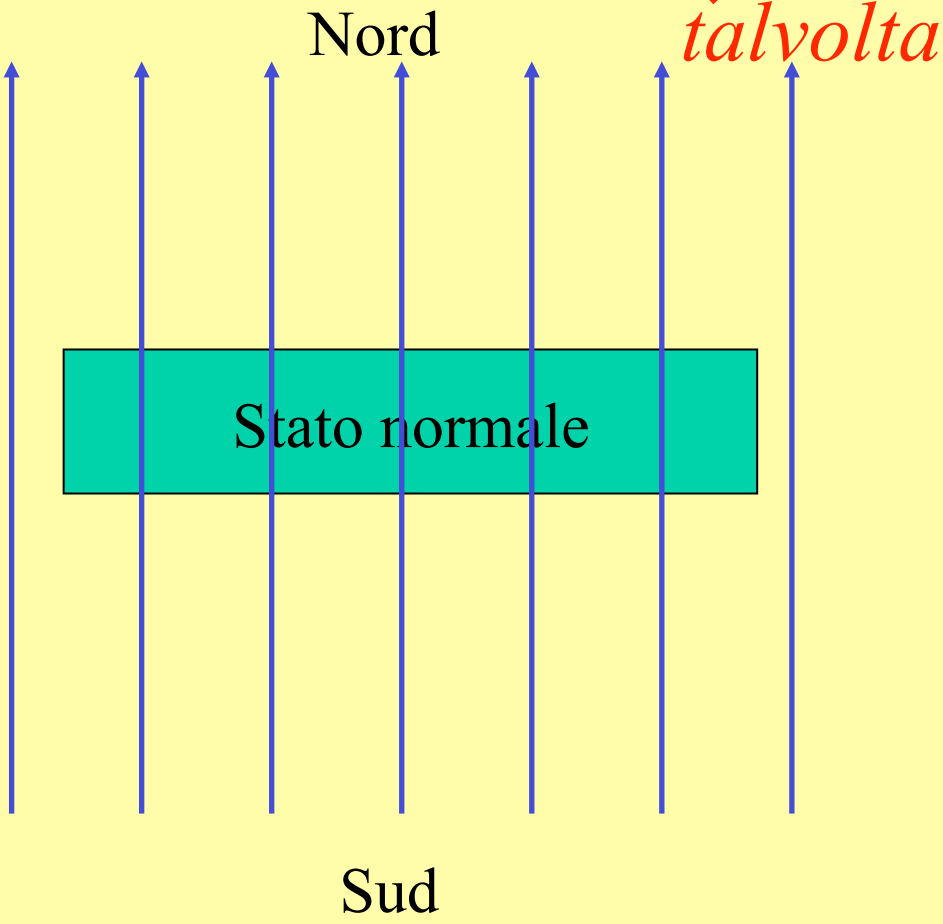
Superconduttori ad alta temperatura critica 30 – 138 K


Temperatura critica (K)
Anni
140
120
100
80
60
40
20
0
1900
1920
1940
1960
1980
2000
120K notte lunare
ossidi mercurio bario calcio rame
(HgBa2Ca2Cu3O10)133.0K
ossidi tallio bario calcio rame
(Tl2Ba2Ca2Cu3O10) 125.0K
90.2K ossigeno liquido
ossidi bismuto stronzio calcio rame
(Bi2Sr2Ca2Cu3O10) 110.0 K
77.4K Azoto liquido
ossidi Yttrio bario rame
(YBa2Cu3O7-δ) 90.0K
ossidi lantanio bario rame
(La0.9Ba0.1)2Cu4 52.0K
(BaxLa5-xCu5Oy) 30.0K
41K superficie di plutone
27.2K Neon liquido
Nb3Ge 23.2K
20.4K idrogeno liquido
Nb3Sn 18.1K
4.2K Elio liquido
Nb 9.2K
Pb 7.2K
Nb3Ga 20.3K
NbN 15.2K
Hg 4.1K
Superconduttori alta temperatura critica (ceramici)
Superconduttori Bassa temperatura critica (metallici)

…….parliamo ora della 3ª proprieta’ (prima della 2ª seconda)

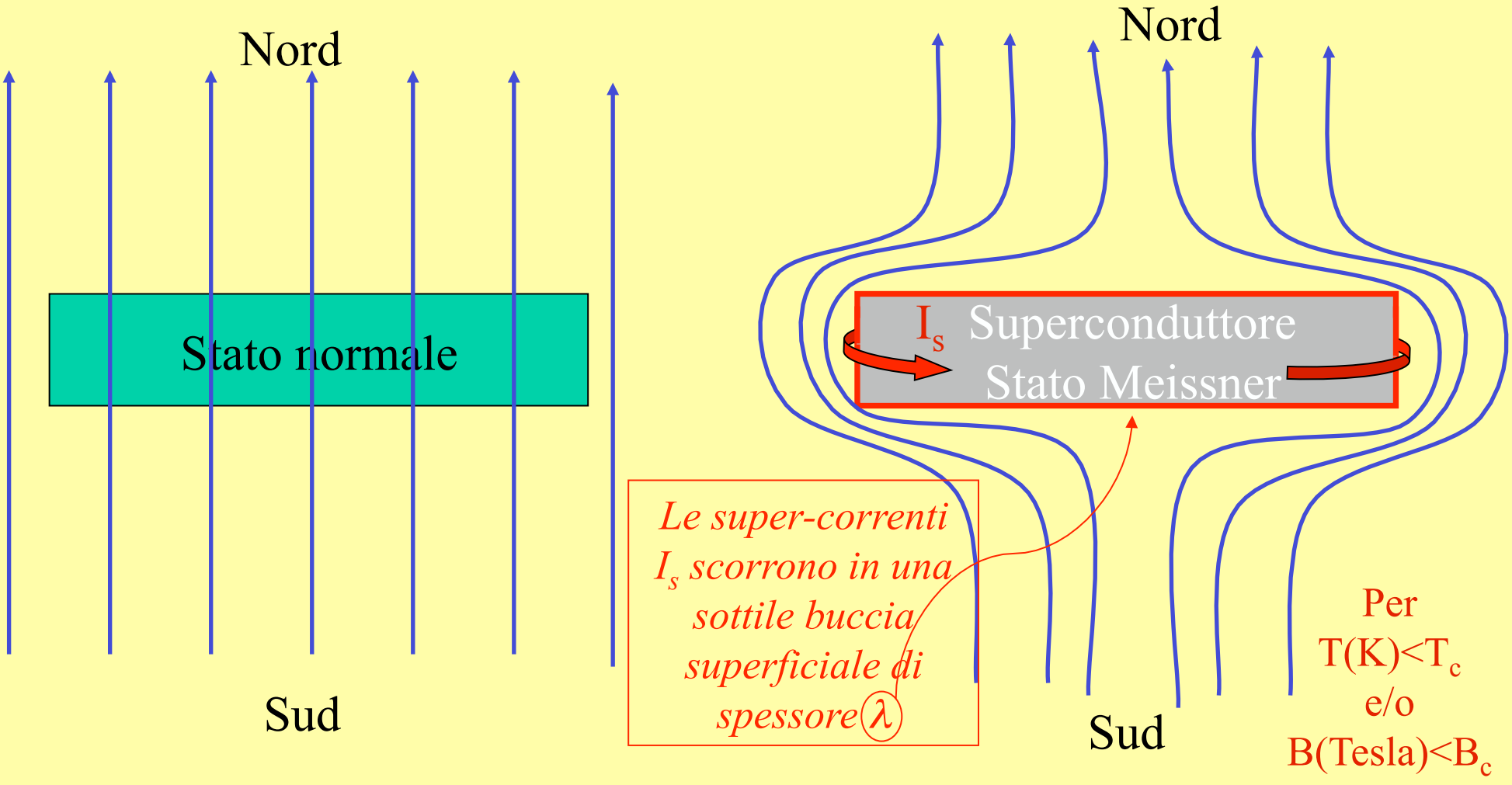
3. I Superconduttori espellono il campo magnetico

talvolta



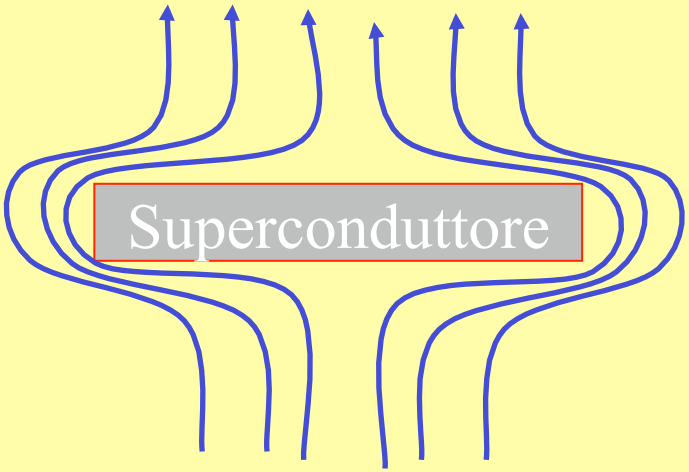
talvolta

3. I Superconduttori espellono il campo magnetico



talvolta

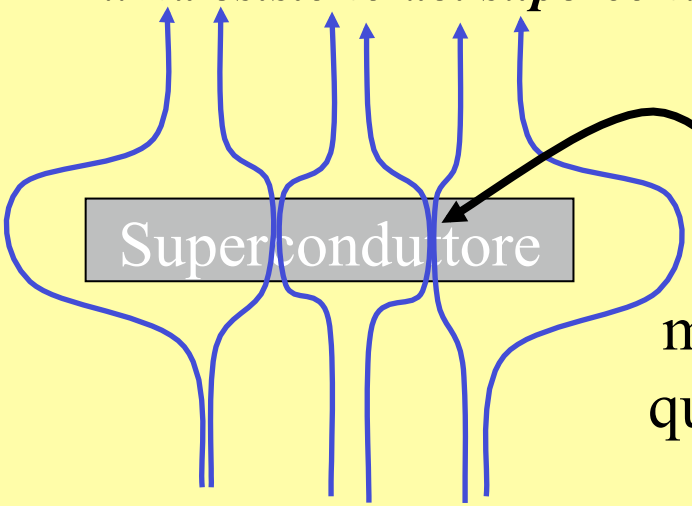
3. I Superconduttori espellono il campo magnetico



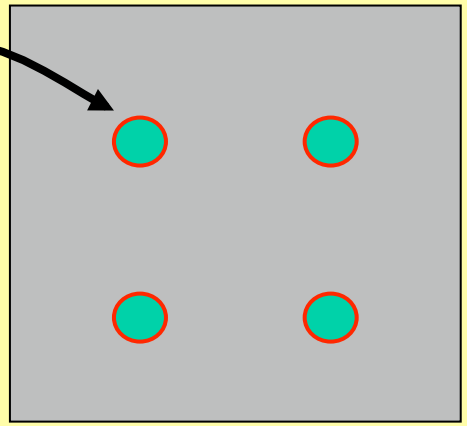
Vista dall'alto

Superconduttori di tipo I

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

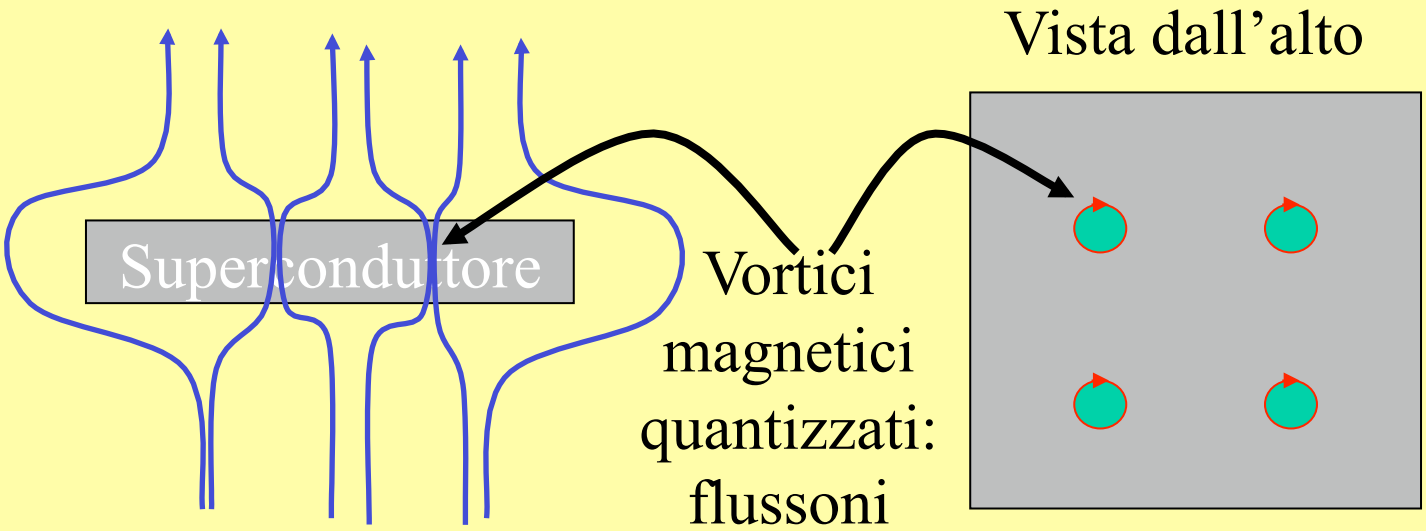


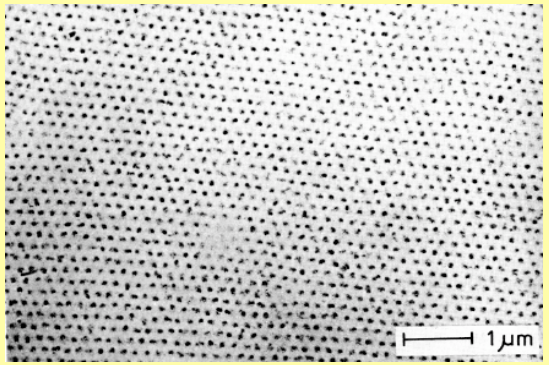
Vortici magnetici quantizzati



Superconduttori di tipo II

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





Reticolo di vortici in Niobio
U.Essmann (1967)

I flussoni consistono:

- **in un nucleo di materiale <u>normale</u> 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

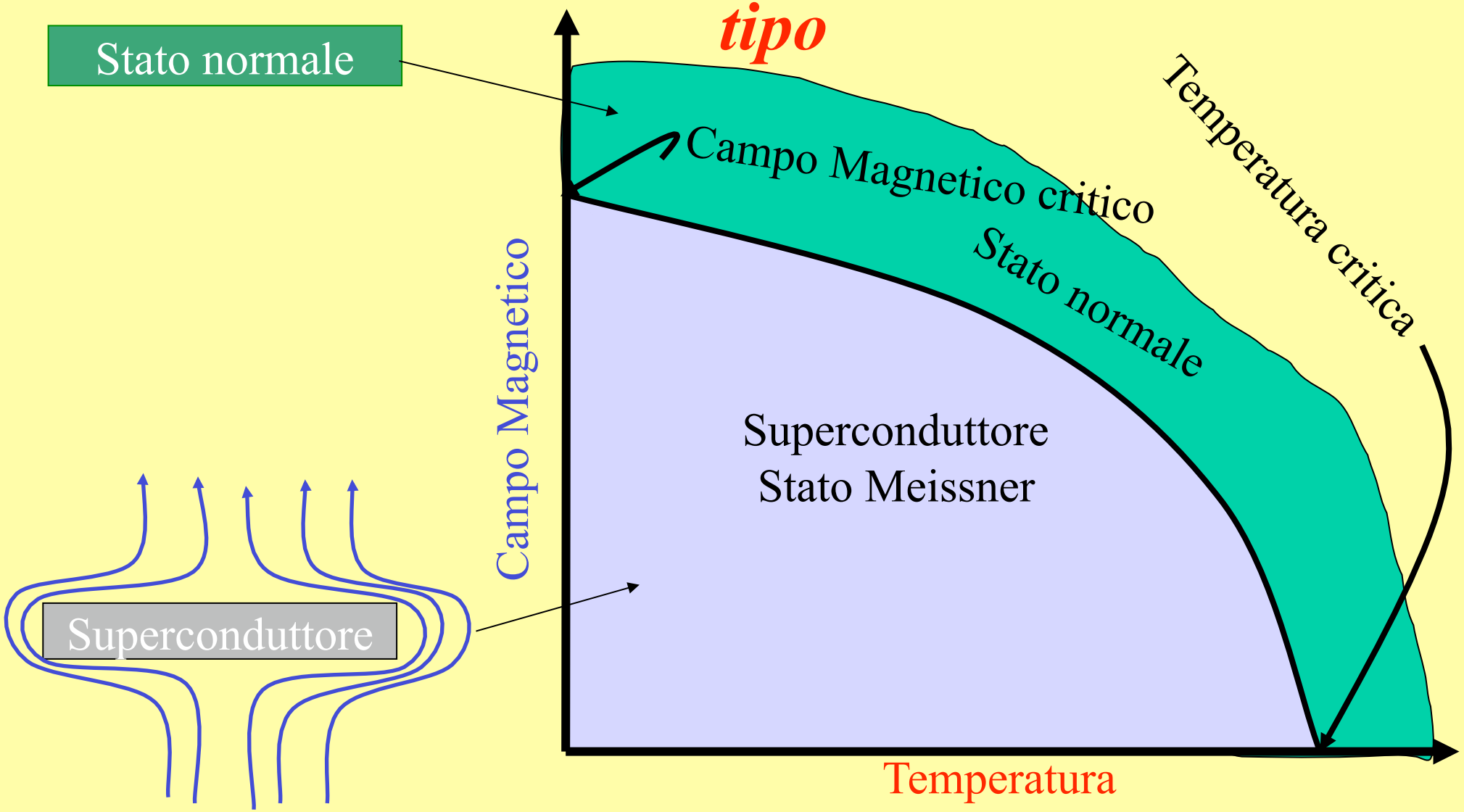
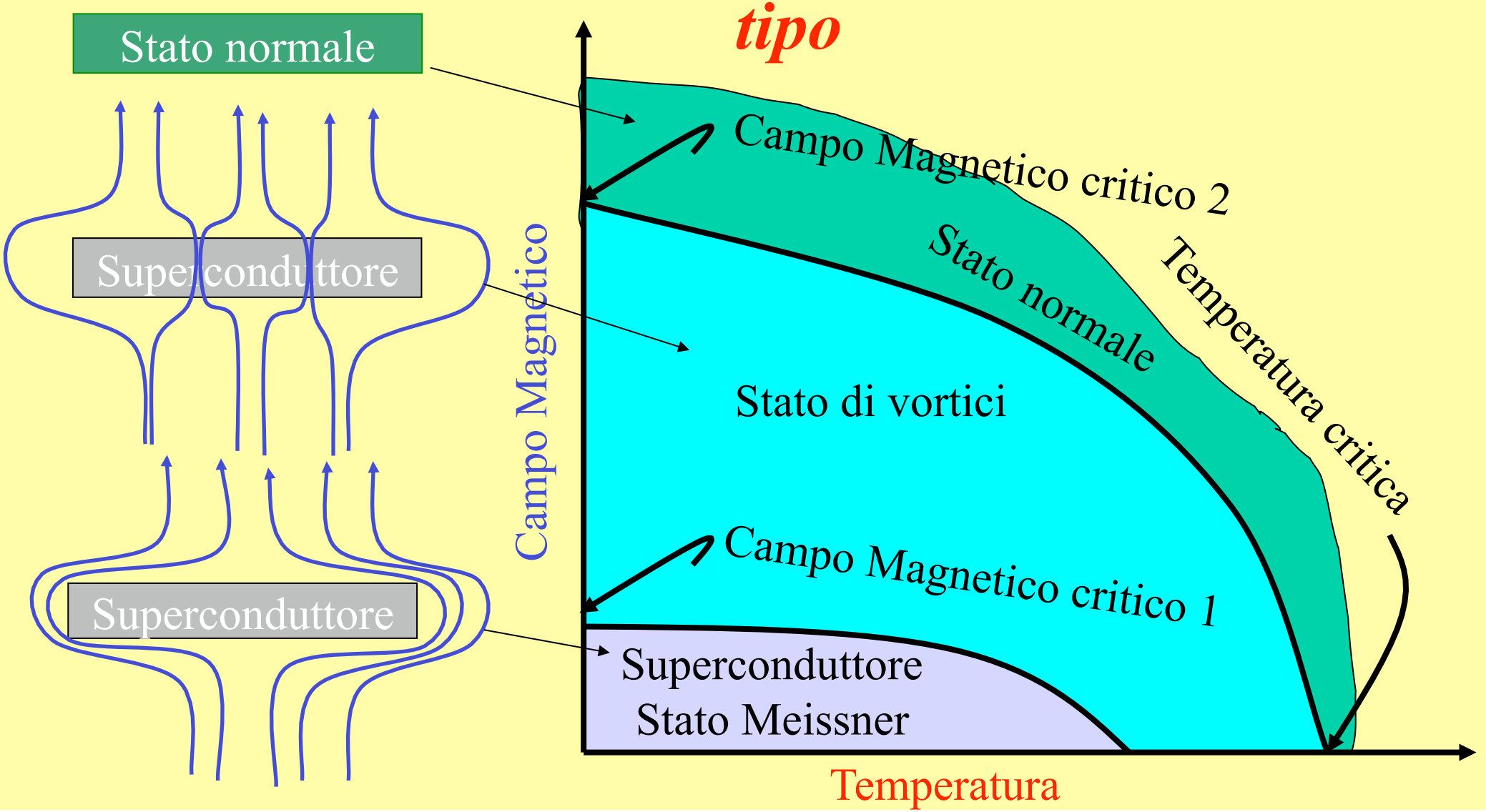


Diagramma di fase B-T per i Superconduttori di II tipo

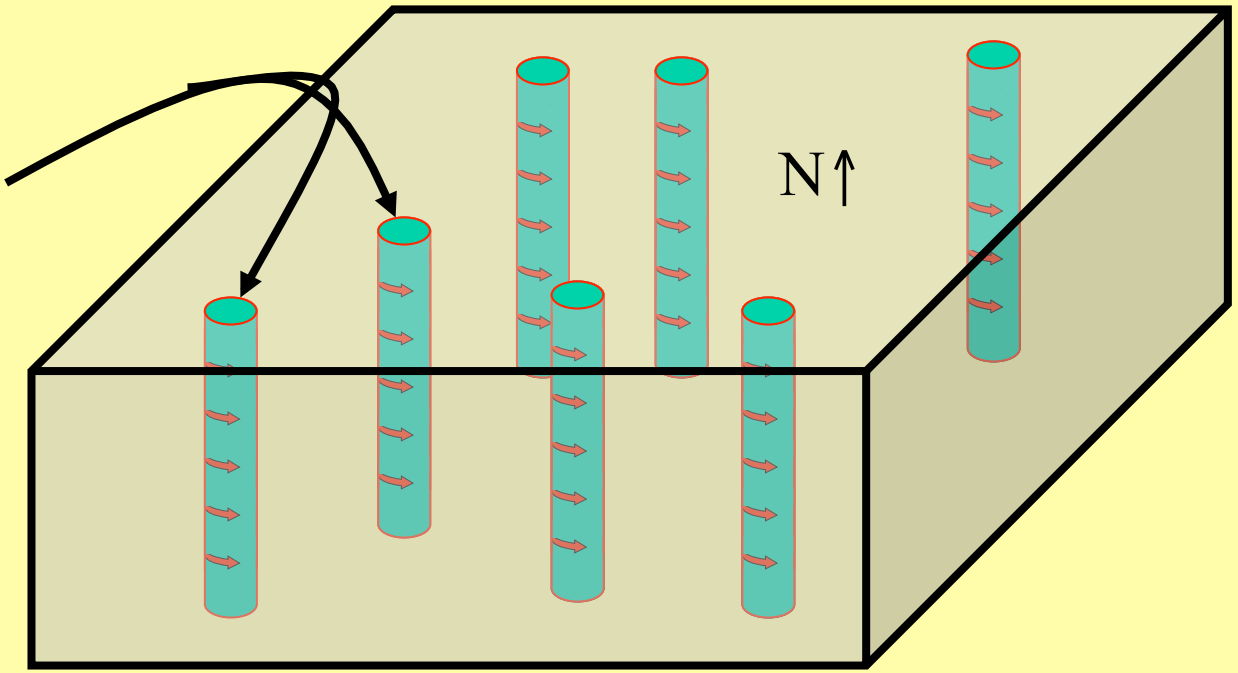


……. ora parliamo della 2ª proprieta’

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

possono avere

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

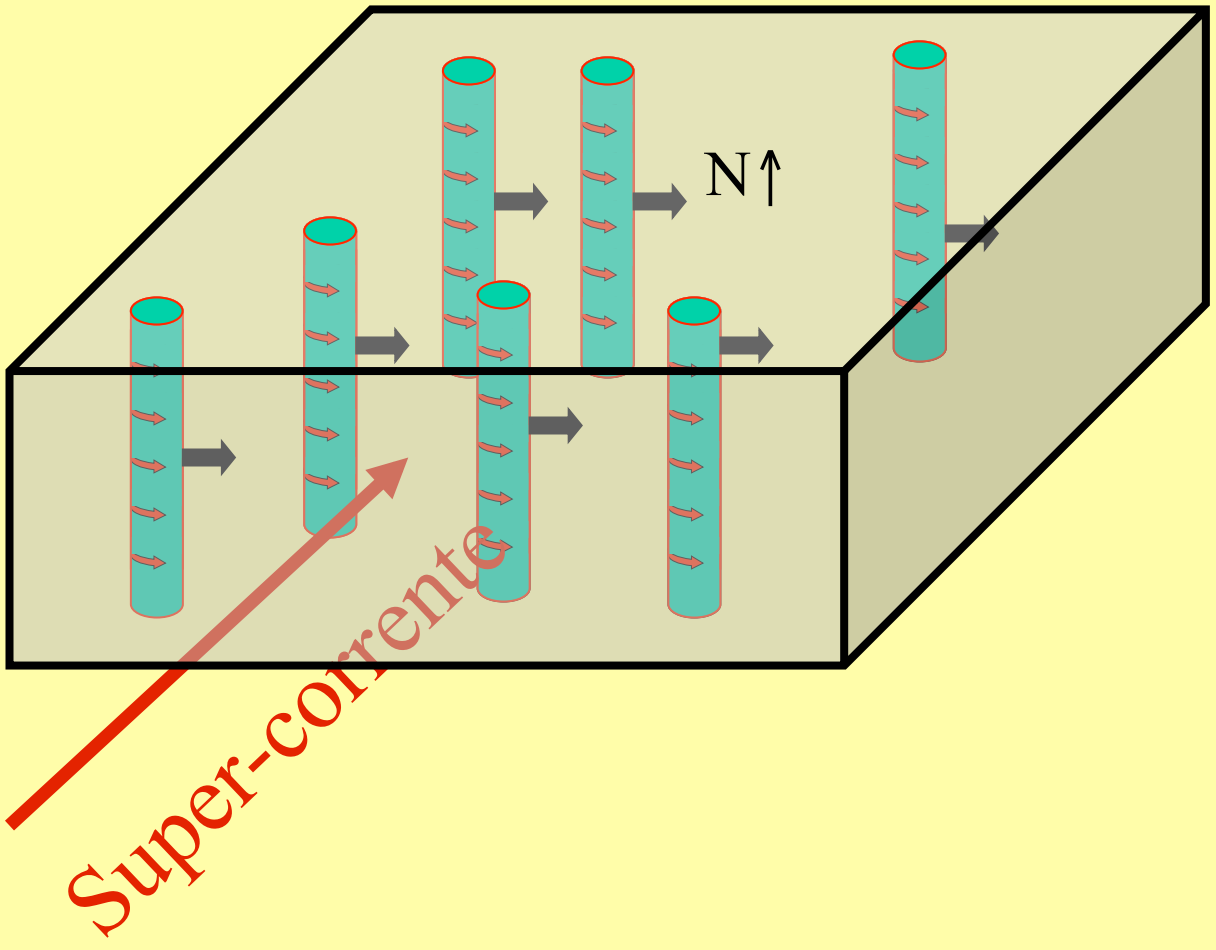


Come puo’ avvenire questo moto?

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

possono avere

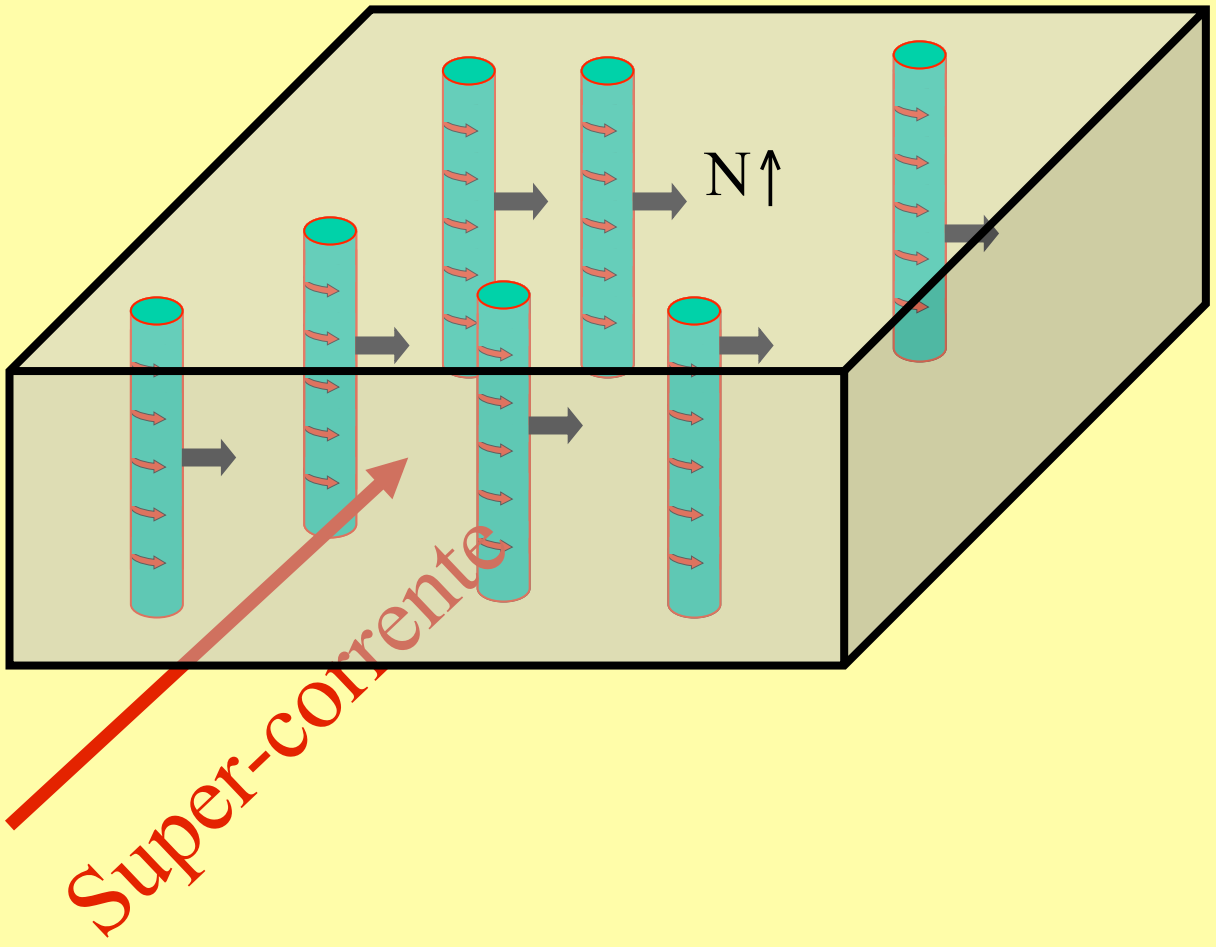
- L'applicazione di una super-corrente elettrica fa nascere una ***forza*** sui vortici magnetici



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

possono avere

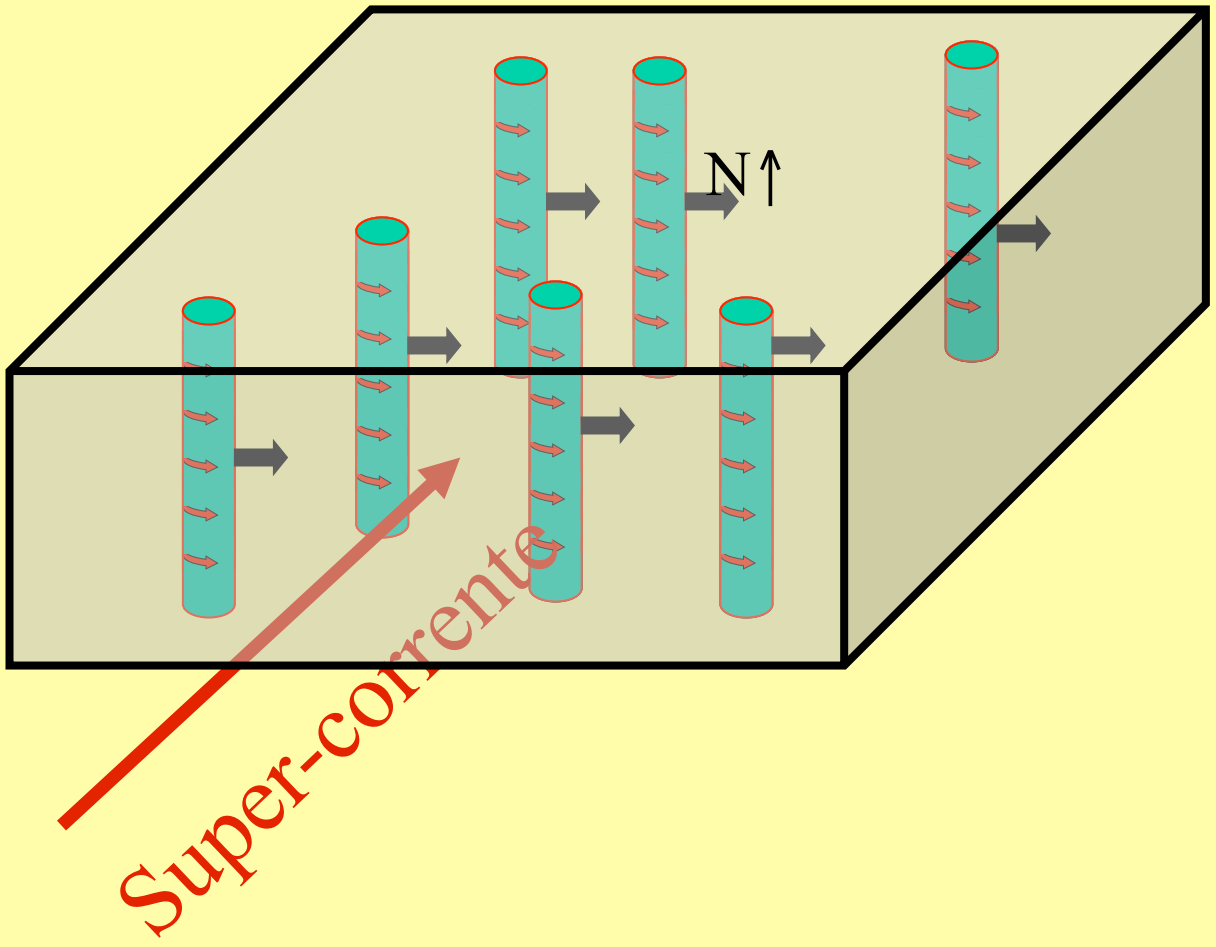
- ..e i vortici possono fluire con una frizione



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

possono avere

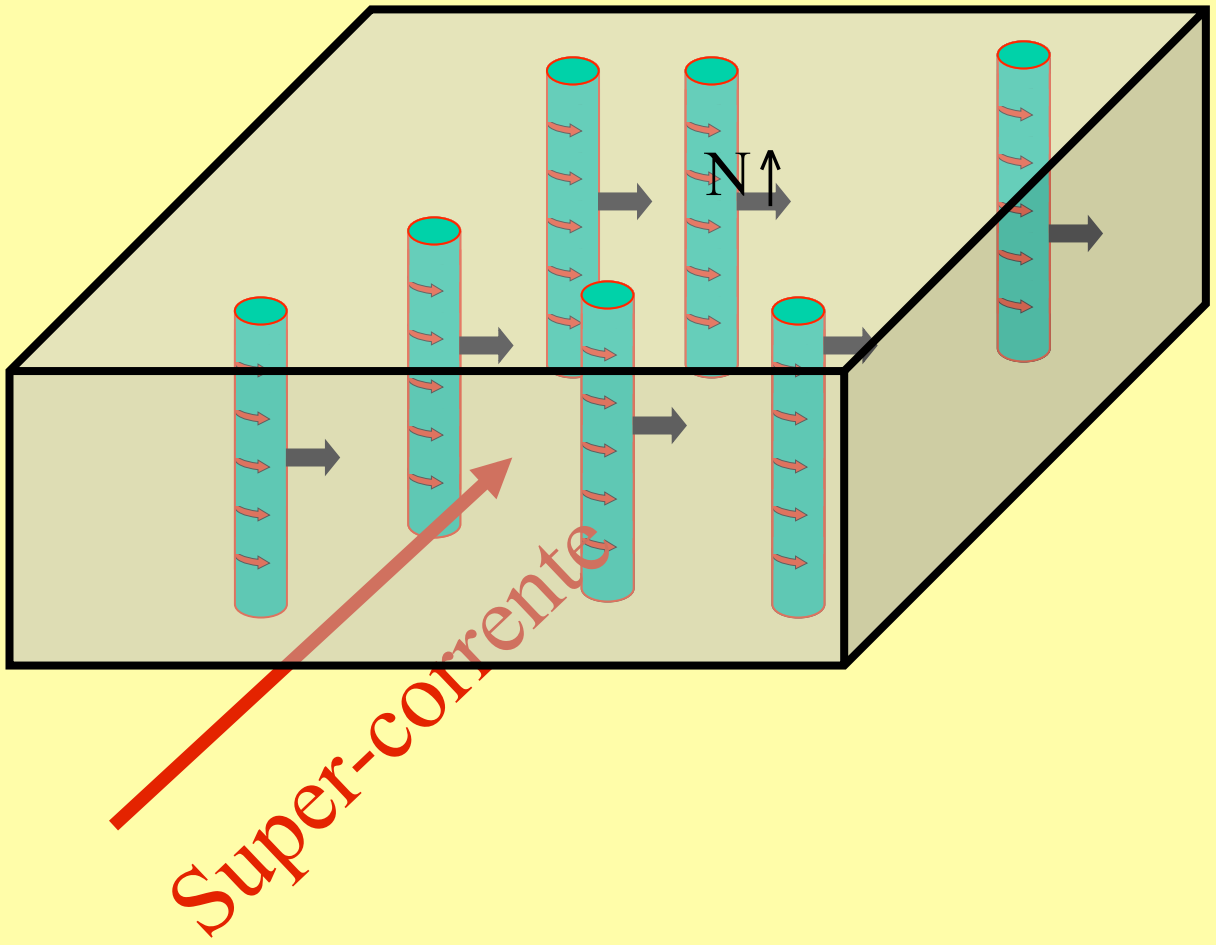
- ..e i vortici possono fluire con una frizione



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

possono avere

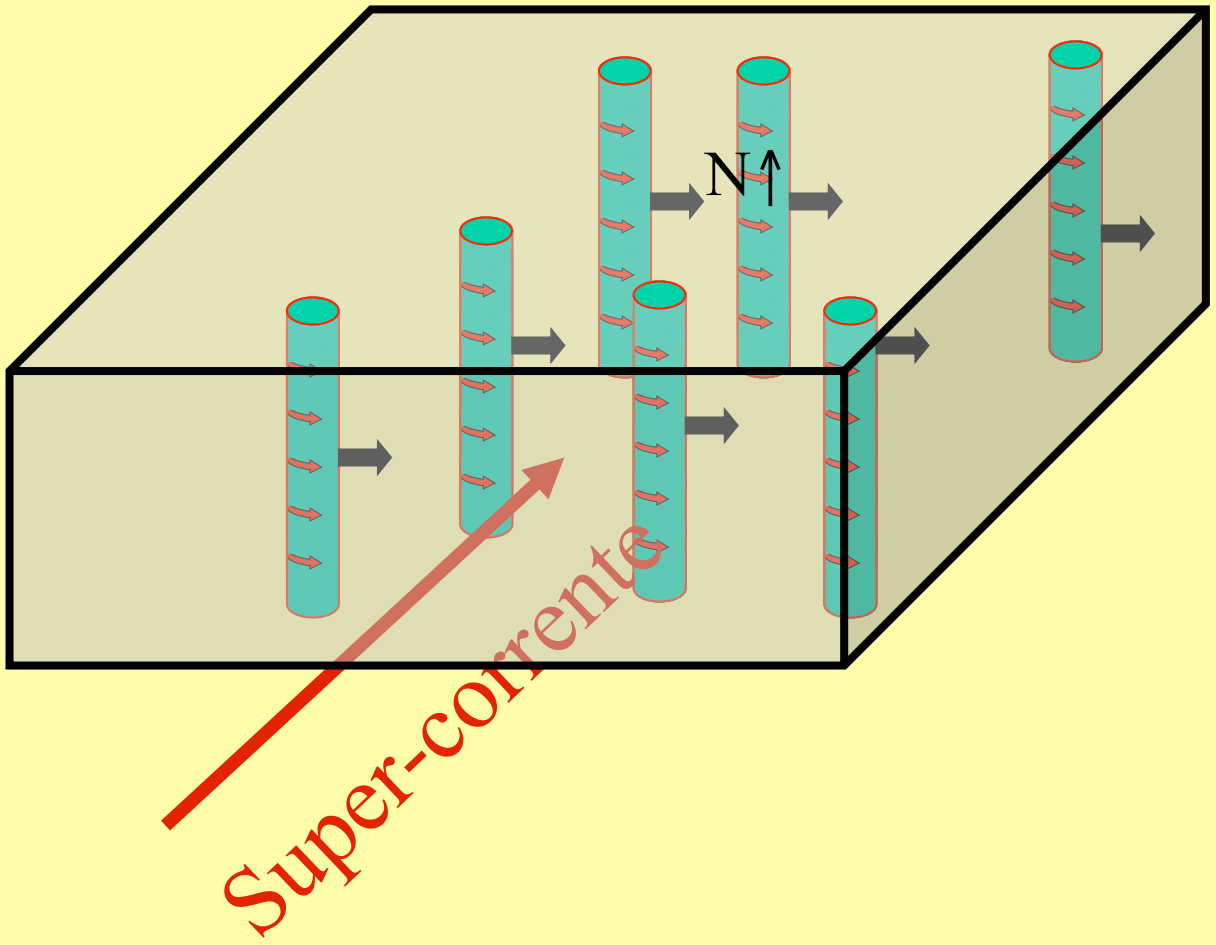
- ..e i vortici possono fluire con una frizione



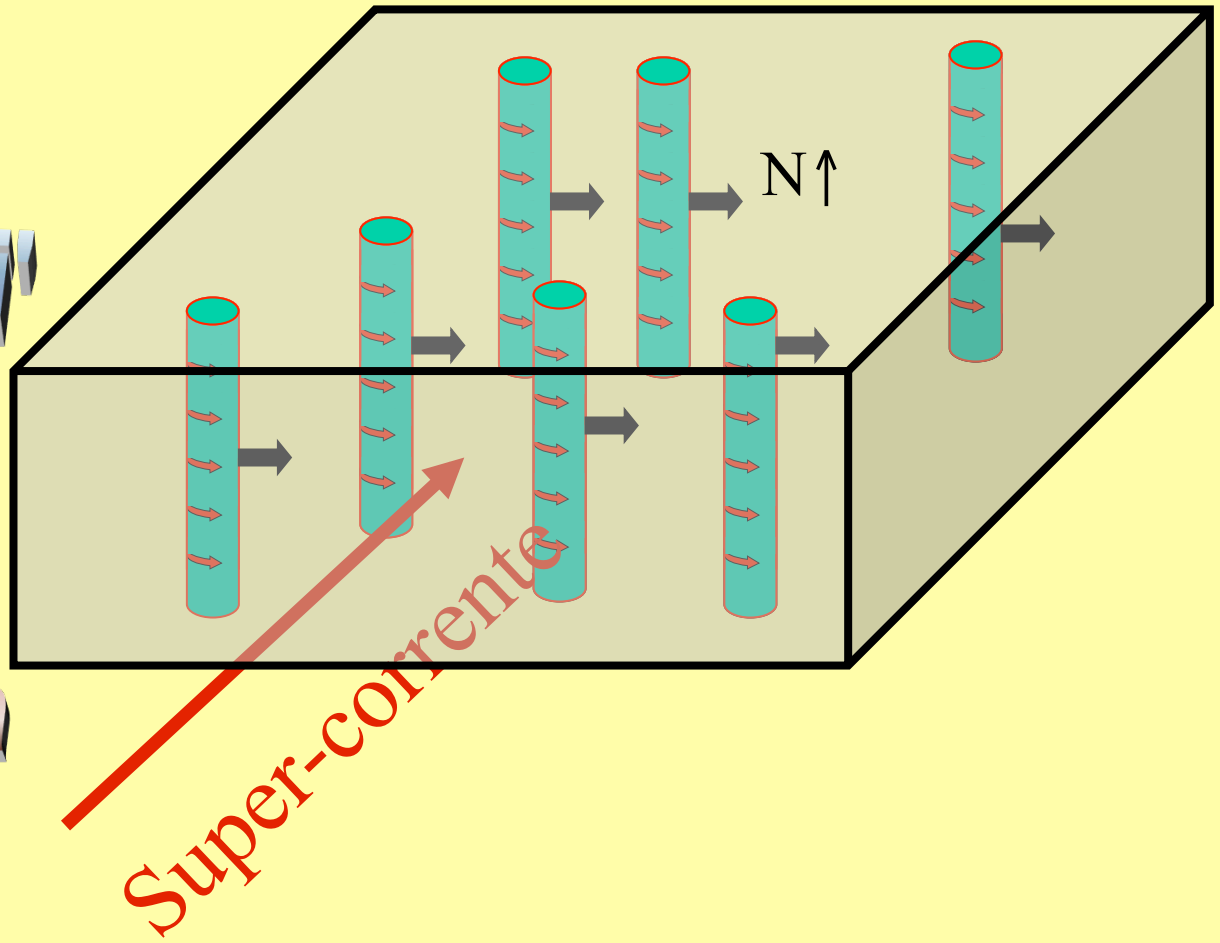
2. I superconduttori II ~~non hanno~~ resistenza

possono avere

- ..e i vortici possono fluire con una frizione



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

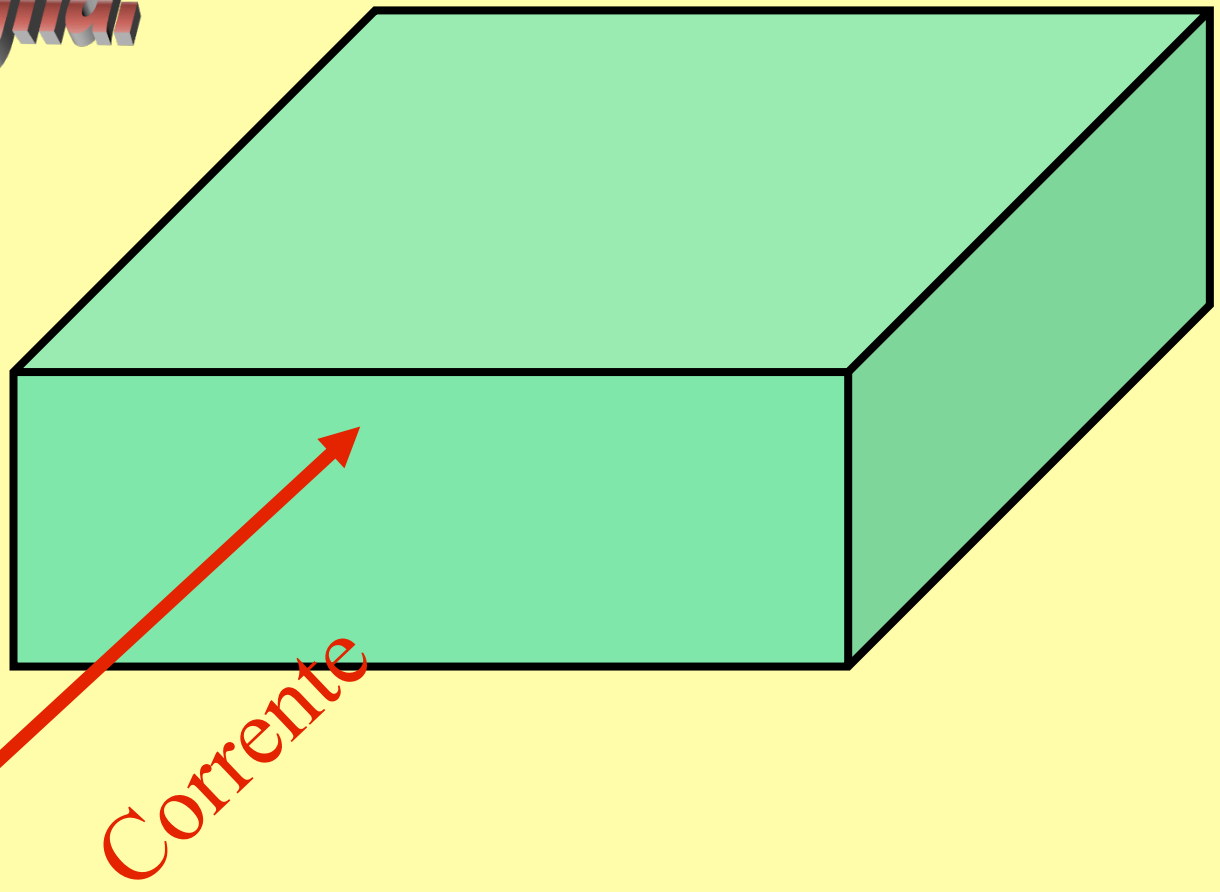


I "cuori normali" dei flussoni in moto danno resistenza

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

La natura e' maligna:

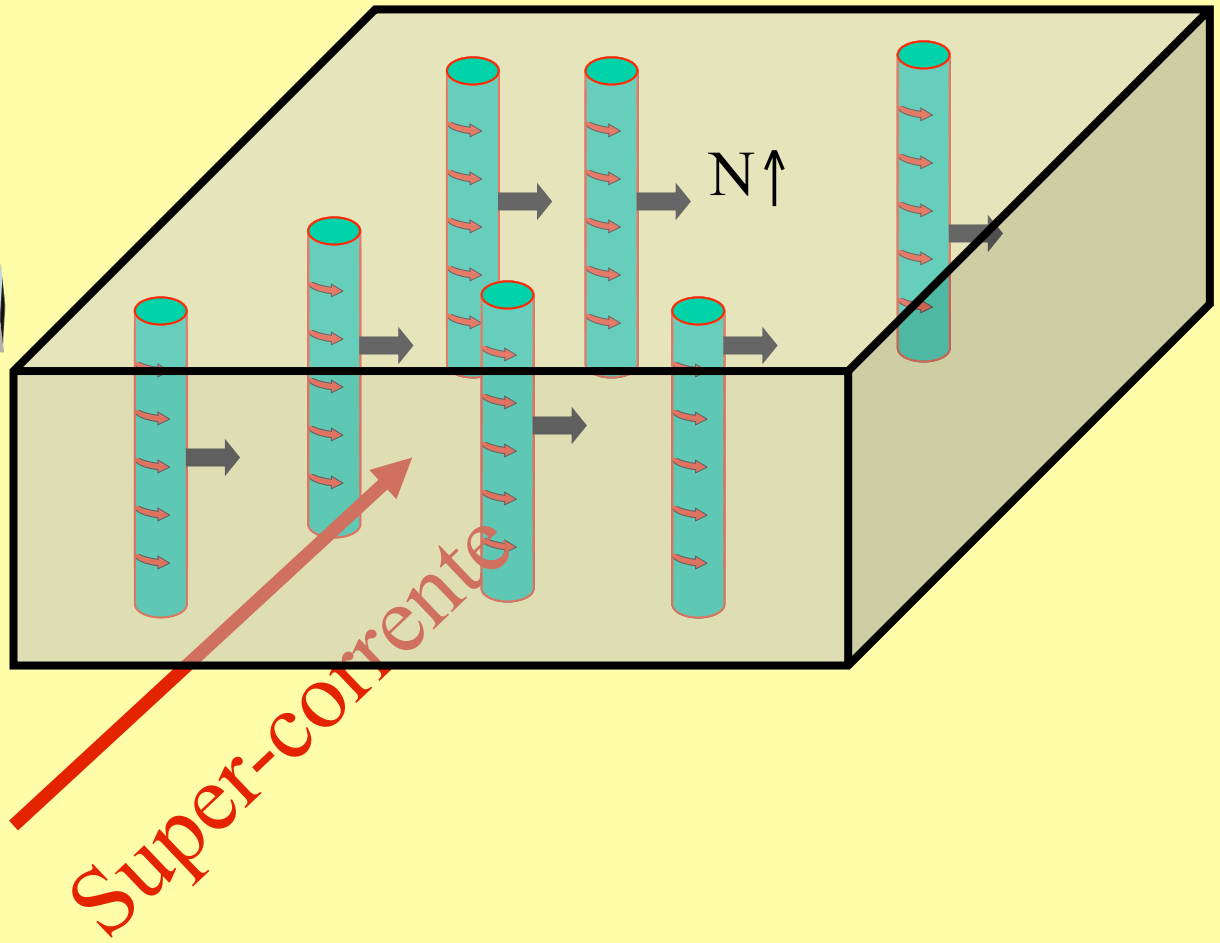
la stessa super-corrente fa transire nello stato normale il superconduttore



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

possono avere

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

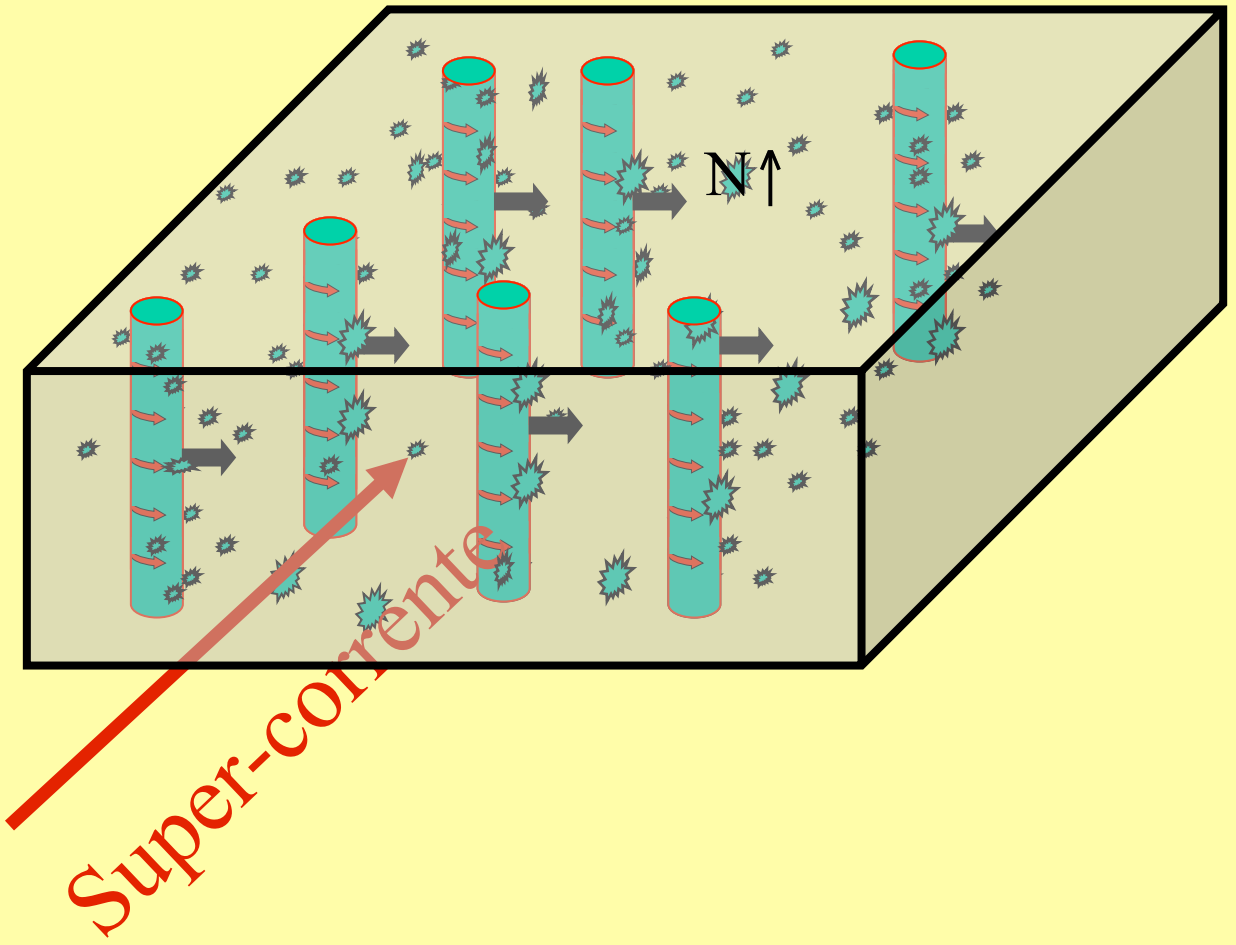


2. I superconduttori II ~~non hanno~~ resistenza

possono avere

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

che succede?

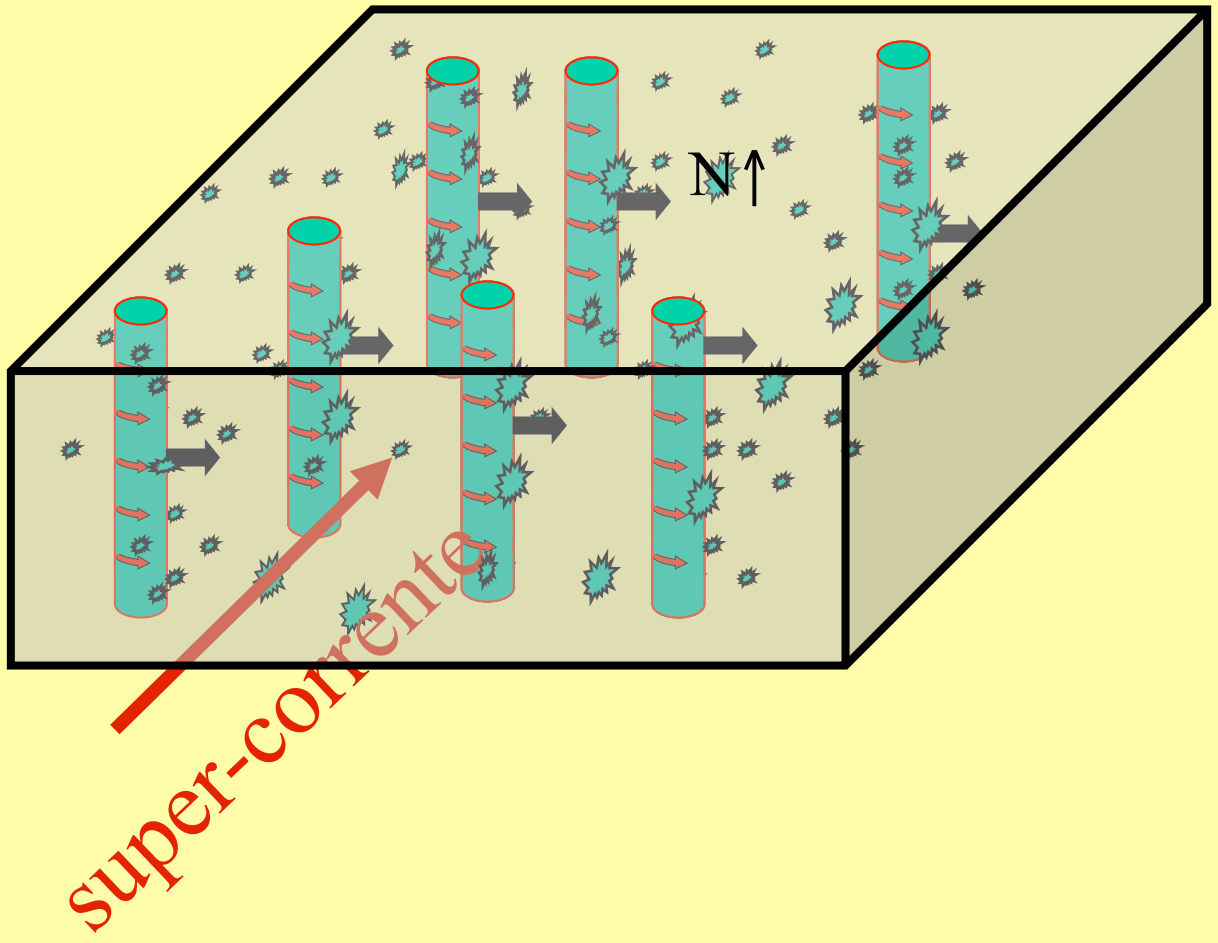


2. I superconduttori II ~~non hanno~~ resistenza

possono avere

- I quanti di flusso vanno sulle imperfezioni e

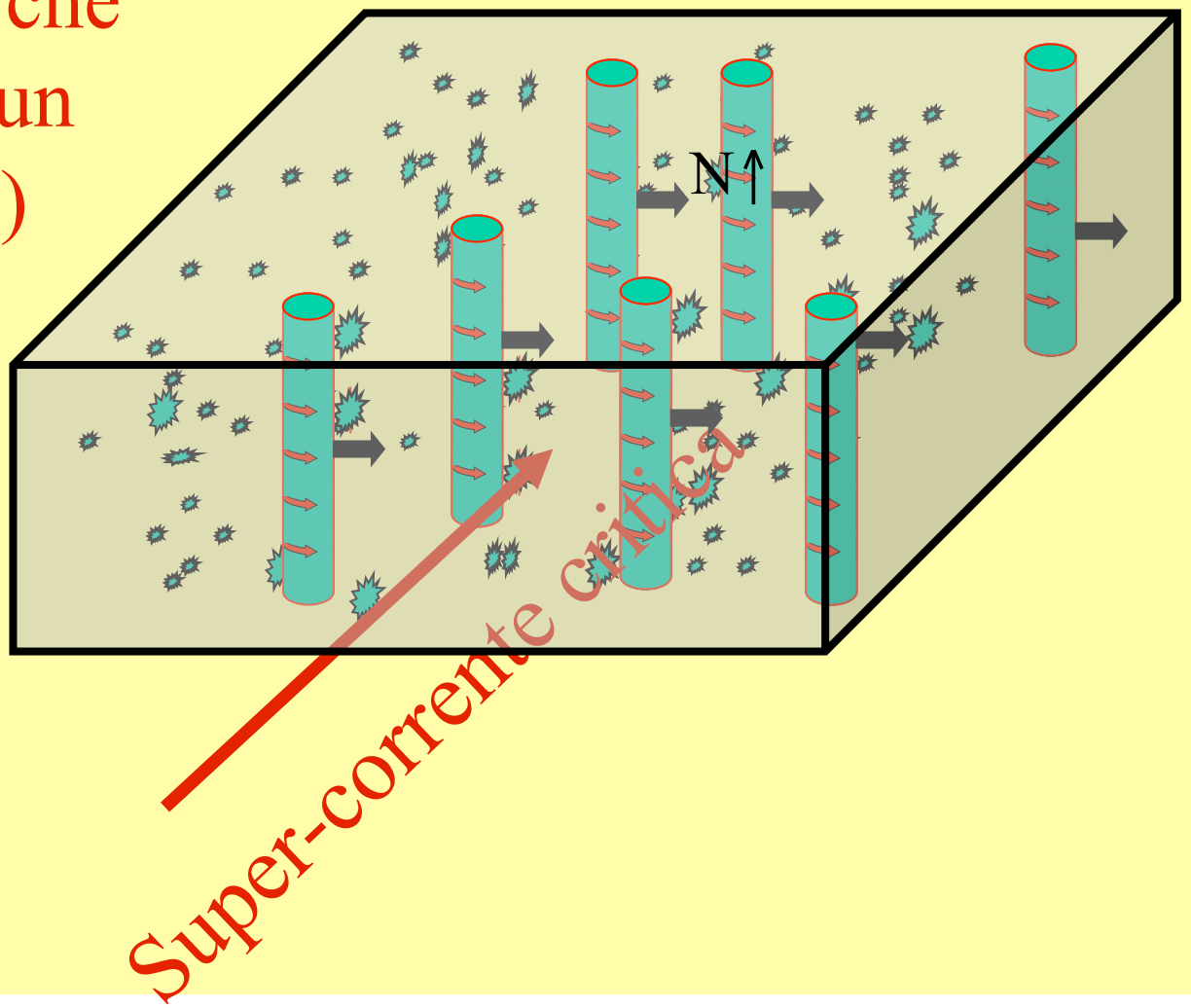
bloccano i quanti di flusso



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

possono avere

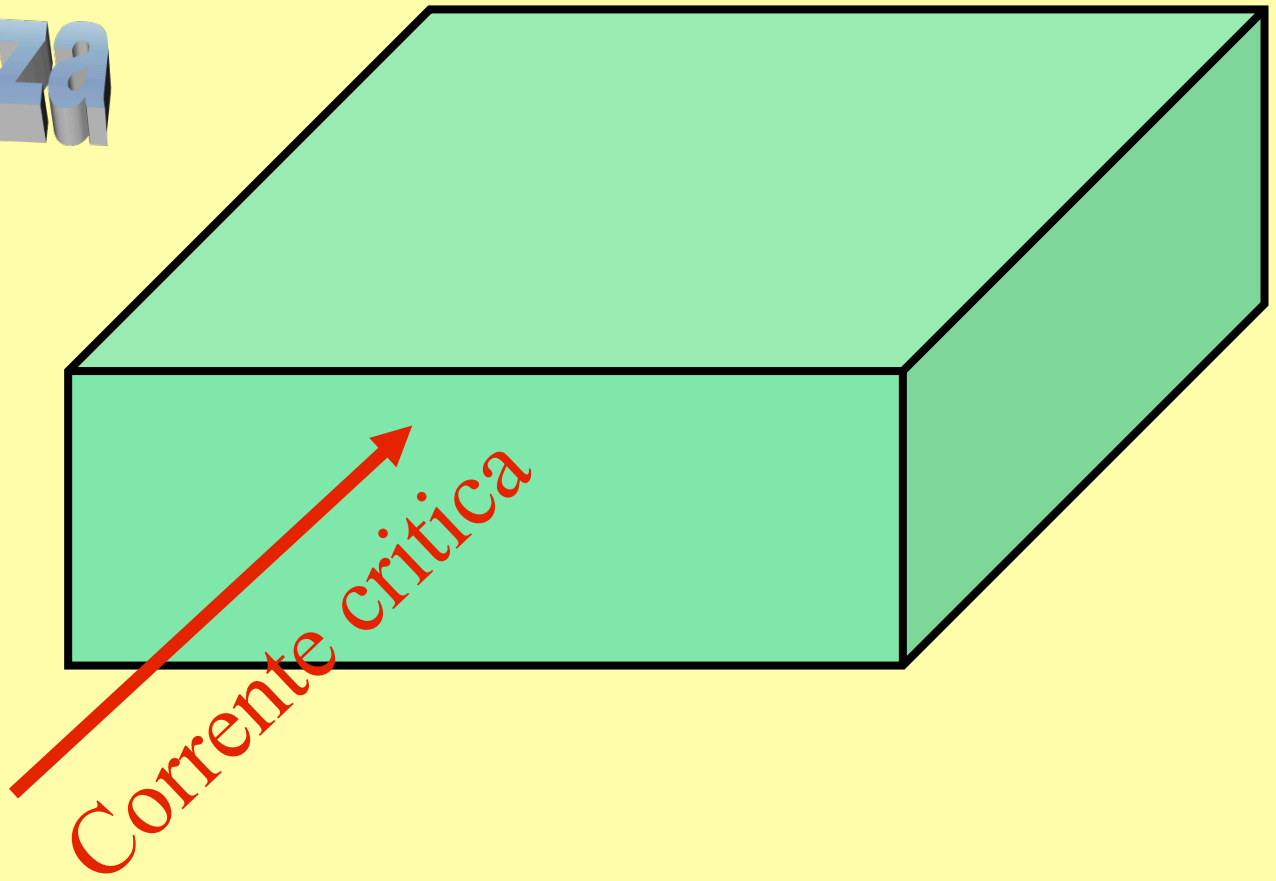
- ..stanno fermi fino a che la super-corrente ha un valore limite (***critico***) e…



i quanti di flusso corrono via

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

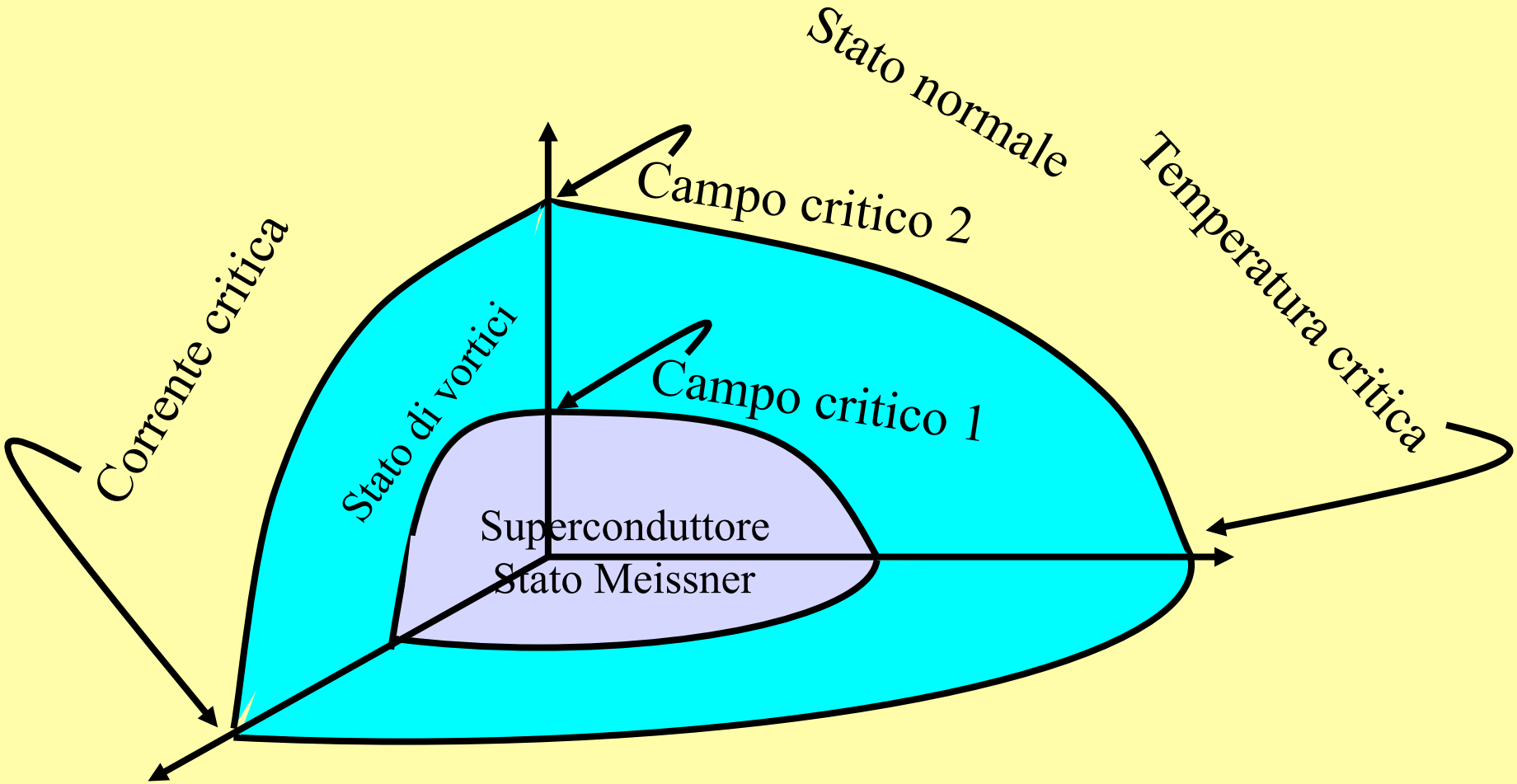
„e la sostanza transisce nello stato normale



Lo stato superconduttore e' individuato da tre parametri:

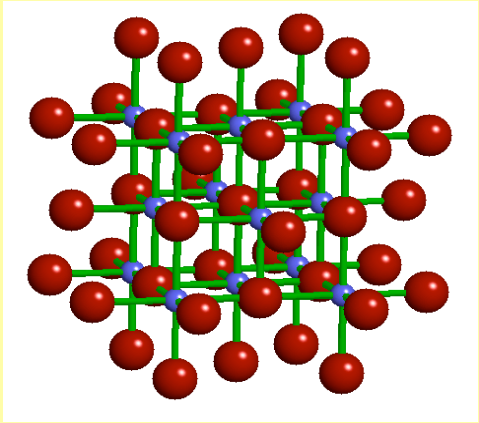
- Temperatura critica (T_c)
- Campo magnetico critico (B_c)
- corrente critica (I_c)

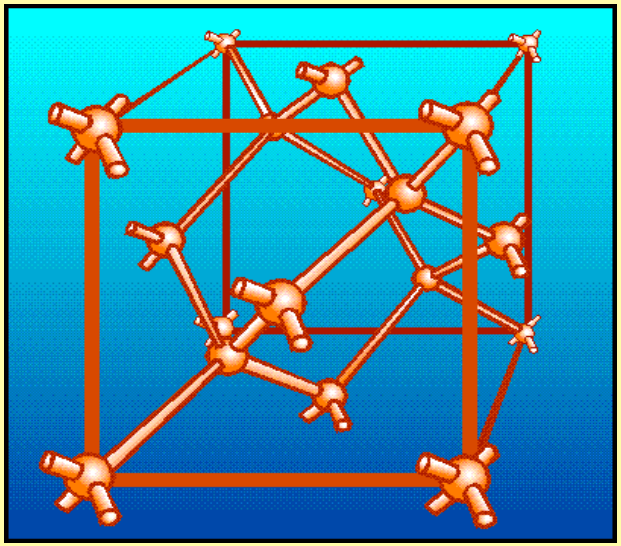
Diagramma di fase B-T-I per i Superconduttori di II tipo



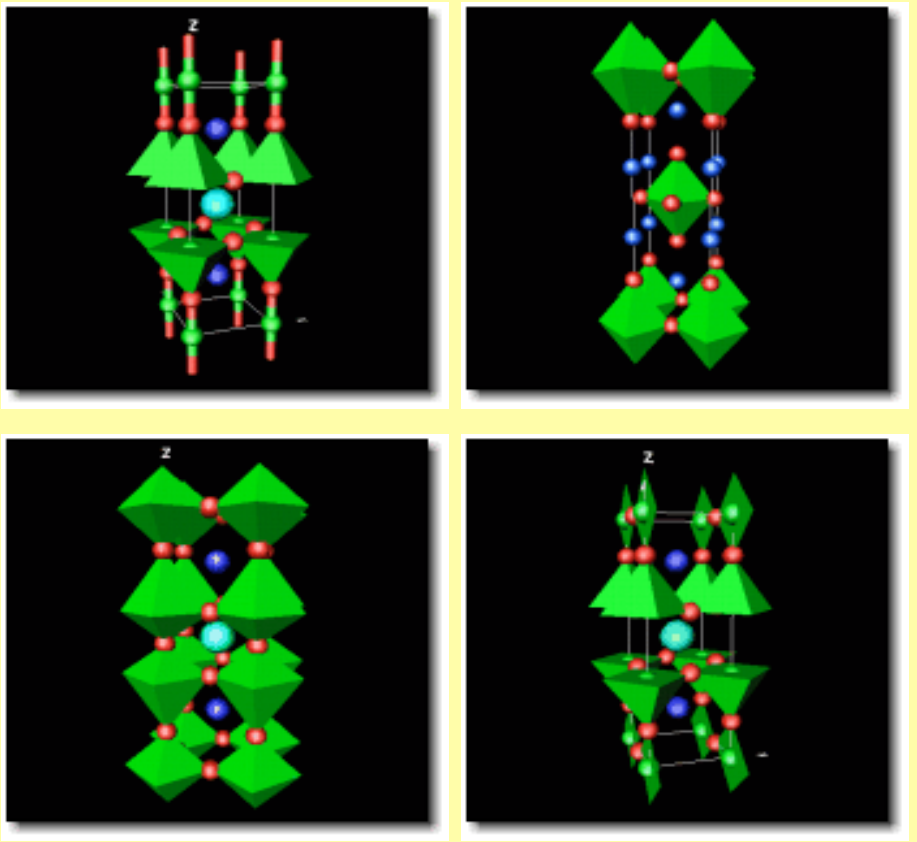
Strutture chimiche dei superconduttori

metallici bassa T_c
Struttura 3-Dimensionale



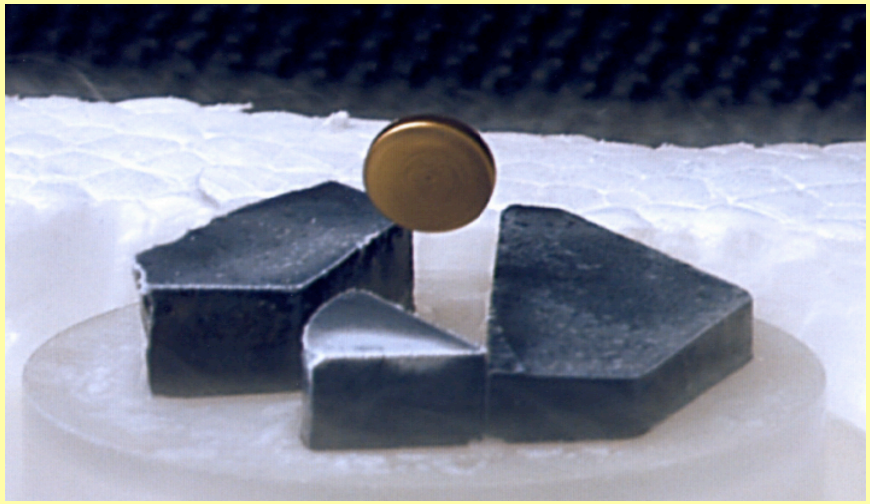


Ceramici alta T_c
Struttura 2-dimensionale
a strati

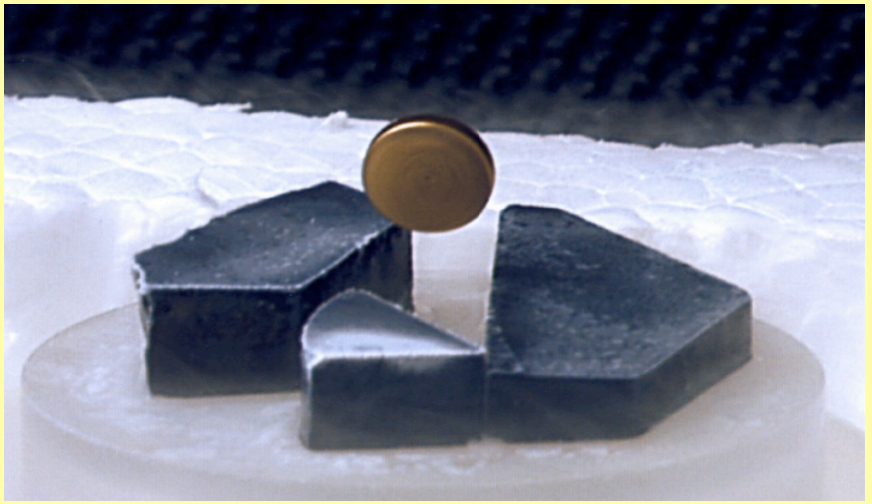


...un facile esperimento

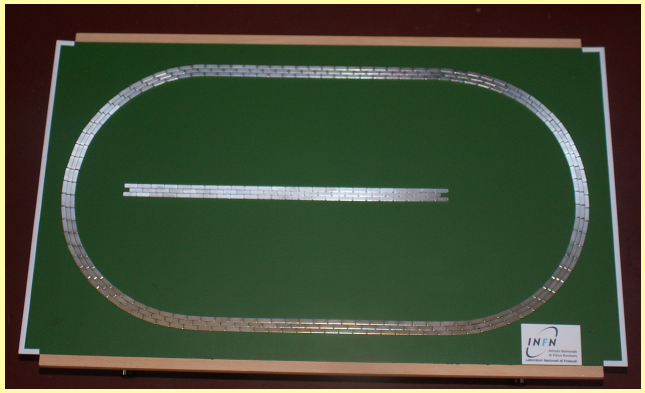
I filmato



II filmato

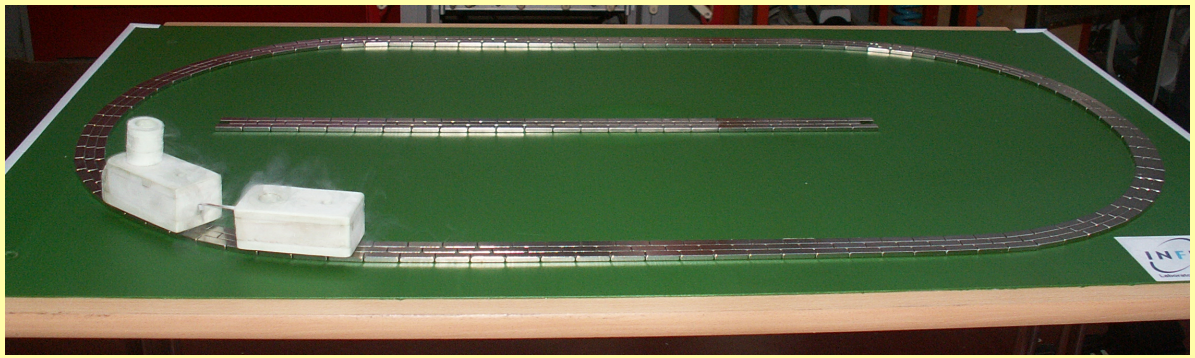


..una applicazione tecnologica



..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.

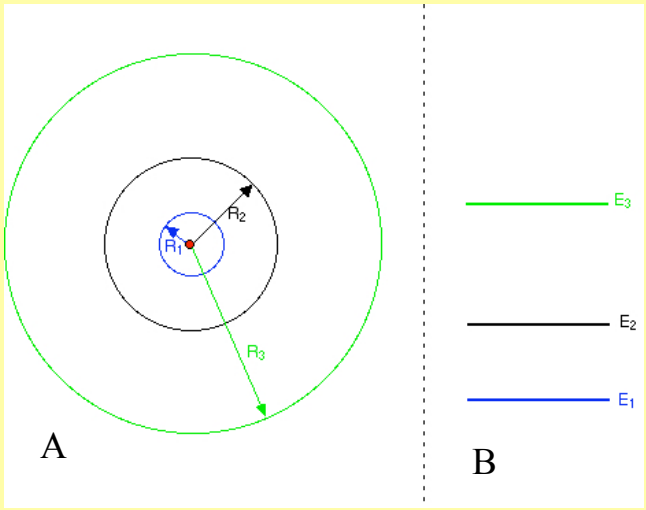
In un superconduttore gli elettroni **condensano** in uno stato quantistico di energia minima e si muovono **collettivamente** e **coerentemente** senza incontrare resistenza in coppie (coppie di Cooper).

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

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

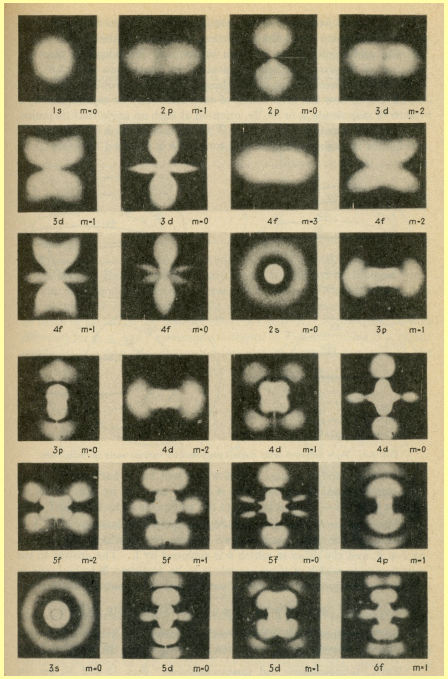
Atomi

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***



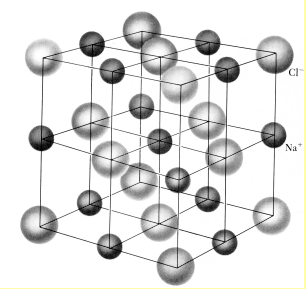
Orbitali

Orbitali elettronici di un atomo di idrogeno:

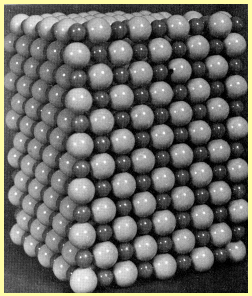
- ✓ n=1 (alto a sinistra) il piu' vicino al nucleo e occupa lo spazio piu' piccolo
- ✓ n>1 hanno energia maggiore e occupano generalmente uno spazio piu' grande e sono piu' lontani dal nucleo

Solidi

Cosa avviene quando si avvicinano N atomi. . .?

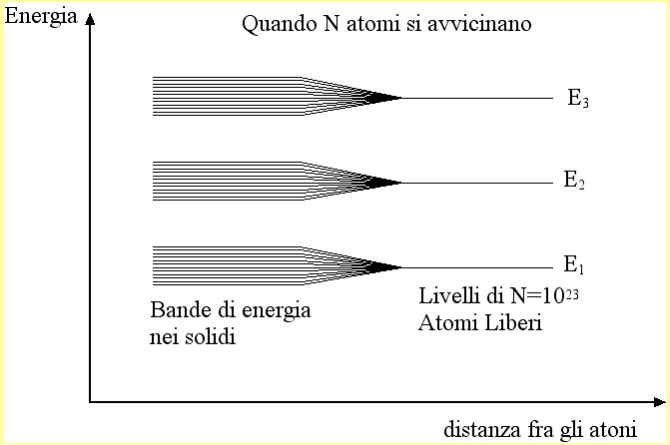


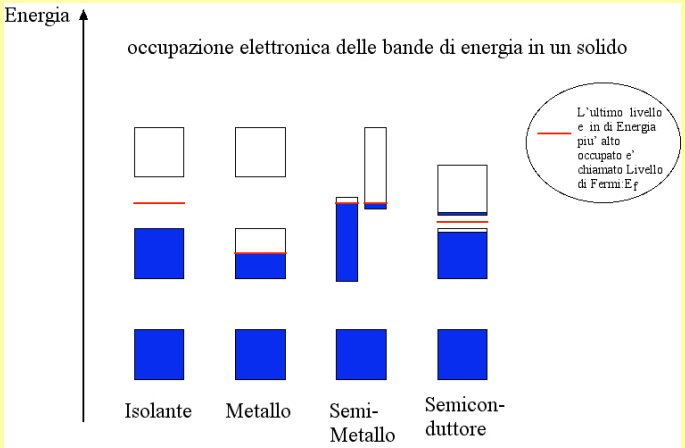
NaCl



I livelli energetici degli elettroni negli atomi singoli si sovrappongono:

si formano delle bande di energia con N livelli

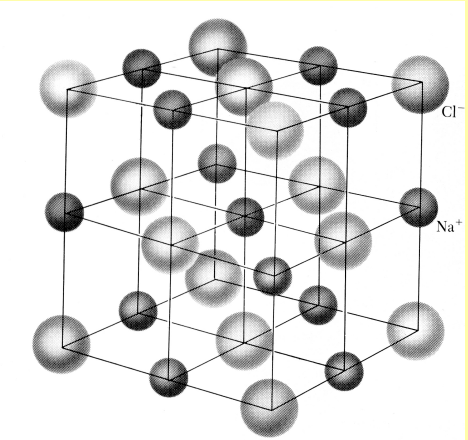




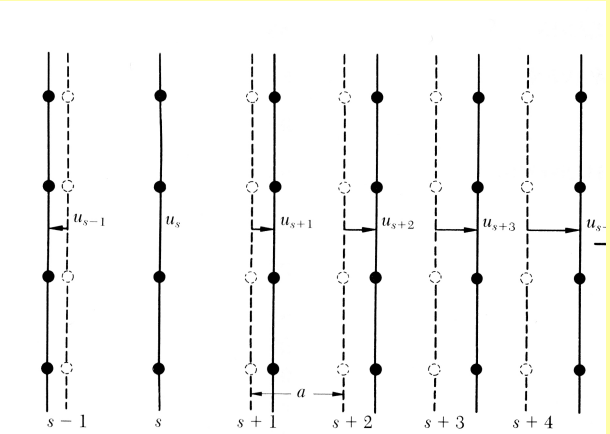
Solidi

reticoli di atomi vibrano...?

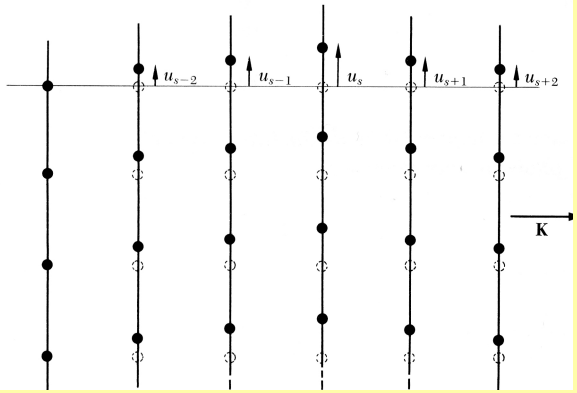
Il reticolo di atomi ha delle vibrazioni stazionarie intorno al loro punto di equilibrio: **fononi**



Moto (fononi) longitudinali



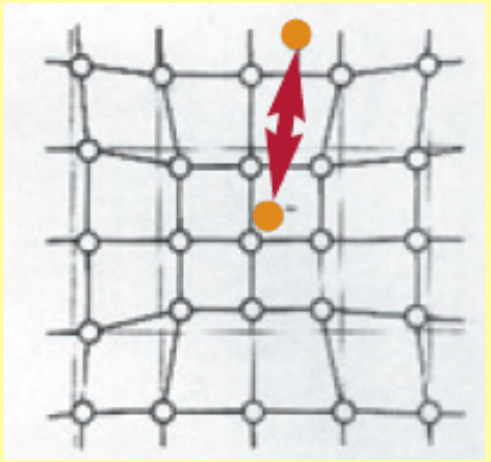
Moto (fononi) trasversali



un po'di teoria….:
-BCS-

elettroni e fononi

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



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

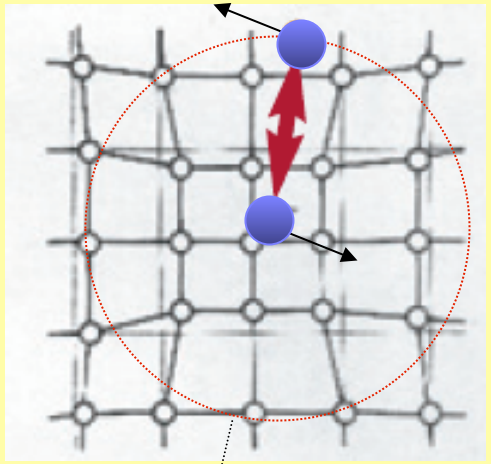
interagiscono per dare....

un po'di teoria….:
-BCS-

le coppie di Cooper

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

Questa azione produce una forza risultante tra di essi attrattiva



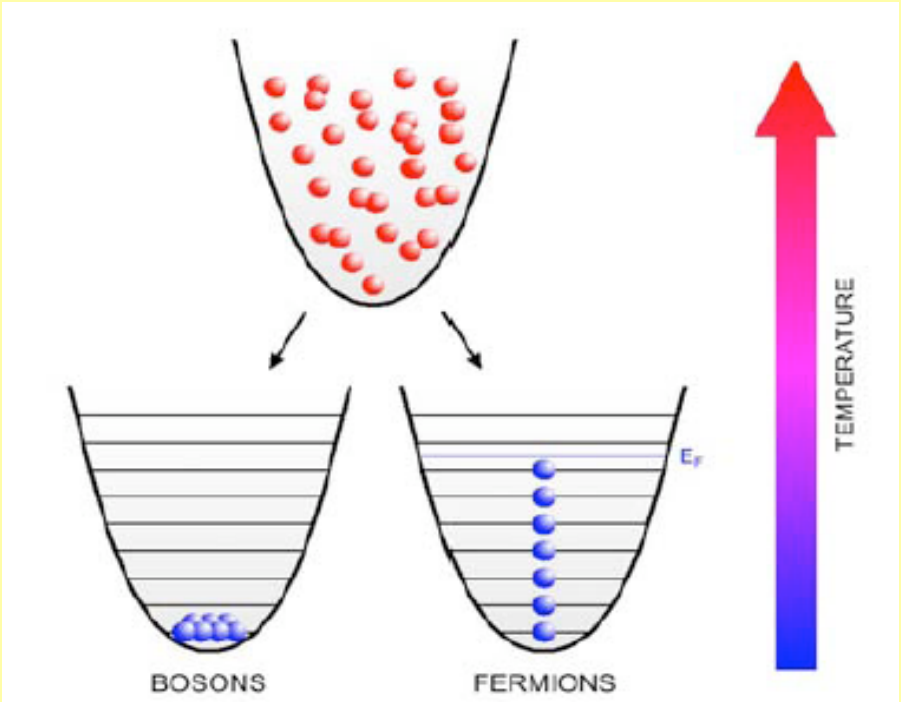
I due elettroni formano una coppia (Coppia di Cooper) per mezzo dell'interazione con le vibrazioni reticolari del cristallo (fononi)

volume 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)



un po'di teoria….:
-BCS-

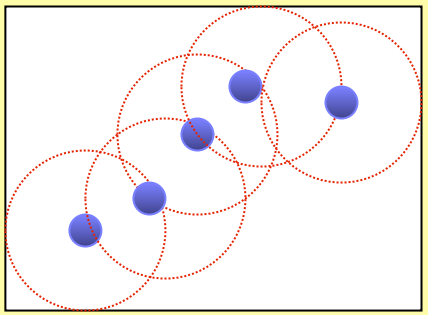
Gli elettroni sono in un solido un numero enorme: circa 10^{23}

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

il sistema e' rigido...

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'accoppiamento con altri elettroni che stanno fuori di quella prima regione.

...tutto coerente

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

un po'di teoria….:
-BCS-

Quindi c'e' 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

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

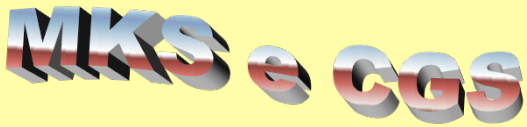
B=induzione magnetica o densita' di flusso magnetico
o campo magnetico
[weber/m^2=tesla MKS]
B=1 tesla=10^4Gauss [Gauss CGS]
E' comunemente usata nelle applicazioni

M=momento magnetico per unita'di volume o peso o massa, chiamata anche intensita' di magnetizzazione
[weber/m^2=tesla MKS]
ma attenzione
M= 1 tesla=$1/4\pi$ x10^4Gauss=7.96x10^4G [Gauss CGS]

H= campo magnetico applicato
[Ampere/metro MKS]
1A/m= 4πx10^{-3} Oe [Oested=Gauss CGS]

μ_0= 4πx10^{-7} H/m permiabilita' magnetica del vuoto MKS …….ma attenzione`: μ_0= 4π [Gauss CGS]

χ= suscettivita' magnetica



Correlazione fra B,M,H

In MKS
B= M+μ_0H
B=0 (Meissner)
χ= M/H=-1/μo

In Gauss CGS
B= M+4πH
B=0 (Meissner)
χ =-1/4π

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'