

Superconduttori vecchi e nuovi: la storia centenaria di un fenomeno ancora giovane

Marco Grilli
Dipartimento di Fisica
 **La Sapienza**
Università degli Studi di Roma



Bibliografia

J. Matricon, G. Waysand, "La guerre du froid", Ed. Seuil

"Superconduttività" trasmissione su RaiSat <http://www.explora.rai.it>

"Lo stano mondo dei quanti" Modena 3-22 maggio 2006,

<http://tv.unimore.it/media/scienze/fisica06/start.swf>

L. G. Aslamazov, A.A. Varlamov, "Fisica, che meraviglia!", Ed. La Goliardica Pavese.

Sommario

□ Cos'è un conduttore?

Come si comporta un conduttore normale?
Com'è fatto dentro?

□ Cos'è un superconduttore?

Come si comporta un SC?
Com'è fatto dentro?

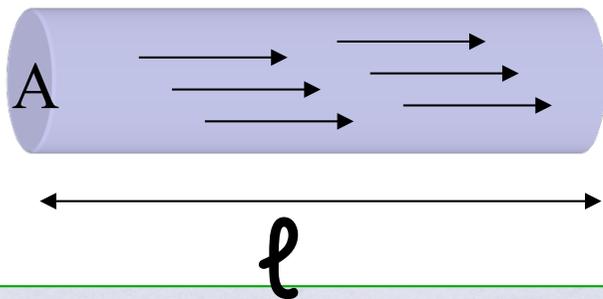
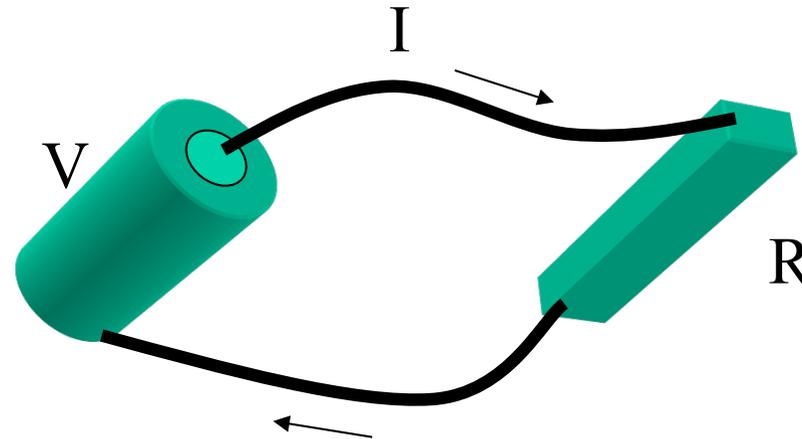
□ A che servono i SC?

I conduttori: materiali attraverso cui la corrente elettrica passa facilmente

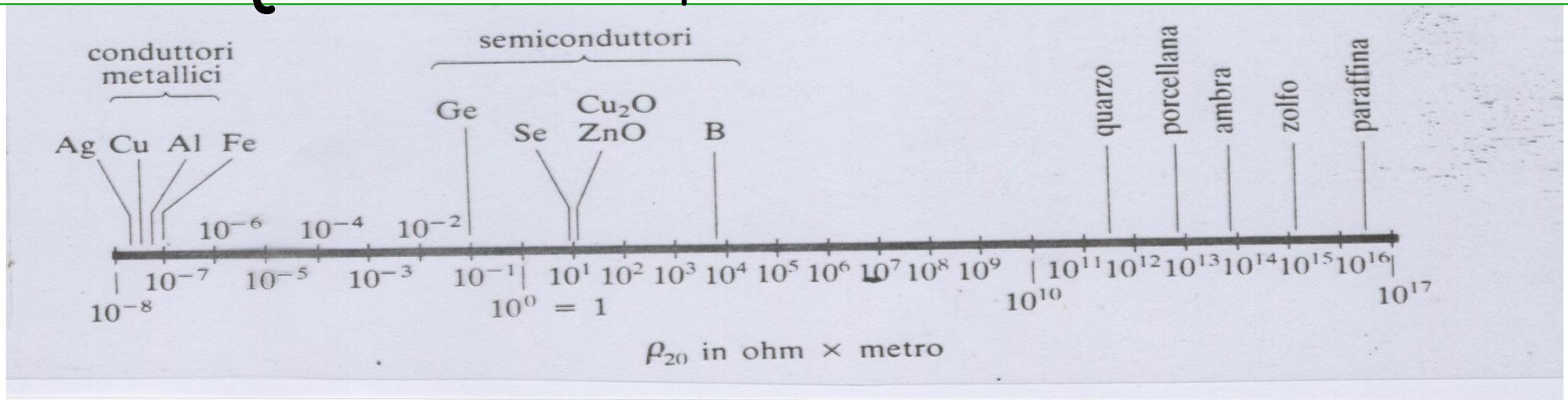
Corrente: è la carica per unità di tempo che attraversa una sezione di conduttore

Legge di Ohm: $V=RI$

Resistenza $R=\rho \ell /A$

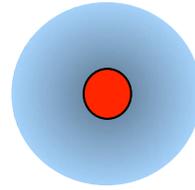
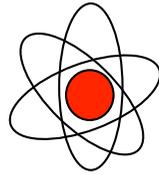


Resistività ρ : è una caratteristica specifica del materiale

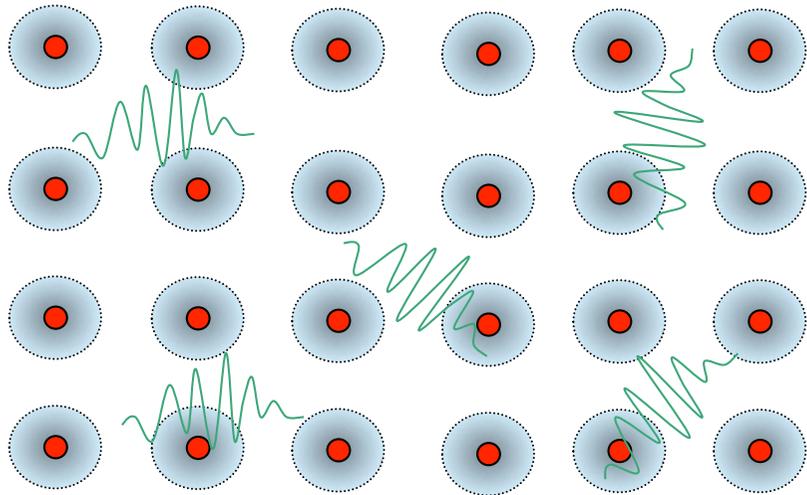


Com'è fatto un conduttore?

1 atomo



Gli elettroni sono simili a onde, una nuvola che circonda ogni atomo



Solido isolante

Tutti gli el restano legati agli atomi

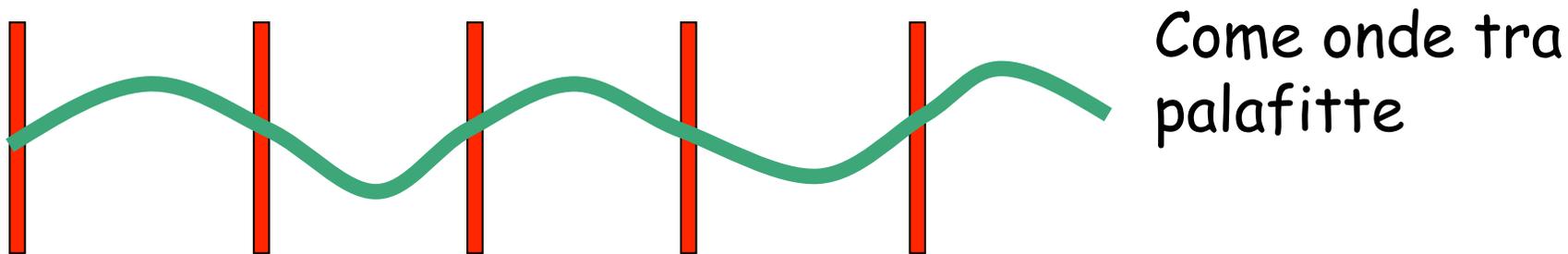
Solido conduttore

alcuni el sono liberi di muoversi come un fluido tra gli atomi e trasportano corrente

Per spiegare la superconduttività è stato necessario capire prima lo stato metallico normale:
ruolo cruciale della meccanica quantistica e dei fondamentali i lavori di Pauli, Fermi, Heisenberg, Bloch,...

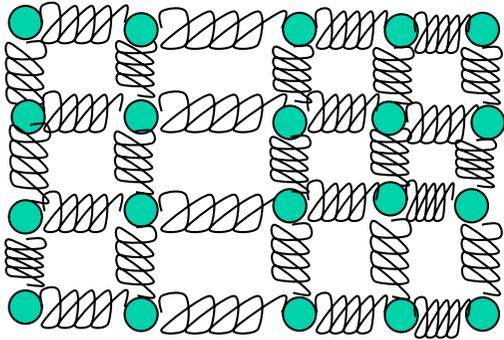
Un risultato sorprendente della meccanica quantistica:

In un reticolo **perfettamente ordinato** gli elettroni viaggiano indisturbati (F. Bloch, ~ 1930)

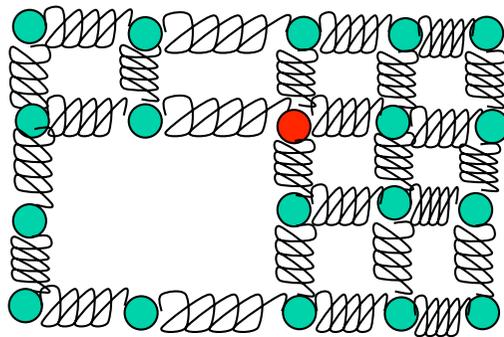


Un metallo con un reticolo perfetto è un conduttore perfetto!

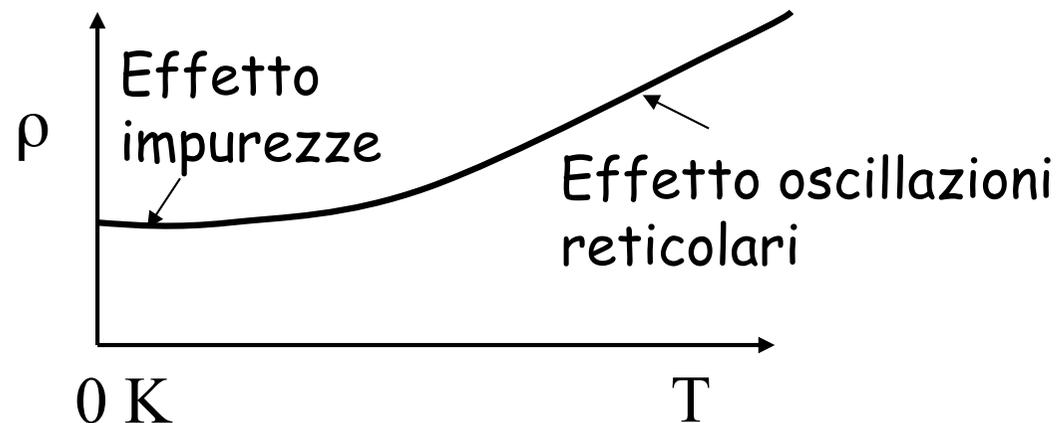
A cosa è dovuta la resistività?



- Il reticolo di ioni oscilla e non è più perfettamente regolare. L'effetto aumenta con la temperatura T



- Nei metalli reali ci sono impurezze e lacune reticolari



Sommario

□ Cos'è un conduttore?

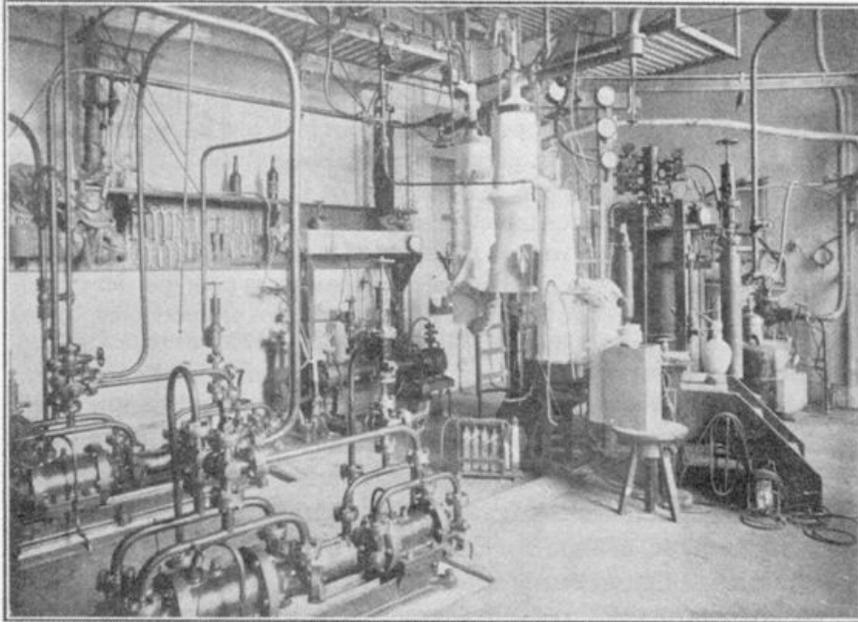
Come si comporta un conduttore normale?
Com'è fatto dentro?

□ Cos'è un superconduttore?

Come si comporta un SC?
Com'è fatto dentro?

□ A che servono i SC?

La superconduttività nasce dal freddo

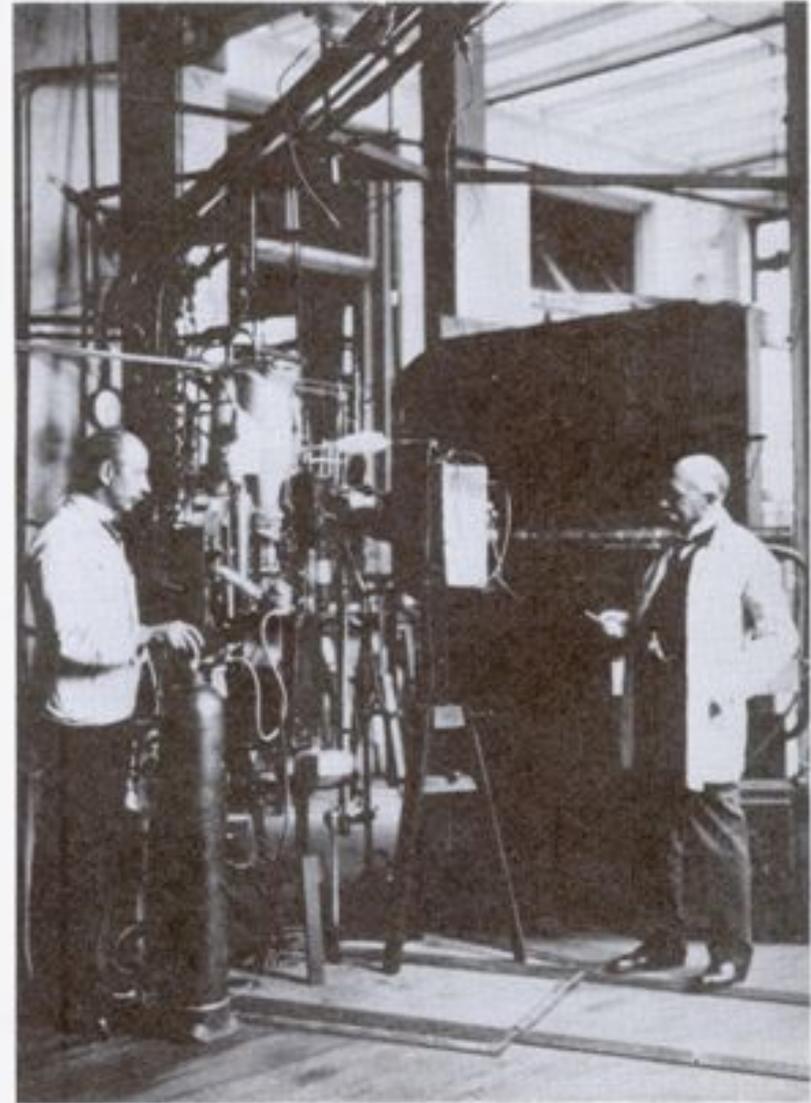


L'atelier de liquéfaction de l'hélium à Leyde, tel que le conçut et le réalisa Kamerlingh Onnes, et tel qu'il fonctionna pendant des dizaines d'années.
La mise en place d'un tel atelier pour assurer la logistique d'un laboratoire de recherche fondamentale représenta une des contributions majeures de Kamerlingh Onnes à la science, car elle inaugurait l'ère de la « science lourde », où des installations démesurées sont nécessaires pour assurer, par exemple, le fonctionnement des grands accélérateurs et des détecteurs qui leur sont associés.

42

Il laboratorio per la liquefazione dell'elio di Kamerling Onnes è il primo esempio di “big science”

Un mouvement perpétuel ?

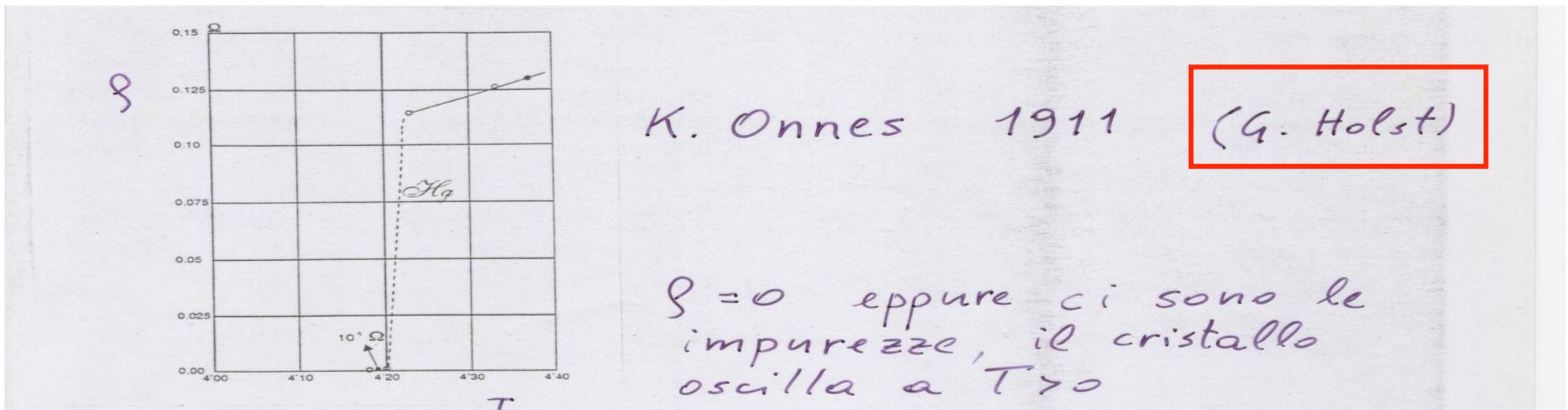


Flam (à gauche), fidèle adjoint de Kamerlingh Onnes (à droite).

All'epoca di Onnes a Leida c'erano due principali linee di ricerca:

-studio delle proprietà dell'elio, liquefatto lì per la prima volta nel 1904;

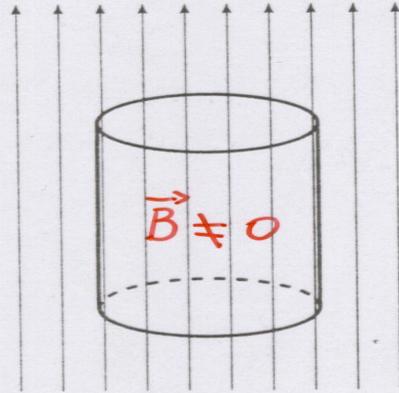
-studio dei sistemi fisici alle basse temperature (ottenute proprio usando l'elio liquido). Per esempio mercurio...



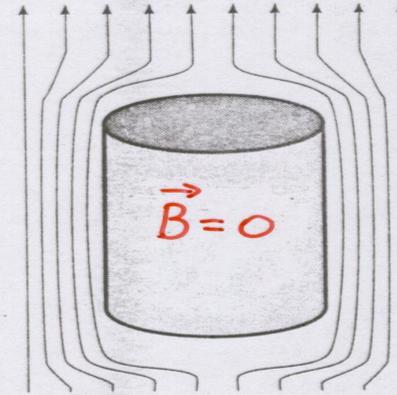
Al di sotto di 4.20 gradi Kelvin (circa -269 C) il mercurio diventa un conduttore perfetto ($\rho=0$): tutto qui? Un SC è solo un conduttore perfetto?

Effetto Meissner 1937

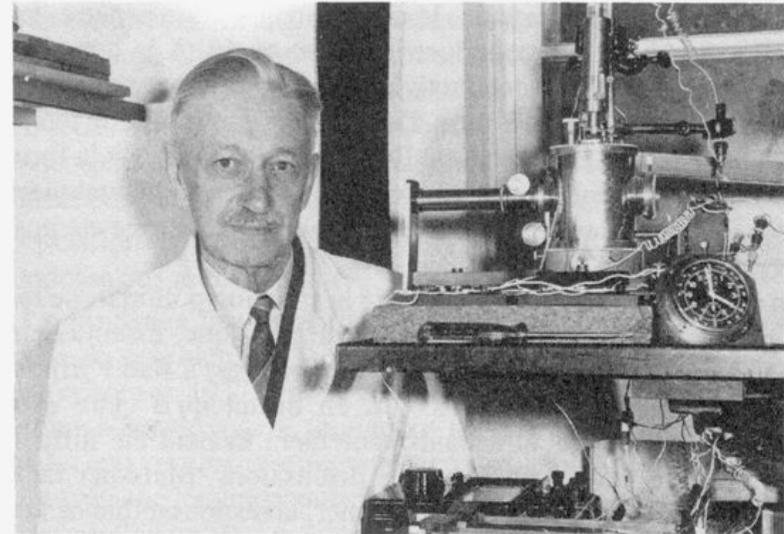
$$T > T_c$$



$$T < T_c$$

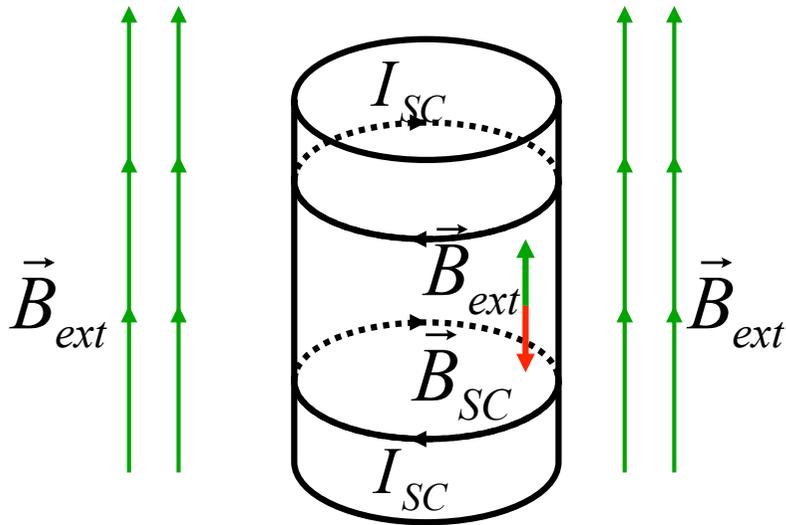


Il campo magnetico all'interno è sempre nullo qualunque sia la procedura e qualunque sia il campo magnetico applicato (purché non troppo forte)



Walther Meissner dans son laboratoire.

Come mai $\vec{B} = 0$ dentro un SC?



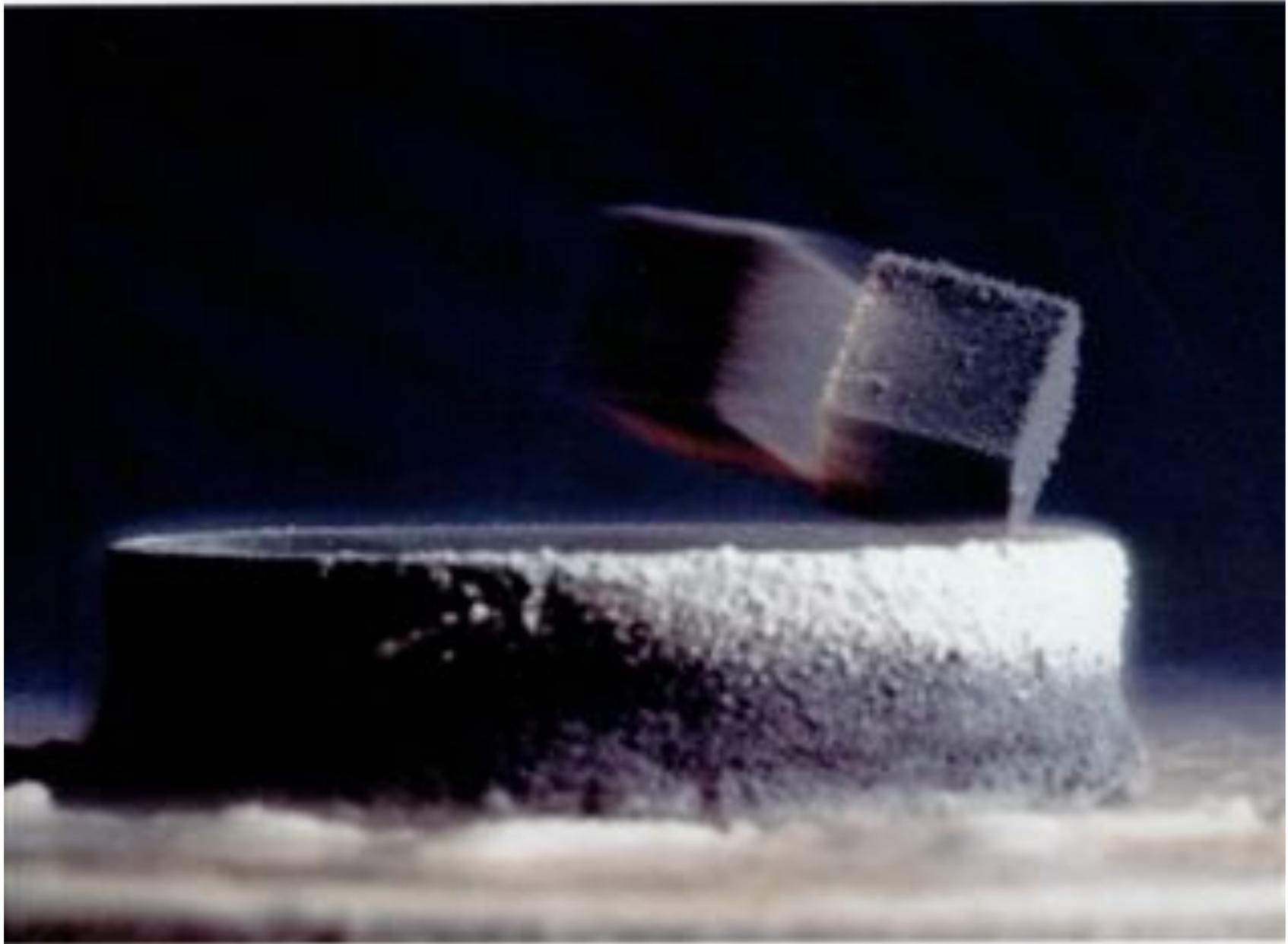
Dentro il SC il campo totale si annulla

$$\vec{B}_{tot} = \vec{B}_{ext} + \vec{B}_{SC} = 0$$

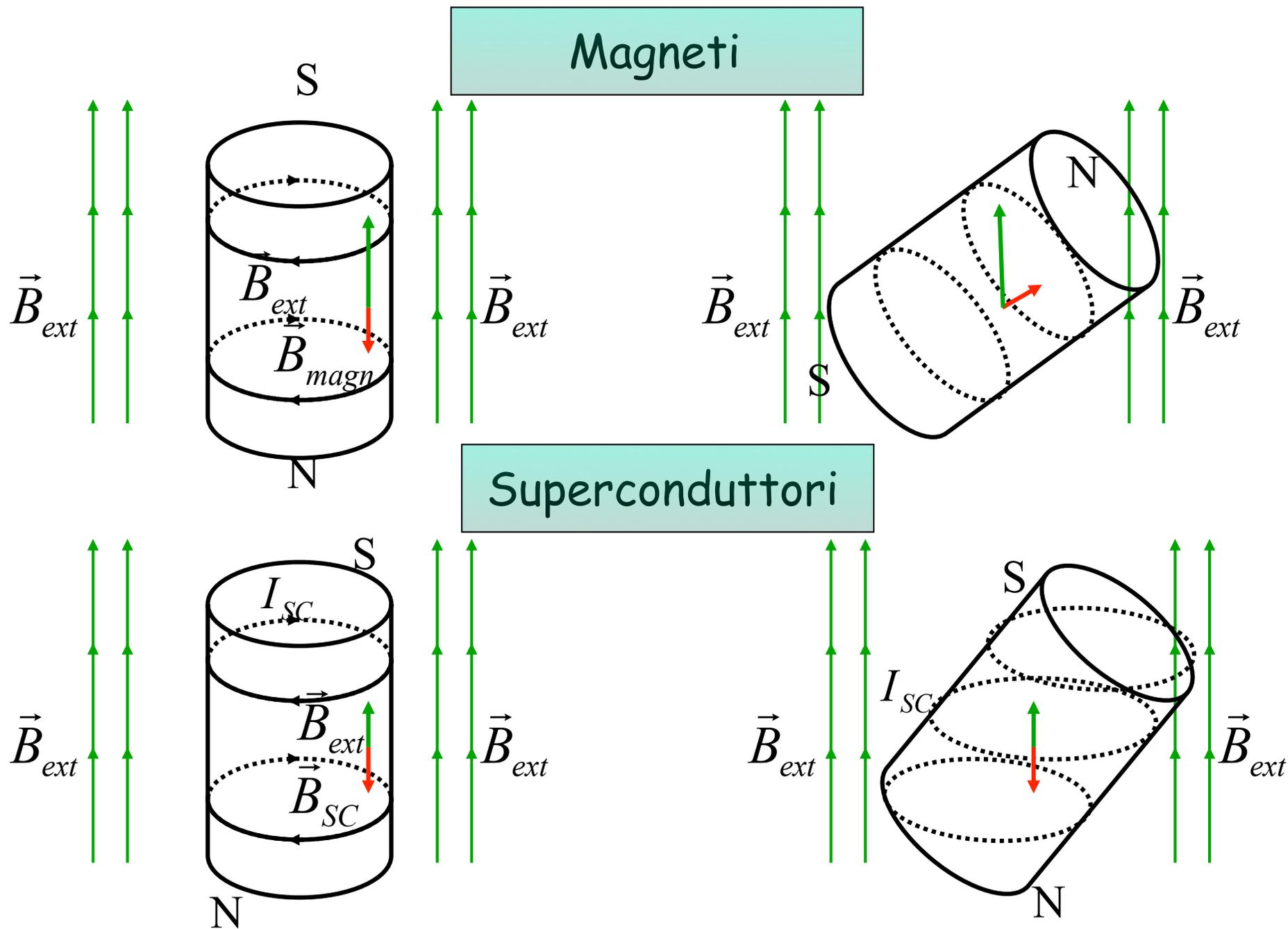
Il SC "vuole" che $\vec{B}_{tot} = 0$ al suo interno \rightarrow crea correnti permanenti che generano (come in una bobina) \vec{B}_{SC} tale da annullare \vec{B}_{ext}

Però, se deve spendere troppa energia per mettere in moto le cariche (perché \vec{B}_{ext} è troppo forte e serve un \vec{B}_{SC} altrettanto forte) allora preferisce smettere di essere SC \rightarrow c'è un campo critico \vec{B}_{ext}^{crit} al di sopra del quale il SC torna ad essere un conduttore normale

Une histoire de la supraconductivité



Perché i SC levitano sulle calamite?

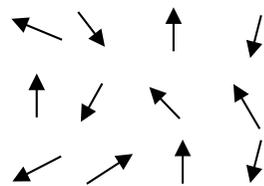


I SC sono una specifica fase della materia:

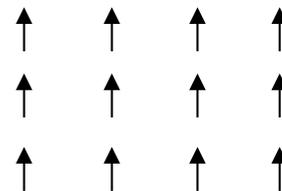
Differenze qualitative forti tra un SC ed un conduttore perfetto:

- $B=0$ all'interno "sempre",
- entropia molto più bassa \rightarrow quindi sono più ordinati

Cambiamenti di fase sono spesso associati alla formazione di ordine: per esempio in una calamita i momenti magnetici atomici si ordinano macroscopicamente



$T > T_c$



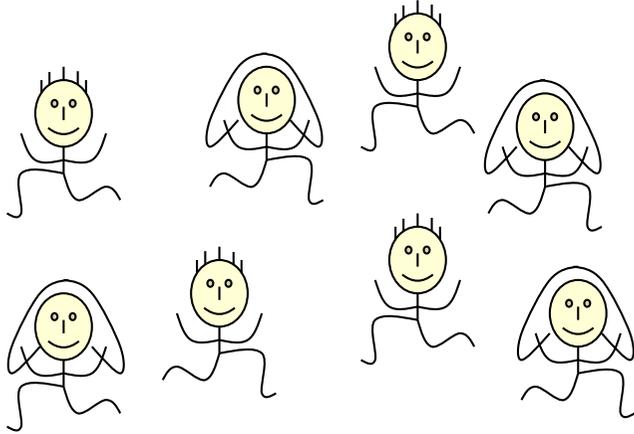
$T < T_c$

Qual è l'ordine realizzato nei superconduttori?

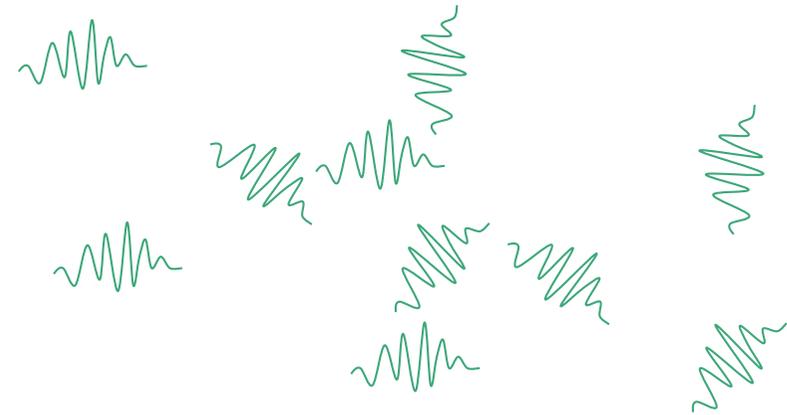
Che succede microscopicamente in un SC?

Teoria di Bardeen, Cooper e Schrieffer (BCS, 1957)

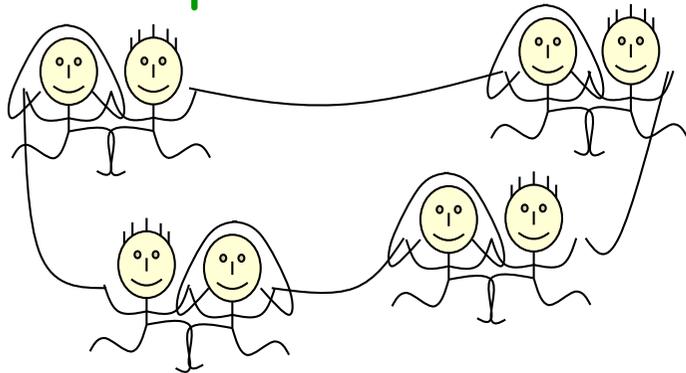
Metallo normale:



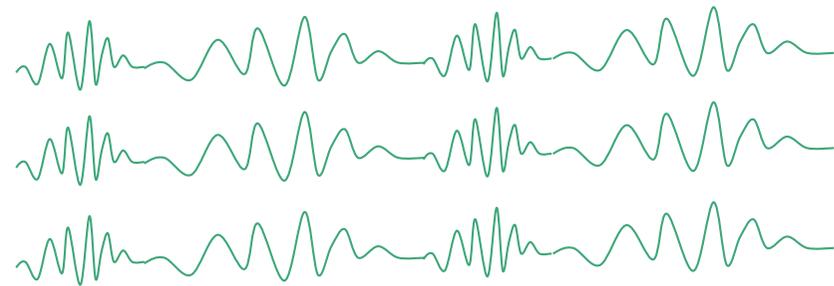
gli el si muovono (e urtano) indipendentemente



Superconduttore:



gli el si accoppiano e si muovono coerentemente in fase



Che succede microscopicamente in un SC?

Teoria di Bardeen, Cooper e Schrieffer (BCS, 1957)

Metallo normale

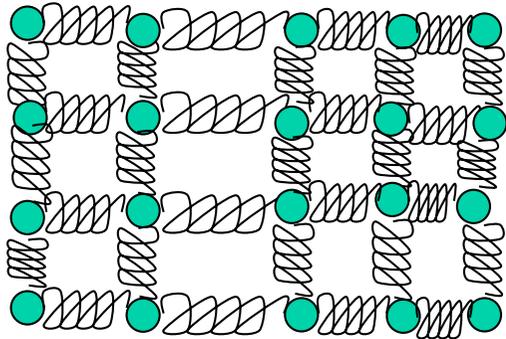


SC

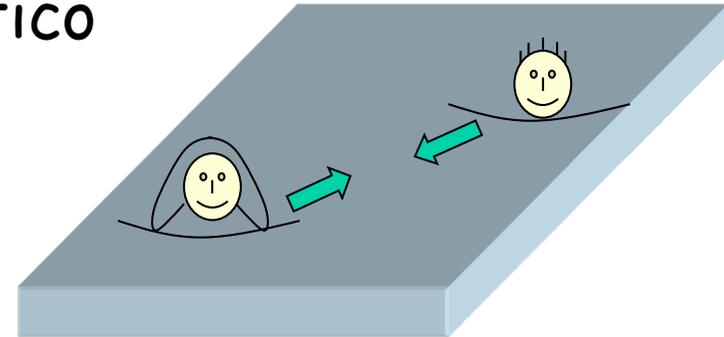


Nei SC l'ordine è nel movimento (non nella posizione) degli elettroni.

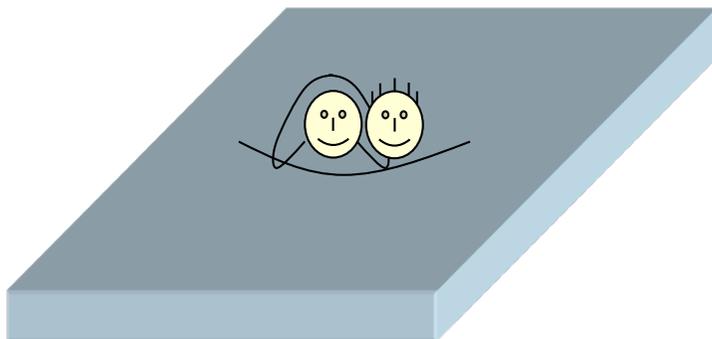
Perché in un SC gli elettroni si accoppiano? dopo tutto sono cariche uguali...



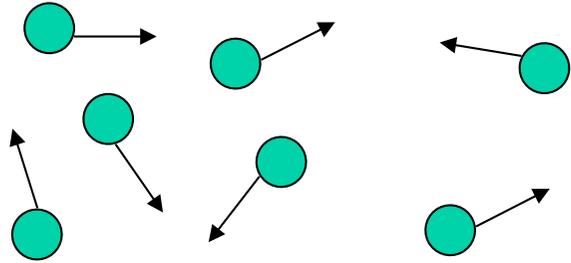
Il reticolo ionico è
un mezzo elastico



L'attrazione elastica del reticolo può vincere la repulsione
Coulombiana tra cariche elettriche uguali e gli el
si accoppiano

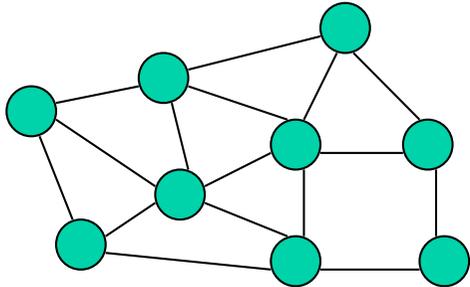


Perché ρ è finita a $T > T_c$?



I singoli el sono **onde distinte**:
urtano contro le impurezze
e le irregolarità del reticolo

Perché $\rho=0$ a $T < T_c$?



Gli el formano **un'unica onda** e si
muovono insieme. "E' più difficile
fermarli o deviarli": non sentono
impurezze ed oscillazioni reticolari

Un SC è un nuovo stato elettronico della materia:
è molto diverso da un conduttore perfetto in cui
gli elettroni restano indipendenti gli uni dagli altri.

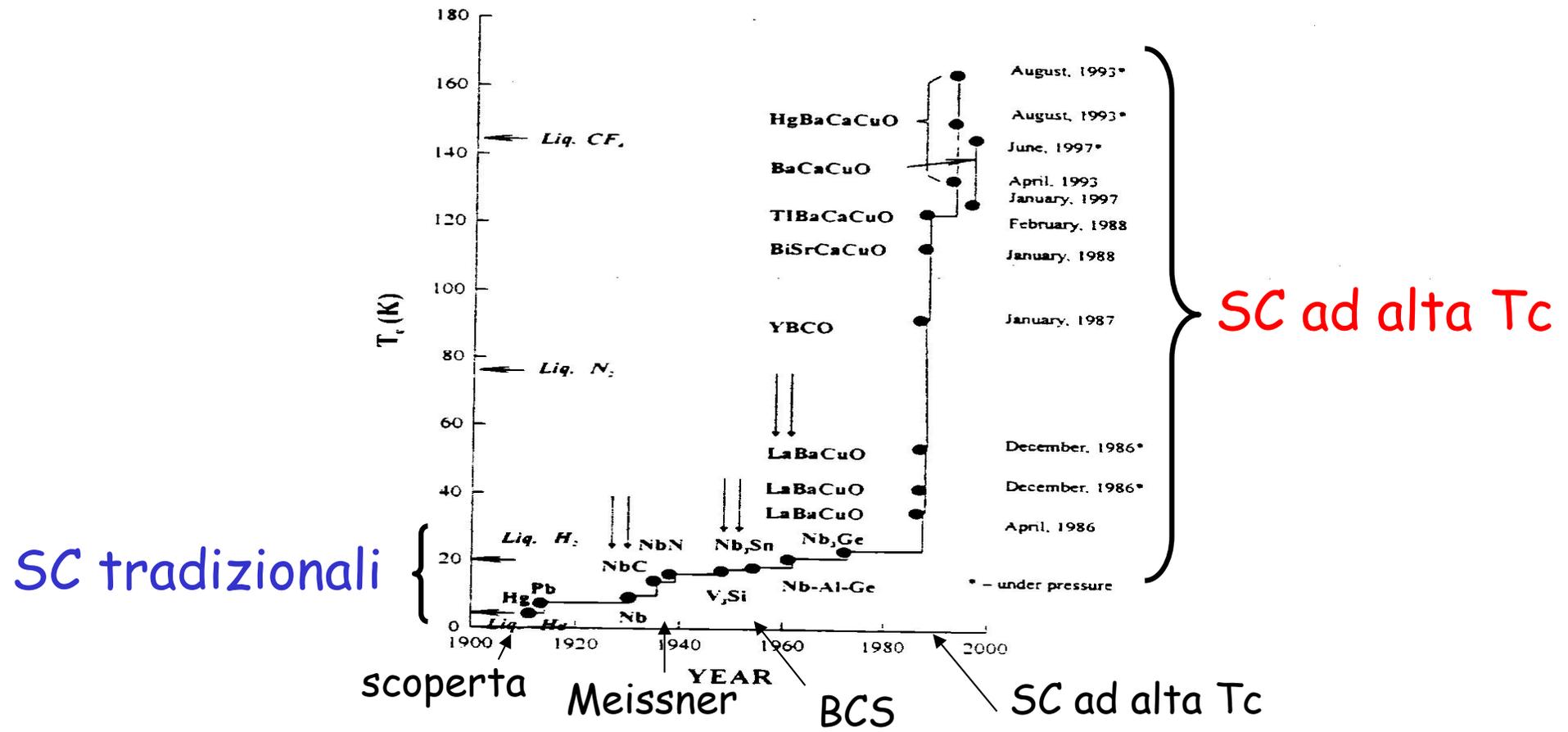
Cosa determina T_c ?

Più T è alta e più gli el si agitano velocemente

→ è più difficile tenerli accoppiati

A $T > T_c$ gli el si agitano troppo, le coppie si rompono ed il metallo torna un conduttore normale

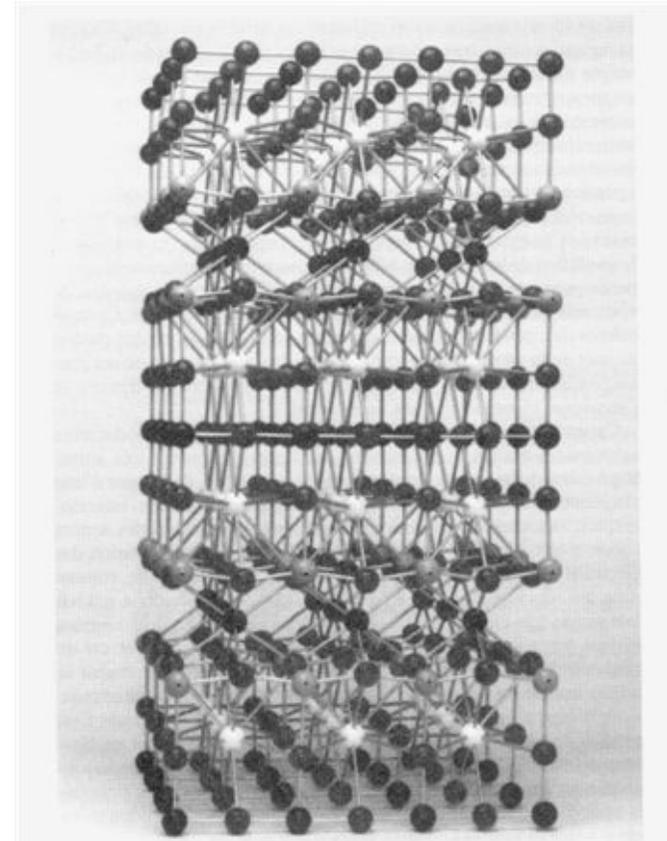
Più forte è la "colla" che accoppia gli el e maggiore è T_c



Superconduttori ad alta T_c (1986)



J. Georg Bednorz (à gauche) et K. Alex Müller (à droite) se félicitent à l'annonce du prix Nobel de physique qui vient de leur être attribué.



Structure pérovskite de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBACUO) déficiente en oxygène. En gris clair : oxygène ; en gris foncé : cuivre ; en blanc : baryum ; en noir : yttrium (Laboratoire des solides irradiés, CEA / École polytechnique.)

I SC ad alta T_c

- SC tradizionali (prima del 1986) $T_c < 23\text{K}$: la teoria BCS andava bene
- SC ad alta T_c (dal 1986) $T_c < 155\text{K}$: **serve una nuova teoria:**
 - Qual è il meccanismo (la colla) per formare coppie di el così robuste da restare unite a T così alte?
 - Lo stato metallico a $T > T_c$ è piuttosto diverso rispetto ai conduttori tradizionali. Perché?
 - Rivoluzione nella fisica dello stato solido? Nuovo concetto di stato metallico?
 - Ci saranno nuove applicazioni? Le "vecchie" applicazioni diventeranno più economiche?

Sommario

□ Cos'è un conduttore?

Come si comporta un conduttore normale?
Com'è fatto dentro?

□ Cos'è un superconduttore?

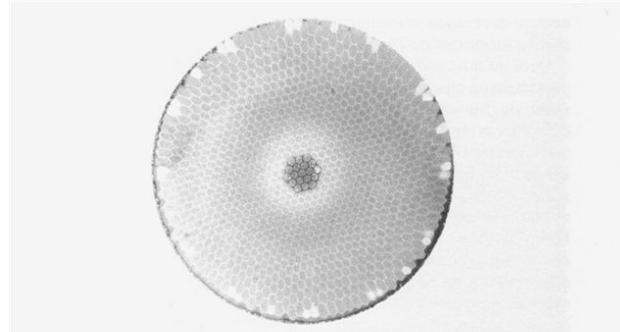
Come si comporta un SC?
Com'è fatto dentro?

□ A che servono i SC?

A che servono i superconduttori?

Applicazioni di potenza:

- Cavi per trasporto di correnti enormi (migliaia di Ampere/mm)
- Per fare elettromagneti potenti servono grandi correnti: con metalli normali servono cavi grandi, c'è grande riscaldamento Con i SC si possono ottenere elettromagneti molto più potenti: levitazione di treni, motori, acceleratori di particelle,...
- risonanza magnetica nucleare,...



Le Jupiter II, un bateau propulsé par des moteurs supraconducteurs (en bas).



Circuiti veloci per supercomputers (un po' passato di moda: ora il mercato è orientato verso computers piccoli...)

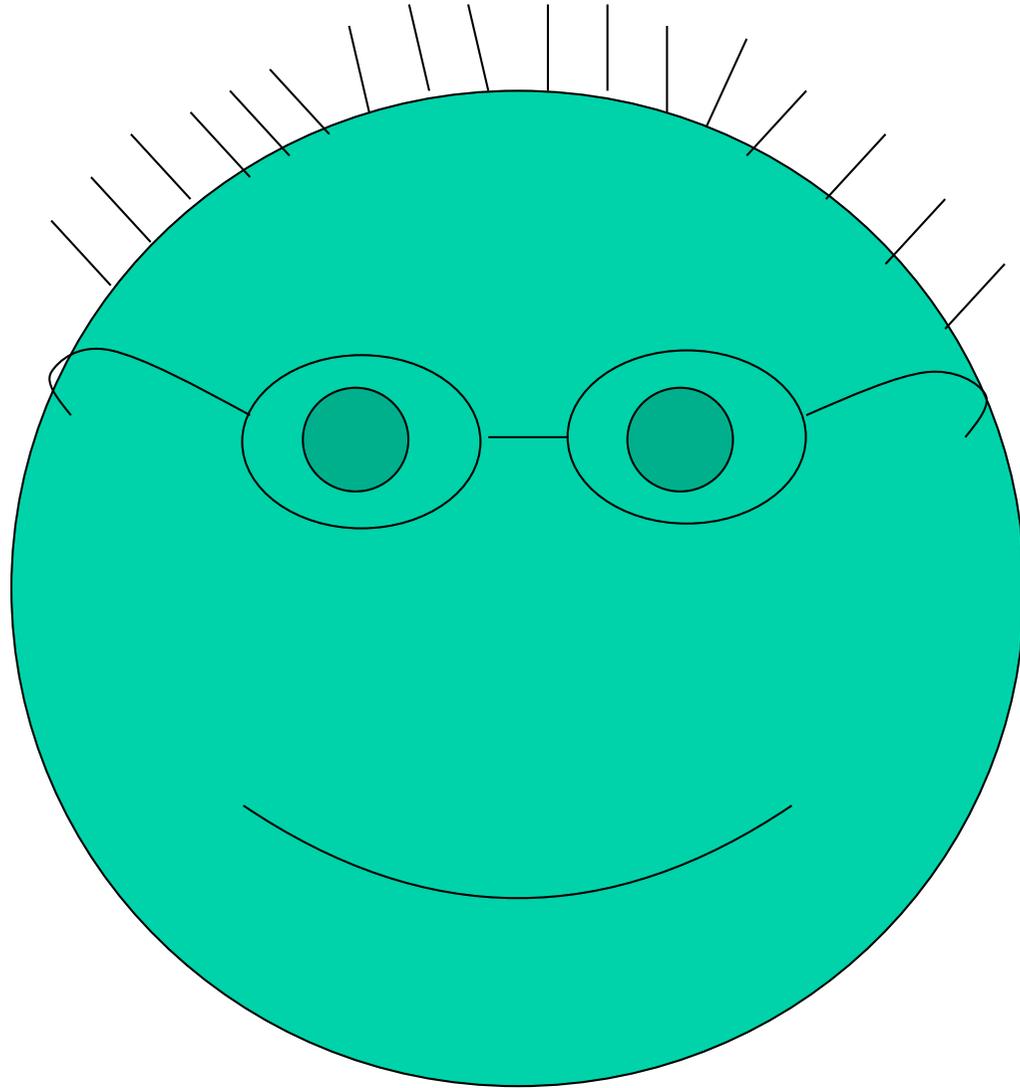
- Rivelatori di campi magnetici debolissimi (SQUIDS basati su effetto Josephson): applicazioni in diagnostica e ricerca medica (p. es. mappe dell'attività cerebrale);

- Sensori,

ma anche (e soprattutto?)...

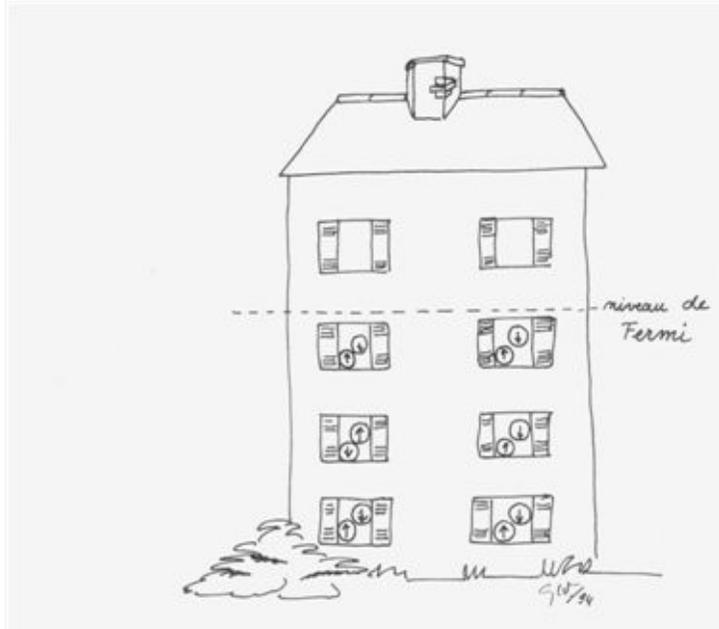
Dopo quasi 100 anni i SC sono ancora una bellissima palestra intellettuale

- Ci hanno fatto capire meglio la meccanica quantistica, la fisica nucleare, la meccanica statistica... e, ovviamente, la fisica dei metalli
- Ci spingono a ripensare in modo moderno lo stato metallico e le ragioni delle sue anomalie;
- Hanno stimolato la scienza dei materiali;
- Se si capisse il meccanismo della SC ad alta T_c si potrebbero forse "ingegnerizzare" dei composti SC a temperatura ambiente
-



Grazie della vostra attenzione

Perché gli el si devono accoppiare prima di "ballare" tutti insieme?

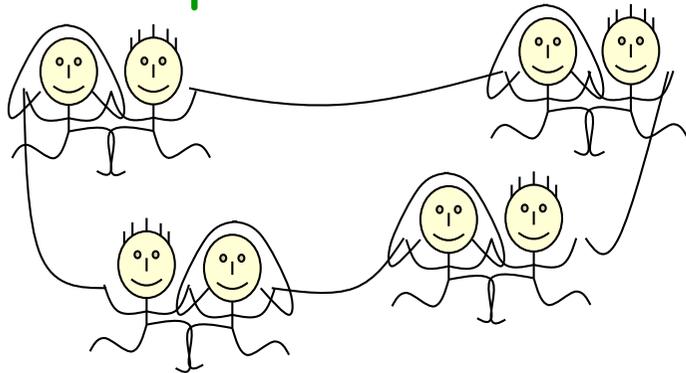


Gli el sono **Fermioni** → devono soddisfare il principio di esclusione di Pauli: non possono occupare lo stesso stato (fare la stessa onda) in due.

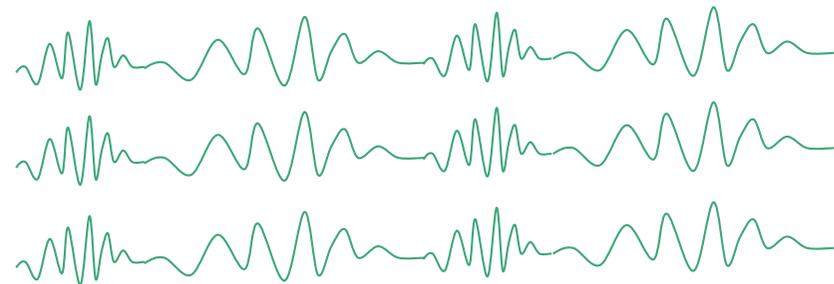
Però...

se due elettroni si accoppiano formano un **bosone** (che non deve soddisfare Pauli) e quindi molte coppie possono fare una condensazione di Bose-Einstein nello stesso stato (formare un'unica onda)

Superconduttore:



gli el si accoppiano e si muovono coerentemente in fase **un'onda unica**



Che succede microscopicamente in un SC?

reguliere veld door het omkleppen
van atomen & toevanig te wreezen
brunzen.

Lichtster:

kan zelt tussen:

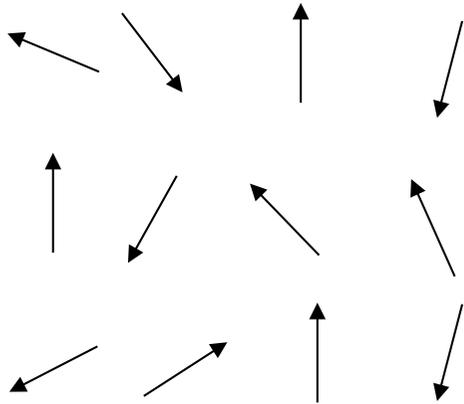


Tekens viel amonab.
ling voo vlyend voo-
tprungr,
1 amonabelij ..

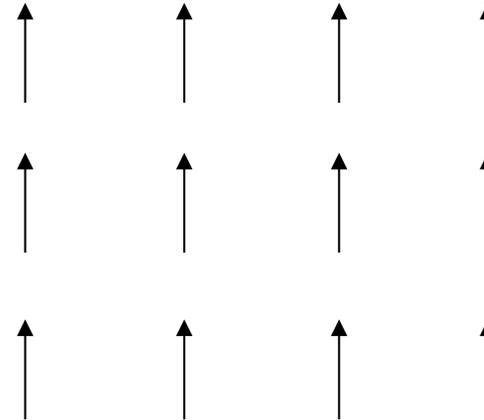
vallt viel voo het eerste op
grond van de krapte van der
tprungr van Supergeleidung is
geleiding.

Notes manuscrites de Keesom durant la réunion de Leyde. Au cours d'une réunion à Leyde à laquelle participaient, entre autres, Ehrenfest, Einstein, Langevin, Lorentz et Onnes différentes hypothèses étaient discutées pour comprendre la supraconductivité. Les notes prises par Keesom mentionnent, croquis à l'appui, une proposition d'Einstein : les électrons décriraient une trajectoire spiralée autour de chaque atome, puis passeraient d'un atome au voisin sans collision. Il est amusant de constater que ce genre d'« état lié » n'est pas sans ressemblance avec certains modèles envisagés récemment pour comprendre la supraconductivité à haute T_c des nouvelles céramiques.

Analogia: paramagnete ↔ ferromagnete

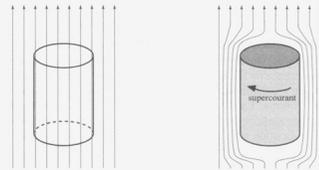


$T > T_c$



$T < T_c$

I momenti magnetici si organizzano coerentemente per formare un ferromagnete



$T > T_c$
Le champ magnétique traverse l'échantillon

$T < T_c$
Le champ magnétique est expulsé du supraconducteur

L'effet Meissner. L'effet Meissner est la preuve que l'état supraconducteur n'est pas uniquement caractérisé par une résistance nulle, et l'expérience schématisée ici le prouve : lorsqu'on refroidit un échantillon en présence d'un champ magnétique, la transition supraconductrice s'accompagne de l'expulsion du champ hors de l'échantillon. Le caractère surprenant de cette propriété, joint aux difficultés expérimentales de toutes sortes qui peuvent en gêner l'observation, expliquent qu'il ait fallu 25 ans pour le découvrir, bien que des expériences analogues à celle-ci aient été faites dès le début de la supraconductivité.



L'âge d'or à Cambridge : le Mond Laboratory en 1963. 1. David Schönberg; 2. Brian Pippard; 3. Brian Josephson.



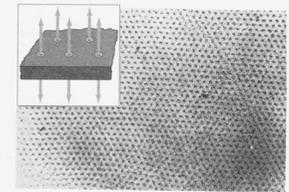
Les frères London : Heinz (à gauche) et Fritz (à droite).



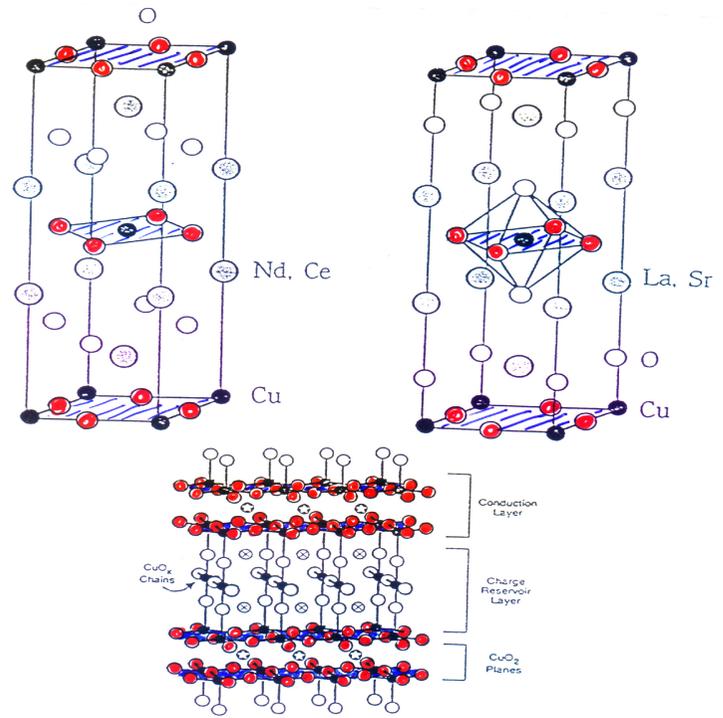
Shubnikov photographié par son épouse Trapeznikova dans les années trente.



Photo prise sur les marches de l'Institut physico-technique de Kharkov lors de la visite de Kapitza en 1934. De gauche à droite, au premier rang : L.V. Shubnikov, A.I. Leipunski, L.D. Landau, P.L. Kapitza; au second rang : V. Finkelstein, O.N. Trapeznikova, K.D. Snelnikov, Y.P. Riabinine.



Le réseau d'Abrikosov des vortex dans un échantillon de supraconducteur de type II. La description de l'état mixte des supraconducteurs de seconde espèce constitue une des réussites les plus spectaculaires du modèle de Ginzburg-Landau. Annulée théoriquement en 1952 par Abrikosov, cette structure, où le champ magnétique pénètre dans le supraconducteur à l'intérieur de tubes de flux (vortex) régulièrement disposés suivant un réseau triangulaire, fut observée douze ans plus tard en recouvrant la surface du supraconducteur d'une fine poudre d'un matériau ferromagnétique. Les grains se concentrent sur les vortex, permettant ainsi de les visualiser. La dynamique de ce réseau de vortex, ainsi que son interaction avec les défauts cristallinographiques du métal, jouent un rôle primordial dans les propriétés électrodynamiques de ces supraconducteurs, et conditionnent toutes leurs applications.



In un conduttore perfetto il campo magnetico resta intrappolato e non varia.

Esempio:

- Procedura 1: fisso $B=B_0$ e raffreddo a $T < T_c$. Poi spengo B .
I parametri esterni sono $(T, B=0)$, ma il conduttore perfetto è in uno stato che dentro ha $B=B_0$
- Procedura 2: fisso $B=0$ e raffreddo a $T < T_c$.
I parametri esterni sono $(T, B=0)$ e nel conduttore perfetto ora il campo interno è $B=0$

Lo stato del conduttore perfetto dipende dalla sua storia: non sarebbe una vera fase termodinamica

I superconduttori, invece, sono una vera fase termodinamica: un particolare stato della materia