

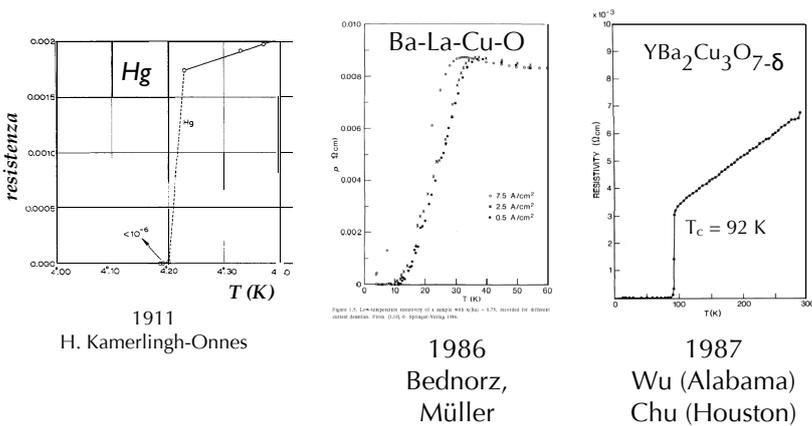
Superconduttività: un'introduzione

Superconduttività: "fabbrica di Nobel"

 1913 Heike Kamerlingh-Onnes <i>"for his investigations on the properties of matter at low temperatures which led, inter alia, to the production of liquid helium".</i>	 1962 Lev Davidovich Landau <i>"for his pioneering theories for condensed matter, especially liquid helium".</i>	 1973 Brian D. Josephson <i>"for his theoretical predictions of the properties of a supercurrent through a tunnel barrier, in particular those phenomena which are generally known as the Josephson effects".</i>
 1973 Ivar Giaever <i>"for [his] experimental discoveries regarding tunneling phenomena in superconductors".</i>	 1987 J. Georg Bednorz K. Alexander Müller <i>"for their important break-through in the discovery of superconductivity in ceramic materials".</i>	
 1972 John Bardeen Leon Neil Cooper John Robert Schrieffer <i>"for their jointly developed theory of superconductivity, usually called the BCS-theory".</i>	 2003 Vitaly L. Ginzburg <i>"for pioneering contributions to the theory of superconductors and superfluids".</i>	 2003 Alexei A. Abrikosov <i>"for pioneering contributions to the theory of superconductors".</i>
	 2016 David J. Thouless J. Michael Kosterlitz <i>"for theoretical discoveries of topological phase transitions and topological phases of matter".</i>	

Conduttore perfetto

$\rho = 0$ sotto una ben precisa temperatura "critica", T_c , caratteristica del materiale.



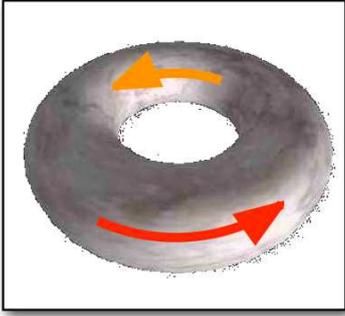
1911
H. Kamerlingh-Onnes

1986
Bednorz,
Müller

1987
Wu (Alabama)
Chu (Houston)

Conduttore perfetto → correnti persistenti

$\rho = 0$ sotto una ben precisa temperatura “critica”, T_c , caratteristica del materiale.
Annullamento della resistenza



$$I(t) \stackrel{?}{=} I_0 e^{-t/\tau}$$

$$\tau > 10^5 \text{ anni}$$

$$\rho < 10^{-23} \Omega \text{cm}$$

[Ag, $T = 4 \text{ K}$: $\rho \simeq 10^{-13} \Omega \text{cm}$]

Diamagnete perfetto

Sotto la stessa temperatura critica T_c :

Espulsione del flusso di \mathbf{B}

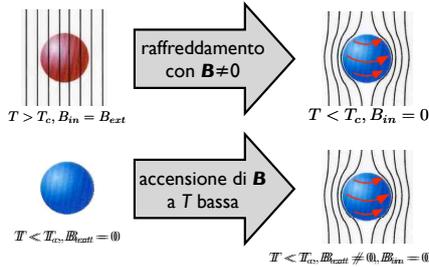


Walter Meißner

1933



Robert Ochsenfeld



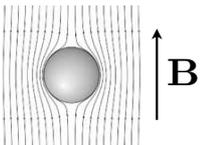
Nascono correnti persistenti spontanee.

“Effetto Meissner-Ochsenfeld”

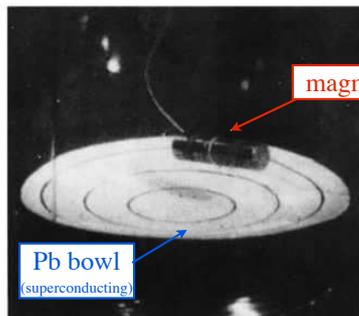
Enrico Silva - diritti riservati - Non è permessa, fra l'altro, l'inclusione anche parziale in altre opere senza il consenso scritto dell'autore

Effetto Meissner → levitazione (un tipo...)

Nel superconduttore $\mathbf{B} = 0$



Si sviluppano forze repulsive fra un magnete permanente e un superconduttore → possibile levitazione



magnet

Pb bowl (superconducting)

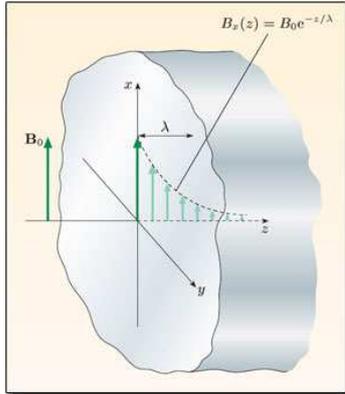
Figure from Buckel, Kleiner, Superconductivity - Fundamentals and Applications

Attenzione: il vero effetto Meissner è di difficile osservazione!

Tutte o quasi le dimostrazioni di “levitazione magnetica” con superconduttori (Youtube) sono dovute a un diverente fenomeno (cfr. corso di “Superconduttività con Applicazioni”).

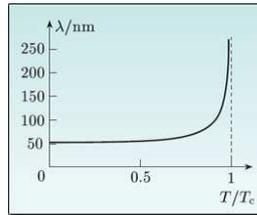
Lunghezza di penetrazione

Il campo magnetico è espulso dal superconduttore decadendo su una lunghezza tipica: lunghezza di penetrazione di London



$$\lambda = \sqrt{\frac{m_s}{\mu_0 n_s e^2}}$$

Dipende da T



Osservazione
magnetoottica.

Univ. di Oslo



Lunghezza di penetrazione

Lunghezza di penetrazione di London: lunghezza caratteristica del decadimento di un campo elettromagnetico.

È data dalla concentrazione di elettroni superconduttori n_s , di massa m_s ,

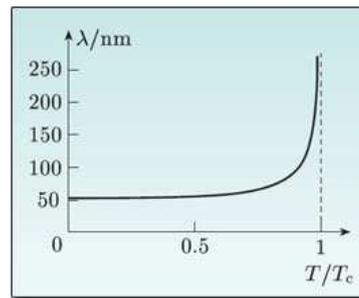
$$\lambda(T) = \sqrt{\frac{m_s}{\mu_0 n_s(T) e^2}}$$

Diverge a T_c , poiché

$$n_s(T) = n_{s0} \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^\alpha \right]^\beta$$

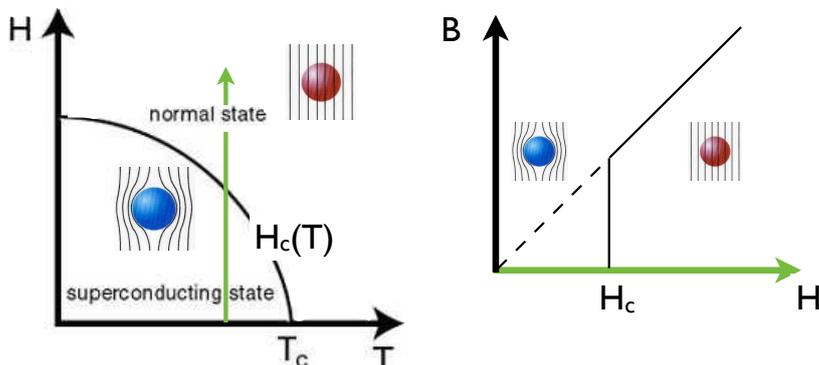
con (nei superconduttori metallici
"a bassa T_c "): $\alpha = 4$

$$\beta = 1$$

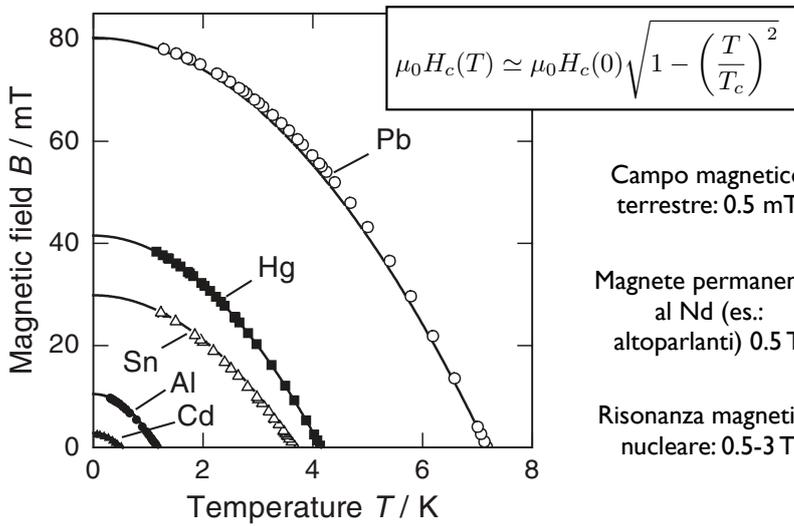


Campo critico

Un campo magnetico sufficientemente intenso
- dipendente da T -
distrugge la superconduttività.

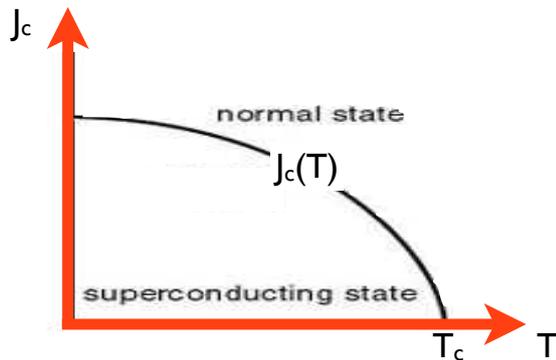


Campo critico (S.C. di tipo I)



(Densità di) corrente critica

Una densità di corrente sufficientemente intensa - dipendente da T - distrugge la superconduttività ("corrente di depairing")



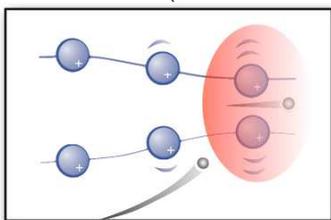
Risultati della teoria microscopica

Cooper (1956): una interazione attrattiva fra due elettroni, comunque piccola, in presenza di una sfera di Fermi occupata determina uno stato legato con $E_{2e} < 2E_F$

BCS (1957): esiste uno stato fondamentale $\mathbf{a} \mathbf{T} = \mathbf{0}$ in cui tutti gli elettroni formano coppie, con coerenza di fase (stato più ordinato), con una gap nella densità degli stati di singola particella.



Meccanismo: distorsioni (ritardate) del reticolo. Più efficiente a basse T (vibrazioni termiche ridotte).



Coppia correlata.
 Scattering con dissipazione (trasferimento netto di momento) \rightarrow rottura della coppia.
 Energie troppo piccole rispetto alla gap \rightarrow supercorrente

Coppie vs. elettroni “normali” (“quasiparticelle”)

Esistono sempre nel superconduttore (tranne che, eventualmente a $T=0$):

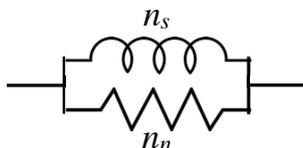
- Elettroni superconduttivi n_s , a formare $n_s/2$ Coppie di Cooper

$$n_s(T) = n_{s0} \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^\alpha \right]^\beta$$

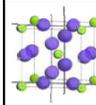
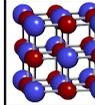
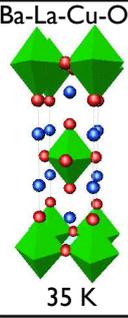
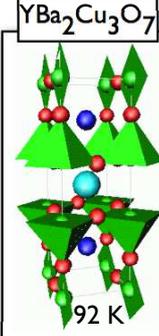
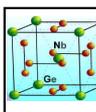
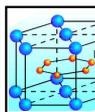
- Elettroni di cristallo (“quasiparticelle”) $n_n = n_{tot} - n_s/2$
(con legge di dispersione differente dallo stato normale)

$$n_n(T) = n_{tot} - n_s(T)$$

→ “modello a due fluidi”:



Elementi, leghe, intermetallici, ceramiche,...

NbTi $T_c = 10$ K	 Nb ₃ Sn 18.3 K	 NbN 16 K	 Ba-La-Cu-O 35 K	 YBa ₂ Cu ₃ O ₇ 92 K
fullereni $T_c^{max} = 52$ K	 Nb ₃ Ge 23.2 K	 MgB ₂ 40 K		
pnictidi $T_c^{max} = 52$ K	Moltissimi elementi Nb, 9 K Hg, 4.15 K Pb, 7.2 K Sn, 3.7 K In, 3.4 K Rh, 35 μK (!) ...			
diamante (drogato), cementi (12 CaO • 7 Al ₂ O ₃), materiali idratati...			Cuprati: $T_c^{max} = 164$ K	etc etc ...

Stato quantistico macroscopico

- Funzione d'onda macroscopica
- Quantizzazione del flusso di \mathbf{B}
- Effetto tunnel/Josephson superconduttivo
- Effetti di interferenza
- Il campo magnetico influisce sulla fase
- ... tutte le proprietà e applicazioni dei superconduttori