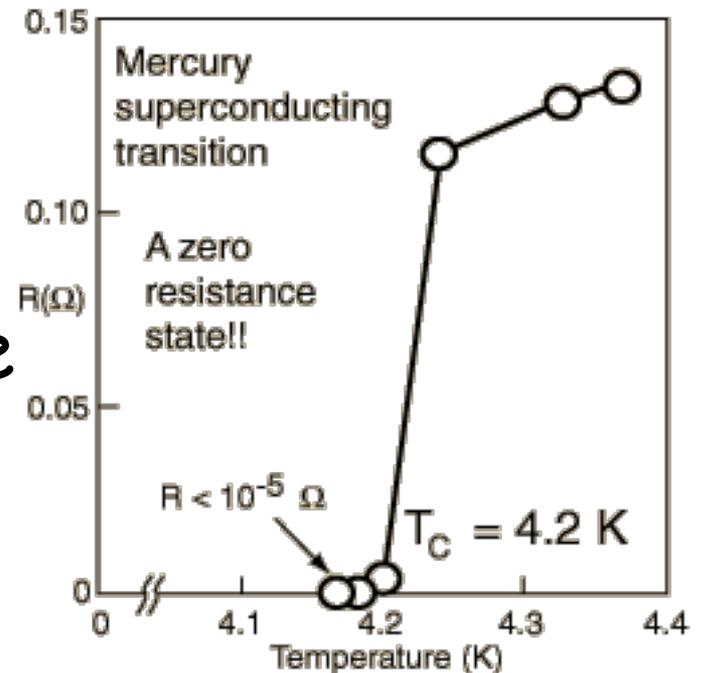
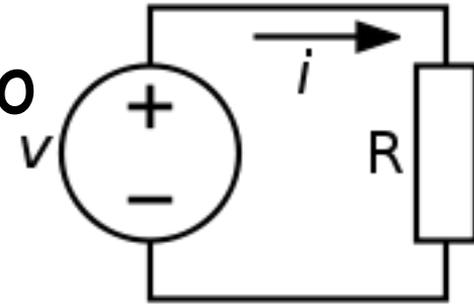


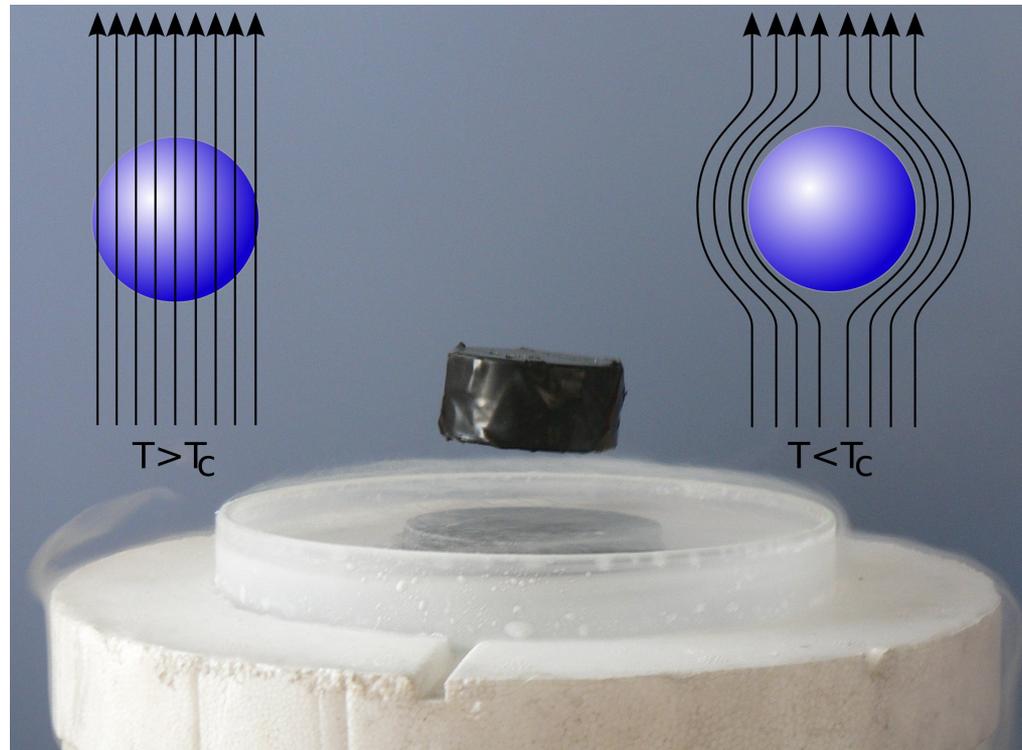
# SUPERCONDUTTORI: PROPRIETA'

- $R=0$  in un solenoide superconduttore il tempo di decadimento puo' essere superiore ai 100000 anni !!!
- Sotto una certa  $T_c$  ho una transizione di fase del secondo ordine (come l'elio superfluido ed i ferromagneti)



# SUPERCONDUTTORI: PROPRIETA'

- Effetto Meissner



I magneti superconduttori sono diamagneti perfetti e quindi un superconduttore puo' far lievitare un magnete permanente come in figura. questo non e' un effetto classico! Classicamente  $dB/dt=0$  NON  $B=0$ . La conducibilità perfetta infinita, infatti classicamente implica che se accendiamo un campo magnetico intorno ad un conduttore perfetto le correnti interne creano dentro il materiale un campo costante.

# SUPERCONDUTTORI: PROPRIETA'

Le correnti all'interno del superconduttore generano un campo magnetico molto forte intorno al superconduttore. Al di sotto di una temperatura critica, e di un valore del campo magnetico critico per ogni temperatura sotto la critica, il materiale e' nello stato superconduttore ed il campo magnetico e' limitato all'esterno del superconduttore. Sopra  $T_c$  ed  $H_c$  il materiale e' nello stato normale.

Elemento	$T_c$ (K)	$H_c$ ( Gauss)
Al	1.196	99
Hg	4.15	411 (fase alfa)
Tc	7.77	1410

Etc.

Le  $T_c$  vanno dai mK a circa 20 K per I superconduttori che seguono la BCS e sono molti i metalli che diventato superconduttori.

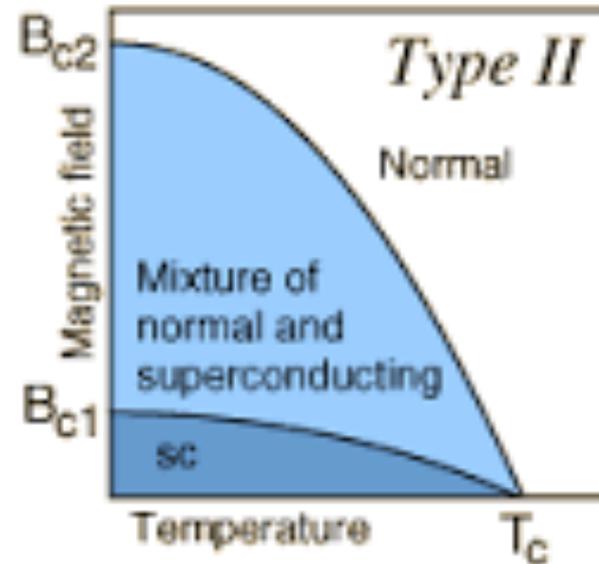
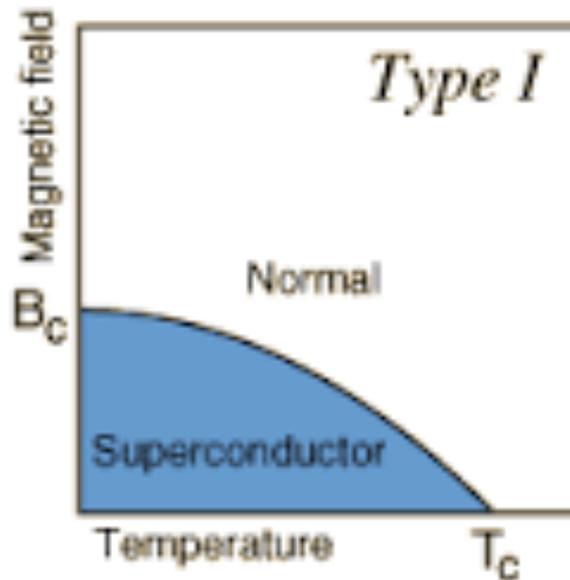
# SUPERCONDUTTORI: PROPRIETA'

La maniera in cui il campo penetra dipende anche dalla geometria ma nel caso di una geometria semplice (cilindri sottili) abbiamo:

## Superconduttori di tipo I

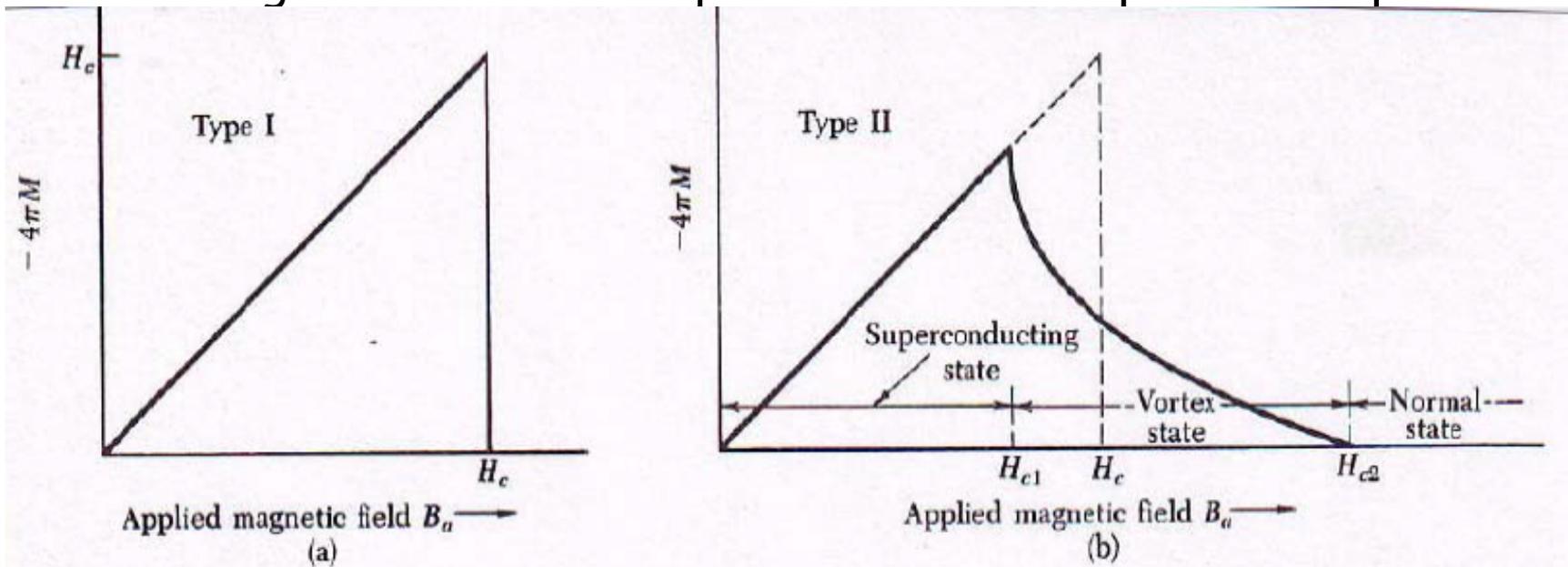
Se sopra al campo critico tutto il campione va nello stato normale e il campo magnetico penetra perfettamente.

**Superconduttori di tipo II** si comportano come in figura che rappresenta i phase boundary tra stato normale e superconduttivo



# SUPERCONDUTTORI: PROPRIETA'

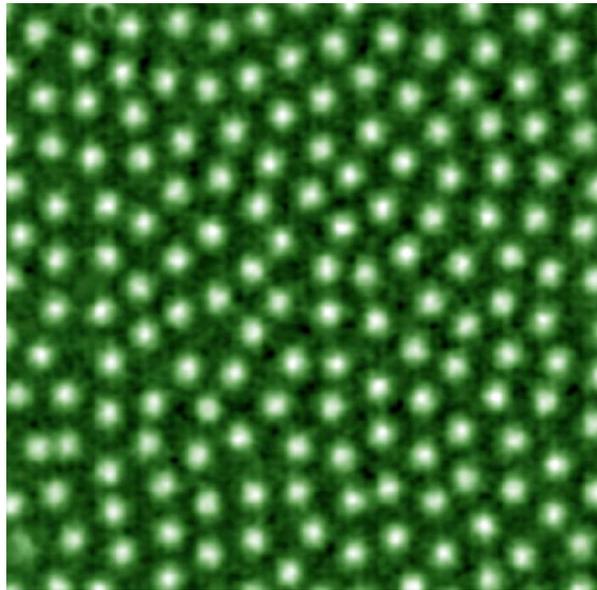
Curva di magnetizzazione di superconduttori di tipo I e di Tipo II



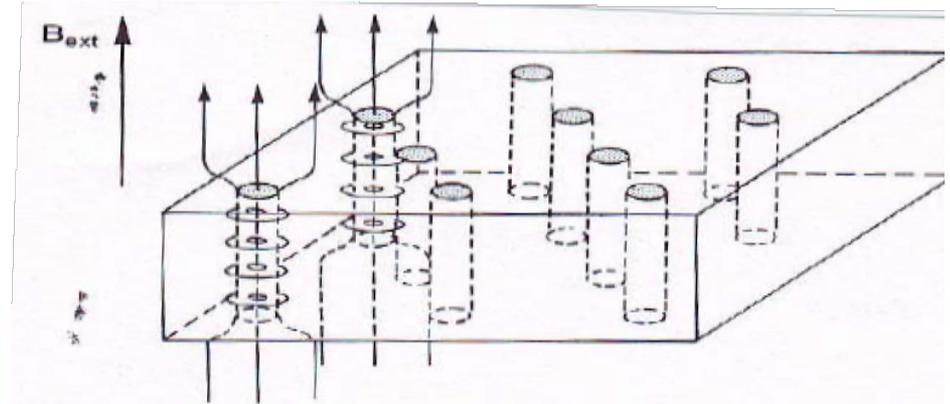
**Figure 4** (a) Magnetization versus applied magnetic field for a bulk superconductor exhibiting a complete Meissner effect (perfect diamagnetism). A superconductor with this behavior is called a type I superconductor. Above the critical field  $H_c$  the specimen is a normal conductor and the magnetization is too small to be seen on this scale. Note that minus  $4\pi M$  is plotted on the vertical scale: the negative value of  $M$  corresponds to diamagnetism. (b) Superconducting magnetization curve of a type II superconductor. The flux starts to penetrate the specimen at a field  $H_{c1}$  lower than the thermodynamic critical field  $H_c$ . The specimen is in a vortex state between  $H_{c1}$  and  $H_{c2}$ , and it has superconducting electrical properties up to  $H_{c2}$ . Above  $H_{c2}$  the specimen is a normal conductor in every respect, except for possible surface effects. For given  $H_c$  the area under the magnetization curve is the same for a type II superconductor as for a type I. (CGS units in all parts of this figure.)

# SUPERCONDUTTORI: PROPRIETA'

Nella regione intermedia i superconduttori di tipo II sviluppano una struttura microscopica molto complicata chiamata stato misto e Abrikosov propose (poi confermato da esperimenti) che il campo penetrasse parzialmente il campione in forma di "filamenti" di flusso.



Magneto-optical images of vortices in a NbSe<sub>2</sub> superconducting crystal at 4.3 K after cooling in magnetic field of 3 and 7 Oe.



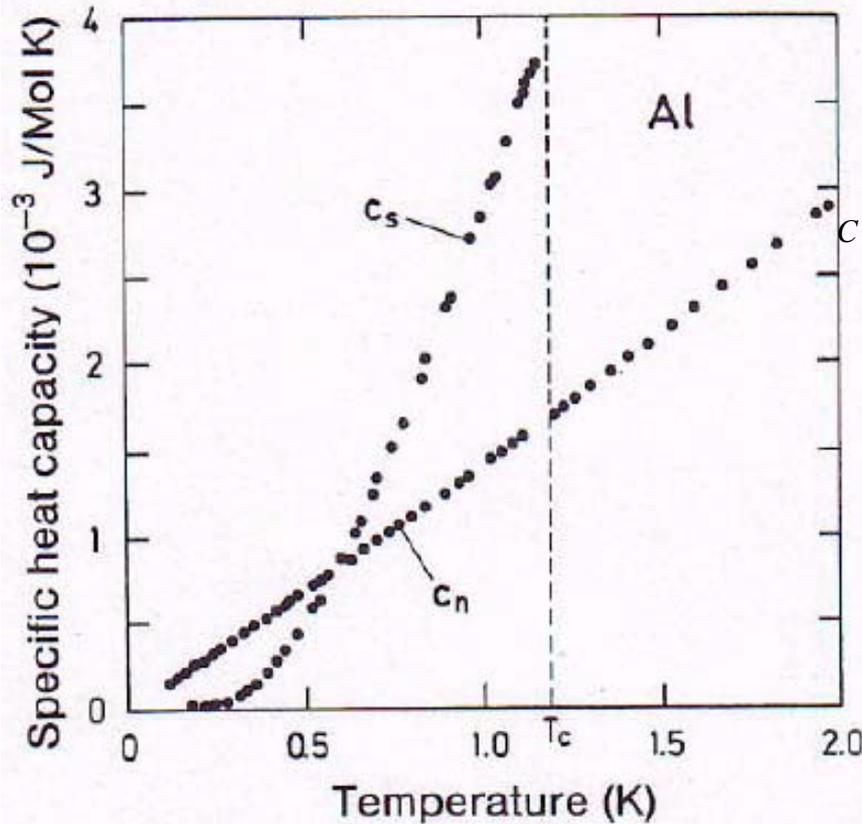
I Tubi di flusso permettono al campo magnetico di penetrare. Ciascun tubo di flusso e' circondato da anelli di corrente superconduttiva e racchiude un quanto magnetico di flusso

# SUPERCONDUTTORI: PROPRIETA'

## Calore Specifico

$$C = C_{el} + C_{lat} = \gamma T + \beta T^3$$

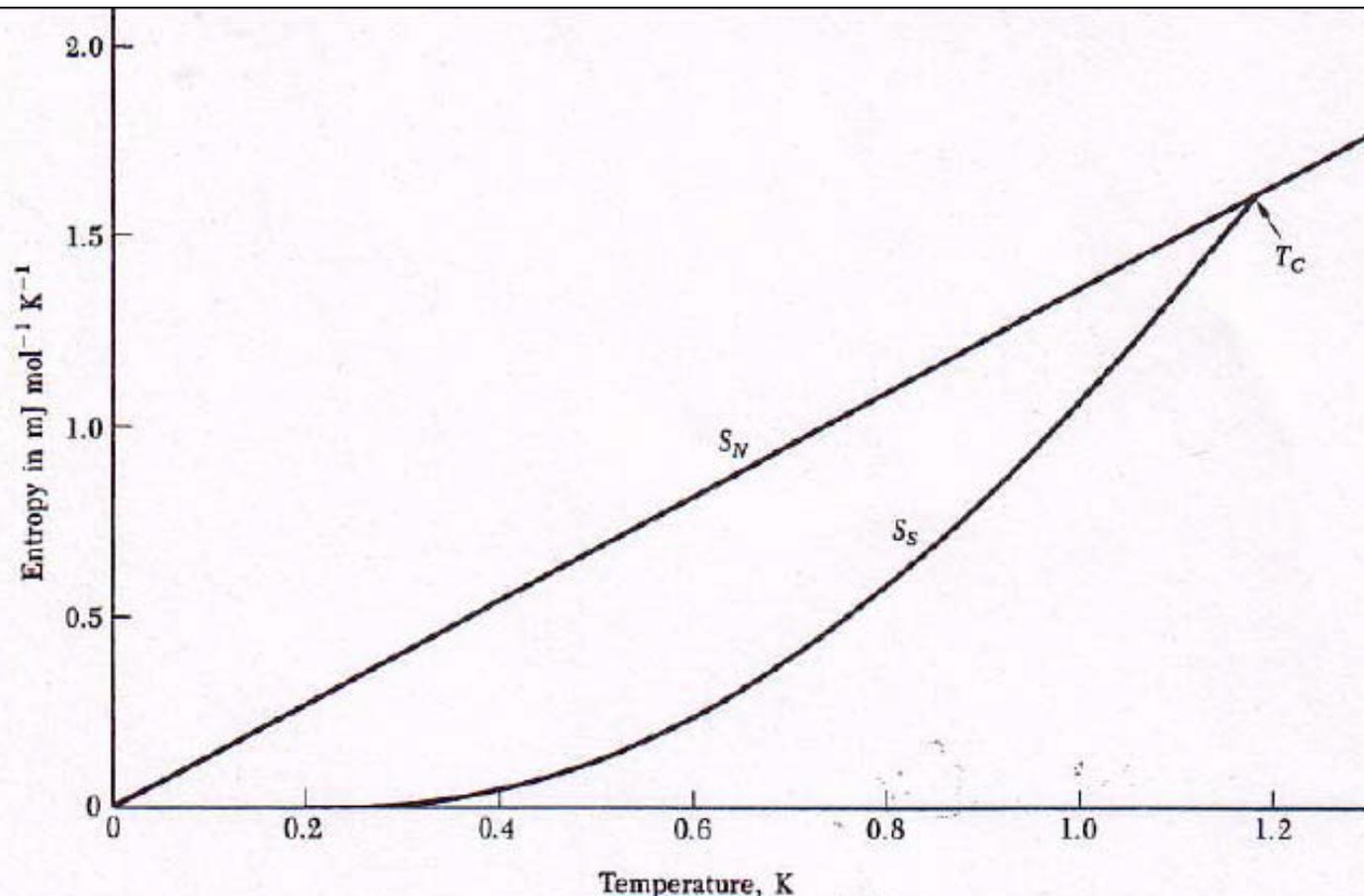
$C_{SC}$  va come  $\exp(-A/K_B T)$



**Fig. 10.3.** Specific heat of normally conducting ( $c_n$ ) and superconducting ( $c_s$ ) aluminium. Below the transition temperature  $T_c$ , the normally conducting phase is created by applying a weak magnetic field of 300 G. (After [10.3])

# SUPERCONDUTTORI: PROPRIETA'

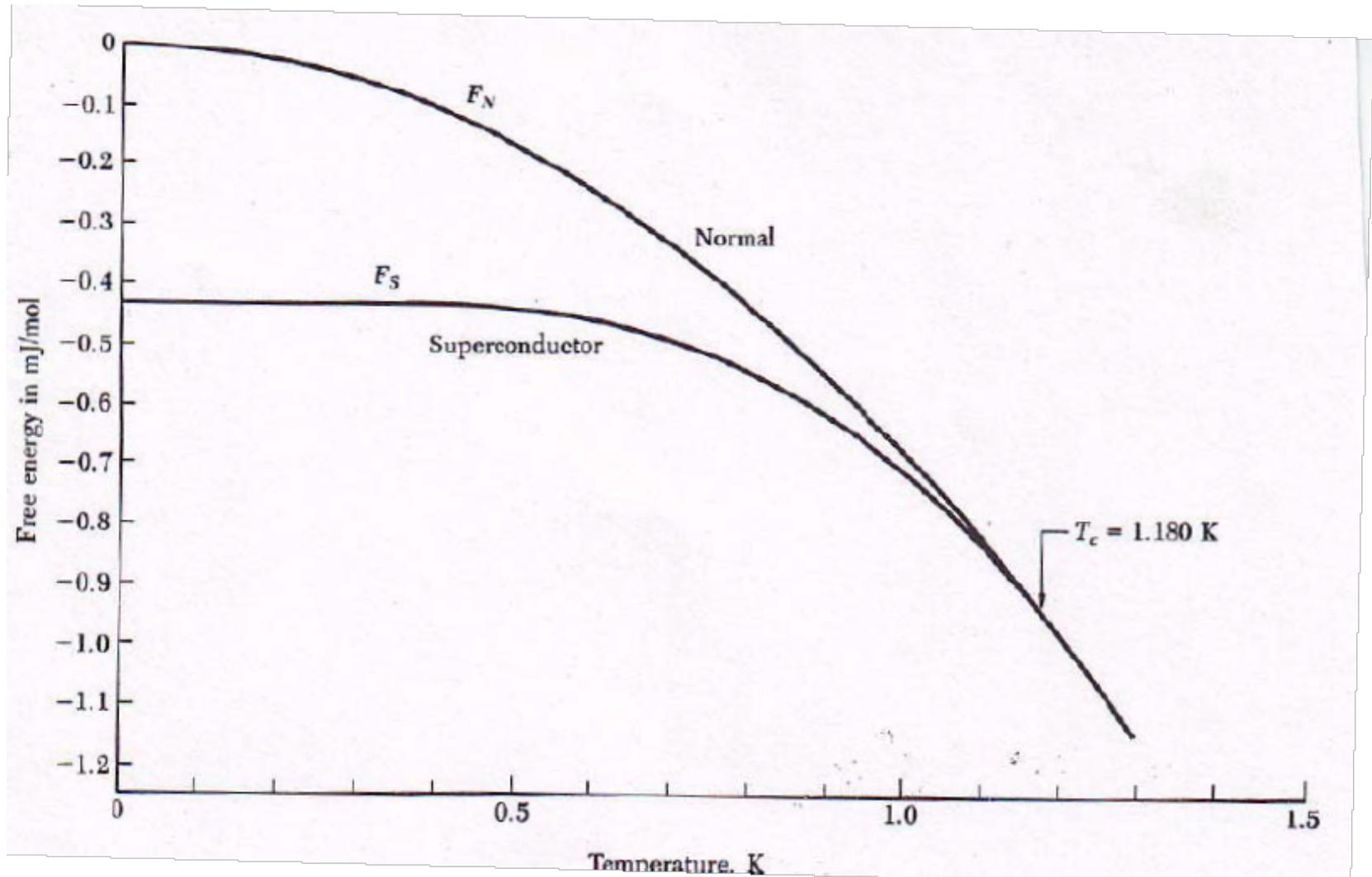
## Entropia, i SC sono piu' ordinati



**Figure 6** Entropy  $S$  of aluminum in the normal and superconducting states as a function of the temperature. The entropy is lower in the superconducting state because the electrons are more ordered here than in the normal state. At any temperature below the critical temperature  $T_c$  the specimen can be put in the normal state by application of a magnetic field stronger than the critical field.

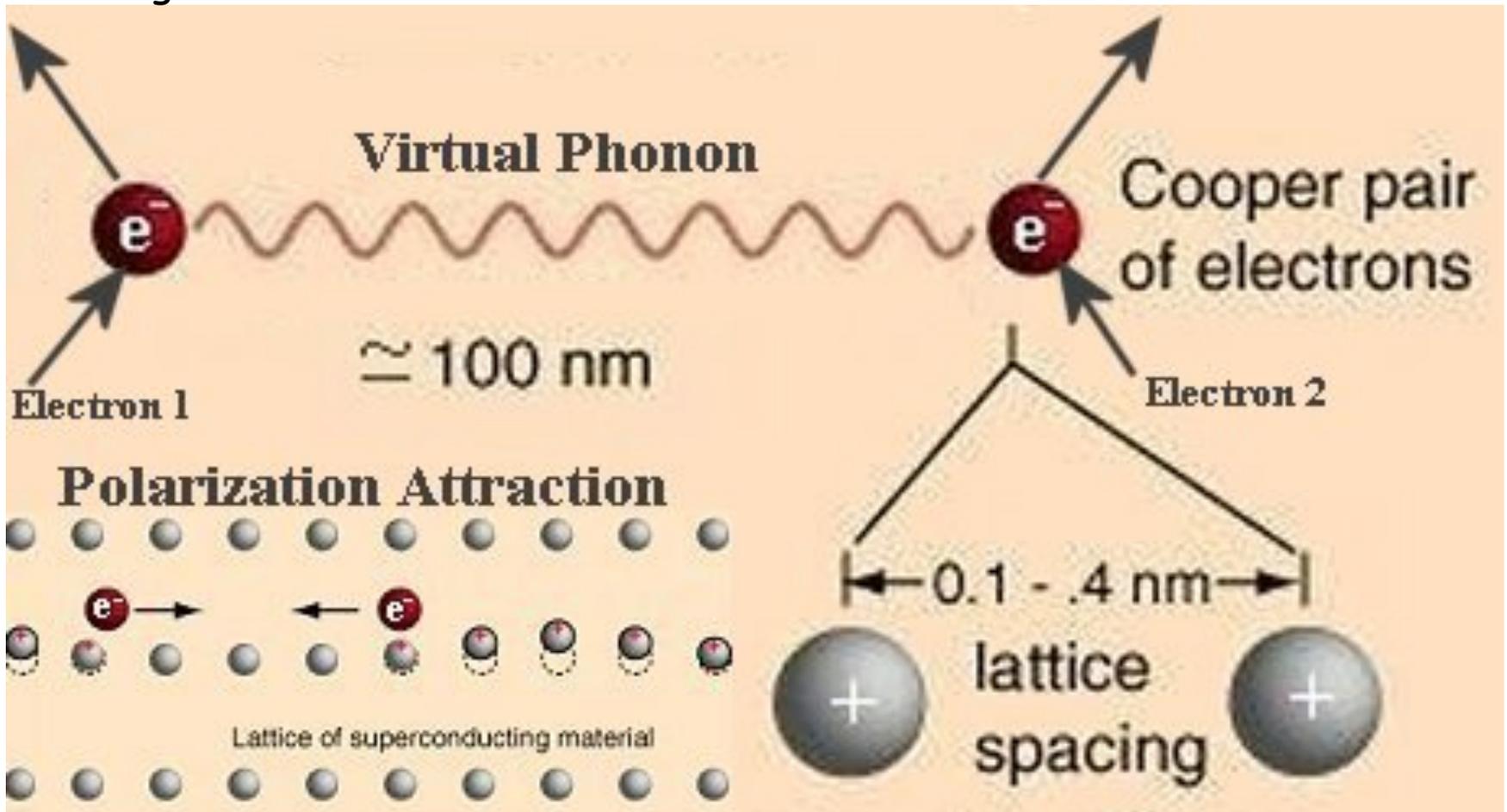
# SUPERCONDUTTORI: PROPRIETA'

Energia Libera  $F=(U-TS)$ , i SC sono piu' ordinati



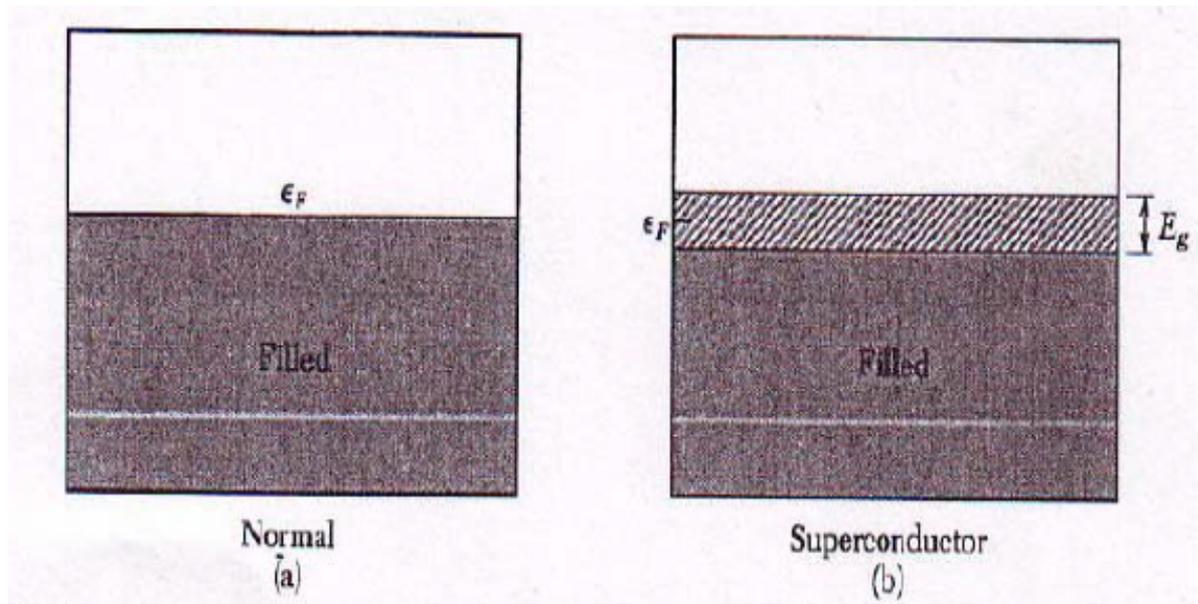
# SUPERCONDUTTORI: BCS

Elettroni vicini al livello di Fermi si uniscono in coppie di Cooper attraverso l'interazione con il reticolo attraverso uno scambio di fonone virtuale (Questa teoria non spiega la high Tc). L'energia di legame  $e'$  del meV.



# SUPERCONDUTTORI: BCS

Le coppie di elettroni sono Bosoni e condensano nello stesso livello di energia che quindi risulta più basso dell'energia di Fermi, questo apre una gap intorno all'energia di Fermi che non permette le collisioni che generano la resistività se il materiale si trova a temperature inferiori alla temperatura corrispondente all'energia di gap.



# Transizioni di fase

Il problema delle transizioni di fase è uno dei più affascinanti e "challenging" della meccanica statistica.

In fisica una transizione di fase è la trasformazione di un sistema termodinamico da una fase ad un'altra. La caratteristica distintiva è il cambiamento improvviso e sostanziale di una o più quantità fisiche in corrispondenza di un piccolissimo cambiamento di una variabile termodinamica (per es. la temperatura).

Esempi di transizioni di fase sono: transizioni tra fase solida, liquida e gassosa. Transizione tra fase ferromagnetica e paramagnetica al punto di Curie. La superconduttività presente in certi metalli sotto una temperatura critica. La condensazione di Bose-Einstein etc.

# Transizioni di fase

**Definizione:** matematicamente una transizione di fase è un punto singolare della funzione di partizione  $Z(V,N,T)$  e un punto di transizione di fase è definito come un punto di non analiticità dell'energia libera canonica ( $f = \log Z / N$  per  $N$  e  $V$  che vanno ad infinito e  $V/N$  fisso) o del gran potenziale gran canonico. Nota: una funzione è non analitica se non può essere espansa in serie di Taylor.

**Schema di classificazione di Ehrenfest:** le transizioni di fase sono raggruppate secondo il grado di non analiticità coinvolto.

**Transizioni di fasi del I ordine:** presentano una discontinuità nella derivata prima dell'energia libera rispetto ad una variabile termodinamica. Le transizioni solido/liquido/gas sono del primo ordine perchè la pressione cambia con discontinuità attraverso la transizione e la pressione è la derivata prima dell'energia libera rispetto a  $V$ .

# Transizioni di fase

**Transizioni di fase del II ordine:** hanno una discontinuità nella derivata seconda dell'energia libera. La derivata prima dell'energia libera sale con continuità da zero sotto  $T_C$ .

$C_v$ , che è proporzionale alla derivata seconda dell'energia libera rispetto a  $T$ , diverge da entrambi i lati di  $T_c$ .

Non sono note transizioni di fase ad ordini superiori.

# Transizioni di fase del II ordine:

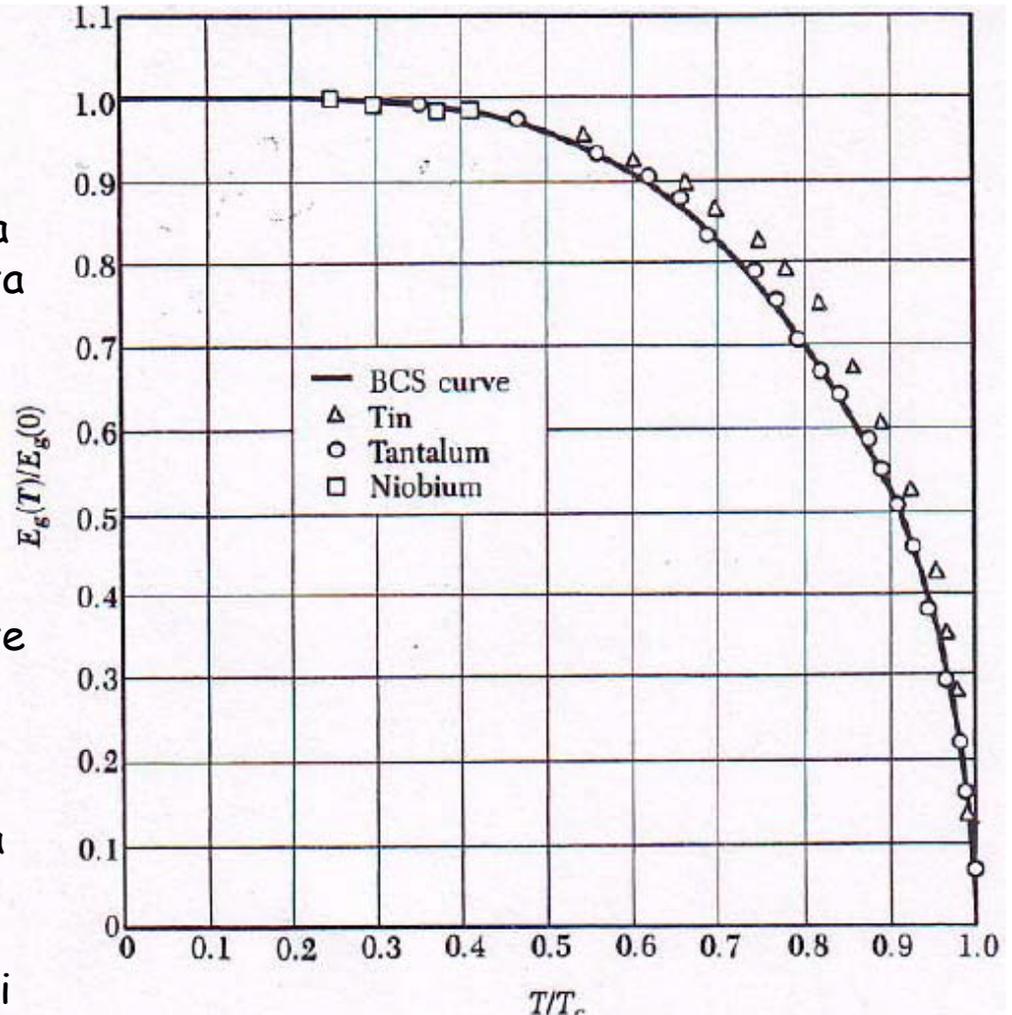
**Universalità degli indici critici:** nelle transizioni di fase del secondo ordine è possibile definire degli esponenti critici che rappresentano la potenza con la quale divergono al punto critico le quantità come il calore specifico.

Gli esponenti critici non sembrano dipendere dal particolare sistema studiato. Per esempio il calore specifico  $c_v$  va come  $(1-T/T_c)^\alpha$  con  $0_{\log} < \alpha < 0.2$  sia per sistemi fluidi che magnetici.

# SUPERCONDUTTORI: BCS

La gap normalizzata e' il parametro d'ordine per questa transizione di fase del secondo ordine e va come  $(1-T/T_c)^{1/2}$

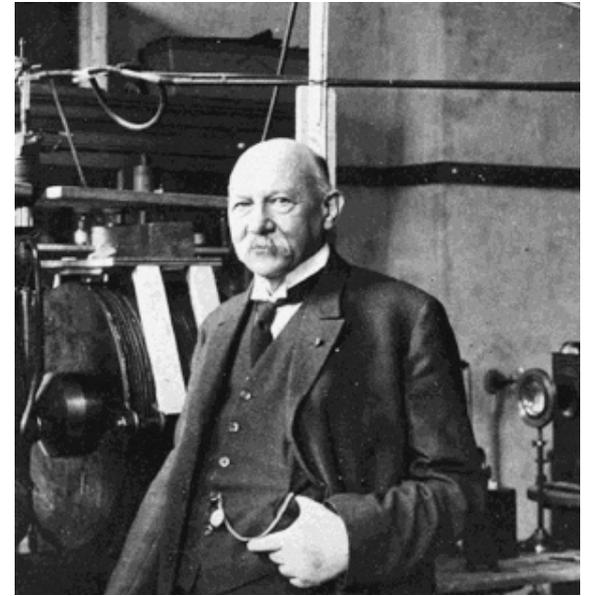
Per caratterizzare una transizione di fase molto spesso si ricorre ad una grandezza fisica che rappresenti, la principale differenza qualitativa fra una fase e l'altra. Tale grandezza, introdotta da Landau nel 1937, prende il nome di PARAMETRO D'ORDINE. Ogni transizione di fase è caratterizzata da un parametro d'ordine. Il parametro d'ordine è una variabile fisica che dà una misura del livello di ordine in un sistema. Nella maggior parte dei casi descrive molti dei riarrangiamenti della struttura che avvengono a causa della transizione di fase. Permette quindi di distinguere fra le due fasi coinvolte nella transizione. Esso può essere una grandezza scalare, una grandezza vettoriale oppure in certi casi una grandezza tensoriale. (Ising ha la magnetizzazione)



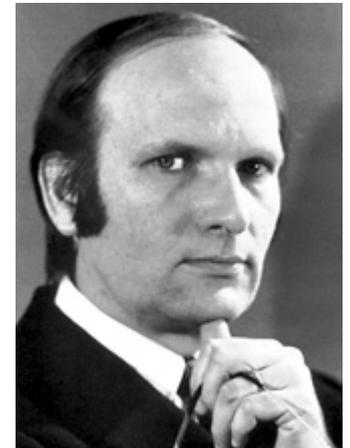
# SUPERCONDUTTORI: PREMI NOBEL

1913 Heike Kamerlingh Onnes *"for his investigations on the properties of matter at low temperatures which led, inter alia, to the production of liquid helium"*.

1972 John Bardeen, Leon Neil Cooper and John Robert Schrieffer *"for their jointly developed theory of superconductivity, usually called the BCS-theory"*.



E poi altri ...



# SUPERCONDUTTORI: STORIA

- **1911:** Heike Kammerlingh Onnes scopre la superconduttività nel mercurio e per questo vince il premio Nobel nel 1913.
- **1938:** Pyotr Kapitsa scopre l'He-4 superfluido e vince il Nobel nel 1978.
- **1947:** Lev Landau propone una teoria per l'He-4 superfluido. Premio Nobel nel 1962.

- **1950:** Vitaly Ginzburg e Lev Landau costruiscono una teoria fenomenologica per la superconduttività. Ginzburg prende il Nobel per questo lavoro nel 2003.

Nel 2003 il nobel anche ad Abrikosov (superconduttori di tipo II -1957 ) e Leggett (teoria He3 superfluido 1973)

# SUPERCONDUTTORI: STORIA

- **1957:** John Bardeen, Leon Cooper and Robert Schrieffer propongono la BCS per cui riceveranno il premio Nobel nel 1972.
- **1962:** Brian Josephson comprende le proprietà delle supercorrenti. Premio Nobel nel 1973.
- **1972:** David Lee, Douglas Osheroff e Robert Richardson scoprono l'He-3 superfluido. Nobel nel 1996.
- **1972:** Anthony Leggett propone una teoria per l'He-3 superfluido e vince il Nobel nel 2003.
- **1986:** George Bednorz e Alex Müller scoprono i superconduttori ad alta temperatura. Vincono il Nobel l'anno successivo, nel 1987.

E A. Abrikosov  
superconduttori di tipo II

Esempi di superconduttori ad alta T:

