

La superconduttività

Sergio Caprara



DIPARTIMENTO DI FISICA

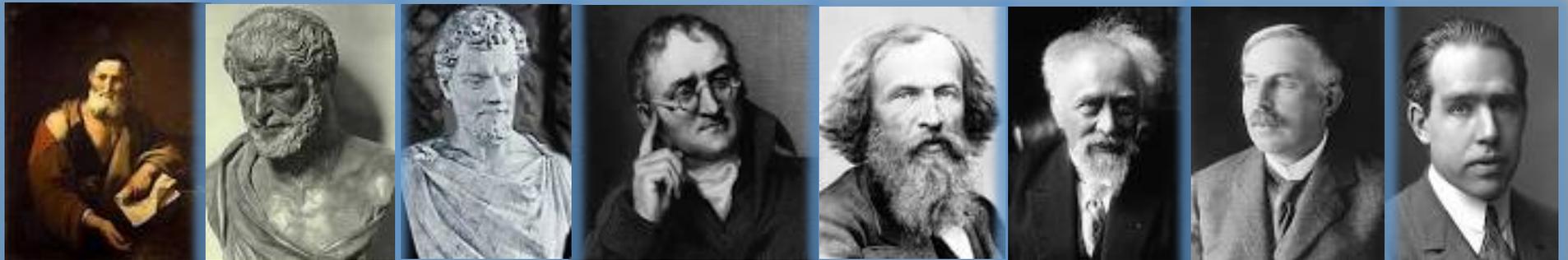
SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Prologo tra atomi e molecole

La materia è fatta di **atomi**

Gli atomi sono costituiti da un **nucleo**,
contenente **protoni (+)** e **neutroni**, e da
una nube di **elettroni (-)**

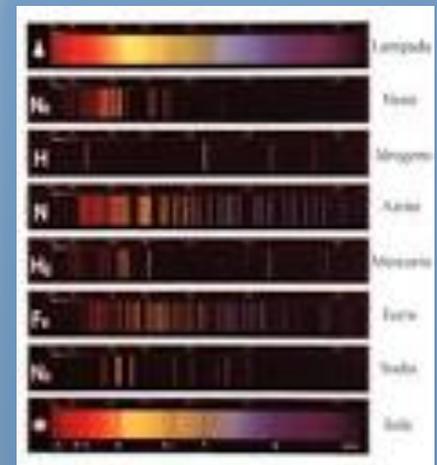
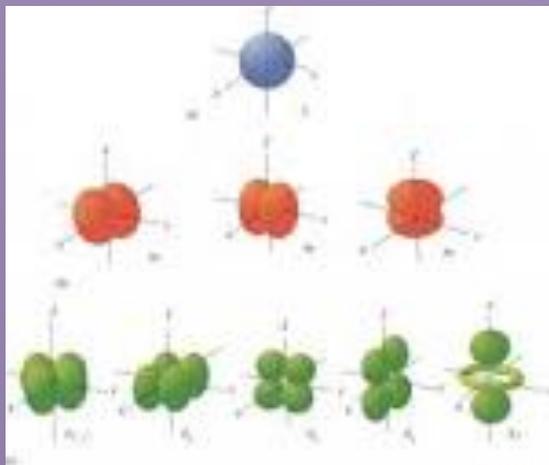
Le **proprietà chimiche** di ciascun **elemento**
sono determinate dal **numero atomico Z**
(numero di **protoni** = numero di **elettroni**)



Prologo tra atomi e molecole

Secondo il modello di **Bohr** li elettroni negli atomi si dispongono in **orbitali** a cui corrisponde una determinata **energia**, di modo che ogni atomo è caratterizzato da una serie di **livelli energetici** e può assorbire o cedere energia soltanto in quantità determinate (→ **spettri di righe**).

Il riempimento dei livelli obbedisce al **principio di Pauli**



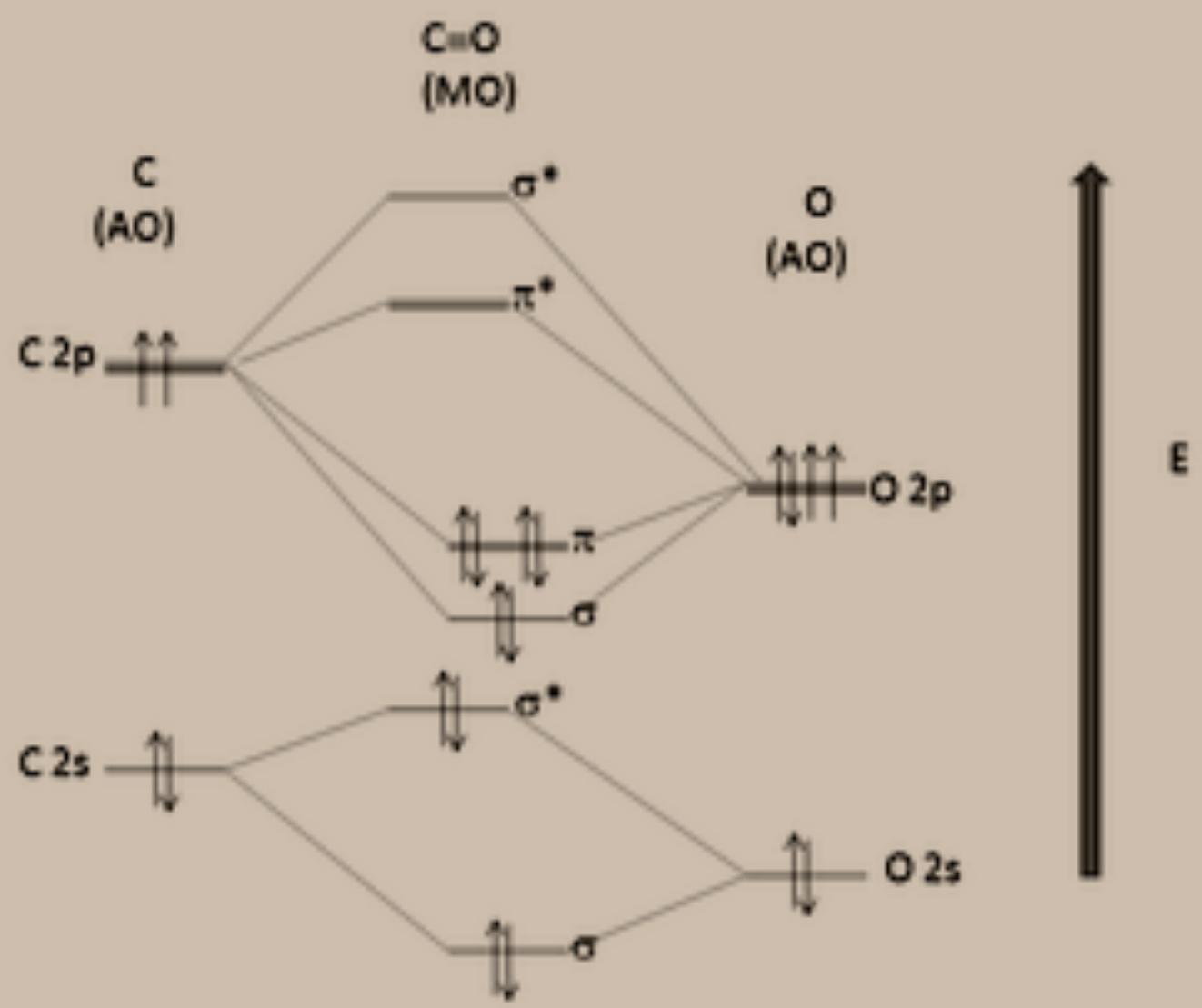
Prologo tra atomi e molecole

Gli elettroni negli orbitali più vicini al nucleo sono più fortemente legati, mentre gli elettroni più periferici (**elettroni di valenza**) determinano le **proprietà chimiche** dell'elemento (→ **sistema periodico**)

Gli atomi tendono a **condividere** gli elettroni di valenza con altri atomi, formando **molecole**

Gli **orbitali atomici**, combinandosi, formano gli **orbitali molecolari**
(**Heitler** e **London**)





La materia

Le molecole si attraggono

Alle **alte temperature** (o **basse densità**)
l'attrazione non è sufficiente a tenere
insieme le molecole e la materia si
presenta allo **stato gassoso**

Riducendo la temperatura (o aumentando la
densità) l'attrazione ha la meglio e la
materia condensa nello **stato liquido**

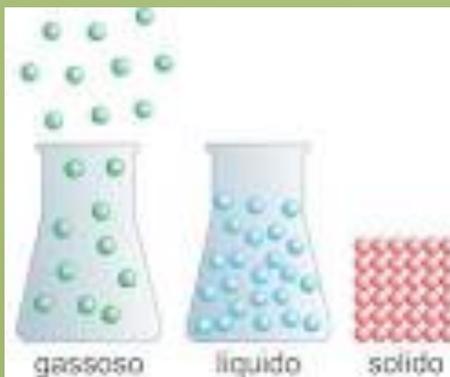


La materia

A temperature ancora più basse (o densità più elevate), la materia si presenta allo stato solido

Un **solido cristallino** è realizzato da una disposizione regolare di atomi, è come un'**enorme molecola**

Gli elettroni in un solido occupano orbitali a ciascuno dei quali corrisponde un'**energia ben definita**

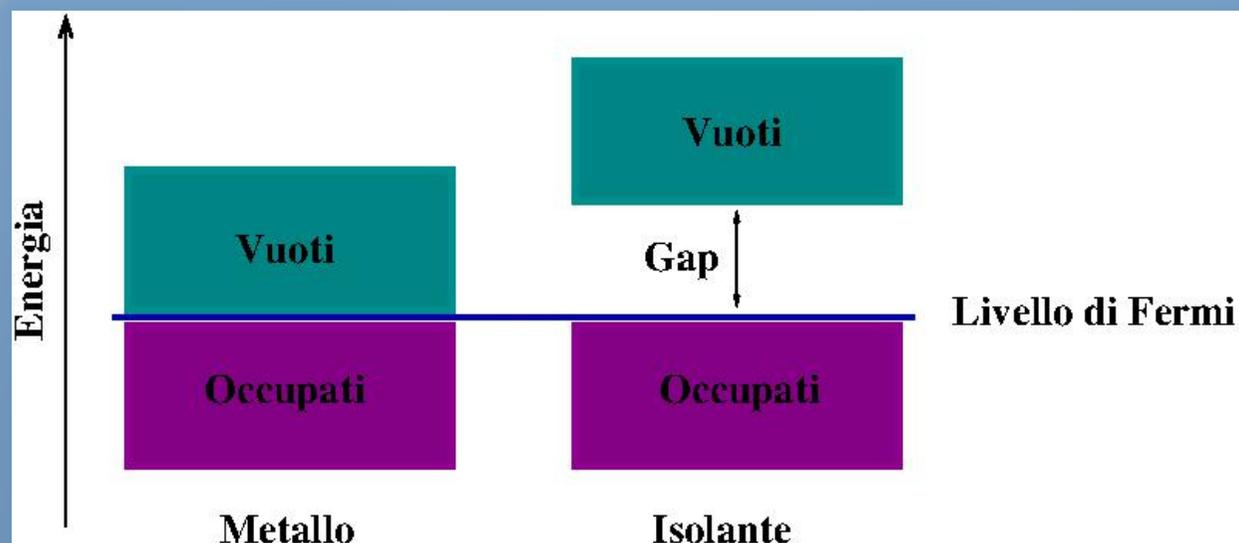


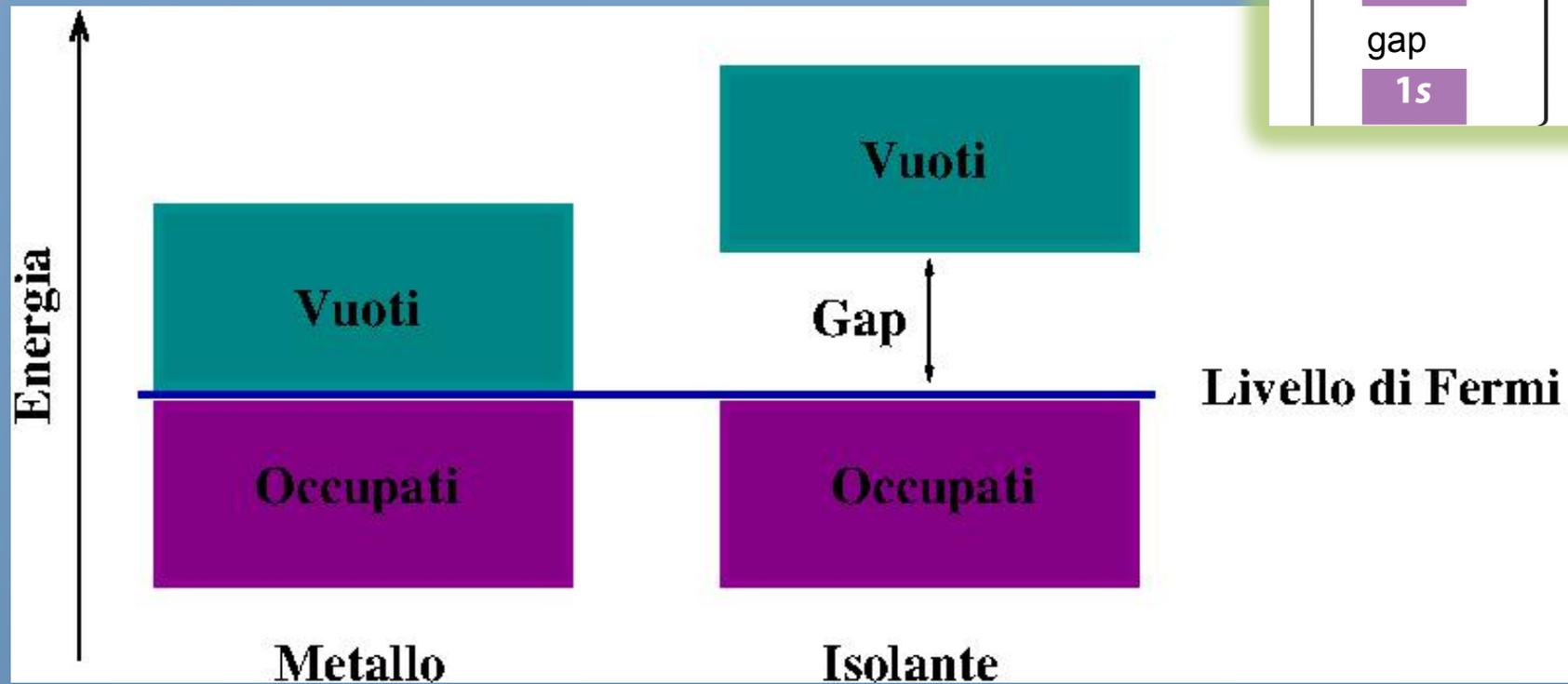
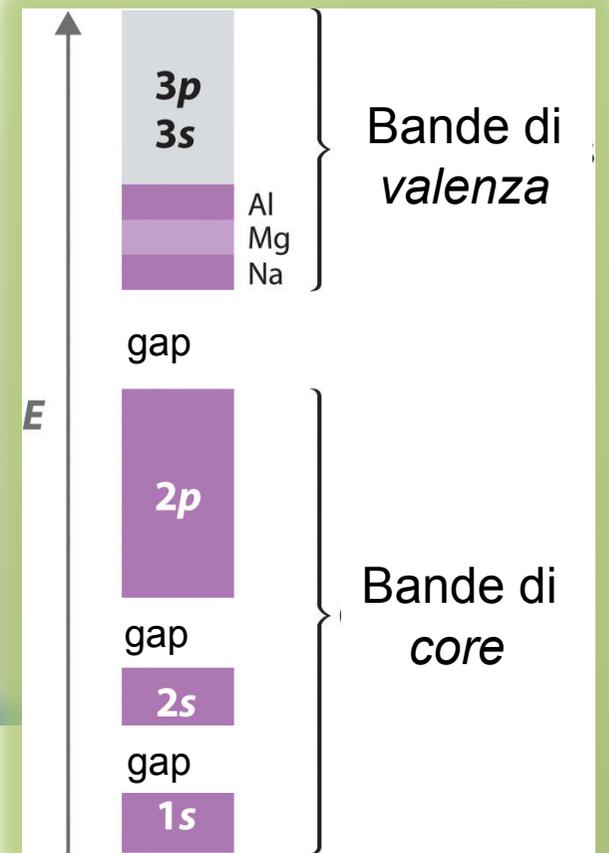
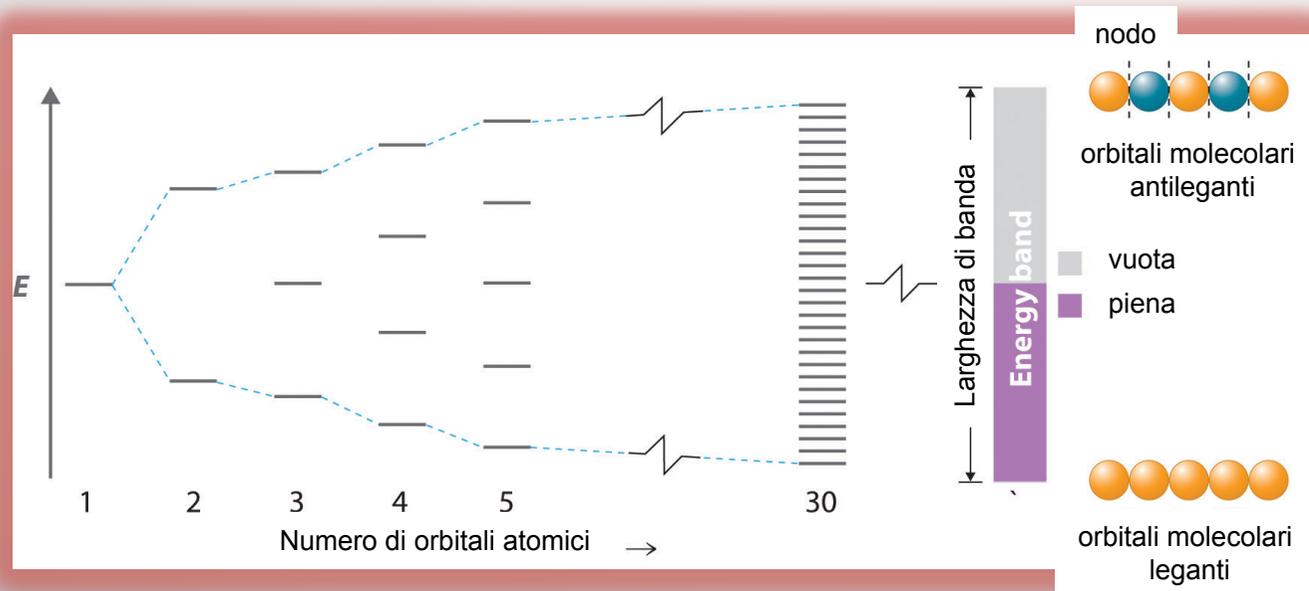
Isolanti e conduttori

Gli elettroni in un solido riempiono i livelli energetici obbedendo al **principio di Pauli**

Se l'ultimo livello occupato (**livello di Fermi**) è separato dal primo livello vuoto (**gap**) si ha un **isolante** (o **dielettrico**)

Se l'ultimo livello riempito è adiacente ad un livello vuoto si ha un **conduttore**

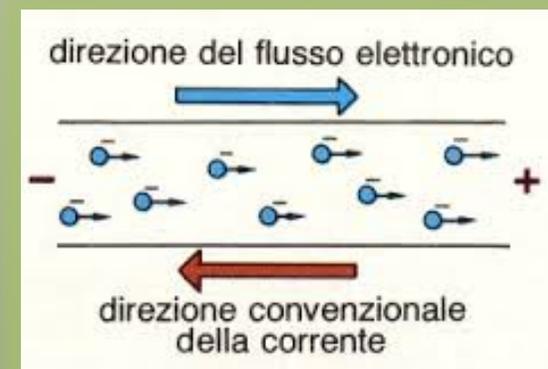




Correnti elettriche: le leggi di Ohm

Un conduttore in **equilibrio elettrostatico** espelle il campo elettrico e si mantiene a **potenziale costante**

Applicando una **differenza di potenziale** ai capi di un conduttore si realizza uno stato di non equilibrio caratterizzato da una **corrente elettrica** (**moto ordinato** degli elettroni di conduzione)



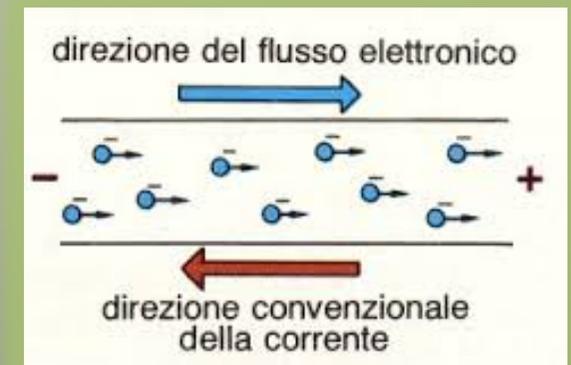
Correnti elettriche: le leggi di Ohm

1. L'intensità della corrente I e la differenza di potenziale V sono proporzionali:

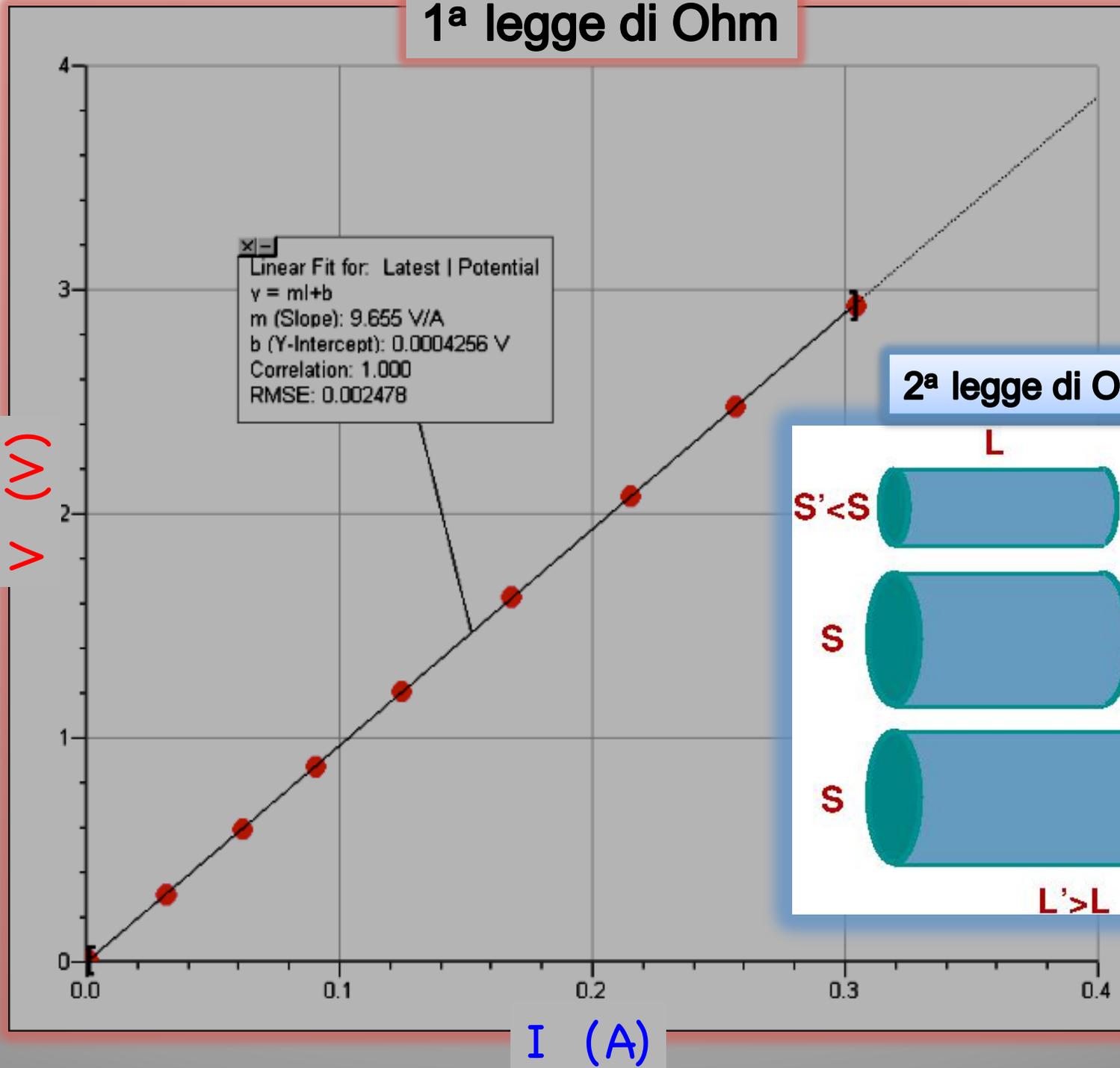
$$V = RI \text{ (resistenza elettrica)}$$

2. La resistenza è direttamente proporzionale alla lunghezza L e inversamente proporzionale alla sezione S del conduttore:

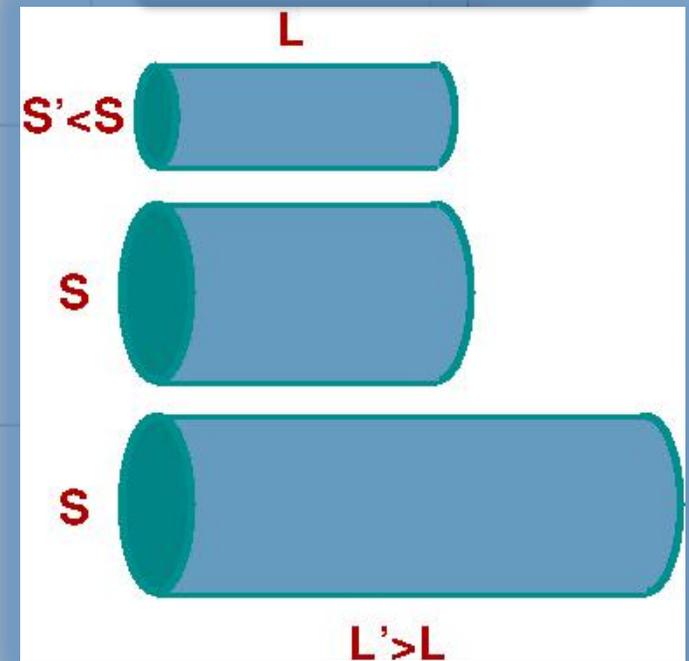
$$R = \rho L/S \text{ (resistività)}$$



1^a legge di Ohm



2^a legge di Ohm



Materiali	Conducibilità elettrica (S/m)	Resistività (Ω m)
Rame	$\sim 10^7$	$\sim 10^{-7}$
Grafite	$\sim 10^6$	$\sim 10^{-6}$
Acqua di mare	$\sim 10^0$	$\sim 10^0$
Silicio	$\sim 10^{-2}$	$\sim 10^2$
Salgemma	$\sim 10^{-4}$	$\sim 10^4$
Acqua distillata	$\sim 10^{-6}$	$\sim 10^6$
Marmo	$\sim 10^{-8}$	$\sim 10^8$
Mica	$\sim 10^{-10}$	$\sim 10^{10}$
Paraffina	$\sim 10^{-12}$	$\sim 10^{12}$
Quarzo fuso	$\sim 10^{-14}$	$\sim 10^{14}$



21 ordini di grandezza!

Correnti elettriche: le leggi di Ohm

3. La resistività di un conduttore cresce con la temperatura T :

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha (T - T_0)]$$

Ad alta temperatura la resistività è dovuta alle oscillazioni del reticolo cristallino

A bassa temperatura la resistività è dovuta ai difetti del reticolo cristallino

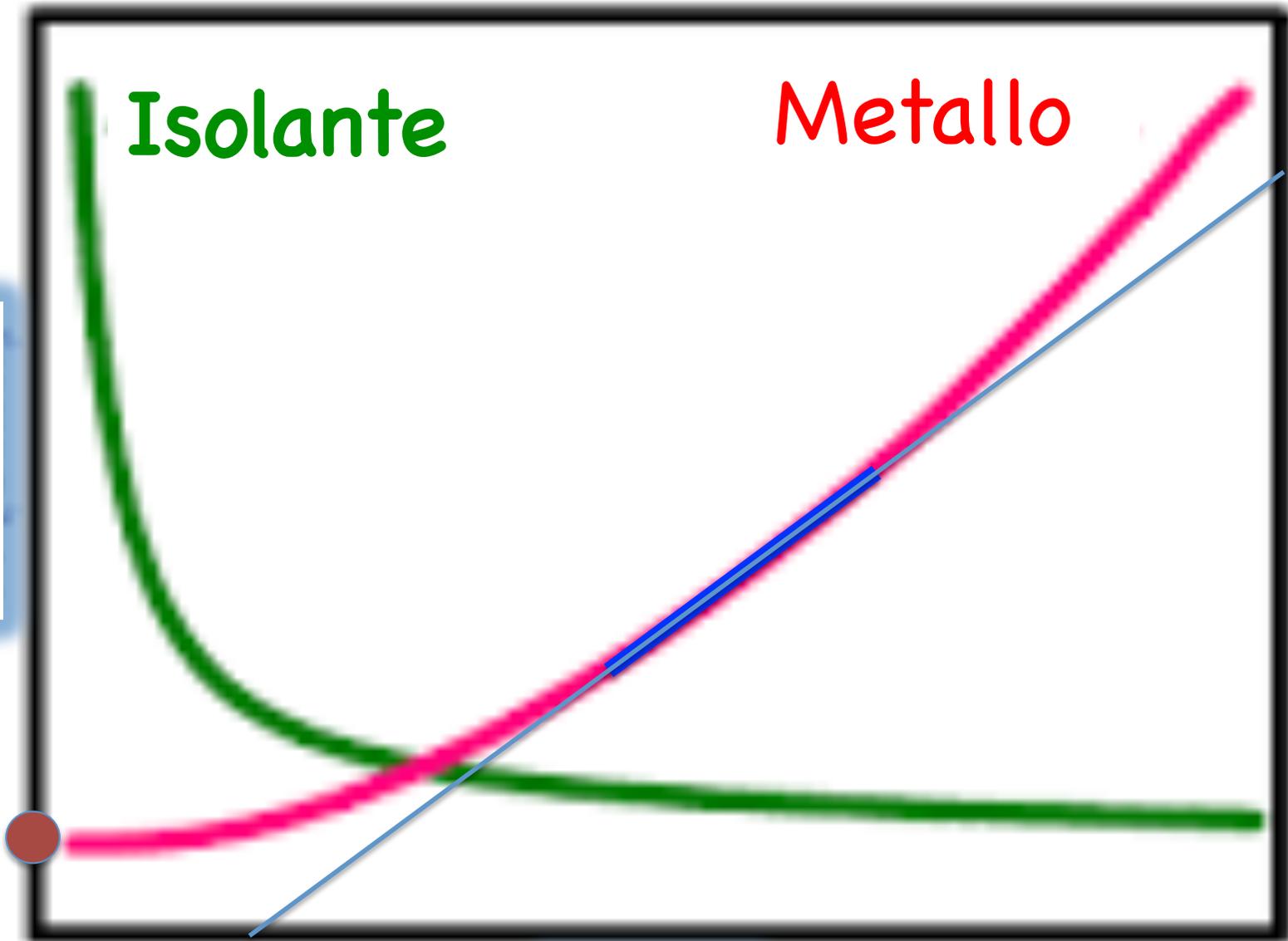
(resistenza residua)



ρ ($\Omega \cdot m$)

Isolante

Metallo



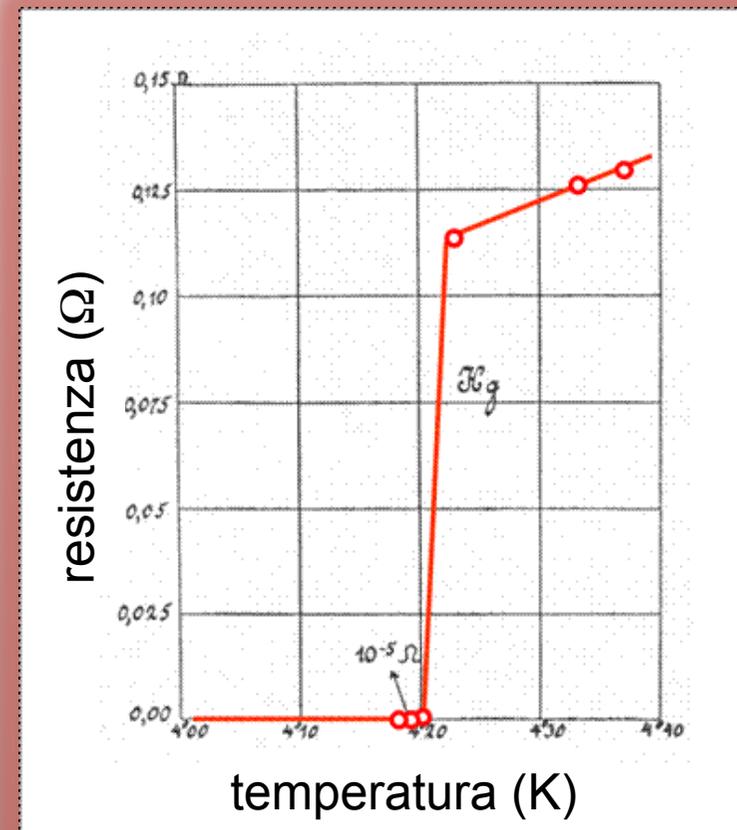
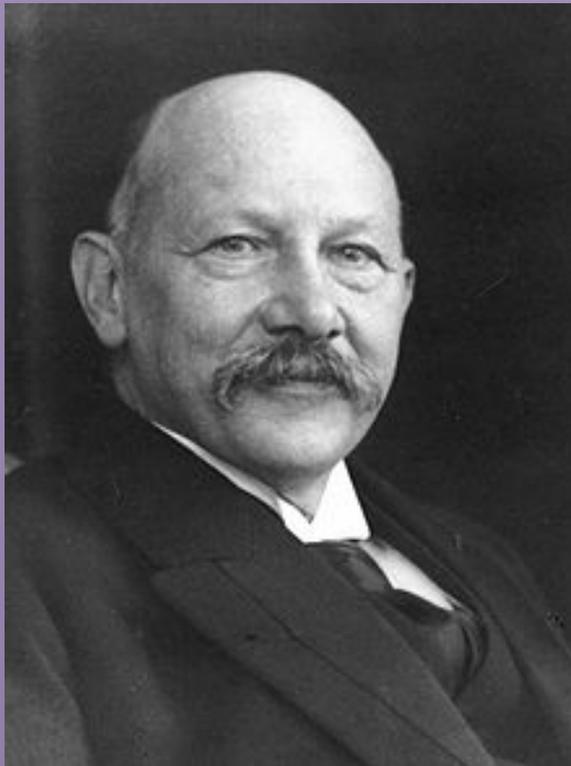
T (K)

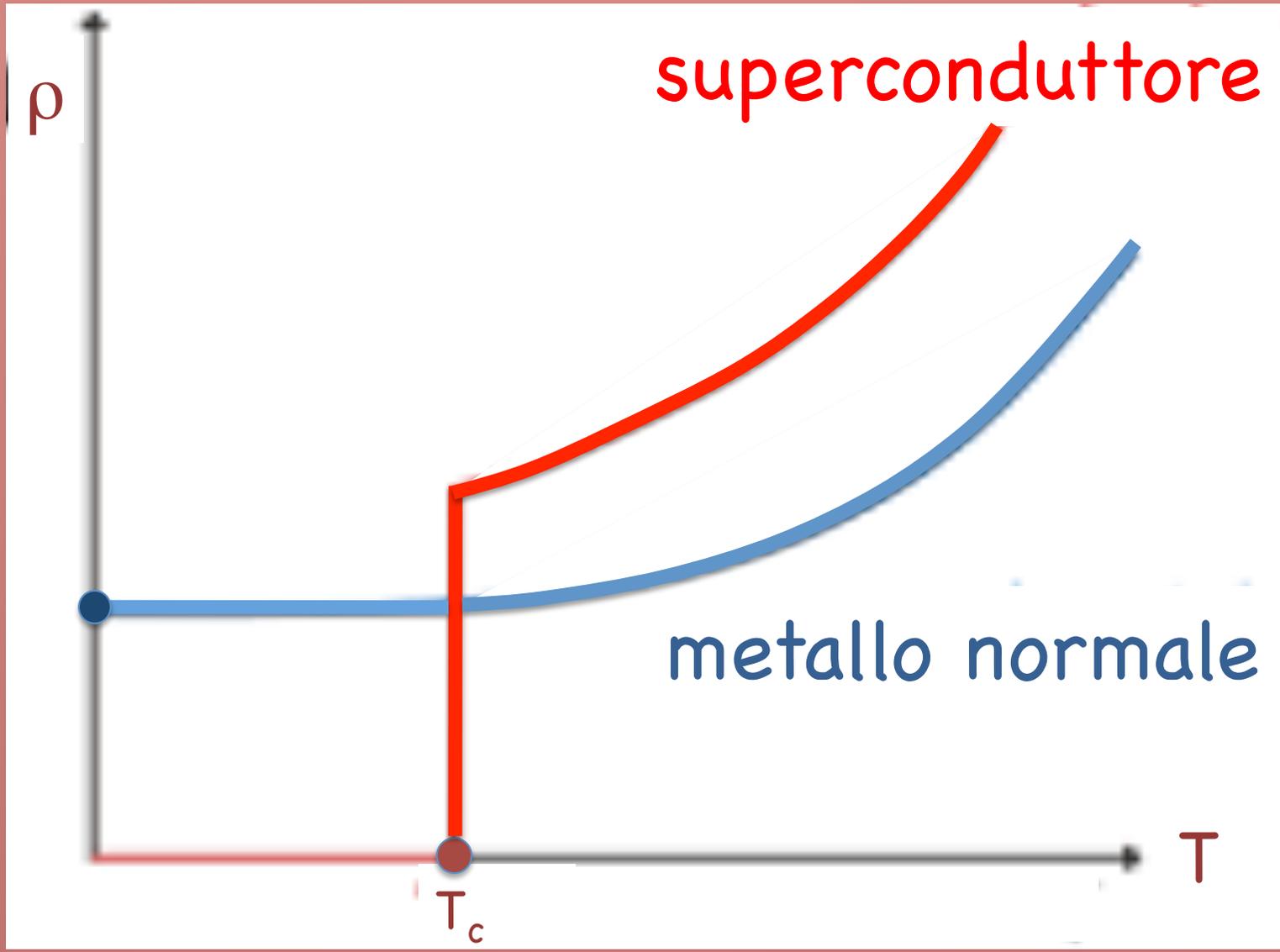
Heike Kamerlingh Onnes a Leida

Liquefazione dell'elio ($T_{\text{liq}}=4,2 \text{ K}$, 1908)

Superconduttività del Mercurio ($T_c=4,2 \text{ K}$, 1911)

Premio Nobel per la Fisica (1913)



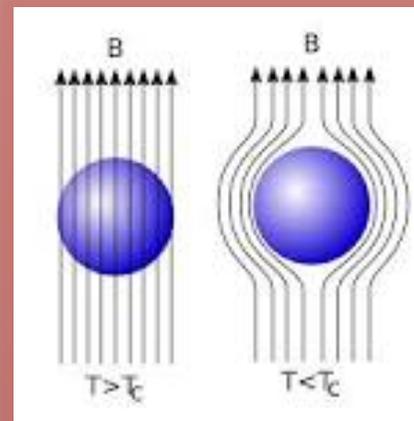


Effetto Meissner-Ochsenfeld

Diamagnetismo perfetto: un superconduttore espelle il campo magnetico (1933)

Levitazione

Lo stato superconduttore è uno stato di equilibrio termodinamico



Effetto Meissner-Ochsenfeld

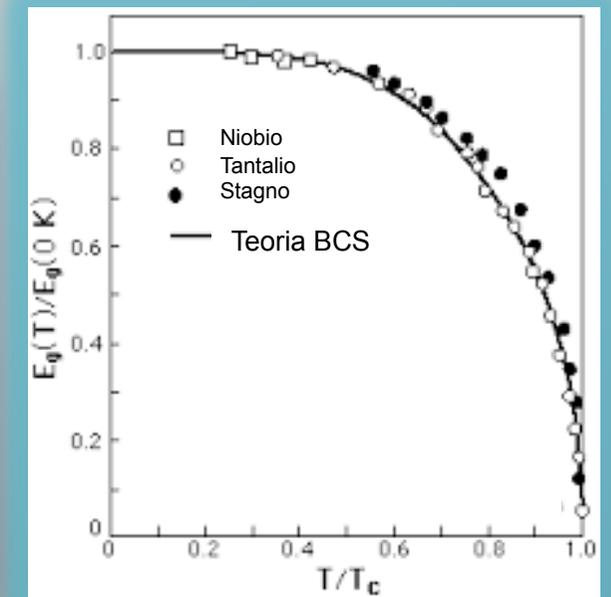
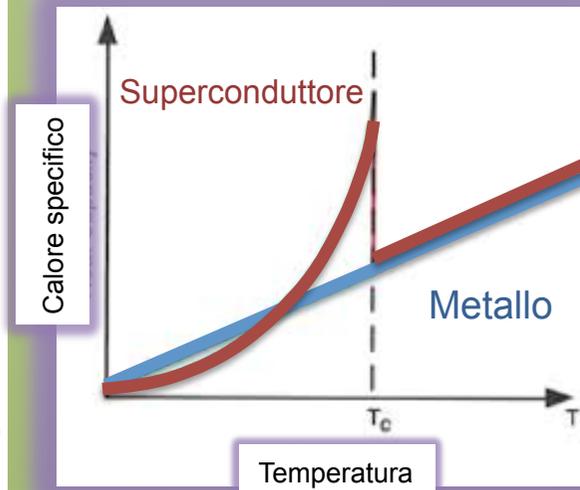
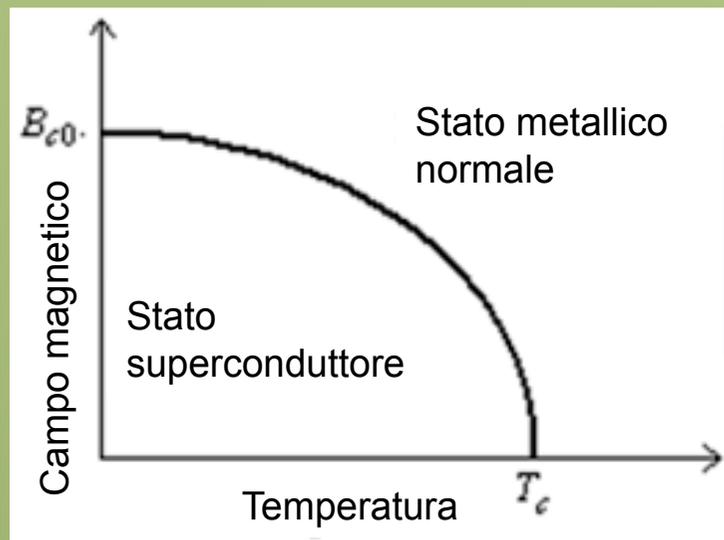


Fenomenologia dei superconduttori

La superconduttività esiste solo per $T < T_c$,

$B < B_{c0}$ (e $I < I_{c0}$)

Il calore specifico è discontinuo per $T = T_c$
(condensazione) ed è soppresso a basse temperature (gap)



SUPERCONDUZIONE

TEMPERATURA CRITICA, T_0 (IN K),
E INTENSITÀ LIMITE DI CAMPO MAGNETICO,
 H_0 (IN KA/M), PER GLI ELEMENTI
SUPERCONDUTTORI

elemento	T_0	H_0
Al	1,20	7,9
Cd	0,58	2,4
Ga	1,09	4,1
Hf	0,10	
Hg(α)	4,15	32,7
In	3,41	23,3
Ir	0,14	1,5
La(α)	4,90	63,5
La(β)	6,10	128,0
Mo	0,92	7,8
Nb	9,25	157,6
Os	0,66	5,2
Pb	7,19	63,9
Re	1,70	15,8
Ru	0,49	5,3
Sn(β)	3,74	24,3
Ta	4,48	66,0
Tc	7,75	112,2
Th	1,37	12,9
Ti	0,39	8,0
Tl	2,39	13,6
U(α)	0,68	160,0
V	5,30	81,2
W	0,01	0,1
Zn	0,88	4,2
Zr	0,60	3,7

H																			He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne		
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar		
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr		
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe		
Cs	Ba	RE	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn		
Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Bk	Cf	Es	Md	No	Lr					

La	Ce	Pr	Ne	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----



Elementi superconduttori



Elementi superconduttori
sotto pressione



Elementi superconduttori
in film sottili

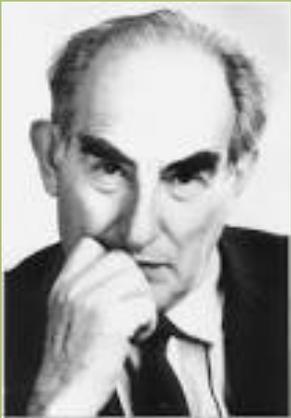


Elementi superconduttori
dopo irradiazione

Teorie fenomenologiche della superconduttività



Fritz & Heinz London sviluppano l'elettrodinamica dei superconduttori e spiegano l'effetto Meissner-Ochsenfeld (1935)



Vitalij L. Ginzburg & Lev D. Landau spiegano le proprietà

termodinamiche dei superconduttori (1950)

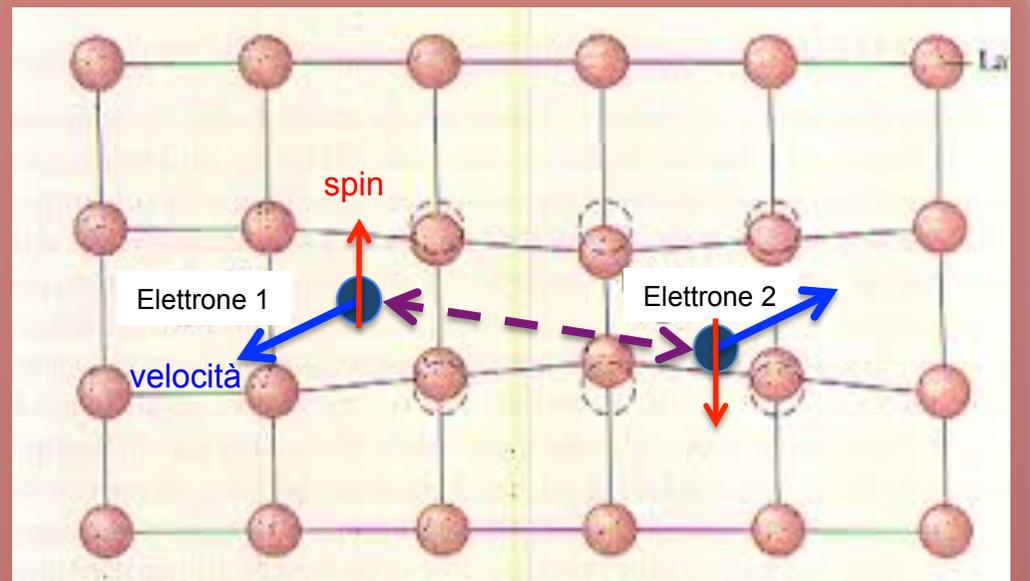


La teoria BCS

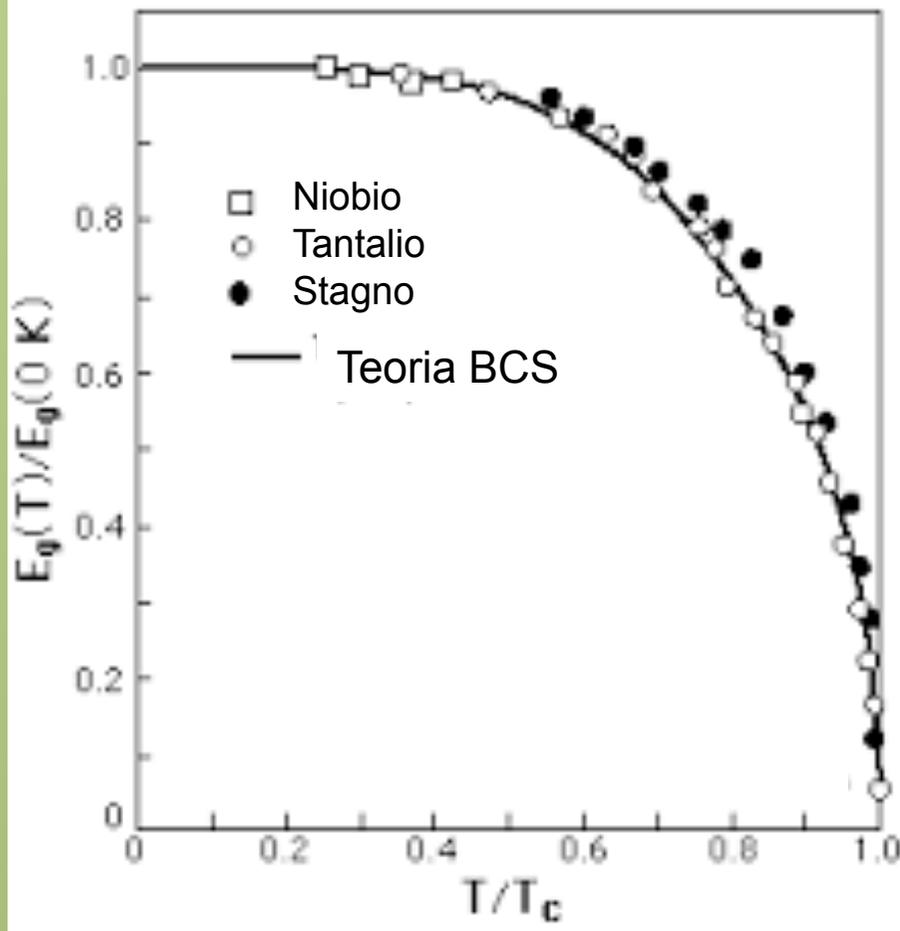
Bardeen, Cooper & Shrieffer nel 1957 formulano la

teoria microscopica della superconduttività (Nobel nel 1972):

la deformazione del reticolo cristallino rende possibile la formazione di coppie di elettroni con un'energia di legame Δ (gap). Le coppie non possono perdere energia negli urti con i difetti del reticolo

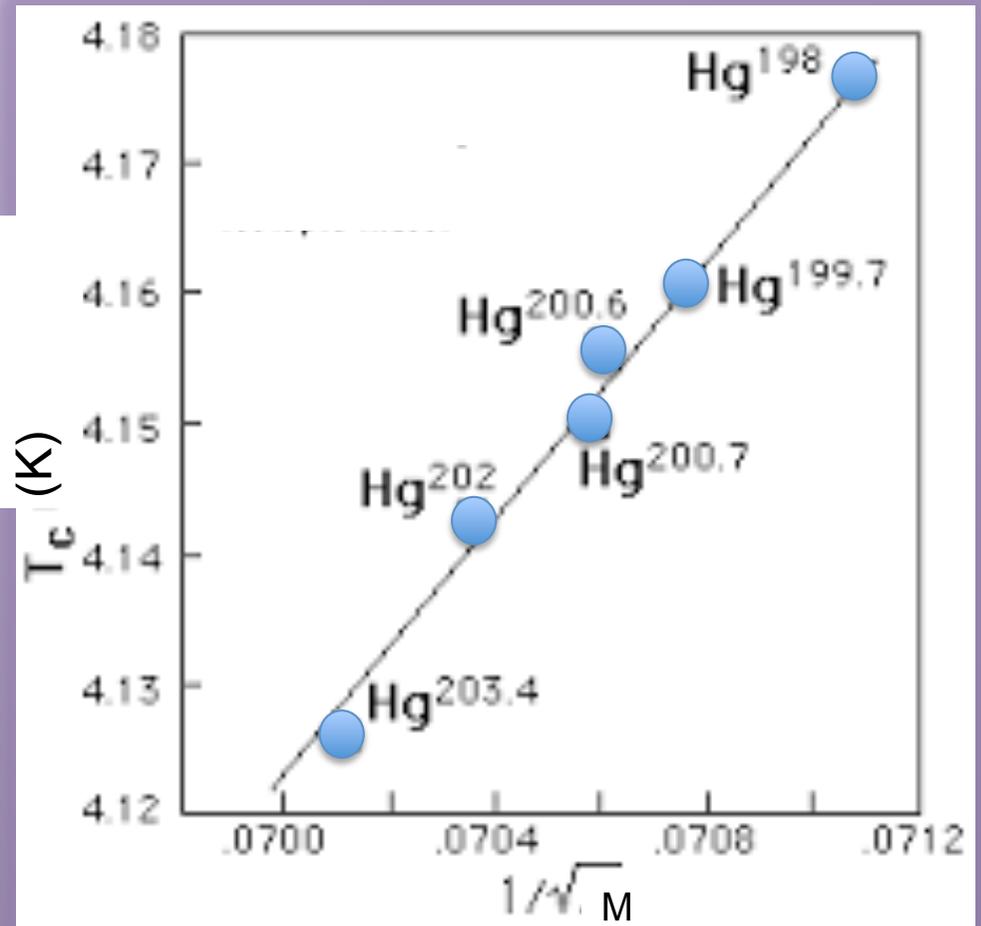


$$\text{Gap } \Delta \sim \sqrt{(T_c - T)}$$



Effetto isotopico

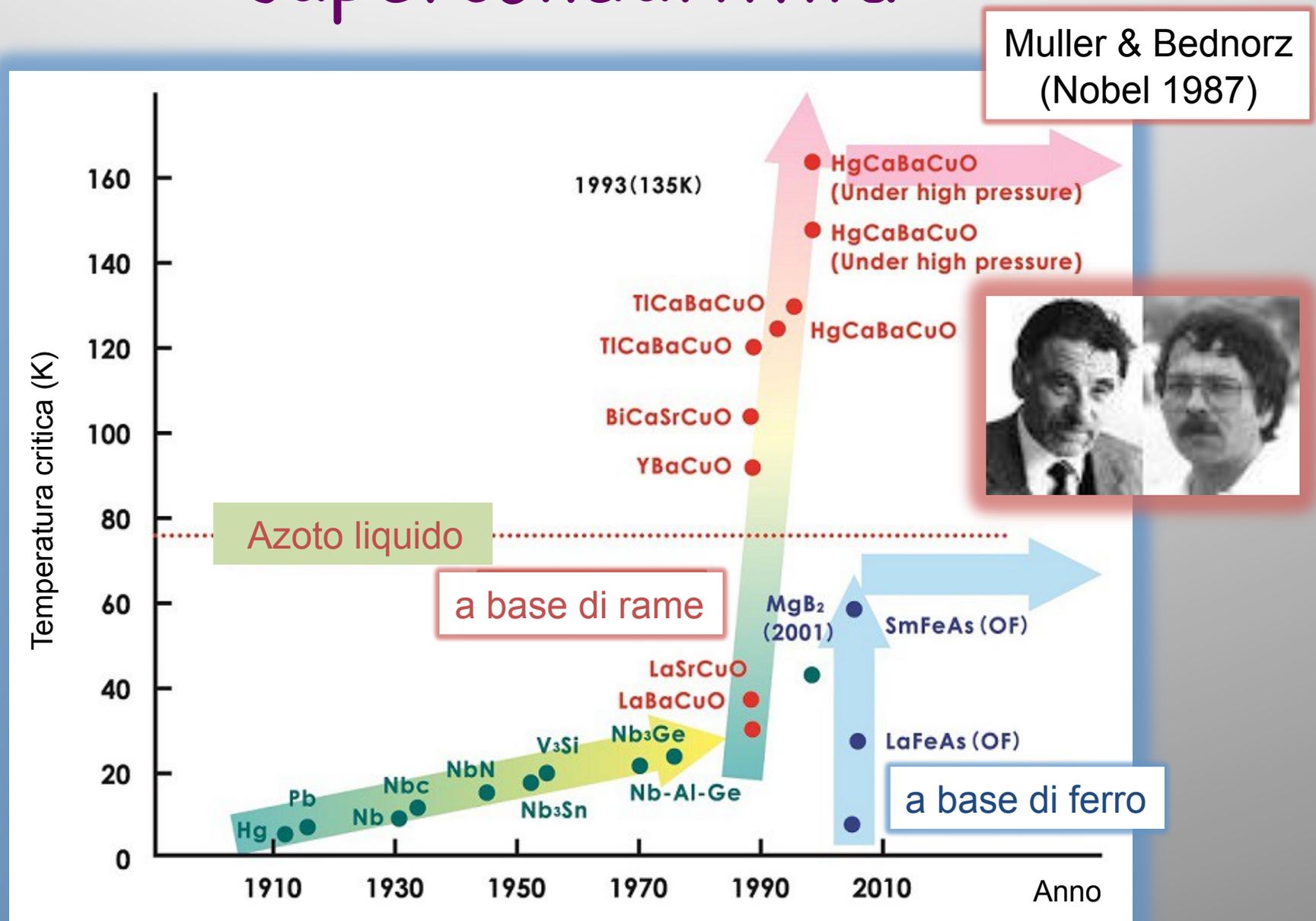
$$T_c \sim \omega_{\text{reticolo}} \sim \sqrt{(K/M)}$$



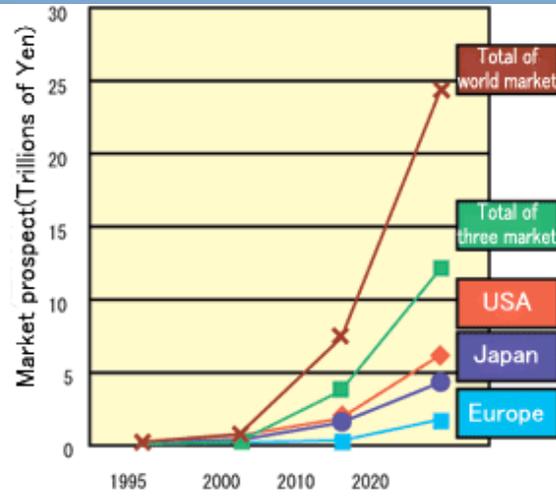
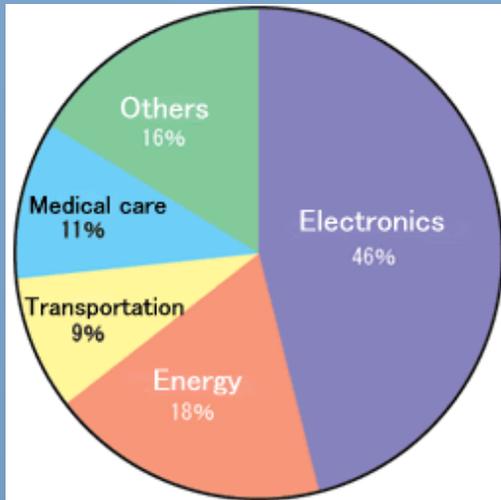
Flash Mob in occasione del centenario (2011)



L'album di famiglia della superconduttività



La superconduttività nella vita di tutti i giorni



Grazie per l'attenzione

