

# I materiali superconduttori: dalla ricerca di base alle applicazioni

Luca Salasnich

Dipartimento di Fisica e Astronomia "Galileo Galilei", Università di Padova  
luca.salasnich@unipd.it

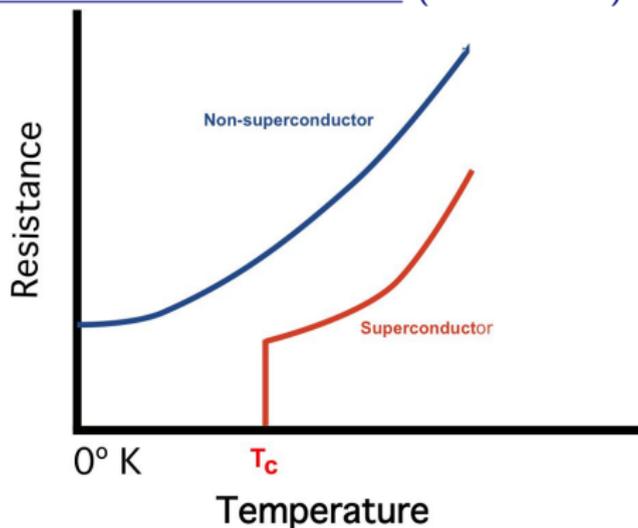
Academy of Distinction ODV

9 Maggio, 2024

- La superconduttività
- La teoria BCS
- Applicazioni tecnologiche
- Conclusioni

# La superconduttività (I)

La **superconduttività** è stata scoperta nel 1911 da Heike Kamerlingh Onnes. Onnes osservò che nel mercurio ( $Hg$ ) al di sotto di  $T_c = 4.16$  Kelvin la resistenza elettrica diventa nulla (Nobel 1913).



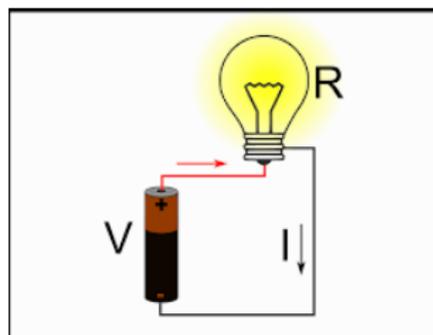
Oggi si sa che alcuni materiali sono superconduttori al di sotto di una temperatura critica  $T_c$ . Comunque, molti materiali NON diventano superconduttivi.

# La superconduttività (II)

Nei **materiali conduttori**, ad esempio i metalli, valgono le leggi di Ohm. La prima legge di Ohm dice che

$$V = R I , \quad (1)$$

dove  $V$  è la differenza di potenziale elettrico (Volt) di una batteria,  $I$  è l'intensità di corrente elettrica (Ampere) che scorre nel conduttore, mentre  $R$  è la resistenza elettrica (Ohm).



## La superconduttività (III)

La seconda legge di Ohm dice invece che

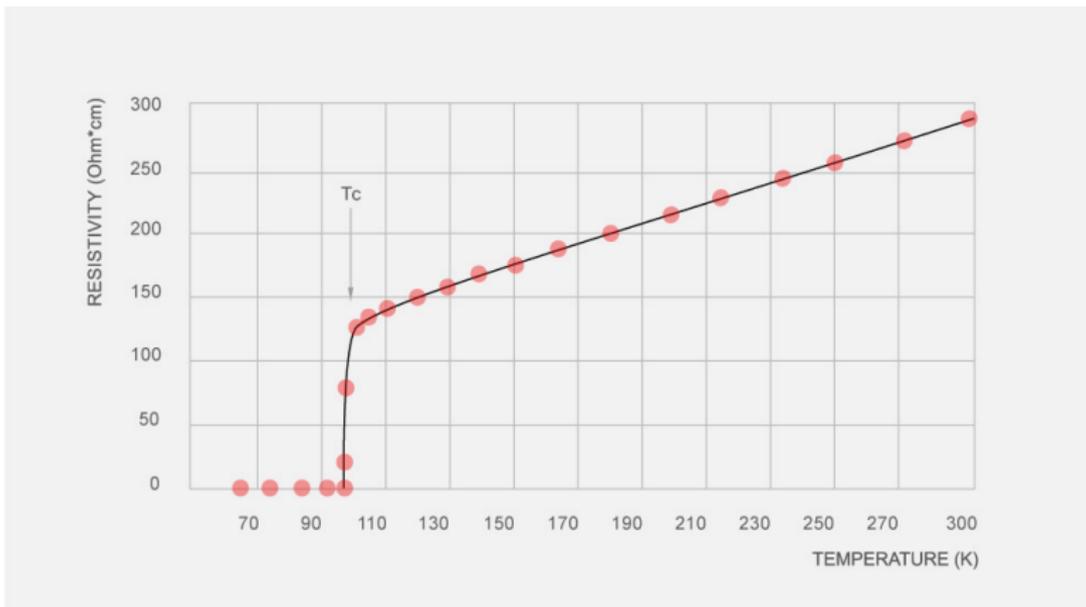
$$R = \rho \frac{L}{S}, \quad (2)$$

dove  $L$  è la lunghezza (metri) del filo conduttore,  $S$  è l'area della sezione trasversa (metri quadri) del conduttore, mentre  $\rho$  è la resistività (Ohm  $\times$  metri).

L'aspetto cruciale è che la resistività  $\rho$ , e quindi la resistenza  $R$ , dipende dalla temperatura  $T$  del materiale conduttore. Come detto, si è scoperto che alcuni materiali, detti **superconduttori**, manifestano completa assenza di resistività  $\rho$  al di sotto di una temperatura critica  $T_c$ , cioè

$$\rho = 0 \quad \text{per} \quad T < T_c. \quad (3)$$

# La superconduttività (III)



E' importante sottolineare che la temperatura critica  $T_c$  dipende fortemente dal materiale.

# La superconduttività (IV)

Temperatura critica  $T_c$  di alcuni materiali metallici a pressione atmosferica.

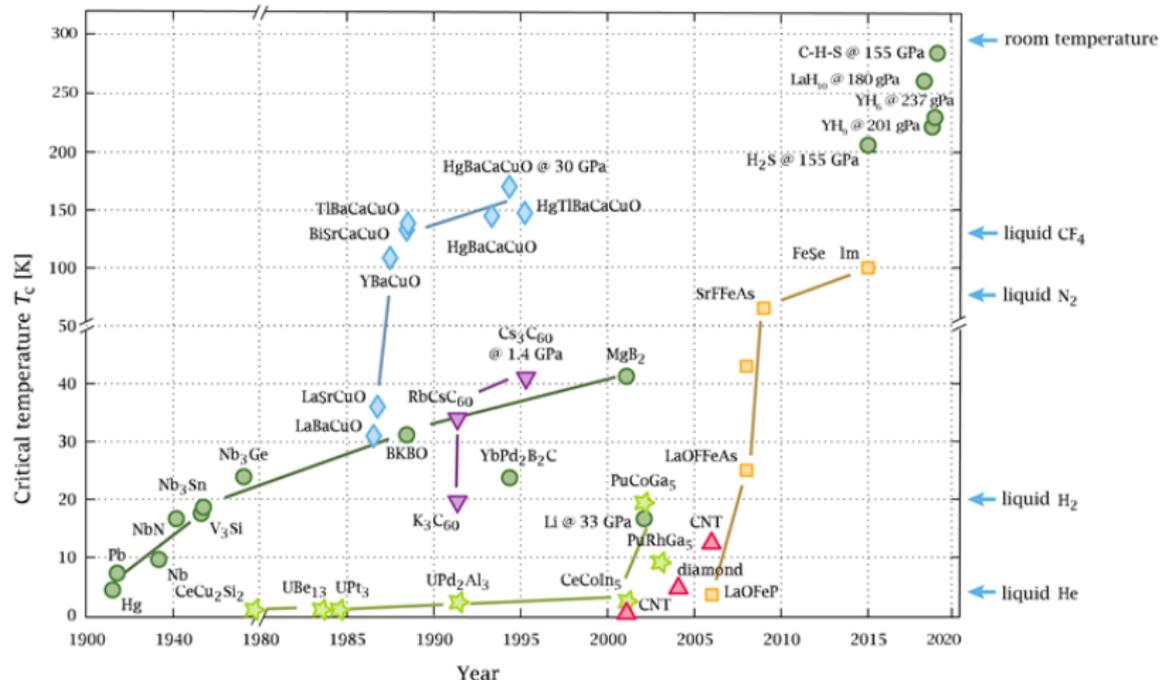
<b>Materiale</b>	<b>Simbolo</b>	<b><math>T_c</math> (Kelvin)</b>
Alluminio	Al	1.19
Stagno	Sn	3.72
Mercurio	Hg	4.16
Piombo	Pb	7.20
Neodimio	Nb	9.30

Nei metalli e nelle leghe solitamente la temperatura critica è estremamente bassa. Non tutti i metalli manifestano superconduttività, tra questi il rame (Cu), l'argento (Ag) e l'oro (Au).

N.B. 0 Kelvin è lo zero assoluto che corrisponde a  $-273.15$  gradi Celsius.

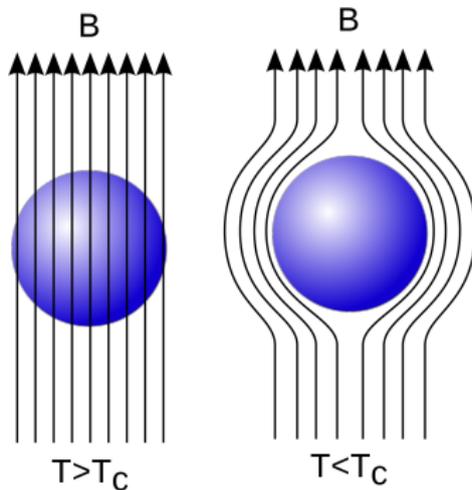
# La superconduttività (V)

Nel 1986 **Karl Alex Müller** e **Johannes Georg Bednorz** scoprirono i **superconduttori ad alta temperatura critica**. Questi materiali ceramici (cuprati) hanno una la temperatura critica al di sopra dei 100 Kelvin (Nobel 1987).



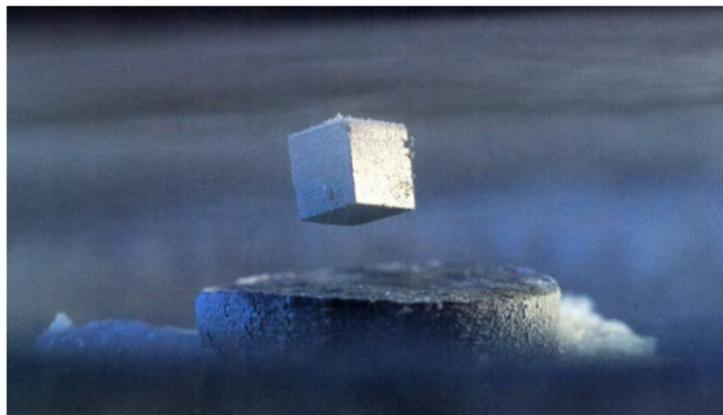
# La superconduttività (VI)

Oltre alla assenza di resistenza elettrica, i **materiali superconduttori** hanno molte altre interessanti proprietà.



Per esempio, l'**effetto Meissner-Ochsenfeld**: il materiale superconduttore si comporta come un diamagnete perfetto. Ovverosia si ha la completa espulsione di un **campo magnetico** esterno  $B$  che agisce sul materiale.

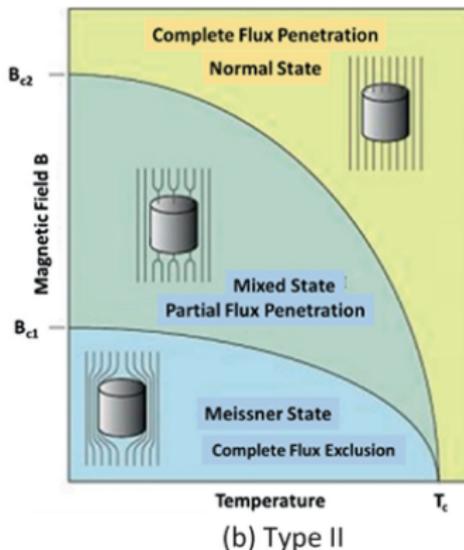
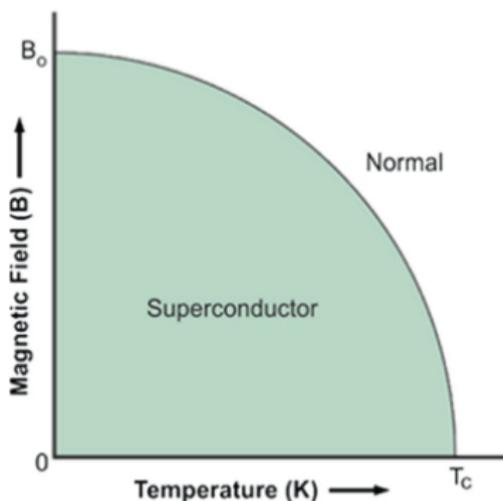
## La superconduttività (VII)



Come conseguenza dell'effetto Meissner-Ochsenfeld si ha la levitazione di un materiale magnetico (ad esempio una calamita) al di sopra un materiale superconduttore.

# La superconduttività (VIII)

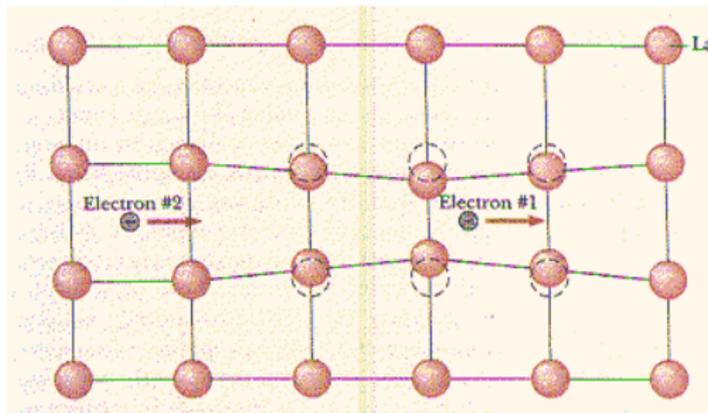
Se però il campo magnetico  $B$  è troppo intenso, questo campo magnetico  $B$  distrugge la superconduttività.



I superconduttori di tipo I (a sinistra) sono solitamente metalli e leghe. I superconduttori di tipo II (a destra) sono solitamente i materiali con alta  $T_c$ .

# La teoria BCS (I)

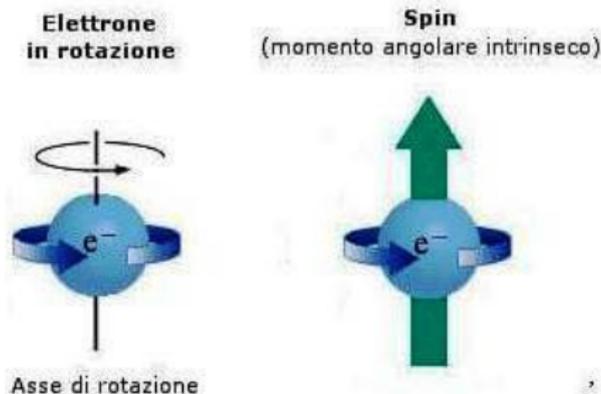
Nel 1957 John Bardeen, Leon Cooper and Robert Schrieffer (**teoria BCS**) capirono che nella superconduttività dei metalli e delle leghe tantissime coppie di elettroni, dette **coppie di Cooper**, formano uno “stato quasi-legato”.



La presenza del reticolo ionico produce, sotto certe condizioni ed a temperatura  $T$  sufficientemente bassa, una forza attrattiva tra coppie di elettroni in grado di superare la forza repulsiva di Coulomb (Nobel 1972).

# La teoria BCS (II)

Oggi sappiamo che ogni particella ha un momento angolare intrinseco, detto **spin**  $\vec{S} = (S_x, S_y, S_z)$ .



Misurando lo **spin** lungo l'asse z si trova che

$$S_z = m_s \hbar, \quad (4)$$

dove  $\hbar = 1.054 \cdot 10^{-34}$  Joule $\times$ secondi è la costante di Planck ridotta mentre  $m_s$  è il numero quantico di spin. Nel caso dell'elettrone  $m_s = 1/2$  (rotazione oraria) oppure  $m_s = -1/2$  (rotazione anti-oraria).

# La teoria BCS (III)

Tutte le particelle si dividono in due gruppi:

– **bosoni**, caratterizzati da  $m_s$  numero intero:

$$m_s = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

– **fermioni**, caratterizzati da  $m_s$  numero semi-intero:

$$m_s = \pm \frac{1}{2}, \pm \frac{3}{2}, \pm \frac{5}{2}, \pm \frac{7}{2}, \dots$$

Esempi: il fotone è un bosone ( $m_s = -1, 1$ ), mentre l'elettrone è un fermione ( $m_s = -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}$ ).

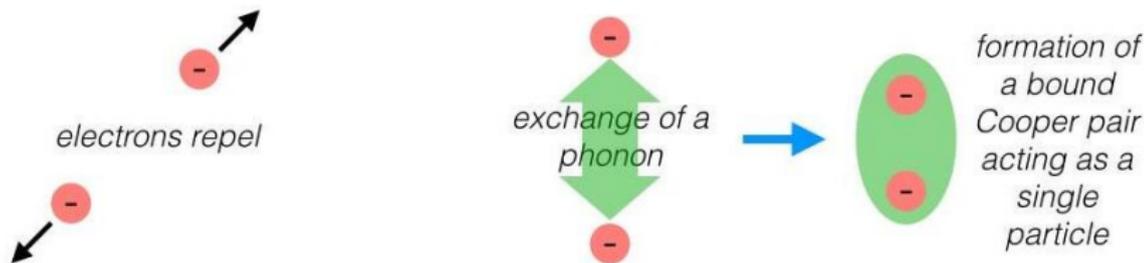
Tra le “particelle non elementari”: l'elio  ${}^4_2\text{He}$  è un bosone ( $m_s = 0$ ), mentre l'elio  ${}^3_2\text{He}$  è un fermione ( $m_s = -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}$ ).



# La teoria BCS (IV)

Nella teoria BCS coppie di elettroni con spin opposto, cioè uno con  $m_s = 1/2$  e l'altro con  $m_s = -1/2$ , formano una **coppia di Cooper** il cui spin totale è zero.

Quindi una singola **coppia di Cooper** è un **bosone** anche se le sue particelle costituenti, gli elettroni, sono **fermioni**.



in normal materials

in superconductors

Un grande insieme di coppie di Cooper costituisce un **fluido bosonico supercoerente**, dove le coppie di Cooper agiscono in modo cooperativo senza interagire con il reticolo ionico (assenza di viscosità e resistività).

# Applicazioni tecnologiche (I)

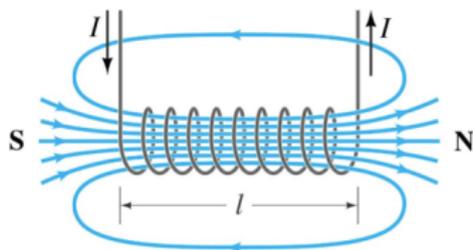
Numerose sono ormai le applicazioni tecnologiche dei materiali superconduttori. Il principale ostacolo ad un uso ancora più intensivo è la **temperatura critica**  $T_c$ , che è comunque molto inferiore alla temperatura ambiente.



Per l'utilizzo dei materiali conduttori sono quindi necessarie delle **tecniche di criogenia** per raffreddare i dispositivi che utilizzano questi materiali.

## Applicazioni tecnologiche (II)

Una tipica applicazione dei superconduttori è per la produzione di campi magnetici  $B$  molto intensi.



Una bobina (solenoid) con  $N$  spire percorsa da una corrente elettrica  $I$  genera al suo interno un campo magnetico dato da

$$B = \frac{\mu_0 N}{\ell} I, \quad (5)$$

dove  $\mu_0$  è la permeabilità magnetica ed  $\ell$  la lunghezza della bobina. La potenza dissipata per effetto Joule risulta invece

$$P_{diss} = R I^2. \quad (6)$$

Quindi all'aumentare della corrente  $I$  aumenta il campo elettrico  $B$  ma aumenta anche la potenza dissipata.

## Applicazioni tecnologiche (III)

In generale, quando la potenza dissipata supera un valore critico  $P_{diss}^{(c)}$ , che dipende dal materiale conduttore, il materiale fonde. Quindi per evitare la rottura del materiale deve essere

$$P_{diss} = R I^2 < P_{diss}^{(c)} . \quad (7)$$

Ne segue che, a fissata resistenza elettrica  $R$ , la corrente trasportata  $I$  non può superare un valore critico

$$I < I_c = \sqrt{\frac{P_{diss}^{(c)}}{R}} . \quad (8)$$

Diminuendo la resistenza elettrica  $R$  si aumenta quindi la corrente elettrica critica  $I_c$ . Nel caso dei superconduttori  $R = 0$  e conseguentemente non c'è una corrente critica, ovvero sia

$$I_c = +\infty . \quad (9)$$

# Applicazioni tecnologiche (IV)

Utilizzando una bobina superconduttiva si può aumentare enormemente la corrente elettrica  $I$  e quindi il campo magnetico  $B$ .

La più nota applicazione tecnologica di questo fatto sono i macchinari della risonanza magnetica negli ospedali.



La risonanza magnetica necessita di campi magnetici  $B$  piuttosto intensi per poter operare all'interno del corpo umano. I dispositivi a risonanza magnetica utilizzano materiali superconduttori per ottenere i campi magnetici necessari.

# Applicazioni tecnologiche (V)

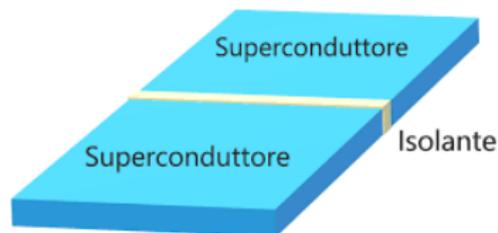
Un'altra notevole applicazione tecnologica dei superconduttori, che sfrutta l'effetto Meissner-Ochenfeld, sono i treni a levitazione magnetica, detti **MagLev**.



I **MagLev** operano in Cina, Giappone e Corea del Sud da diversi anni. Essi hanno una velocità massima di oltre 600 km all'ora.

# Applicazioni tecnologiche (VI)

Assolutamente rilevanti per varie applicazioni tecnologiche sono le **giunzioni Josephson**, costituite da due **superconduttori** separati da piccolo strato di materiale **isolante**.

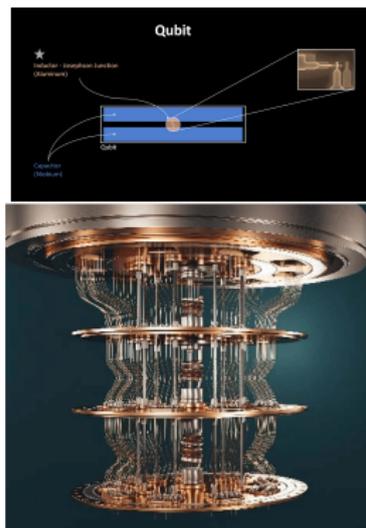


Nelle **giunzioni Josephson** le coppie di Cooper effettuano **tunneling quantistico macroscopico** tra un superconduttore all'altro. Questo effetto è amplificato collegando la **giunzione Josephson** ad una batteria.



# Applicazioni tecnologiche (VIII)

Il comportamento peculiare delle **giunzioni Josephson** viene utilizzato per varie applicazioni, come ad esempio **per misurare con grande precisione campi magnetici molto deboli** (Superconducting Quantum Interference Device: SQUID).



Le **giunzioni Josephson** sono anche il dispositivo di base per produrre i **qubit** nei **computer quantistici superconduttivi** (IBM, INTEL, Google, Rigetti, IMEC).

# Conclusioni

- I materiali superconduttori manifestano assenza di resistenza elettrica ( $R = 0$ ) al di sotto di una temperatura critica  $T_C$ .
- I materiali superconduttori sono anche dei diamagneti perfetti: espellono i campi magnetici  $B$ .
- Se il campo magnetico  $B$  è troppo intenso i superconduttori perdono la loro natura superconduttiva (tipo I e tipo II).
- La teoria BCS riesce a spiegare i superconduttori più semplici (metalli e leghe).
- I superconduttori hanno notevoli applicazioni tecnologiche: risonanza magnetica, MagLev, giunzioni Josephson, SQUID, computer quantistici.

# Ringraziamenti

Chi si laurea in **Scienza dei Materiali** all'**Università di Padova** acquisisce competenze adeguate per poter comprendere ed applicare le proprietà dei **materiali superconduttori**.



GRAZIE PER LA VOSTRA ATTENZIONE!