

Il fenomeno della superconduttività

Centenario della scoperta 1911 - 2011

Aurelio Agliolo Gallitto

Dipartimento di Fisica e Chimica

Università di Palermo

21 novembre 2013

Sommario

- **Cenni storici**
- **Proprietà fenomenologiche dei superconduttori**
 - Perfetta conduzione elettrica
 - Perfetto diamagnetismo
- **Modelli fenomenologici della superconduttività**
 - Modello a due fluidi
 - Teoria di London
- **Cenni sulla teoria microscopica della superconduttività**
- **Superconduttori non convenzionali**
- **Applicazioni attuali e future dei superconduttori**

La corsa verso le basse temperature

Ricerca delle basse temperature

Nel 1823, Faraday riuscì a liquefare il cloro e quindi a raggiungere la temperatura di -34°C .

Questo diede inizio alla ricerca delle basse temperature, cercando di liquefare altri gas con temperatura di ebollizione ancora più bassa.

Faraday placed the crystals of chlorine hydrate "in a sealed glass tube, the upper end of which was then hermetically closed". He heated the tube and noted the formation of an coloured oily liquid on subsequent cooling. The best results were performed using a bent tube; he heated one end with the chlorine hydrate in it and allowed the oily liquid to condense in the cold end which was submerged in crushed ice.

L'aumento di pressione all'interno del tubo faceva innalzare la temperatura di ebollizione del gas consentendo in questo modo la liquefazione a temperatura ambiente
(Farady approfittò di un giorno particolarmente freddo!!!)



Michael Faraday (1791 – 1867)

La corsa verso le basse temperature (II)



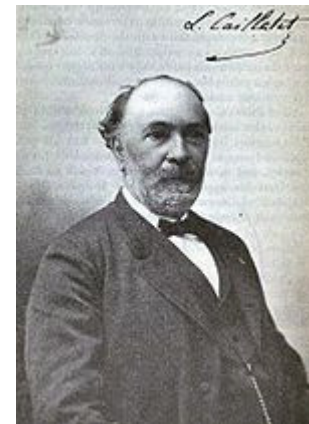
Thomas Andrews
(1813 – 1885)

Subito dopo la scoperta di Faraday, il fisico irlandese **Thomas Andrews** studiò il comportamento dei gas allora noti e dedusse che per liquefare i *gas permanenti* erano necessarie alte pressioni.

Spinto dalle ricerche di Andrews, il fisico francese **Luis Paul Cailletet** costruì un apparato per comprimere i gas ad alte pressioni. Proprio mentre usava questo apparato, una crepa fece uscire il gas dal contenitore raffreddando immediatamente il gas che fuoriusciva fino a formare delle gocce di liquido.

Con questa tecnica Cailletet nel dicembre 1877 ha liquefatto l'ossigeno alla temperatura di 90 K (-183°C)

Nota: Faraday non riuscì a liquefare l'ossigeno, l'azoto e l'idrogeno e per questo motivo li chiamò *gas permanenti*



Luis Paul Cailletet
(1832 – 1913)

Effetto Joule-Thomson

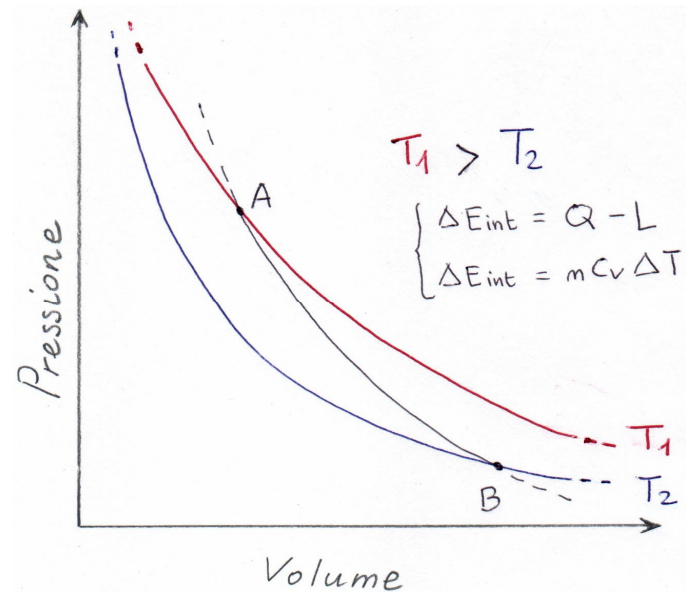
Un metodo usato per fare espandere i gas era quello di fare uscire un gas ad alta pressione da un forellino in un regione di bassa pressione.

Questo a raffreddare il gas fino alla e il rimanente gas freddo essere ricompresso e inserito nel circuito per essere espanso nuovamente e quindi realizzare un processo continuo di raffreddamento e di liquefazione.

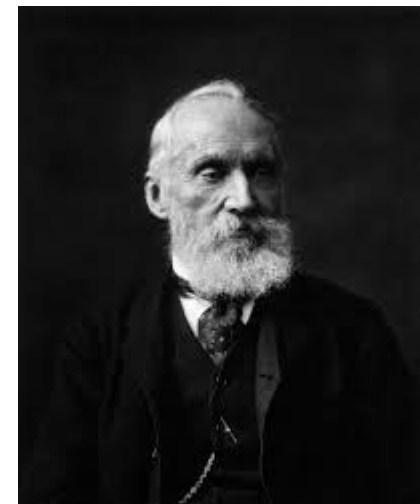
Il principio del rapido raffreddamento era stato studiato precedentemente, nel 1852, da James Prescott Joule e William Thomson (Lord Kelvin).

Quest'effetto deriva dal fatto che quando un gas si espande rapidamente la distanza media delle molecole del gas aumenta, alterando la debole forza attrattiva intermolecolare tra molecole.

L'effetto Joule-Thomson risulta essere importantissimo per liquefare i gas.



James Prescott Joule
(1818 – 1889)



William Thomson, Lord Kelvin
(1824 – 1907)

La scoperta dell'elio sul sole

Alla fine del 1870, tranne l'idrogeno quasi tutti i gas noti erano stati liquefatti. Tuttavia, ancora un altro gas doveva essere scoperto e questo è fu scoperto non sulla terra ma sul sole.

Nel 1868, il francese Pierre Janssen scoprì il nuovo elemento in India guardando lo spettro solare e da ciò diede il nome di elio, dal greco helios.

Dopo la scoperta dell'elio, nel 1895 il chimico scozzese Sir William Ramsay isolò l'elio dalla cleveite, un minerale composto dal 90% di UO_2 e dal 10% di terre rare.

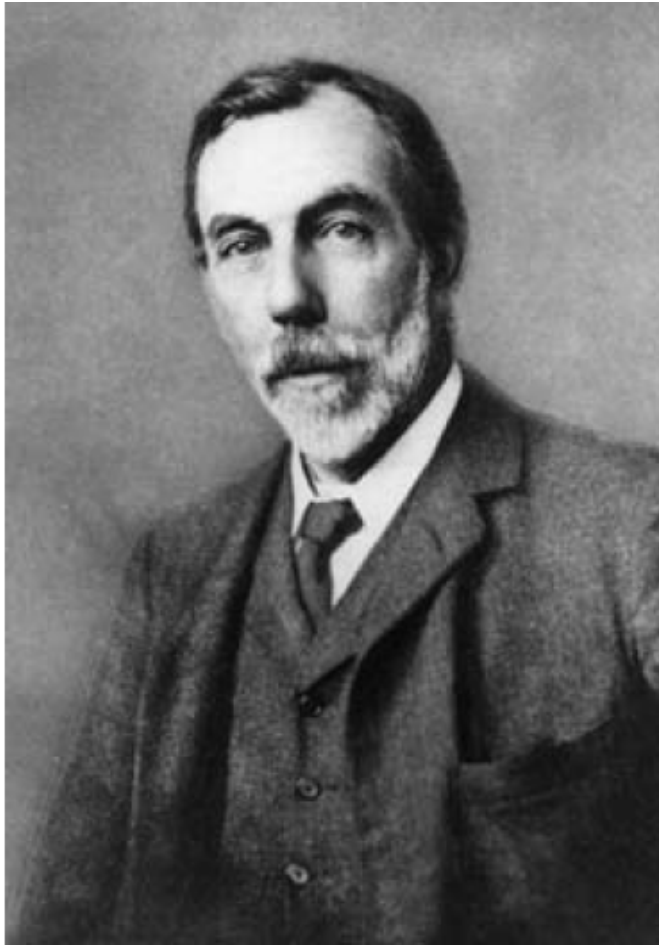
Alla corsa verso le basse temperature partecipò anche Sir James Dewar, il quale non solo voleva liquefare l'idrogeno e l'elio, ma voleva raggiungere lo zero assoluto ($-273.15\text{ }^\circ\text{C}$).

Nel 1893, Dewar costruì il famoso contenitore di vetro con una camicia sottovuoto, oggi noto col nome di thermos (e in ambiente scientifico col nome di dewar).

Nel 1898, Dewar riuscì a liquefare l'idrogeno (20.28 K , $-252.87\text{ }^\circ\text{C}$) e successivamente riuscì a raggiungere anche la temperatura dell'idrogeno solido (14 K , $-259\text{ }^\circ\text{C}$).

Tuttavia, i pessimi rapporti tra Dewar e Ramsay hanno contribuito al fallimento di Dewar nel liquefare l'elio.

Sir William Ramsay e Sir James Dewar



Sir William Ramsay
(1852 – 1916)



Sir James Dewar (1842 – 1923)

La liquefazione dell'elio

L'ultimo rush della corsa verso la liquefazione dell'elio è stato vinto nel 1908 da un fisico olandese: Heike Kamerlingh Onnes.

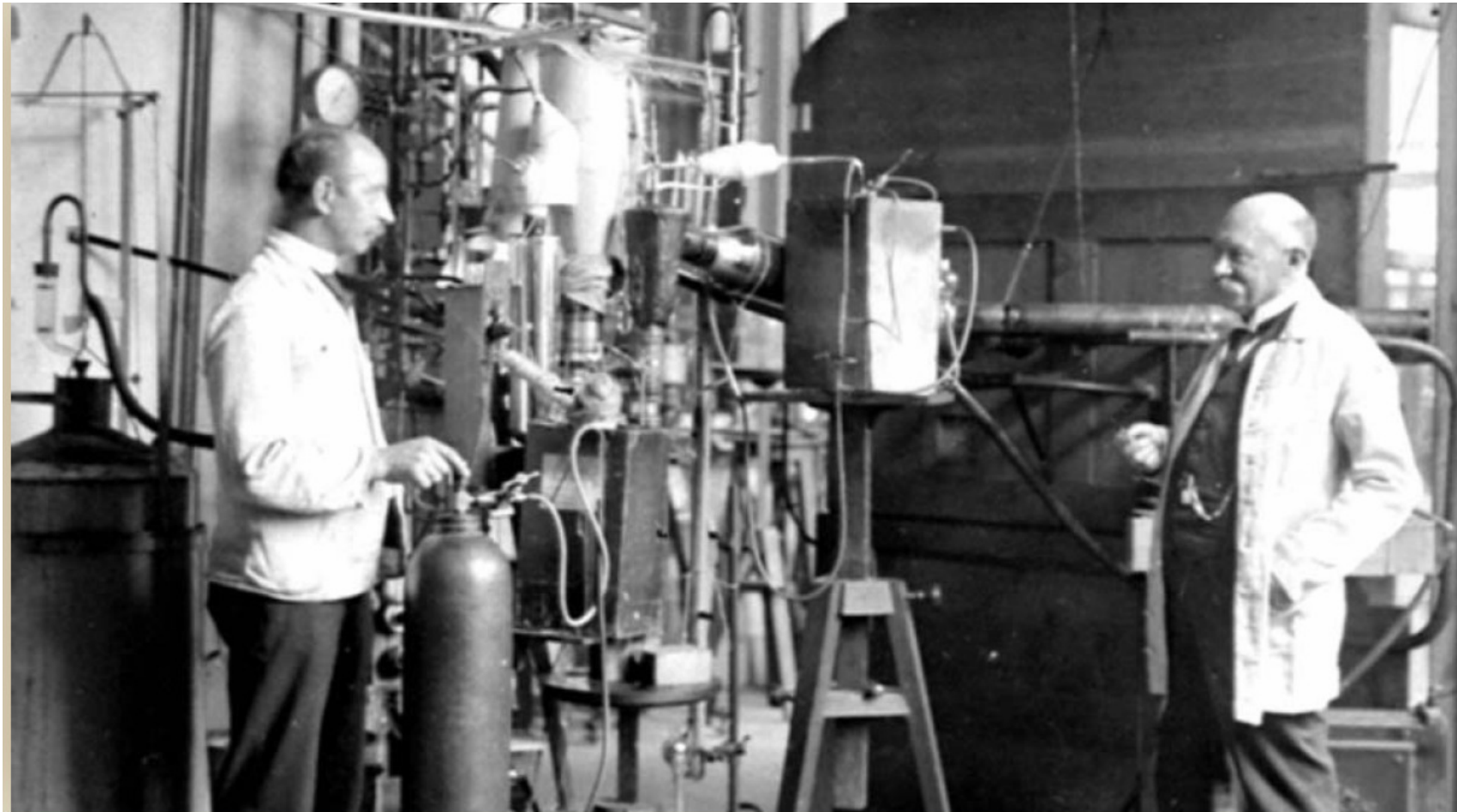


Figure 1. Heike Kamerlingh Onnes (right) and Gerrit Flim, his chief technician, at the helium liquefier in Kamerlingh Onnes's Leiden laboratory, circa 1911.

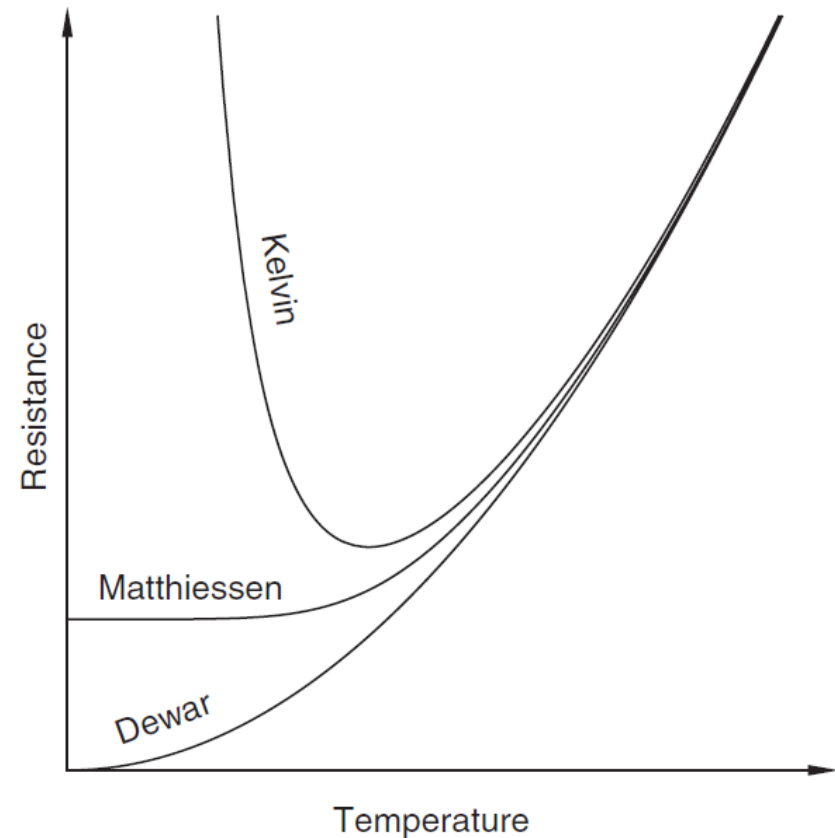
La ricerca in fisica delle basse temperature

Cosa succede alla resistenza elettrica dei metalli raffreddati vicino lo zero assoluto?

Dewar - la resistenza si annullerebbe.

Kelvin - gli elettroni inizierebbero a congelarsi riducendo il loro moto, quindi la resistenza dovrebbe aumentare.

Matthiessen - la resistenza rimarrebbe costante a un valore non nullo.

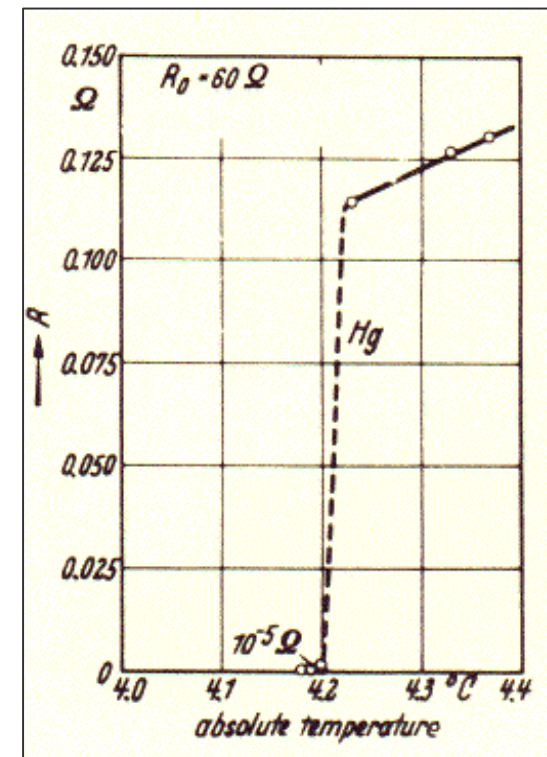
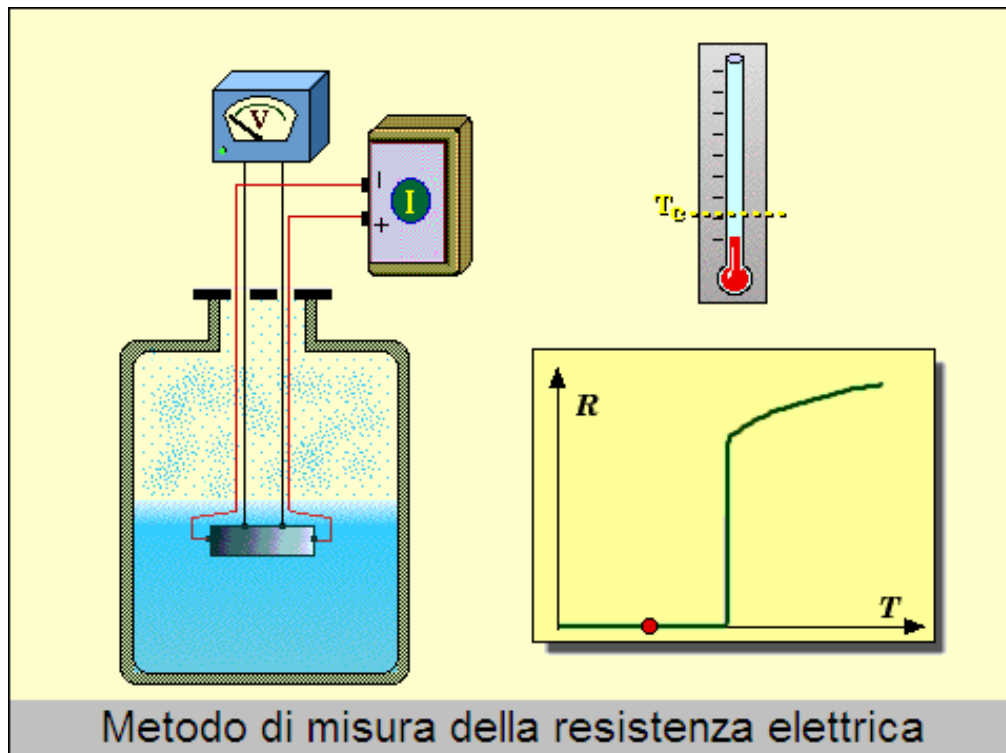


6. The low-temperature resistance of metals according to three popular theories at the turn of the 20th century. But which one would agree with experiment?

La scoperta della superconduttività

Nel 1911, Heike Kamerlingh Onnes scoprì che la resistenza elettrica del mercurio raffreddato alla temperatura di 4.2 K si annullava bruscamente: **aveva scoperto la superconduttività.**

La Superconduttività è un fenomeno fisico che caratterizza molte sostanze, le quali raffreddate al di sotto di una temperatura critica, T_c , presentano eccezionali proprietà elettriche e magnetiche.



Heike Kamerling Onnes e Johannes Diderik van der Waals con il primo liquefattore di elio

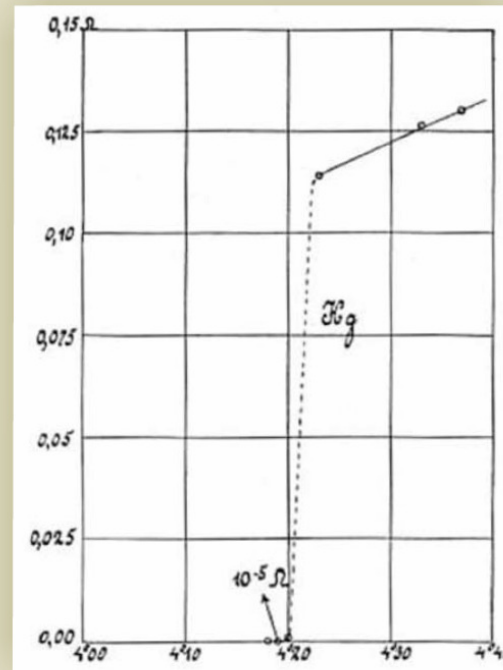
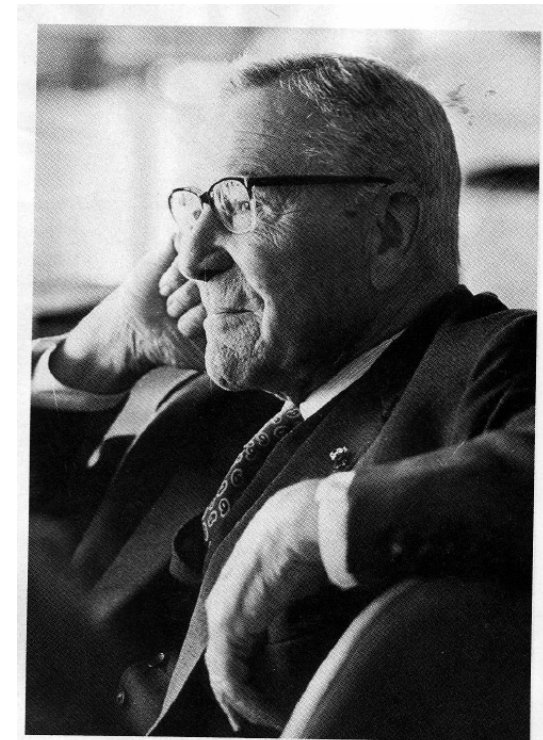


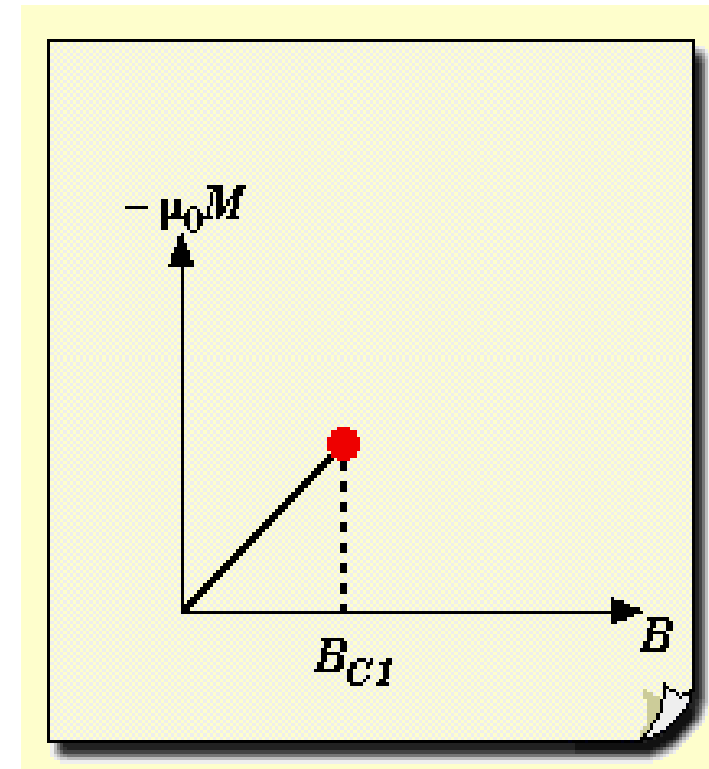
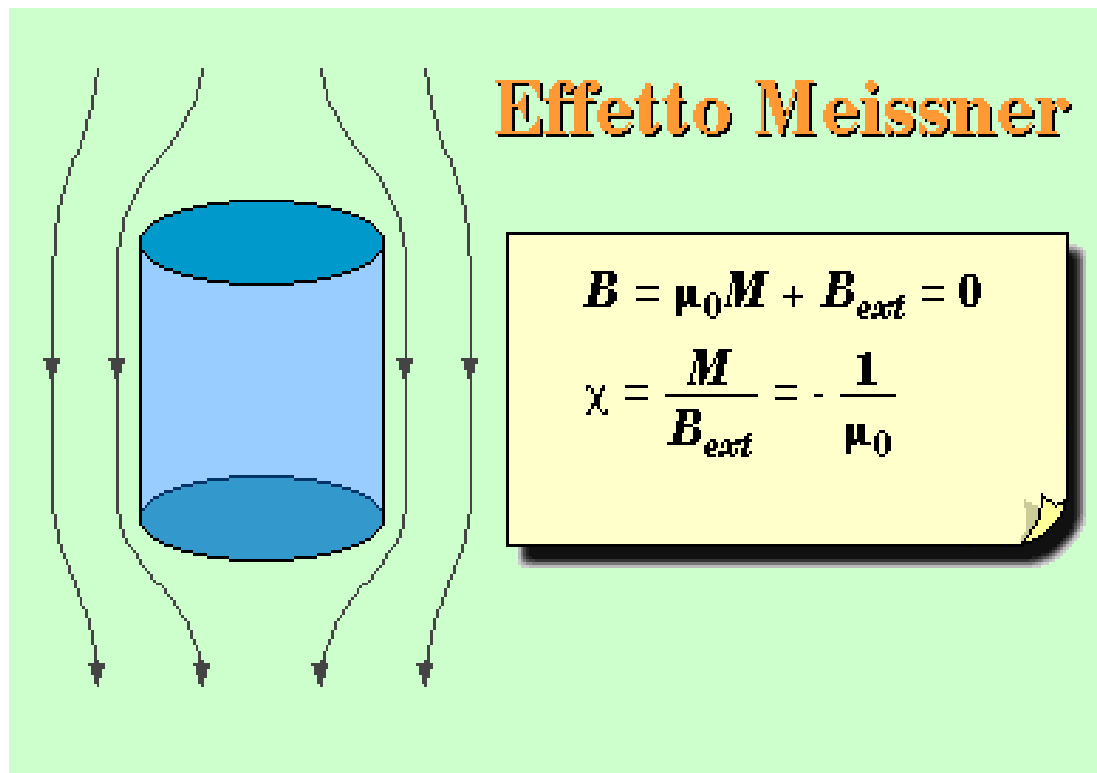
Figure 4. Historic plot of resistance (ohms) versus temperature (kelvin) for mercury from the 26 October 1911 experiment shows the superconducting transition at 4.20 K. Within 0.01 K, the resistance jumps from unmeasurably small (less than $10^{-6} \Omega$) to 0.1 Ω . (From ref. 9.)



GILLES HOLST, who made the first measurement of superconductivity, later became the first director of the Philips Research Laboratories in Eindhoven.

Proprietà Elettriche e Magnetiche dei Superconduttori di I Tipo

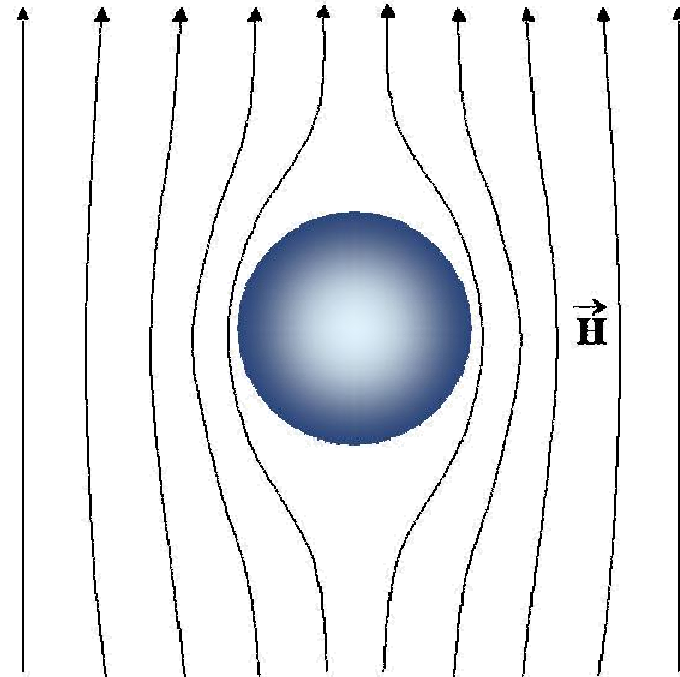
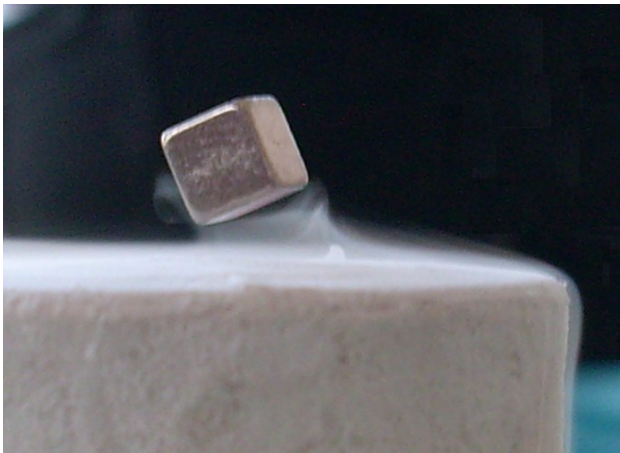
- Resistività elettrica dc nulla: conduttore perfetto
- Espulsione del campo magnetico: diamagnete perfetto



Proprietà Elettriche e Magnetiche dei Superconduttori di I Tipo

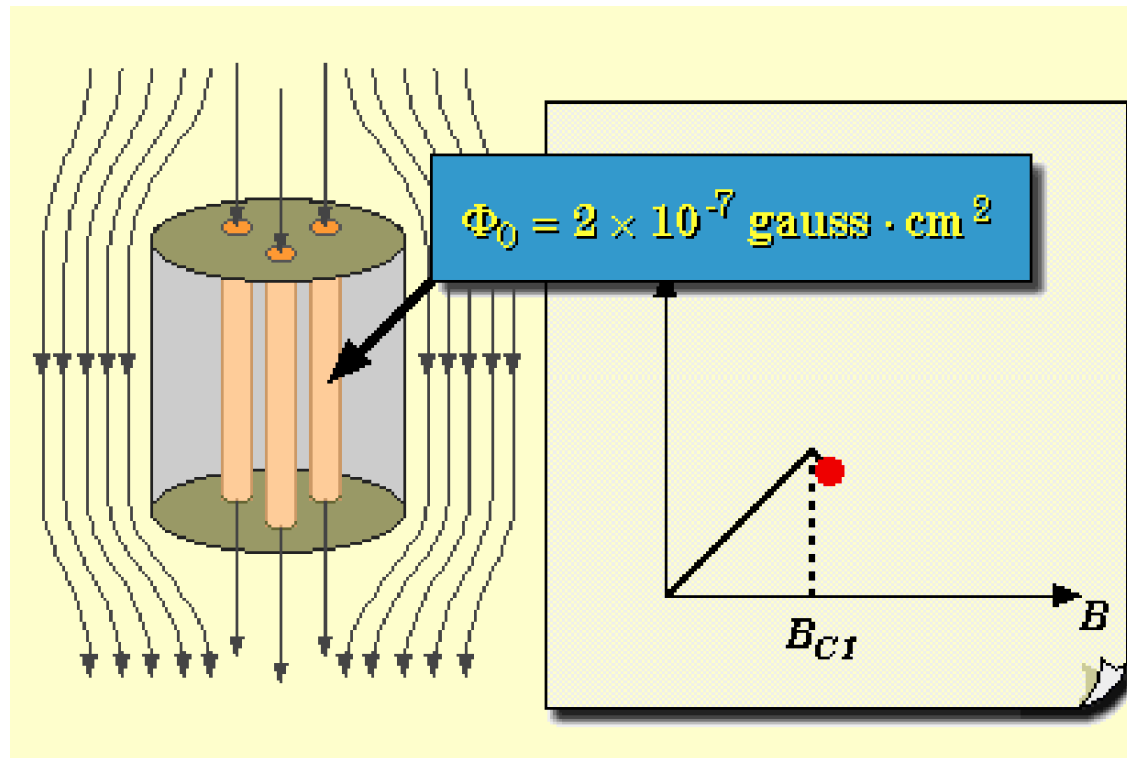
Meissner effect

- $B = B + 4\pi M = 0$
- $M/B = -1/4\pi$

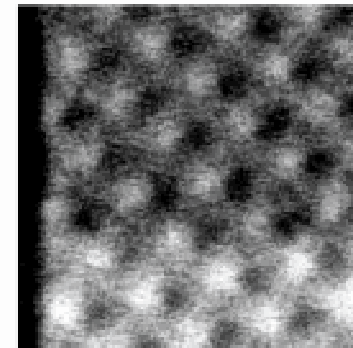


Superconduttori di II Tipo

● Quantizzazione del flusso magnetico: il flussone



mv05



Questa proprietà dei superconduttori di II tipo è stata prevista dal fisico russo Alexander Abrikosov nel 1957. Da lui prende il nome il reticolo di flussoni, detto appunto *reticolo di Abrikosov*.



Creta, settembre 2003 - Da sinistra verso destra: Francesco Laviano, Aurelio Agliolo Gallitto, Alexej Abrikosov e Carla Cirillo.

Teoria fenomenologica: il modello a due fluidi di Gorter e Casimir

La corrente è trasportata da due tipi di portatori: gli elettroni normali e quelli superfluidi. Gli elettroni normali si comportano in modo usuale e seguono la legge di Ohm

$$\mathbf{J}_n = \sigma_n \mathbf{E};$$

gli elettroni superfluidi invece non dissipano e seguono la legge di London

$$\mathbf{J}_s = -\frac{1}{4\pi\lambda} \mathbf{A}.$$

\mathbf{A} : potenziale vettore

Teoria Microscopica (BCS)

- ◆ Gli elettroni possono formare delle coppie, *dette coppie di Cooper*, per mezzo dell'interazione con le vibrazioni reticolari del cristallo.
- ◆ Tra due elettroni, aventi momento e spin opposti, nasce un'interazione attrattiva che causa la formazione delle coppie di Cooper.
- ◆ Il sistema può essere descritto da un'unica funzione d'onda complessa.

$$\psi(\vec{r}, t) = \sqrt{\rho(\vec{r}, t)} \exp[i\phi(\vec{r}, t)]$$

Densità delle
coppie di Cooper

Fase Superconduttiva

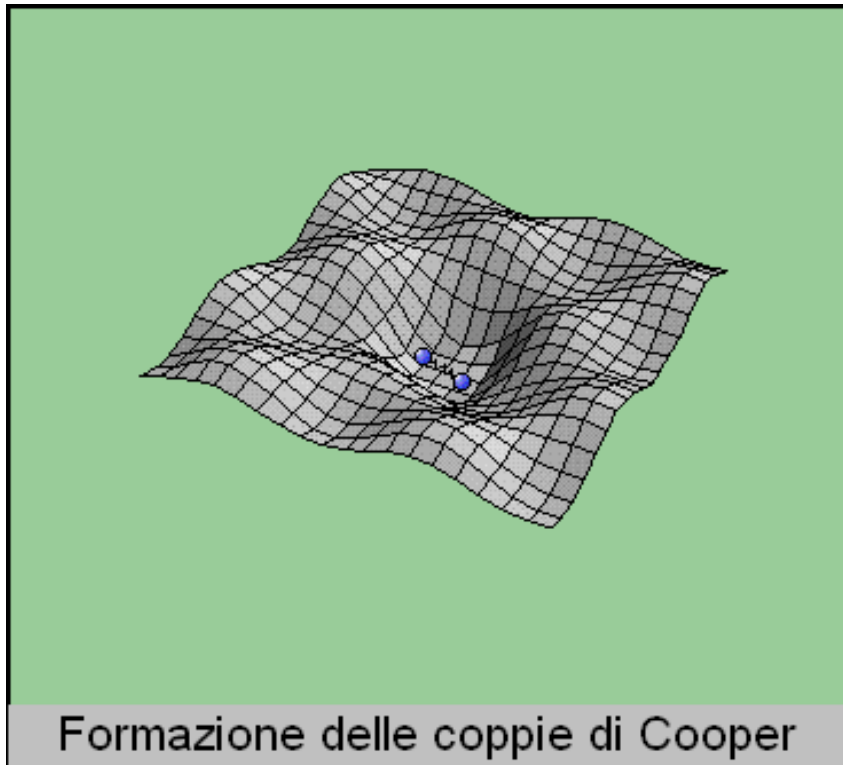


John Bardeen ha vinto due premi Nobel; oltre a quello per la teoria BCS, ha vinto il premio Nobel per aver inventato il transistor.

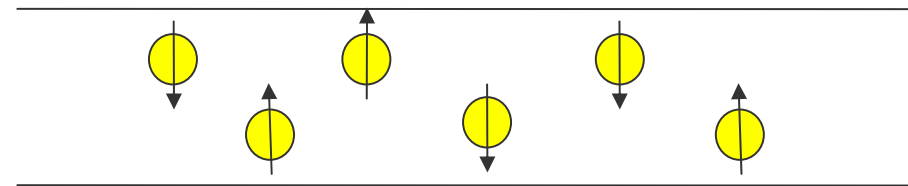
SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA
SCUOLA INTERNAZIONALE DI FISICA «E. FERMI»
CXXXVI CORSO - VARENNA SUL LAGO DI COMO
VILLA MONASTERO - 24 Giugno - 4 Luglio 1997



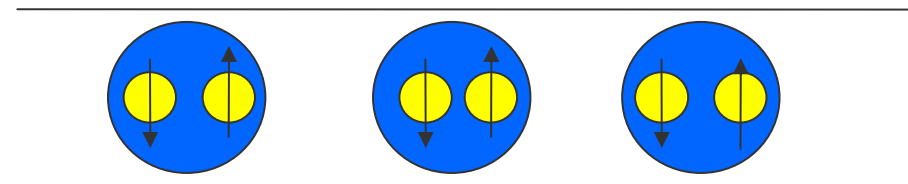
Formazione delle coppie di Cooper



Elettroni nei metalli



Coppie di Cooper nei superconduttori



Quantizzazione del flusso magnetico

Il gradiente della fase della funzione d'onda è proporzionale alla corrente di schermaggio che fluisce alla superficie del superconduttore



$$\vec{\nabla} \phi = \frac{m\rho}{2e\hbar} \vec{J} + \frac{2e}{\hbar} \vec{A}$$

$$\oint \vec{\nabla} \phi \cdot d\vec{l} = \oint \frac{m\rho}{2e\hbar} \vec{J} \cdot d\vec{l} + \oint \frac{2e}{\hbar} \vec{A} \cdot d\vec{l} = 2\pi n$$

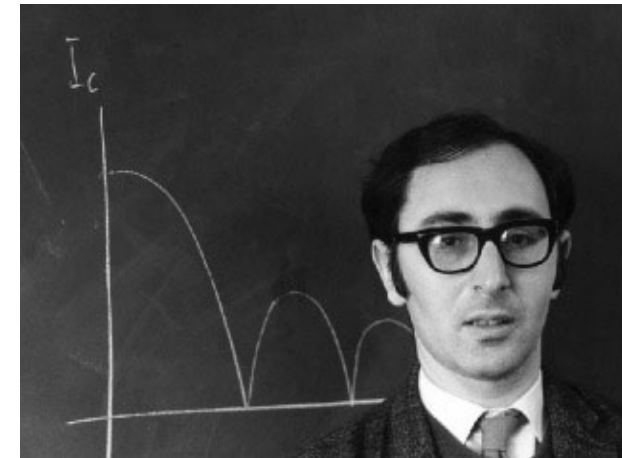
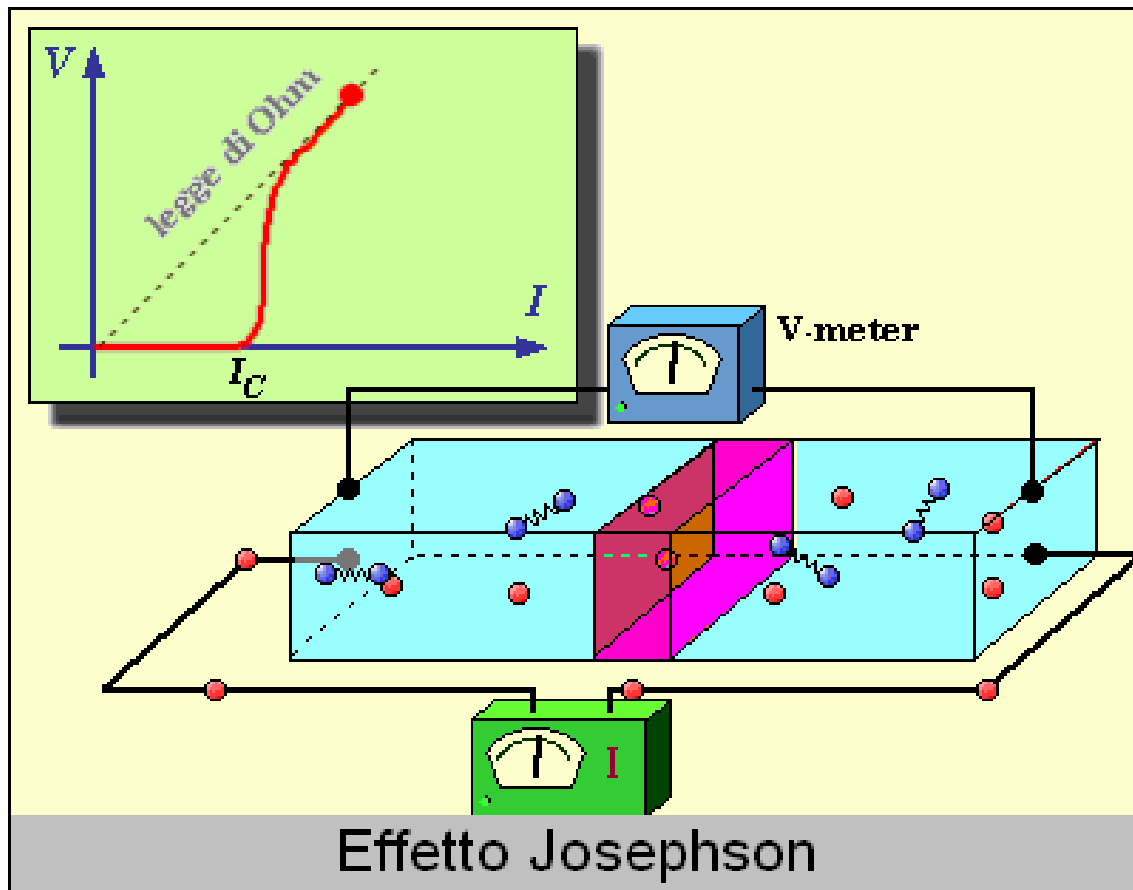
φ deve ritornare allo stesso valore (funzione d'onda ad un solo valore)

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} = 2,07 \cdot 10^{-15} \text{ Wb}$$

$$\Phi = n \Phi_0$$

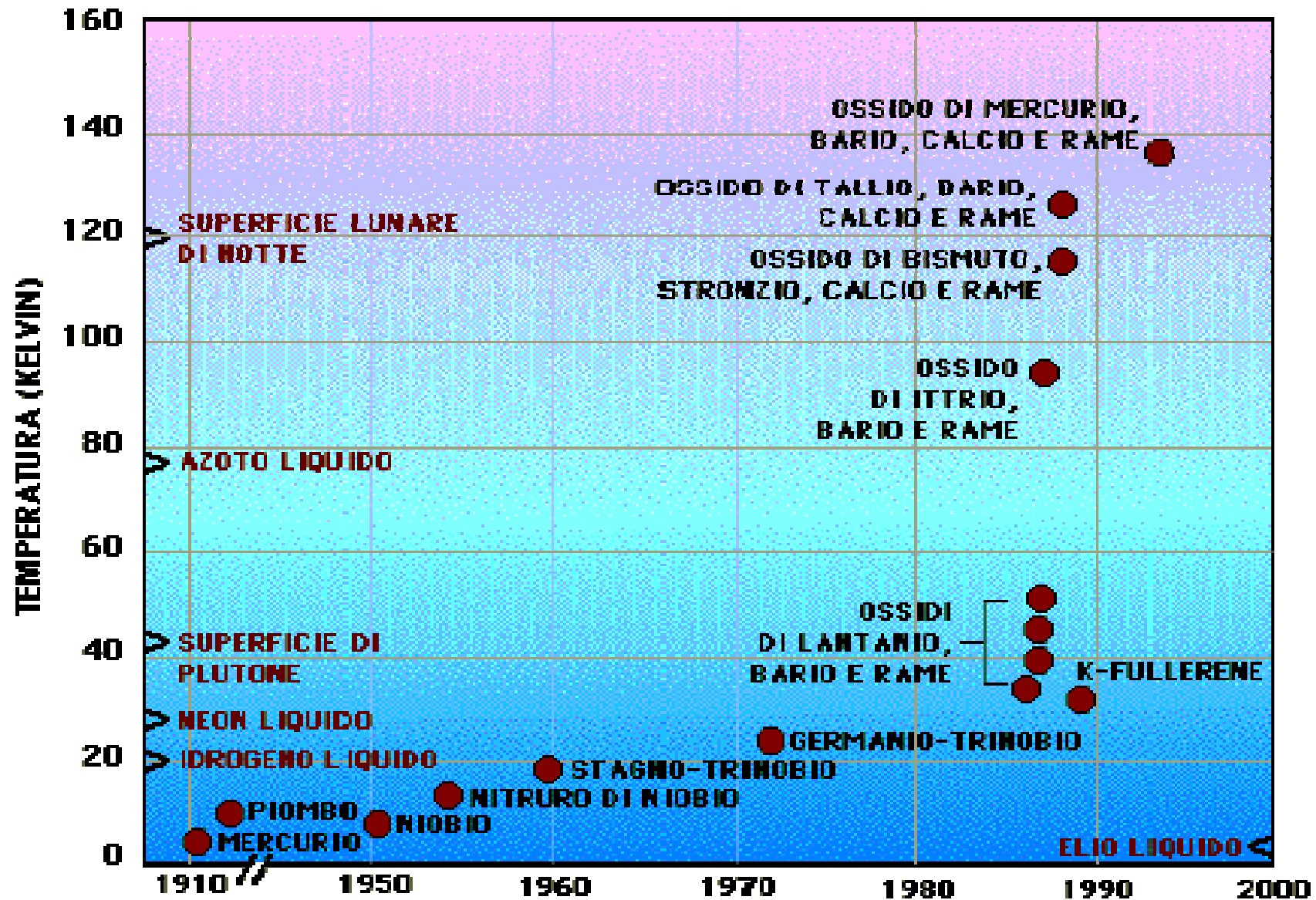
Interferenza Quantistica: Effetto Josephson

Interferenza quantistica macroscopica tra funzioni d'onda descriventi lo stato di due superconduttori accoppiati.



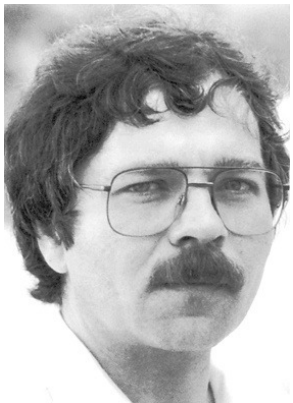
Brian Josephson ha scoperto questo effetto, che prende il suo nome, durante la tesi di dottorato nel 1962. Per questa scoperta ha vinto il premio Nobel nel 1973.

Andamento di T_c vs. tempo



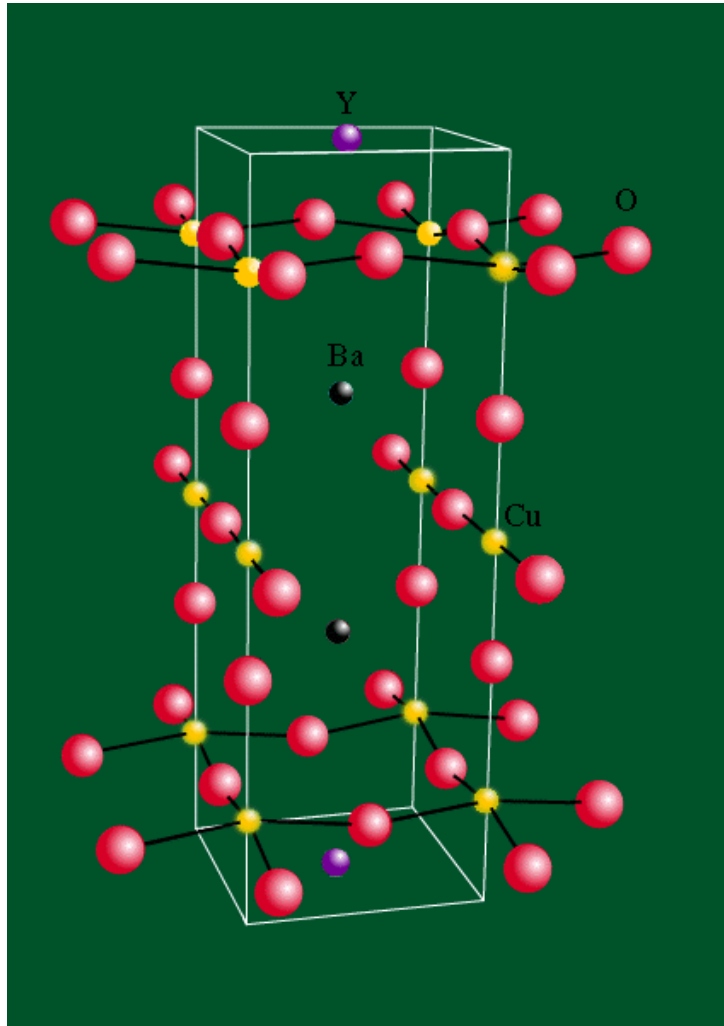
Superconduttori ad alta T_c

- ◆ Temperatura critica superiore della temperatura dell'azoto liquido ($T_c > 77$ K);
- ◆ Natura ceramica;
- ◆ Meccanismo di accoppiamento degli elettroni non ancora pienamente capito.



I fisici svizzeri **Bednorz e Muller** nel 1986 scoprirono la superconduttività nei composti a base di ossido di rame. Per questa scoperta gli fu assegnato nel 1987 il premio Nobel per la fisica.

Superconduttori ad alta T_c : YBCO

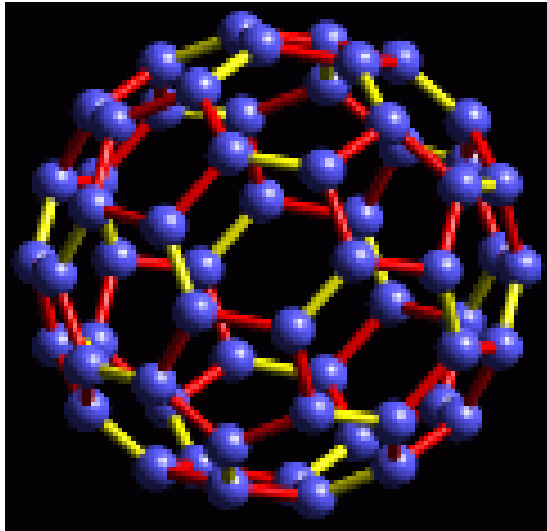


◆ $T_c > 92 \text{ K}$;



Ching-Wu Chu

Altri Superconduttori: i fullereni

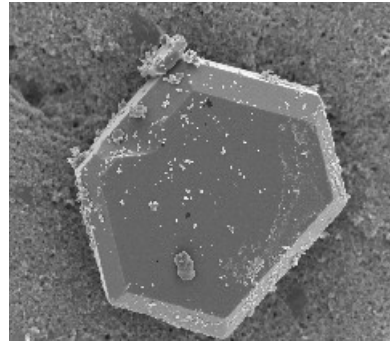
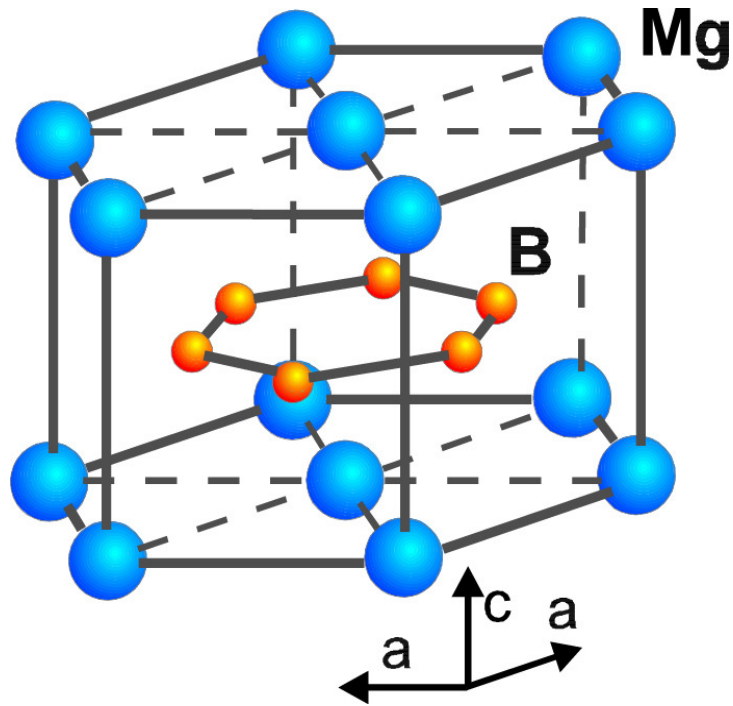


Il Premio Nobel per la Chimica nel 1996 è stato assegnato a **Robert Curl Jr.**, **Harold Kroto** e **Richard Smalley** per avere scoperto che gli atomi di carbonio si possono disporre come una sfera.

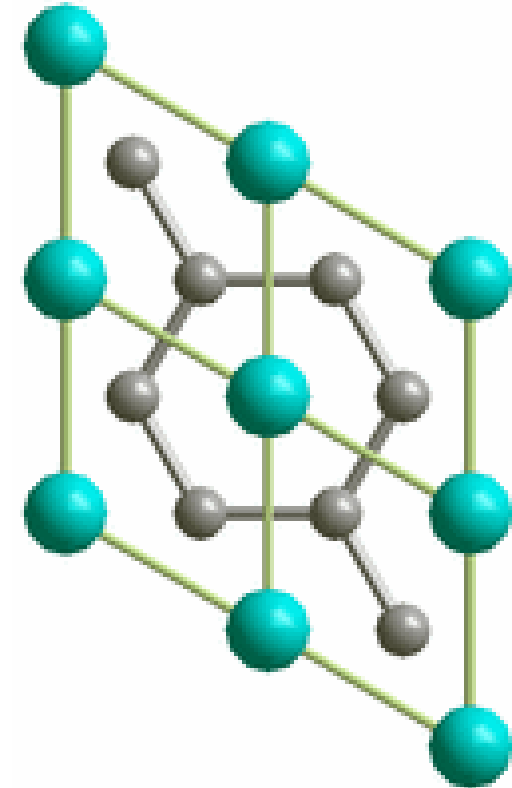
Il pallone di calcio ha questa struttura, così come la cupola geodetica, che si sostiene senza alcuna trave di sostegno, progettata dall'architetto americano R. Buckminster Fuller per la World Exhibition di Montreal nel 1967. I ricercatori chiamarono questa struttura degli atomi di carbonio proprio **buckminsterfullerene**.



Altri Superconduttori: MgB_2



Cristallo di MgB_2
di dimensioni
micrometriche

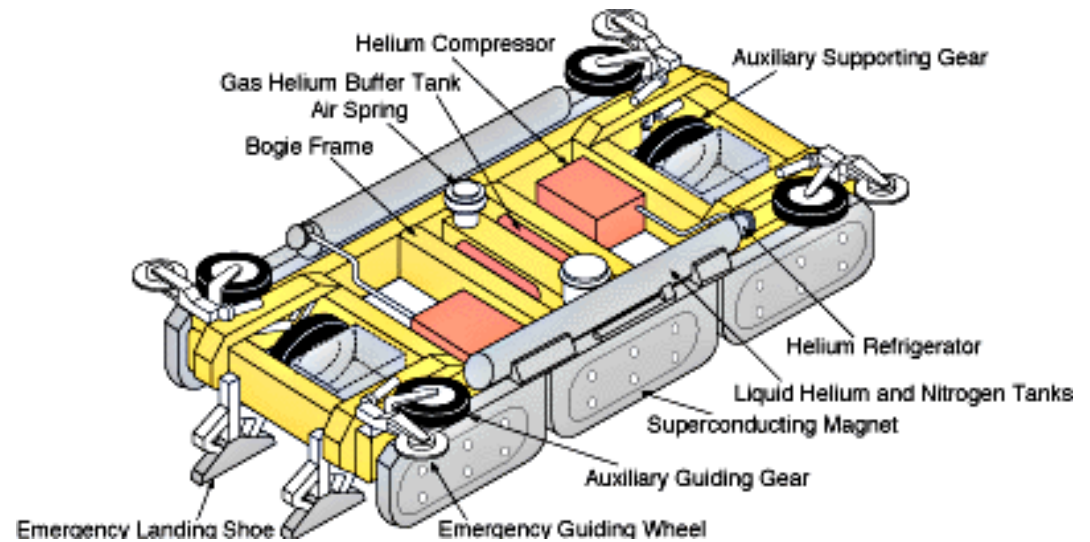
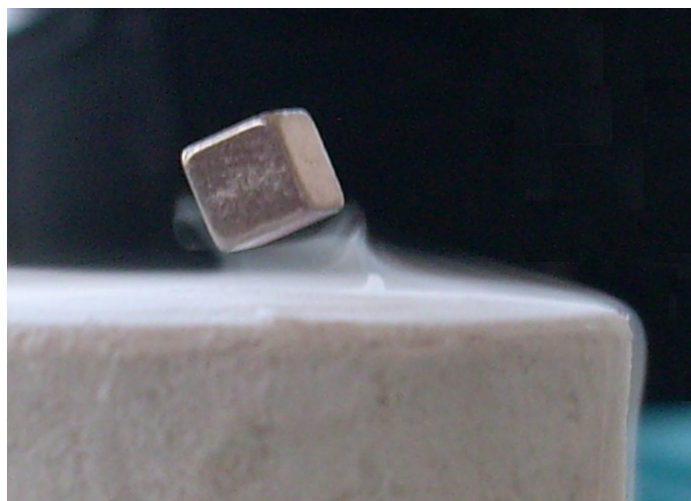
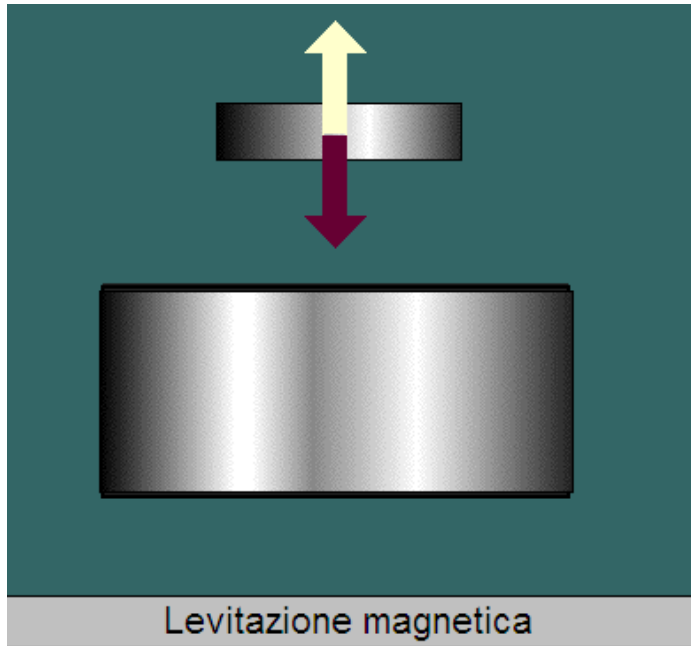


Questo superconduttore è stato scoperto nel 2001 dai giapponesi Nagamitsu, Nagakawa, Muranaka, Zenitani e Akimitsu. Esso ha una temperatura critica $T_c \approx 40 \text{ K}$.

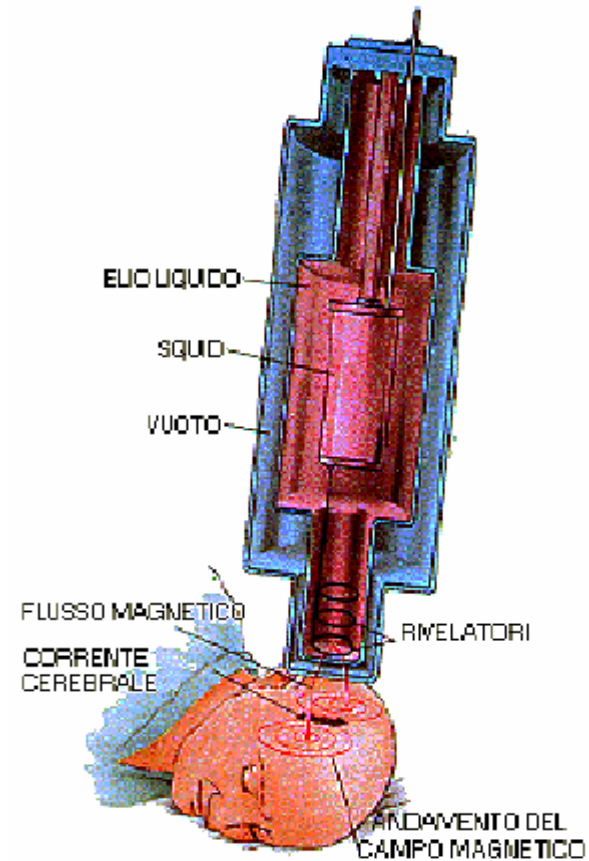
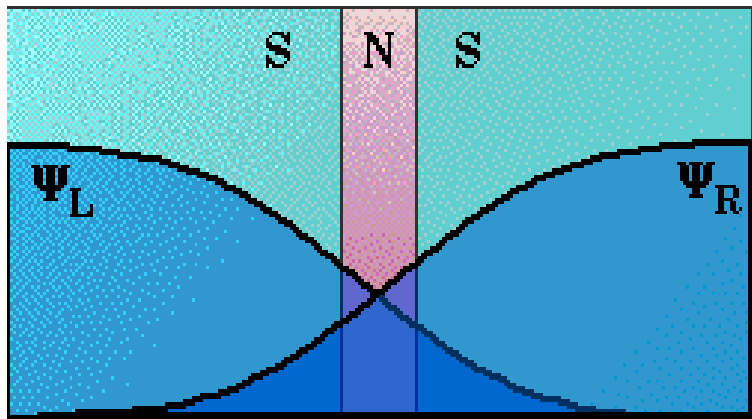
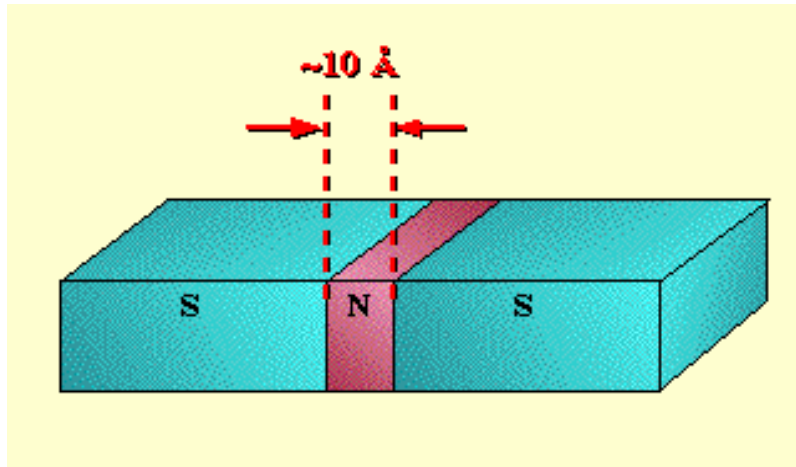
Applicazioni Tecnologiche dei Superconduttori

- Magneti a Superconduttore per la Risonanza Magnetica Nucleare;
- Levitazione magnetica: treni superveloci;
- SQUID: supersensori di campo magnetico;
- Elettronica veloce: supercomputer.

Levitazione Magnetica: treni superveloci



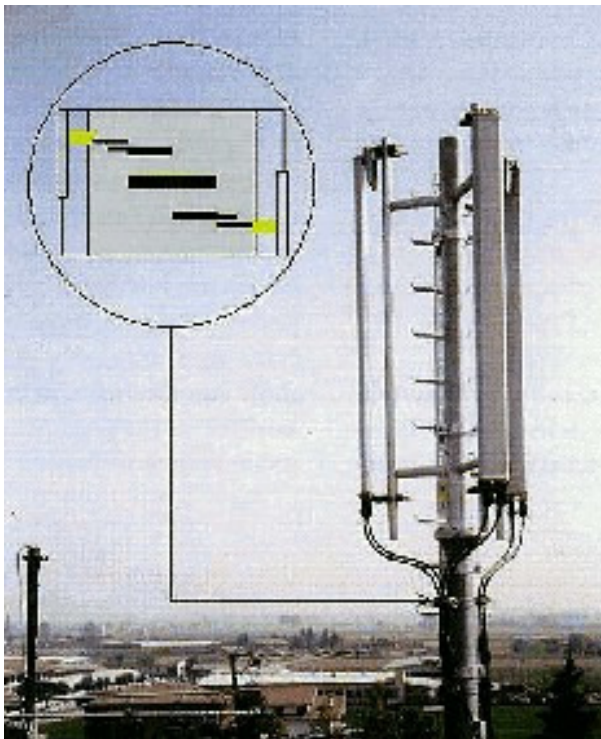
Superconducting QUantum Interference Devices - SQUID



Apparato per analisi biomagnetiche attraverso l'uso di sensori SQUID.

Applicazioni Tecnologiche dei Superconduttori: filtri

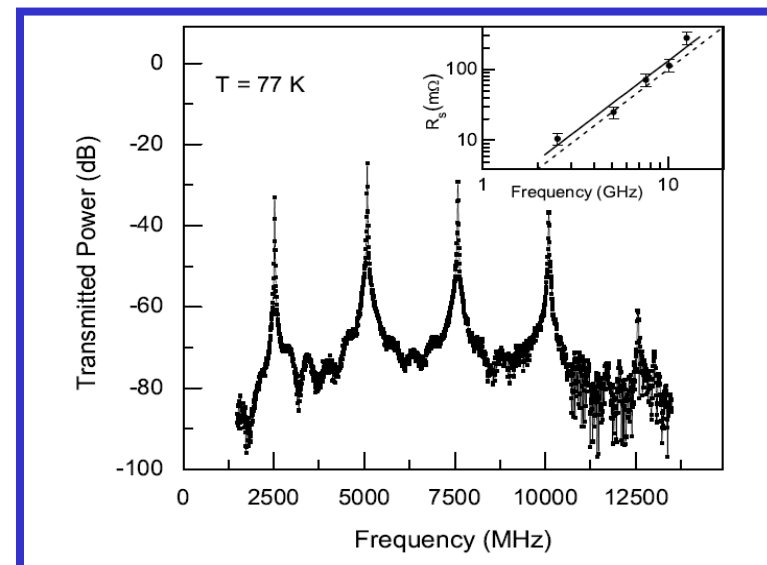
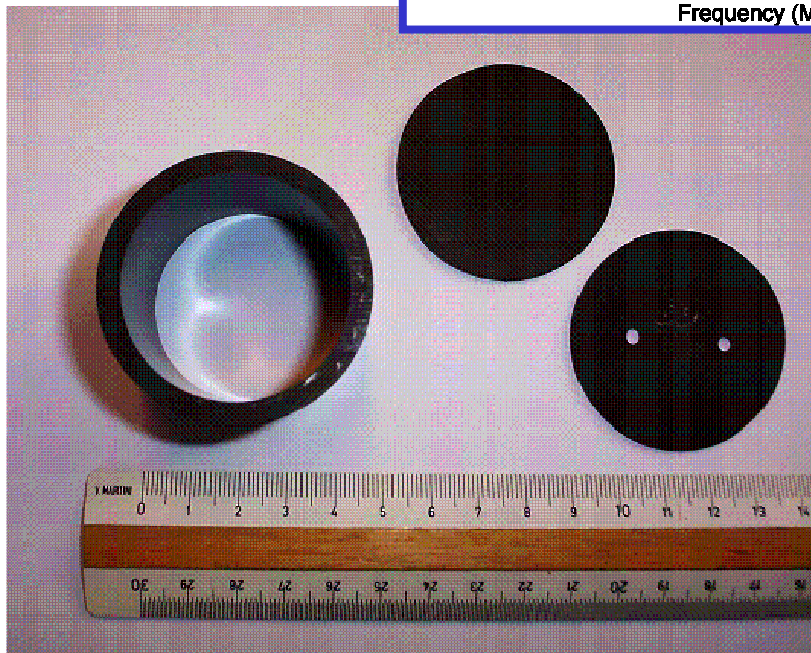
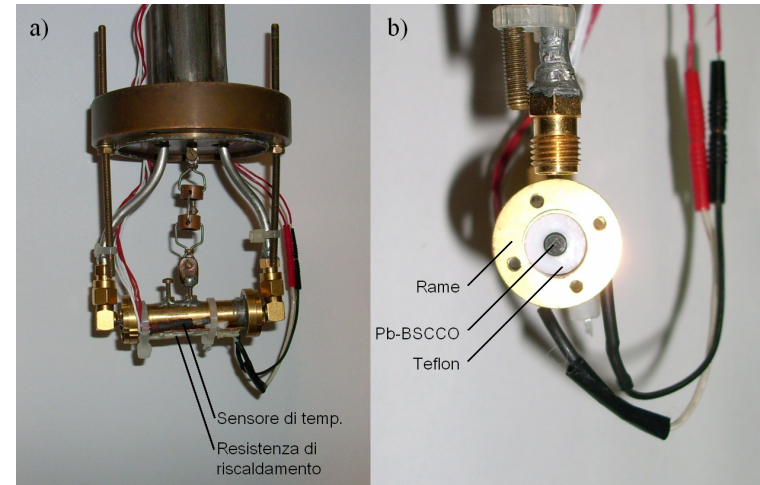
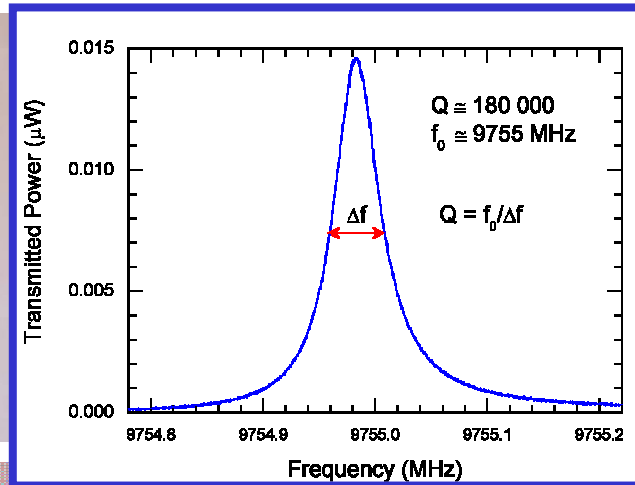
Filtri passa banda per stazioni satellitari e terrestri per la telefonia mobile



Progetto **INFM** coordinato dal Prof. R. Vaglio dell'Università di Napoli, in collaborazione con le Università di Salerno, Catania e le aziende **OMNITEL** di Ivrea, **ALENIA** di Roma **ANSALDO** **C.R.I.S.** e la **CE.SVI.TEC.** di Napoli.

Stazione per telefonia mobile **OMNITEL**.
Nel riquadro è mostrato un dettaglio del filtro a film superconduttivo.

Cavità Risonanti a Microonde di MgB_2 e con BSCCO



Magneti a Superconduttore per la Risonanza Magnetica Nucleare, NMR

I superconduttori permettono di realizzare elettromagneti molto potenti, i quali trovano applicazione nella costruzione di spettrometri NMR usati per lo studio delle parti molli del corpo umano.



Riferimenti Bibliografici

- EDUMAT: dalla pietra al microchip, CD-ROM realizzato dall'Istituto Nazionale per la Fisica della Materia (Genova), Gruppo Ed. Giunti (Genova) e Laboratorio Interprovinciale di Informatica (Parma) 1997
- Physics Today, *The discovery of superconductivity*, Settembre 1996
- Le Scienze, *La struttura magnetica dei superconduttori*, Giugno 1971
- Le Scienze, *Le future applicazioni dei nuovi superconduttori*, Febbraio 1989
- www.superconductors.org
- S. Blundell, *Superconductivity*, Oxford University Press 2009
- Superconductivity*, Physics World, Aprile 2011 pp. 17 – 43
- en.wikipedia.org

Contatti



Dipartimento di Fisica e Chimica

 Via Archirafi 36, 90123 Palermo

 Tel 091.23891702

 Fax 091.6162461

 aurelio.agliologallitto@unipa.it

 sites.google.com/site/aurelioagliologallitto/



Laboratorio **D**idattico per la **F**isica

Facoltà di Scienze MM. FF. NN.

Via Archirafi 28, 90123 Palermo