



## Una breve digressione storico-scientifica sulla superconduttività

Dott. ing. Francesco Sintoni

Era il 1911 quando il fisico olandese *H. Kamerlingh-Onnes* osservò sperimentalmente che il mercurio sotto i 4,15 gradi Kelvin perdeva quasi istantaneamente la resistenza elettrica ed il mondo scopriva un gas molto particolare fatto non più di molecole, ma di elettroni che fluivano dentro il metallo a 0 K senza interagire con gli ioni del reticolo cristallino e a fronte di un fabbisogno di energia piccolo<sup>1</sup> (Figura 1). Come nel caso di altre importanti scoperte scientifiche anche questa fu frutto del caso, perché Onnes meno ambiziosamente cercava di scoprire il valore minimo di resistività ottenibile purificando il materiale, in questo caso il mercurio perché era più facilmente purificabile del platino, dell'oro o del rame.

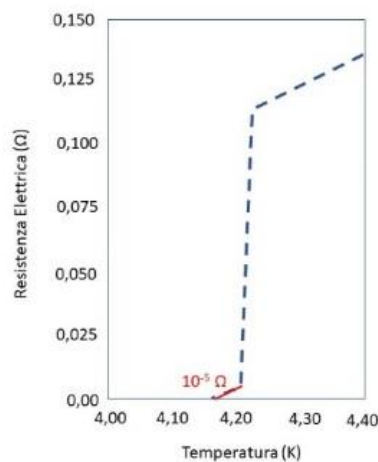


Figura 1 – I valori della resistenza elettrica del mercurio nell'intorno di 4 K (By courtesy of [1]).

Era già noto a quei tempi che la resistenza elettrica<sup>2</sup> dei materiali metallici diminuiva al diminuire della temperatura, ma non si sapeva che a temperature estremamente basse l'alluminio, il piombo ed il mercurio diventavano superconduttivi perché la loro resistenza elettrica scendeva improvvisamente a  $10^{-23} \Omega \cdot cm$ , che è trilioni di volte inferiore a quelli del rame ( $R_{Cu,0K} = 1,75 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot cm$ ). Perché questa differenza di comportamento tra il rame ed i tre metalli superconduttori? La risposta sta nel comportamento degli ioni posti nei nodi di un reticolo cristallino dei metalli: al diminuire della temperatura a valori prossimi a 0 K l'ampiezza delle vibrazioni degli ioni lì dislocati, che si oppone al moto degli elettroni, diventa residuale, ma non si annulla. Questo valore residuo è inoltre influenzato dai vari tipi di difetti presenti nel cristallo reale.

Mentre nei metalli normali la diminuzione della resistenza elettrica è continua, nei superconduttori esiste un range di temperature che va da meno di un centesimo di grado (materiale puro) al centinaio di gradi (cristalli imperfetti) entro cui cade la temperatura critica di transizione conduttore-superconduttore  $T_c$  (Figura 2).

<sup>1</sup> I zero gradi kelvin della scala di temperatura assoluta corrispondono a -273,15 gradi della scala celsius.

<sup>2</sup> La resistenza elettrica di un metallo – espressa nella unità Ohm - è legata alla temperatura T dalla relazione  $R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)]$  ed ai parametri geometrici e fisici del materiale dalla equazione  $R = \rho l s^{-1}$ , in cui l è la lunghezza del circuito, S è l'area della sua sezione trasversale,  $\rho$  è la resistività elettrica.



Da quanto emerge che è stata la tecnologia del freddo ad aver ritmato lo sviluppo di nuovi materiali superconduttori a temperature critiche più alte, quindi, meno economicamente onerose, per lo meno fino agli anni '80, quando la scoperta dei superconduttori ad alta temperatura sopravanzò il limite di temperatura critica appena superiore ai 20 K del germanuro di niobio (NbGe) che imponeva l'uso dello elio liquido. Ed il tempo scandisce questa evoluzione:

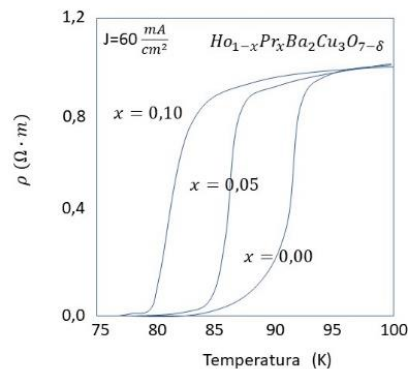


Figura 2 – Effetto della concentrazione di droganti sul valore di  $T_c$  (By Courtesy of [2]).

- anno 1988, Onnes produce  $He_{liq}$  e realizza un primo laboratorio dedicato a Leida nel Olanda
- anni 1923-1925,  $He_{liq}$  prodotto in Germania (Berlino) e Canada (Toronto)
- anno 1930,  $He_{liq}$  prodotto presso l'Istituto di ingegneria fisica di Kharkov in Unione Sovietica
- anno 1933 scoperta dell'effetto Meissner da parte due fisici tedeschi, W. Meissner e R. Ochsenfeld,
- anno 1935, prima spiegazione teorica sul comportamento di un superconduttore in un campo magnetico esterno da parte di due fisici tedeschi, F. e H. London
- anno 1950, teoria generale della superconduttività elaborata dai sovietici L. D. Landau e V.L. Ginzburg
- anno 1957 sviluppo della teoria BCS dal nome dei tre fisici statunitensi J. Bardeen, L. Cooper e J. R. Schrieffer: essa spiega la superconduttività con il principio dello "electron pairing"
- anno 1962, scoperta da parte del fisico inglese B. Josephson della superconduttività debole (o effetto Josephson)
- Anni '70, dimostrazione della correlazione esistente tra la teoria BCS ed i precedenti concetti di superconduttività da parte del fisico sovietico L. P. Gor'kov e del team di J. Kunzler, i quali produssero composti superconduttori a  $T_c = 4,2$  K sotto forma di fili di  $Nb_3Sn$  che resistettero a campi magnetici molto forti (80.000 Oe) ed a correnti di elevate densità ( $100 \frac{A}{cm^2}$ ).

Ma il vero punto di svolta fu nel 1986, quando lo svizzero K. A. Muller ed il tedesco G. Bednorz scoprirono i superconduttrici ad alta temperatura (HTS) costituiti da ossidi complessi di rame contenenti elementi delle terre rare (Bario, Tallio, Bismuto, Yittrio, ecc.), la cui temperatura critica era pari a  $T_c = 176$  K ( $\cong -10^{-2}C$ ), e venne sintetizzato il seleniuro di ferro la cui temperatura critica è più alta di quella dell'azoto liquido o del tetrafluoruro di carbonio che trovano impiego a livello industriale (Figura 3).

E' con l'effetto Meissner che la superconduttività viene collocata in un quadro fenomenologico più complesso; alla scomparsa della resistenza elettrica si aggiunge l'espulsione del campo magnetico interno da parte del materiale superconduttore, oltre che l'assenza in esso di un campo elettrico<sup>3</sup>, quando esso è raffreddato al di

<sup>3</sup> Essendo nel superconduttore la resistività nulla, se il campo elettrico fosse presente si manifesterebbe una corrente di densità infinita, fatto - questo - impossibile



sotto della temperatura critica, elemento – questo - che implica la presenza di una corrente elettrica superficiale e che rende il superconduttore diverso da un materiale perfettamente diamagnetico<sup>4</sup>.

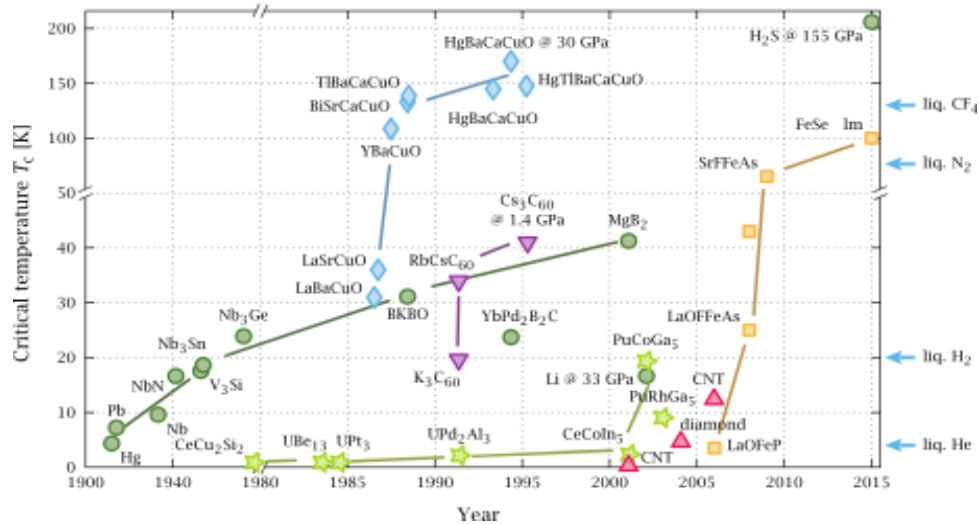


Figura 3 – Evoluzione storica nella tecnologia dei materiali superconduttori (By Courtesy of [3])

Questo significa che il tentativo di magnetizzazione di un superconduttore al di sotto della temperatura critica genera dei vortici di corrente che per la legge dell'induzione di *Faraday-Neumann-Lenz* cancellano praticamente il campo magnetico imposto, lasciandolo presente solo dentro uno strato superficiale di  $20 \div 40nm$  di spessore in cui esso diminuisce fino ad annullarsi (penetrazione di London) (Figura 4).

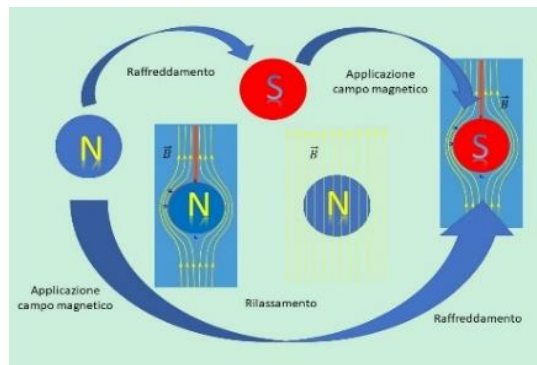


Figura 4 – Rappresentazione schematica dell' *effetto Meissner* (By Courtesy of the [4])

La dimostrazione di questo fatta dal fisico russo V. K. Arkadyev con un esperimento in cui un magnete veniva posto dentro una tazza superconduttrice, aprì la porta alla altra importante proprietà della superconduttività, la *levitazione*, in virtù della quale le correnti presenti nella tazza espulsero da essa il campo magnetico e questi

<sup>4</sup>Il diamagnetismo è la proprietà quantistica di alcuni materiali per la quale essi sono debolmente respinti da un campo magnetico in quanto subiscono dal campo magnetico stesso una magnetizzazione opposta al campo che l'ha prodotta.



# Evolutions

respinse il magnete permanente ponendolo in equilibrio sotto l'azione del peso e della forza magnetica (Figura 5)

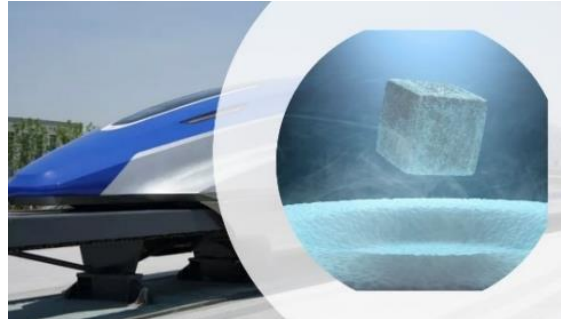


Figura 5 – Il nuovo treno a levitazione magnetica Shanghai city – Aeroporto (By the Courtesy of [5])

Ed è la risposta del materiale superconduttore al campo magnetico esterno che consiglia la suddivisione tra i *superconduttori di tipo I*, i primi ad essere scoperti, e quelli *di tipo II*, che saranno fonte di applicazioni.

Se questo fatto sfiora l'ambito mistico rievocando la *leggenda della bara del profeta* secondo la quale questi si librava nell'aria senza alcun supporto visibile (Figura 6), più laicamente si è tradotto, ad esempio, in un treno superelevato che connette la città cinese di Shanghai al suo aeroporto internazionale.



Figura 6 – Stampa avente per oggetto la *leggenda della bara del profeta* (By the Courtesy of [6])

In virtù di quanto scritto risulta che in un semiconduttore coesiste una fase normale ed una superconduttrice; inoltre, la transizione tra esse avviene passando per la temperatura critica - loro punto di equilibrio - senza alcun dispendio di energia<sup>5</sup>, perché accade solo che il moto degli elettroni diventa ordinato (Figura 7) e che il calore specifico del materiale subisce una variazione di un fattore pari a  $2,5 \div 3$ . Anche quest'ultima evidenza sperimentale dimostra che in un metallo superconduttore, a differenza di un gas perfetto, le particelle non urtano semplicemente, ma interagiscono in un processo a distanza per effetto della legge di Coulomb.

<sup>5</sup> Si ricordi che, l'acqua per passare dallo stato liquido a quello di vapore richiede la somministrazione di  $2260 \frac{KJ}{Kg}$  e viceversa.



# Evolutions

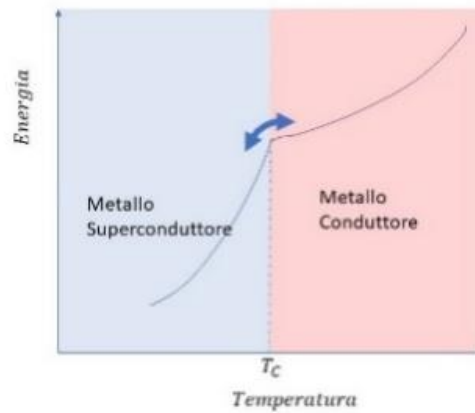


Figura 7 - Energia di transizione metallo conduttore-superconduttore (By the Courtesy of [1])

Da questo i due fisici olandesi K. Gorter e H. Casimir (1934) intuirono che un superconduttore era modellizzabile come una miscela di due liquidi, uno normalmente conduttore e l'altro superconduttore, e che, non soltanto la transizione dall'uno all'altro equivaleva allo *switch-off/on* tra un circuito elettrico resistivo ed uno privo di resistenza elettrica, ma anche che:

- se l'intensità del campo magnetico  $H$  superava il valore critico del materiale, il raffreddamento al di sotto della temperatura critica non permetteva la transizione (Figura 9)
- una densità di corrente  $J > J_{crit}$  causava la distruzione della superconduttività per l'azione del campo magnetico da essa generato.

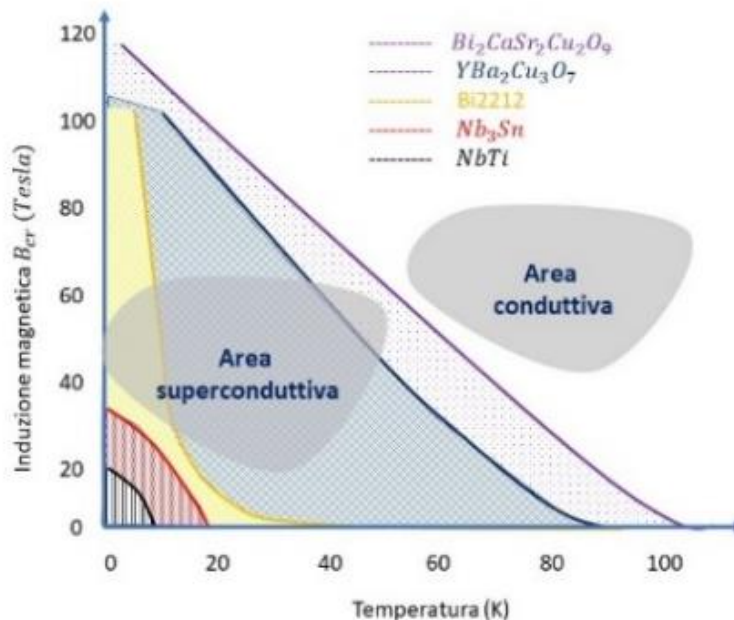


Figura 9 – Campo di esistenza della superconduttività (By the Courtesy of [7])

In sintesi in uno strato sottile della superficie di separazione *superconduttore di tipo I - conduttore normale* scorre una corrente superconduttrice che scherma il campo magnetico e ne impedisce l'entrata all'interno del



materiale; in realtà il campo magnetico penetra dentro lo strato sottile del superconduttore, diminuendo esponenzialmente guidato dalla “profondità di penetrazione di London”  $\lambda_L$ . (Tabella I).

Materiale	Profondità di penetrazione, $\lambda_L$ (Å)
Stagno	510
Alluminio	500
Piombo	390
Mercurio	380 ÷ 450
Niobio	470
Tallio	920

Tabella I – Profondità di penetrazione del campo magnetico dentro un superconduttore (T=0 K).

All’aumentare della temperatura da 0 K a  $T_{cr}$ ,  $\lambda_L$  aumenta ed il campo magnetico penetra più all’interno del superconduttore, fintantoché a  $T_{cr}$  la penetrazione è completa e si manifesta la scomparsa della superconduttività. Comunque, questa penetrazione è sufficientemente piccola:  $\lambda_L = 10^{-5} \div 10^{-6} \text{ cm}$ .

Le applicazioni reali propongono geometrie complesse e, di conseguenza, l’influenza del campo magnetico è più sofisticata. Considerato l’elemento sensibile di un sensore cilindrico per la rilevazione di campi magnetici rivestito in superficie di un coating di spessore  $d \gg \lambda_L$ , la crescita della intensità del campo magnetico da valori bassi a valori elevati ed, infine, superiori a quello critico, fa sì che prima la corrente parassita superficiale espelle il campo magnetico, poi esso assume valori più piccoli vicino ai "poli" e maggiori all’ “equatore”, quindi, in ultimo, la disomogeneità assume la forma di strati adiacenti, non superando dappertutto il campo magnetico il valore critico (Figura 10); se  $d \ll \lambda_L$  il campo critico, al contrario, può essere aumentato di circa un fattore di 100.

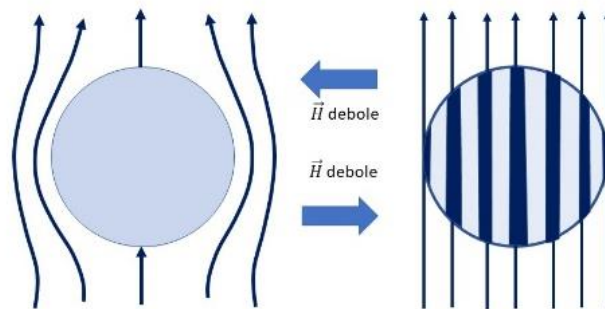


Figura 10 – Campo magnetico di un superconduttore rivestito da un coating (By the Courtesy of [1])

Ciò si verifica in un “superconduttore di I specie” (mercurio, ecc.). Esistono, però, leghe e singoli elementi chimici (ad es., il niobio) - “superconduttori di II specie” - in cui si ha l’espulsione solo con campi deboli, mentre a più alti valori coesistono il campo e la superconduttività, purché  $H \ll H_{crit}$ ; il fisico A. A. Abrikosov (1957) rappresentò le loro correnti parassite come lunghi solenoidi, cioè vortici generati da un campo magnetico morfologicamente identico a quello di un solenoide del diametro dell’ordine di grandezza  $10^{-7} \text{ cm}$ . Orientati parallelamente al campo magnetico esterno, essi appaiono quando l’intensità di questo raggiunge un valore critico inferiore,  $H_{c1}$ , e sono assimilabili dei buchi di passaggio delle sue singole linee di flusso che aumentano in densità all’aumentare dell’intensità del campo magnetico esterno, almeno fintantoché il campo  $H_{est} \leq H_{c2}$ ; oltre esso la superconduttività collassa sparendo (Figura 11). Questo accade perché ad alte intensità del campo magnetico l’interazione tra i vortici-solenoidi genera il loro movimento a cui si associa una crescente dissipazione, cioè una resistenza elettrica al passaggio della corrente.



# Evolutions

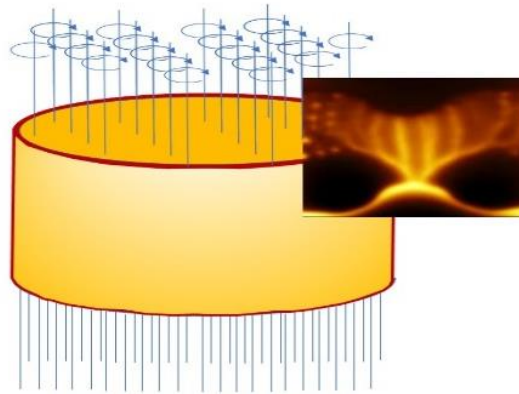


Figura 11 - Modello di Ginzburg-Landau (By the Courtesy of [8] e [9])

Essendo fuori dai vortici, quindi, il campo uguale a zero ed il nucleo del vortice in uno stato conduttivo normale, ne discende che a) mentre nei superconduttori di I specie il campo magnetico è esattamente uguale a zero, in un superconduttore di tipo II non lo è, b) il fatto che  $H_{c1}$  e  $H_{c2}$  sono molto minore - il primo - e molto maggiore - il secondo - di  $H_c$  ha conseguenze importanti nelle applicazioni reali, c) la superconduttività di II specie non è facilmente distruggibile perché  $H_{c2}$  è grande (Tabella II). Confrontando i dati della tabella con quelli dei superconduttori per alta temperatura, si osserva che questi hanno valori ancora più elevati: ad esempio  $H_{c2}$  dell'YBCO, ha valori  $\cong 44T = 440000 \text{ Oe}$  alla temperatura di 1,6 K.

Sostanza	Temperatura critica $T_c$ (K)	$H_{c2}$ (Oe) a 4,2 K
$Nb_3Ti$	8 ÷ 10	90000 ÷ 130000
$V_3Ga$	4,5	210000 ÷ 230000
$Nb_3Sn$	17 ÷ 18	220000 ÷ 250000
$V_3Si$	17	230000
$Nb_2Ga$	20	340000
$Nb_3Ge$	21 ÷ 24	370000 ÷ 400000

Tabella II – Temperatura critica e del campo magnetico critico superiore nei superconduttori di II specie

La corrente scorre senza resistenza solo quando i vortici sono in qualche modo fissi ed è la presenza di difetti "estesi" (ad esempio, le distorsioni del reticolo cristallino) che coinvolgono una miriade di atomi, ad appuntarli. Se il materiale superconduttore è come un liquido di elettroni, qual è, allora, il recipiente di questo liquido? E questo recipiente interviene a creare le condizioni necessarie alla superconduttività? A prima vista sembrerebbe di no, ma in realtà la transizione superconduttrice è influenzata dal reticolo cristallino (Figura 12).

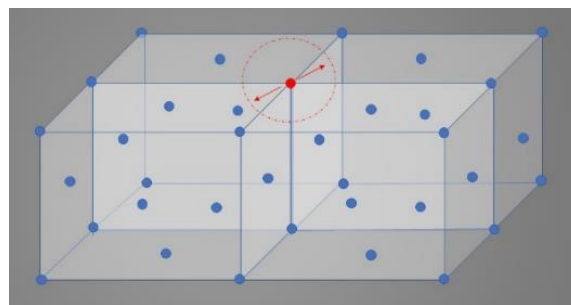


Figura 12- Reticolo cristallino costituito da due celle cubiche a facce centrate (By the Courtesy of [4]).



Questo fu dimostrato nel 1950 sfruttando l' "effetto isotopico", cioè variando la massa del reticolo cristallino senza modificarne la natura chimica immettendo un isotopo diverso dello stesso elemento chimico: si osservò la variazione della temperatura critica  $T_c$  di transizione conduttore-superconduttore e che questa variazione era proporzionale alla frequenza delle vibrazioni degli ioni del reticolo cristallino<sup>6</sup>. Queste vibrazioni di origine termica sono trasferite agli ioni adiacenti del reticolo cristallino, come se questi fossero connessi da molle, spostandosi al suo interno sotto forma di vere e proprie onde o particelle – i fononi , dato che il reticolo risponde alle leggi della meccanica quantistica - che si differenziano per molteplicità, frequenza e velocità di propagazione (Figura 13).

Quindi, gli elettroni non sono più palle da biliardo che impattano con più grosse palle da biliardo<sup>7</sup>- gli ioni - disposti su file regolari, ed è proprio questo che dà loro la possibilità di passarvi attraverso senza urtarvi, così come fa l'elettrone superconduttore muovendosi nel reticolo cristallino del materiale; in meccanica quantistica gli elettroni sono, invece, come quelle onde che passano attraverso i pilastri dei pontili, cioè il reticolo cristallino: l'interazione tra questi genera increspature o vortici, ma l'onda riesce a passare attraverso essi, quindi, senza dissipare energia per rifrangersi sulla spiaggia.

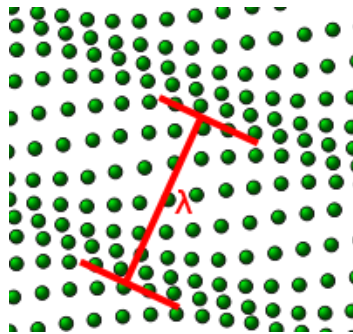


Figura 13 – Propagazione dei fononi all'interno del reticolo cristallino (By the Courtesy of [10])

Nella realtà, i difetti reticolari presenti nei materiali tendono ad opporsi al movimento degli elettroni e la transizione conduttore-superconduttore è possibile, nonostante essi, se essa abbassa la energia del sistema. Il problema sta proprio qui: la associata variazione dell'energia del singolo elettrone è così piccola che basta un leggero cambiamento nelle posizioni degli ioni nel cristallo a che la superconduttività collassi. Quindi, il fenomeno della superconduttività non può non dipendere dal comportamento collettivo degli elettroni come precondizione al manifestarsi di un movimento ordinato.

Quindi, la transizione causa il cambiamento non tanto dell'energia dell'elettrone, ma delle caratteristiche del suo moto e ciò che rende complesso il problema è il fatto che tutte le particelle del liquido di elettroni sono legate insieme e nessuna di esse può essere separata senza violare l'intero stato del sistema: questo sfugge alla percezione del nostro vivere quotidiano e bisogna ricorrere ai concetti di stato quantistico e di leggi quantistiche per essere interpretato, capito ed utilizzato. La comprensione semplice a ciò è agibile pensando alla interpretazione data dell'atomo dal fisico danese Niels Bohr secondo il quale l'elettrone ruota stabilmente attorno al nucleo carico positivamente e non è attratto da questo perché permane in stati definiti "quantistici" a meno che ad esso non sia fornita o tolta la quantità di energia finita (quanto di energia) che separa due stati quantistici contigui: l'elettrone si muove, perciò, lungo la sua pista senza attrito.

<sup>6</sup> Solo a 0 K la vibrazione del reticolo cristallino è "congelata".

<sup>7</sup> Se ogni protone o il neutrone, di cui è formato il nucleo atomico, è quasi duemila volte più pesante di un elettrone, si immagini lo ione costituito da molti protoni e neutroni!





Allora si può pensare al superconduttore come dotato di uno stato di energia fondamentale ed altri stati di energia superiore e al fatto che la differenza tra stato conduttore normale e superconduttore dipende dal valore della differenza di energia tra stati contigui: se il gap di energia tra lo stato superiore e quello fondamentale è arbitrariamente piccolo, il materiale è un conduttore normale e guadagna e rilascia energia dissipandone una parte (resistenza elettrica); se, invece, il gap energetico tra i due stati è fisso, il materiale è nello stato superconduttore. Va considerato che nella meccanica quantistica, due particelle atomiche o subatomiche non possono permanere contemporaneamente nello stesso stato che è definito dai valori dei parametri denominati numeri quantici, valori - questi - a cui corrispondono valori discreti delle varie forme di energia posseduta da esse (potenziale, cinetica, magnetica, ecc.). Questo significa che due elettroni devono differire almeno per il verso di rotazione attorno al proprio asse, cioè per lo spin (Principio di esclusione di Pauli)<sup>8</sup>, (Figura 14).

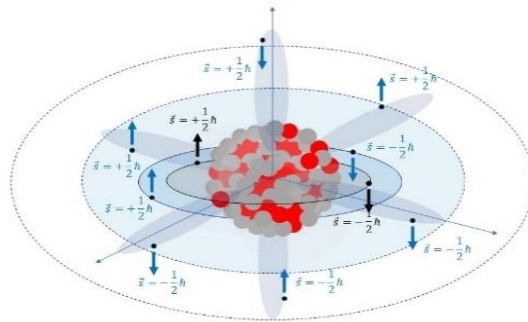


Figura 14 – Stati consentiti agli elettroni nell'atomo (By the Courtesy of [4])

In relazione allo spin le particelle subatomiche si dividono in due classi, quelle a spin intero e quelle a spin frazionario, e questa differenza dà proprietà comportamentali diverse: le prime sono le “particelle di Bose” (bosoni), dal nome del fisico indiano *Satyendranath Bose*, le seconde “particelle di Fermi” (Fermioni), dal nome dell'italiano *Enrico Fermi*. Ad esempio, è un bosone l'elio che è un superfluido, cioè un fluido che fluisce senza attrito<sup>9</sup>; il liquido di elettroni, denominato “liquido di Fermi” ha, invece, spin pari ad  $\frac{1}{2}$  e, rispondendo per questa ragione al principio di esclusione di Pauli, è sede di quelle azioni repulsive da cui deriva la resistenza elettrica.

La rimozione della quest'ultima richiede la trasformazione del liquido di Fermi in un superfluido, ovvero l'accoppiamento degli elettroni affinché il loro spin complessivo sia nullo. Le caratteristiche dei superconduttori sono tali da permettere ciò nell'intorno della temperatura critica di transizione perché in qualche modo è là che è bilanciata la azione repulsiva della forza di Coulomb<sup>10</sup> attraverso il coinvolgimento di un terzo attore, il fonone, che cede ai due elettroni di spin opposto l'energia necessaria ad “accoppiarli”. Il meccanismo con cui ciò avviene è di una complessità unica:

- il primo dei due elettroni nel suo moto attrae leggermente gli ioni positivi, facendoli addensare, ma in ritardo rispetto al suo passaggio data la loro maggiore massa
- il secondo elettrone interagisce con l'addensamento di carica positiva e viene a trovarsi in equilibrio dinamico tra l'attrazione attrattiva del reticolo perturbato e la repulsione dal primo elettrone.

<sup>8</sup> Lo numero quantico di spin è il numero che definisce i possibili stati di rotazione delle particelle quantistiche attorno a se stesse come fossero trottole; a parità dei valori degli altri numeri quantici, due particelle devono assumere valori di segno contrario, cioè  $0\hbar, \pm 1\hbar, \pm 2\hbar, \pm 3\hbar \dots \pm \frac{1}{2}\hbar, \pm \frac{3}{2}\hbar, \pm \frac{5}{2}\hbar \dots$ , in cui  $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{s}$  è la costante di Planck, a seconda della natura della particella.

<sup>9</sup> Gli atomi di elio, avendo spin pari a zero, hanno un comportamento “collettivo”; il fisico inglese J. Ziman, affermò che questo elemento rispondeva al detto “Più ci riuniamo, meglio siamo sono insieme”. Di fatto, questa è la condizione fisica per cui una particelle è un Bosone.

<sup>10</sup> La forza di Coulomb scambiata da due elettroni vicini genera una accelerazione repulsiva pari a  $10^{20}$  volte l'accelerazione di gravità.



Il risultato finale è che i due elettroni si muovono nel reticolo cristallino in modo coerente come fossero una unica entità a cui è dato il nome di *Coppia di Cooper* dal nome del fisico americano L. Cooper che la scoprì.

In sintesi, il comportamento superconduttore di un metallo dipende da due parametri, la distanza media degli elettroni della Coppia di Cooper,  $\xi$ , chiamata “lunghezza di correlazione”<sup>11</sup>, e la profondità di penetrazione  $\lambda_L$  del campo magnetico: dalla prima dipende il numero delle coppie di Cooper  $n_{sC}$ , dalla seconda la penetrazione del campo magnetico  $H$  esterno all’interno del superconduttore. La figura 15 mostra che i semiconduttori di I e II specie si differenziano per i valori di queste due grandezze, sebbene in entrambi all’aumento della densità di coppie fa riscontro la diminuzione del campo magnetico; in quelli di I specie, però, essendo  $\xi \gg \lambda_L$ , la superconduttività è energeticamente svantaggiosa, quindi fragile e più facilmente distruggibile,

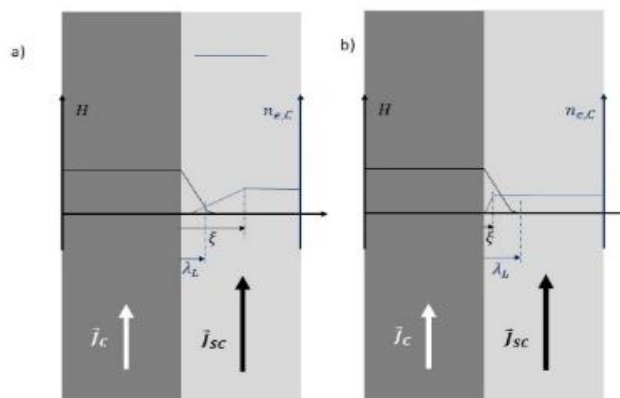


Figure 15 – La superconduttività di I e II specie (By the Courtesy of [1]).

Perché, comunque, questo possa aver luogo è necessario che tutte le coppie di elettroni correlati si comportino allo stesso modo, ovvero siano in fase, essendo la superconduttività espressione di un comportamento collettivo e non di singole o coppie particelle quantistiche.

Sebbene il salto di *breakthrough* nella superconduttività è da ricondurre alla scoperta dei cuprati (Figura 16), perché la loro elevata temperatura critica  $T_C$  - superiore a quella dell’azoto liquido, fluido oggi giorno largamente impiegato nell’industria -, ne rende accessibile l’impiego pratico a costi compatibili, la crescita della conoscenza in questo ambito tecnologico si è rivelata più ampia di quanto possa pensarsi.

Tra 2000 ed il 2015 prima il team di Akimitsu, poi quello di Hosono scoprono, infatti, la comparsa della superconduttività del diboruro di magnesio  $MgB_2$  a  $T \leq T_C = 39 K$  e dello ossipnictide stratificato a base di ferro,  $LaOFeP$ , composto da una pila alternativa di strati di ossido di lantanio ( $La^{3+} O^{2-}$ ) e pnictide di ferro ( $Fe^{2+} P^{3-}$ ) la cui transizione superconduttiva avviene a  $\sim 4 K$ .

E pochi anni fa è il risultato conseguito dal team dello scienziato Eremets del *Max-Planck-Institut für chemie di Mainz* (Germania), che ha reso l’acido solfidrico superconduttore ad una pressione di 150GPa e ad una temperatura di transizione maggiore 200 K, a dimostrare che i sistemi legati all’idrogeno sono potenziali risposte all’obiettivo di realizzare la superconduttività a temperatura ambiente.

<sup>11</sup> La lunghezza di correlazione è superiore migliaia di volte la distanza media tra gli elettroni normali.

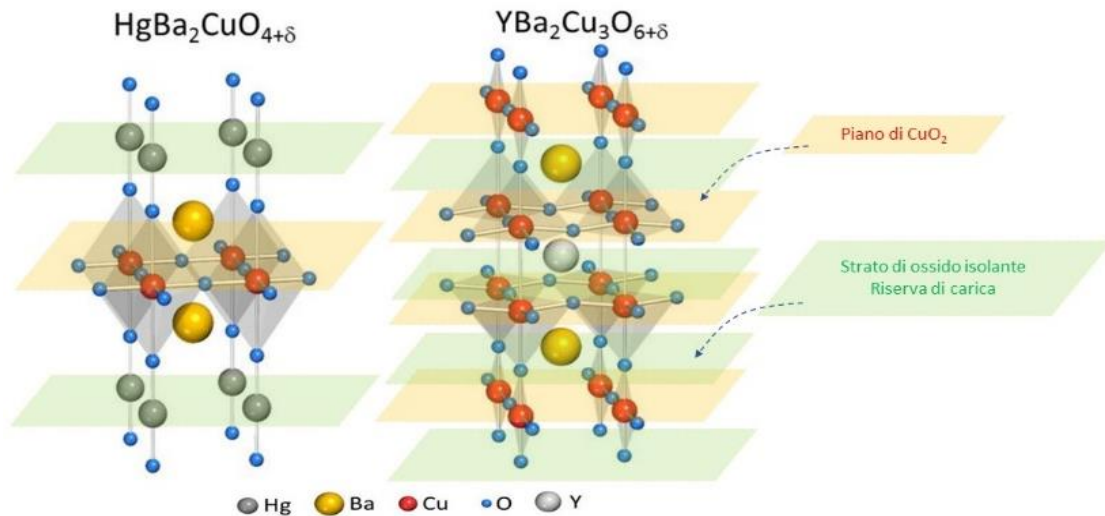


Figura 16 – Struttura cristallina di due tipologie di cuprati (By the Courtesy of [11])

In comune i cuprati ed i superconduttori a base di ferro hanno il fatto che sono materiali stratificati costituiti da una alternanza di strati di ossidi superconduttori (nei cuprati è l'ossido di rame  $\text{CuO}_2$ ) e strati isolanti che agiscono da alimentatori di carica: è il numero di portatori di carica aggiunti a determinare l'entità di  $T_C$ . Caratterizzati – questi - da un diagramma di fase simile, entrambi sono magnetici fintanto che mantengono proprietà isolanti.

Questa scoperta ha rappresentato dal punto di vista teorico la crisi ed il superamento del modello BCS il quale si caratterizza per la profonda interdipendenza tra la frequenza del reticolo cristallino, il numero di portatori di carica liberi e l'accoppiamento tra questi e il reticolo cristallino stesso. *Bednorz e Müller* avevano osservato, al contrario, che in tali cuprati a valori piuttosto alti della temperatura di transizione faceva riscontro un valore molto basso della loro densità di portatori di carica e questo fece loro concludere che alla base della superconduttività c'era un più espanso ed intenso accoppiamento tra il reticolo cristallino ed i portatori di carica: il polarone. Allora la superconduttività non era più da ricondurre ad una coppia di elettroni coerenti, bensì era l'effetto del *coupling* di due polaroni, costituiti dall'accoppiamento *portatore di carica-deformazione del reticolo cristallino*, i quali si correlano in un range di pochi nanometri (Figura 17).

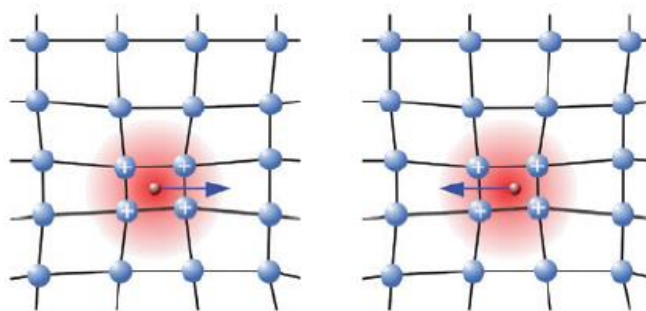


Figura 17 – Interazione tra polaroni (By the Courtesy of [12])

I cuprati sono stati per *Bednorz e Müller* il punto di arrivo di un percorso che iniziò con il composto  $\text{SrTiO}_3$ , passò per un altro tipo di perovskite nichelata, per arrivare ad essi e ad una teoria, quella del polarone, sulla quale il dibattito in ambito scientifico non è ancora sedimentato: lo sviluppo della superconduttività, quindi, è passato attraverso ed è ancora venato da un dinamismo di pensiero estremamente effervescente.



# Evolutions

L'aver scoperto con l' YBCO un superconduttore dotato di una temperatura di transizione di  $-163,15\text{ C}$  più alta di quella dell'azoto liquido ( $-196\text{ C}$ ) fece scrivere al *Time Magazine* l'11 maggio 1987 di un cambiamento epocale, dell' "inizio di una svolta che potrebbe cambiare il nostro mondo", di previsioni entusiastiche in quasi tutti i tipi di applicazioni tecniche, della implementazione di una moltitudine di idee già ampiamente preconizzate, dai magneti superconduttori ai cavi di alimentazione nelle trasmissioni, dai motori elettrici ai dispositivi di accumulo di energia, dai treni a levitazione magnetica alla sensoristica, e così via.

La scoperta di materiali come gli intermetallici  $NbSn_3$  e  $NbTi$  ha permesso la costruzione di magneti delle caratteristiche induttive richieste per l' *imaging* nella diagnostica medica in virtù della loro temperatura critica e della capacità di trasporto di corrente elettrica piuttosto elevate (Figura 18).



Figura 18 - Scanner per risonanza magnetica (By the Courtesy of [13])

Ma HTS significa sostanzialmente *diboruro di magnesio, pnictidi*, cuprati per il grande potenziale commerciale nello utilizzo su fili e cavi di alta qualità lunghi e flessibili per il trasporto di corrente elettrica, come quello riportato come esempio nella figura 19 costituito da tre anime per le tre fasi di alimentazione elettrica, che è stato integrato alcuni anni fa alla rete di Essen in Germania.



Figura 19 - Cavo di trasmissione di potenza HTS (By the Courtesy of [14])

Questa efficiente e compatta applicazione, dimostratasi capace di trasportare cinque volte più elettricità rispetto ai cavi convenzionali e quasi senza perdite, può costituire l'elemento centrale delle nuove reti di approvvigionamento energetico delle città; e queste reti alimenteranno o saranno alimentate da condensatori sincroni, generatori, e motori il cui rame delle bobine potrà essere sostituito con materiali HTS capaci di ridurre il peso ed il volume del 20%, come nel caso del motore per la propulsione navale sviluppato dalla *American Superconductor*. E nuovi dispositivi per lo stoccaggio dell'energia elettrica si rendono possibili, facendo scorrere corrente in bobine superconduttrici senza dissipazione e/o trasformando questa potenza elettrica in energia cinetica di volani rotanti a velocità comprese nel range  $20.000 \div 50.000 \frac{\text{giri}}{\text{min}}$  su cuscinetti magnetici a levitazione.



# Evolutions

E che la superconduttività non sia più il sogno futuribile di schiere di scienziate è dimostrato dai test condotti in Giappone sul treno a levitazione magnetica (SCMaglev) che nel 2015 ha già espresso una prestazione in velocità di  $603 \frac{km}{h}$  e per il quale è pianificato l'inizio del servizio commerciale per il 2027 nella tratta Tokyo-Nagoya di 286 km.

Altro ambito in cui la superconduttività è destinata a giocare una importante partita è quello dei film sottili per i dispositivi elettronici; nelle comunicazioni wireless, in particolare, su questa tecnologia saranno basati filtri di stazione-base della telefonia cellulare. La bassa resistività alle microonde ed il più basso livello di rumore permesso da coating superconduttori operati a 77 K permetterà la gestione di ampiezze di banda di segnale maggiori o la realizzazione di cavità risonanti ad alto Q per acceleratori di particelle.

Un'altra importante applicazione dell'elettronica, infine, è lo SQUID (*Superconducting QUantum Interference Device*) basato sull'effetto *Josephson* che consta del tunneling di coppie di Cooper attraverso una stretta barriera tra due superconduttori (giunzione *Josephson*) utilizzato in sensori ad alta prestazione nella rilevazione di minuscoli campi magnetici per la diagnosi e lo studio delle malattie cardiache e cerebrali.

Per ultimo estremo interesse riveste la struttura elettronica del grafene in virtù della scoperta della superconduttività di questo nuovo materiale quando è nella forma di multistrati drogati (ad esempio, con atomi di litio), ma le molto basse temperature di transizione lasciano intendere che questa tecnologia è agli albori.

Di sicuro, infine, la superconduttività giocherà un ruolo futuro nei viaggi all'interno del nostro sistema solare ed anche al di fuori dello stesso: magneti e correnti superconduttrici permetteranno, riducendo il peso ed il volume nei motori elettrici ed elettromagnetici dei propulsori spaziali, di sfruttare appieno le riserve di potenza elettrica di generatori nucleari con l'obiettivo di accorciare drasticamente i tempi di missione (Figura 20).

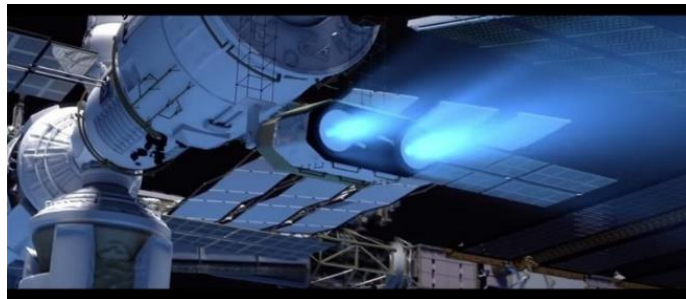


Figura 20 – L'accoppiamento generatore nucleare-Vasimir renderà sostenibile l'accesso dell'uomo nello spazio (By the Courtesy of [15]).

## Bibliografia

- [1] Superconductivity. V.L.Ginzburg, E.A.Andryushin, PN Lebedev Institute, Russia, WO World Scientific, 2004
- [2] Critical and Gaussian Conductivity Fluctuations in Granular  $\text{Ho}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  Superconductor  
Wesley Tiago Batista de Sousa  
(<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs10948-010-0774-0.pdf>)
- [3] <http://cesur.en.ankara.edu.tr/history-of-superconductors/>
- [4] L'autore, Ing. Francesco Sintoni



# Evolutions

- [5] <https://www.railacademy.it/news/treno-a-levitazione-magnetica/>
- [6] <https://leidenspecialcollectionsblog.nl/articles/the-great-false-prophet-mahomet>
- [7] X.Obradors\_Coated conductors for power applications  
([https://www.researchgate.net/figure/Enhancement-of-the-critical-current-density-J-c-B-measured-at-77-K-associated-with\\_fig1\\_260909813](https://www.researchgate.net/figure/Enhancement-of-the-critical-current-density-J-c-B-measured-at-77-K-associated-with_fig1_260909813))
- [8] <https://phys.org/news/2017-07-ultra-fast-vortices-superconductors.html>
- [9] <http://www.personal.psu.edu/qud2/Res/Pic/gallery1.html>
- [10] [https://en.wikipedia.org/wiki/Phonon#/media/File:Lattice\\_wave.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Phonon#/media/File:Lattice_wave.svg))
- [11] <https://phys.org/news/2014-12-universality-cuprate-superconductors.html>
- [12] <https://doi.org/10.1515/znb-2019-0103>
- [13] <https://www.carsontahoe.com/mri.html>
- [14] <https://www.nexans.de>
- [15] <https://www.tomshw.it/altro/motori-al-plasma-la-nasa-stacca-un-assegno-da-9-milioni-di-dollari>.