

## **IL FENOMENO DELLA SUPERCONDUTTIVITÀ**

Daniele Di Gioacchino

*LNF - INFN, Via E. Fermi 40, I-00044 Frascati, Italy*

### **Abstract**

In questa nota divulgativa sono presentate le proprietà fenomenologiche della fase superconduttrice quali la resistenza elettrica nulla, l'espulsione del campo magnetico o effetto 'Meissner', il concetto di campo magnetico critico e supercorrente critica, gli ordini di grandezza delle variabili fisiche coinvolte puntualizzando le tappe storiche della superconduttività. Si mostra il differente comportamento fra un superconduttore e un conduttore perfetto e sono introdotte le due classi di materiali superconduttori e le differenti strutture cristalline. Inoltre si accenna cosa è un quanto di flusso magnetico, le conseguenze dovute alla quantizzazione del campo magnetico in un superconduttore. Brevemente si presenta la speculazione che delinea i fondamenti microscopici del fenomeno superconduttivo: la teoria 'BCS' e il concetto della formazione delle coppie di 'Cooper'. Infine è accennata la descrizione della transizione di fase da uno stato normale a quello superconduttore come "rottura spontanea della simmetria", concetto elegante e potente usato in modo generale per la comprensione di molteplici fenomeni fisici.

## Come si presenta uno stato superconduttore

La Superconduttività è uno stato della materia con eccezionali proprietà elettriche e magnetiche. Evidenzia un comportamento della fisica quantistica nei solidi. E' uno dei rarissimi effetti quantistici macroscopici. Fu scoperto da Onnes nel 1911 (Premio Nobel nel 1913) quando osservò questo nuovo stato attraverso l'annullamento della resistenza elettrica del mercurio alla temperatura di  $-269.1^{\circ}\text{C}$  (scala gradi centigradi) o  $4.1^{\circ}\text{K}$  (scala gradi Kelvin).

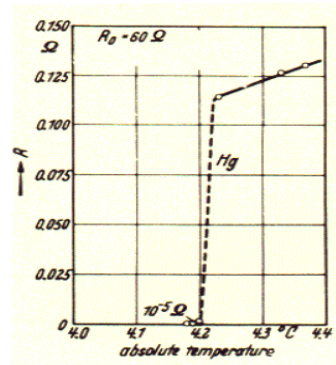


Fig.1 Misura storica della resistenza elettrica del mercurio in funzione della temperatura, effettuata da Onnes. E' mostrata la transizione dallo stato normale a quello superconduttore

La superconduttività è un fenomeno che accade a bassa temperatura. Quando una sostanza viene raffreddata sotto una temperatura denominata critica ( $T_c$ ) si evidenzia questo stato. L'elettricità fluisce nel materiale senza resistenza, in altre parole si può trasportare una "**supercorrente**" elettrica a qualsiasi distanza senza perdite. Se la supercorrente scorre in un filo chiuso su se stesso, fluirà per sempre. Esiste un valore massimo della supercorrente, chiamata corrente critica ( $I_c$ ), che limiterà il valore di supercorrente trasportabile. Sopra tale valore la materia torna nello stato di conducibilità elettrica normale.

La fase superconduttiva è caratterizzata da un secondo effetto **sempre** concomitante con il precedente, è quello dell' espulsione del campo magnetico dal suo interno (effetto Meissner, 1933).

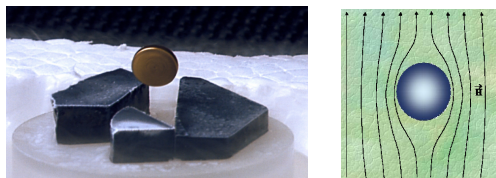


Fig.2 Levitazione magnetica di un magnetino (0.1 Tesla) su alcuni campioni di YBCO alla temperatura dell'azoto liquido (77K). La foto evidenzia l'espulsione del campo magnetico dal materiale superconduttore ceramico ad alta temperatura critica (effetto Meissner). Foto LNF-INFN (laboratorio LAMPS)

Esiste un valore critico del campo magnetico ( $B_c$ ) sopra il quale il materiale non riesce più ad espellere il campo magnetico e torna in uno stato normale.

Quindi anche il valore del campo magnetico prodotto da un magnete superconduttore avrà un valore massimo.

## Differenze fra stato superconduttore e conduttore perfetto

L'effetto Meissner è distinto dal diamagnetismo perfetto. Se in un materiale normale si abbassa la temperatura e transisce in un nuovo stato con la caratteristica di avere **solo** la resistenza elettrica di valore **nullo** (iperconducibilità), già questo fenomeno implica il diamagnetismo perfetto. Infatti se si cerca di magnetizzare l'iperconduttore con un campo magnetico, viene generata una corrente indotta che esclude esattamente il campo magnetico imposto (legge di Lenz->diamagnetismo perfetto). Ma se il materiale aveva già un campo magnetico costante prima del raffreddamento nello stato normale, quando passa la temperatura di transizione con una resistenza elettrica zero, il campo magnetico interno resta anche quando quello esterno viene rimosso. **Non viene espulso, l'iperconduttore se lo tiene!**

Un superconduttore si comporta in modo differente: consideriamo un materiale nello stato normale senza campo magnetico applicato, si abbassa la temperatura ed entra in uno stato superconduttore, se applichiamo un campo magnetico, il superconduttore lo esclude (simile al caso precedente); ma se applichiamo un campo magnetico nello stato normale e abbassiamo la temperatura, alla transizione il campo magnetico **verrà di nuovo espulso (Effetto Meissner)!** Le situazioni descritte sono mostrate in figura 3

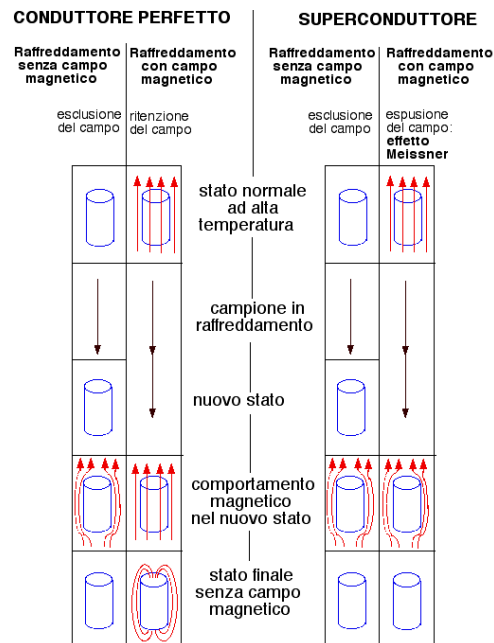


Fig.3 Effetto del raffreddamento senza e con campo magnetico per conduttore perfetto e per un superconduttore

## Strutture chimiche dei Superconduttori e scala di temperatura

Facciamo alcune considerazioni rispetto la scala di temperature in gradi centigradi (o Kelvin). Consideriamo alcuni valori di riferimento, dal valore più basso possibile  $-273.2^{\circ}\text{C}$  (0K), lo zero assoluto e risalendo al valore dell'elio liquido  $-269^{\circ}\text{C}$  (4.2K), poi quello dell'azoto liquido  $-196^{\circ}\text{C}$  (77.2K) e infine la temperatura ambiente  $20^{\circ}\text{C}$  (298.2K). L'esperienza attuale mostra la presenza, di tipi di superconduttori con strutture chimiche profondamente differenti, quelli di natura metallica che presentano una temperatura critica bassa con valori da frazioni di grado Kelvin fino ai 23K del composto di Niobio-Germanio ( $\text{Nb}_3\text{Ge}$ ) e altri di natura ceramica con una struttura chimica complessa a strati, scoperti da Bednord e Muller (Premio Nobel nel 1986), dove la temperatura critica va da 30K e sale fino a 133K del composto  $\text{Hg}_{0.8}\text{Pb}_{0.2}\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ . Per l'uso dei primi c'è bisogno dell'elio allo stato liquido mentre per i secondi è sufficiente l'azoto liquido molto meno costoso.

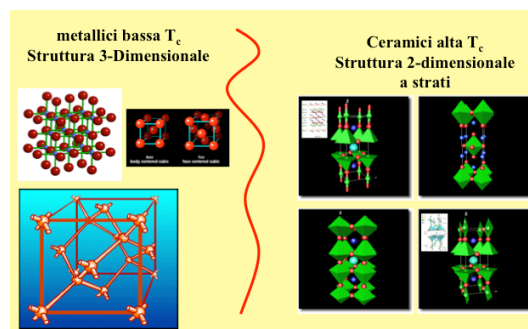


Fig.4 Struttura chimica dei superconduttori metallici a bassa temperatura critica e dei superconduttori ceramici ad alta temperatura critica

## Superconduttori di tipo I e II

La temperatura e il campo magnetico hanno un effetto sulla fase superconduttiva, sono due variabili termodinamiche complementari che regolano lo stato superconduttore. La temperatura critica e il campo magnetico critico dipendono dal tipo di materiale.

Ora approfondiamo l'effetto del campo magnetico su un superconduttore. Sperimentalmente si evincono due comportamenti differenti.

Nei superconduttori denominati di tipo *I* (Fig.5A) sarà possibile con il campo magnetico e la temperatura effettuare una transizione netta dallo stato superconduttore a quello normale. Nello stato superconduttore sulla superficie del materiale scorrerà una supercorrente con un valore tale da produrre un contro campo magnetico identico in valore e opposto in direzione rispetto a quello applicato in modo tale che il suo interno sarà interdetto all'accesso del campo magnetico applicato (effetto Meissner). Al valore critico di campo magnetico ( $B_c$ ) il materiale transirà nello stato normale e conseguentemente il campo magnetico accederà in tutto il materiale, questo valore dipenderà dalla

temperatura e dal tipo di materiale. Avrà il valore massimo a  $T = 0 \text{ K}$  e un valore nullo alla temperatura critica,  $T_c$ . Materiali che presentano questo tipo di superconduttività sono per esempio mercurio, alluminio, piombo, gallio, stagno e .....tanti altri, sono della classe dei superconduttori metallici. I valori di campo magnetico critico ( $B_c$ ) sono bassi, dell'ordine delle decine di millitesla.

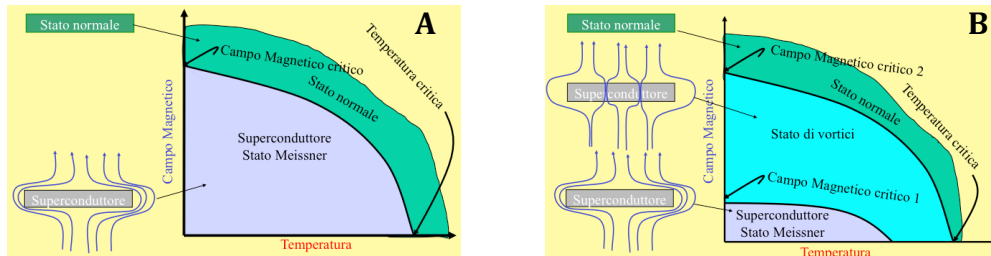


Fig.5 Diagramma di fase Campo magnetico- Temperatura di un superconduttore di tipo I (A) e di tipo II (B)

Nei superconduttori di tipo **II** (fig.5B) l'applicazione di un campo magnetico con ampiezze maggiori di un dato valore critico ( $B_{c1}$ ) mostrerà un'ulteriore configurazione, nel materiale entrerà un "quanto" di flusso magnetico (o **flussoni**) (teorizzato da Abrikosov nel 1952. Premio Nobel nel 2003) e inizierà nel materiale uno stato denominato "misto" dove coesisteranno sia lo stato superconduttore che quello normale (Fig.5). In questo caso, lo stato intermedio sarà formato da un reticolo di quanti di flusso magnetici (Fig.6A) che aumenteranno in numero con l'aumento del valore del campo magnetico applicato. Il cuore di tali flussoni è nello stato normale, intorno ad esso fluirà, come in un vortice una supercorrente che formerà un contro campo magnetico il cui risultato localizzerà il campo magnetico penetrato nel materiale solo nel cuore del quanto di flusso (Fig.6B,C).

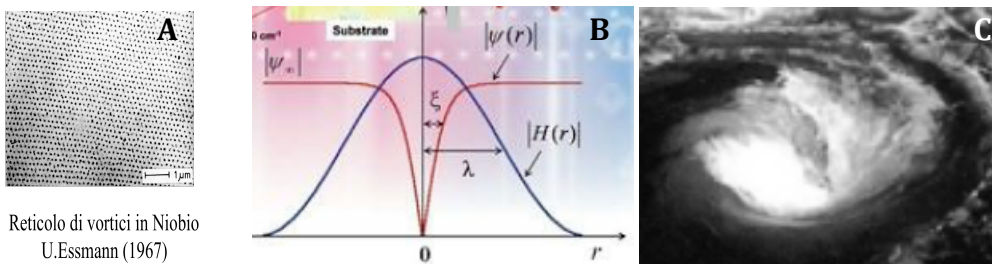


Fig.6 A) Reticolo di quanti di flusso nel Niobio, B) schematizzazione del quanto di flusso, caratterizzato da un cuore normale dove è presente un campo magnetico di  $B=10^{-15} \text{ Weber/m}^2$ . Sono mostrate le due dimensioni caratteristiche di uno stato superconduttore,  $\xi$  e  $\lambda$ , rispettivamente lunghezza di coerenza superconduttiva e lunghezza di penetrazione magnetica, C) foto di un gorgo che ben rappresenta la zona esterna di un flussoni dove scorre una supercorrente come in un vortice.

Per un valore critico ( $B_{c2}$ ), il numero dei flussoni sarà tale che ogni cuore normale coprirà completamente l'intero volume del materiale ed esso transirà nello stato normale. Superconduttori metallici puri, tipo Niobio, Vanadio e tutti i superconduttori composti metallici e ceramici sono superconduttori di tipo **II**. Questi materiali presentano valori  $B_{c1}$  piccoli dell'ordine di frazioni di millitesla e valori di  $B_{c2}$  anche molto alti per esempio il  $Nb_3Ge$  ha il valore di 37 Tesla mentre nel superconduttore ceramico  $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+x}$  è altissimo vale 190 Tesla. E' evidente che questi superconduttori hanno applicazioni tecnologiche maggiormente rilevanti rispetto a quelli di tipo **I**.

Si possono individuare sperimentalmente due dimensioni che definiscono il tipo di superconduttività, la prima chiamata "lunghezza di coerenza superconduttiva",  $\xi$ , è la distanza che va dal centro del cuore normale del flussone e termina alla distanza media dove il materiale diventa superconduttivo, l'altra è la distanza media che dal centro del cuore normale del flussone arriva alla fine della penetrazione del campo magnetico nel superconduttore chiamata "lunghezza di penetrazione magnetica di London",  $\lambda$ . Il valore del rapporto fra queste due lunghezze,  $\kappa = \lambda/\xi$ , determinerà se un superconduttore è di tipo **I** ( $\kappa < 1/\sqrt{2}$ ) o tipo **II** ( $\kappa > 1/\sqrt{2}$ ). I valori di queste due lunghezze vanno da migliaia di nanometri a qualche nanometro.

Tutti i materiali che presentano la superconduttività hanno una resistività elettrica a temperatura ambiente molto più alta, ad esempio, dell'oro o dell'argento. Questi ultimi ottimi conduttori non presenteranno **MAI** la superconduttività. In generale nei superconduttori, peggiore è la conducibilità elettrica a temperatura ambiente maggiore è la temperatura critica.

## Spiegazione del fenomeno superconduttivo

La spiegazione è una conseguenza del comportamento quantistico che è alla base del fenomeno della superconduttività e fu interpretato dai fisici Bardeen, Cooper, Schrieffer nel 1957, la teoria BCS (Premio Nobel nel 1973). Per una comprensione si devono introdurre alcune nozioni sul comportamento quantistico elettrico e vibrazionale di un solido.

Un solido è composto da un numero enorme di atomi fissati in un reticolo cristallino tridimensionale, gli elettroni più esterni degli atomi vengono messi in comune fra gli atomi e partecipano al legame e formano il solido (come indicazione dell'ordine di grandezza dei numeri 'in gioco' si può considerare il numero di atomi contenuti in una mole di una sostanza (pochi grammi): il numero di Avogadro  $N=10^{23}$ ). I materiali conduttori di elettricità avranno un altrettanto alto numero di elettroni di conduzione che possono muoversi liberamente. Dato che abbiamo a che fare con un grande numero di oggetti identici, il loro comportamento sarà descritto da delle statistiche.

Gli atomi fissati in un reticolo possono inoltre vibrare sia con passi lunghi (onde acustiche, come un tamburo) sia con passi corti con una energia più alta (vibrazioni ottiche). Quantisticamente queste vibrazioni sono discretizzate e sono chiamate 'fononi'. Il numero dei fononi sono proporzionali alla temperatura.

Gli elettroni, d'altro canto, possiedono una importante proprietà, hanno un moto di rotazione interno puramente quantistico assimilabile alla rotazione di una trottola chiamato momento angolare di 'spin' che ha un valore semi-intero,

per questa particella vale il principio di esclusione di Pauli: in un singolo stato elettronico possono essere presenti solo 2 elettroni con spin opposto. Quindi gli elettroni s'impilano via via su livelli di maggiore energia che corrispondono anche a livelli più lontani dal nucleo. Il comportamento di tali particelle identiche viene descritto da una statistica chiamata di "Dirac-Fermi" che poi è un caso particolare del comportamento di un gruppo di particelle elementari più generale con spin semi-intero chiamate Fermioni.

In un conduttore gli elettroni che occupano i livelli di energia poco sotto quello più alto, chiamato livello di Fermi, hanno la possibilità di cambiare la loro energia e impulso di moto saltando su livelli energetici vuoti disponibili e posso muoversi nel materiale con velocità istantanee molto elevate, circa  $10^8$ cm/sec.

Gli elettroni sono dal punto di vista quantistico un onda che si propaga attraverso il reticolo cristallino, se il reticolo fosse perfetto questo accadrebbe senza perdite in energia. Ma le vibrazioni del reticolo (fononi) cambiano la posizione di riposo degli atomi e gli elettroni nel loro moto se ne accorgono e interagiscono con loro perdendo energia. C'è una interazione elettrone-fonone. Questa è la fonte che dà il maggiore contributo alla resistenza elettrica, un altro contributo, è dovuto alla presenza nel reticolo di difetti come ad esempio le mancanze di atomi o inquinanti come atomi estranei. Abbassando la temperatura diminuisce il numero dei fononi e come conseguenza decade anche il valore della resistenza elettrica fino ad un valore costante che dipenderà solo dai difetti presenti.

Ora menziono perchè risulterà importante per la comprensione del fenomeno della superconduttività l'esistenza di un'altra classe di particelle elementari che statisticamente si comporta in modo differente, sono particelle che hanno un momento angolare di spin con valore intero, per queste particelle NON vale il principio di esclusione di Pauli. Sono descritte dalla statistica di Bose-Einstein che prevede la possibilità per tutte le particelle (chiamate Bosoni) di condensare in un unico stato energetico chiamato "**stato condensato**" di più bassa energia e maggiormente ordinato.

Dopo questa introduzione presentiamo una spiegazione intuitiva del fenomeno che è alla base della teoria BCS per spiegare la superconduttività.

Il concetto è il seguente: in un superconduttore gli elettroni condenseranno in uno stato quantistico di energia minima e si muoveranno collettivamente e coerentemente senza incontrare resistenza in coppie (coppie di Cooper). Come può accadere tale meccanismo? Prima di tutto è essenziale che con la diminuzione della temperatura si smorzino i fononi (vibrazioni) casuali eccitati termicamente. Gli elettroni (carica elettrica negativa), con energia prossimi a quella di Fermi, possono essere eccitati e muoversi nel solido all'interno del reticolo periodico di ioni di carica elettrica positiva. Gli ioni vengono attratti al passaggio dell'elettrone, tale distorsione è regolata dalle vibrazioni del reticolo di ioni, cioè dai fononi, in altre parole il moto dell'elettrone induce fononi. Ora consideriamo un altro elettrone che si muove vicino al primo in verso opposto e con spin contrario, specificatamente all'interno di un volume caratteristico, e vede il primo elettrone coperto (vestito) da cariche positive ioniche che eccedono quella negativa dell'elettrone stesso. Questa azione produce una forza risultante tra di essi attrattiva e i due elettroni formano una coppia (Coppia di Cooper) per mezzo dell'interazione con le vibrazioni reticolari del cristallo.

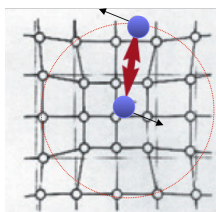


Fig.7 Reticolo di ioni positivi nel solido distorto localmente dal passaggio di un elettrone che li attira innescando una vibrazione. Un secondo elettrone entro un dato volume, “vede” il primo elettrone “vestito” da cariche positive e si lega formando una Coppia di Cooper. La distanza fra i due elettroni è la dimensione caratteristica di coerenza già introdotta,  $\xi$ .

La coppia ha spin intero, è un bosone, e può andare in uno stato a energia più bassa. Questo avviene entro un volume chiamato di coerenza. Dato il grande numero degli elettroni presenti, all'interno di quel volume gli elettroni si accoppiano tutti e “condensano” in questo nuovo stato maggiormente “ordinato”, inoltre gli elettroni sono particelle identiche indistinguibili e quindi si può estendere questo processo agli altri elettroni presenti nel materiale. Infatti quelli sul bordo del volume caratteristico sono al centro di altri volumi di coerenza. C'è l'accoppiamento con altri elettroni che stanno fuori rispetto alla prima regione. Tale processo è evidentemente ripetitivo e permette al materiale di essere interamente in uno stato superconduttore quantistico coerente e rigido: **tutte le coppie formate si devono comportare allo stesso modo.**

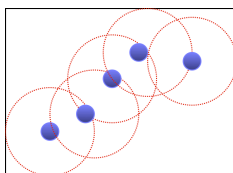


Fig.8 Un modello per visualizzare il processo che rende un superconduttore nel suo intero coerente e condensato in un unico stato grazie alla indistinguibilità e al numero enorme degli elettroni presenti nel materiale.

C'è una modifica radicale del comportamento di un conduttore. I portatori di carica elettrica (coppie di Cooper) sono bosoni condensati in uno stato. Contrariamente a quanto succede per gli elettroni, fermioni, liberi in un metallo normale, le coppie di Cooper si muoveranno se sottoposti a campi elettrici e/o magnetici senza attrito e coerentemente. Il materiale presenterà una resistenza elettrica nulla.

E' ora evidente che la fase superconduttiva può avvenire solo se il moto elettronico riesce a indurre i fononi “giusti” che permettano di vestirlo con le cariche positive ioniche e producano un valore eccedente di carica positiva rispetto a quella negativa degli altri elettroni presenti entro un volume caratteristico (volume di coerenza). Il materiale per essere un superconduttore deve possedere tali fononi. Materiali che presentano alta resistenza elettrica a temperatura ambiente mostrano uno spettro più ampio di fononi con diverse energie e questo è essenziale per indurre la formazione di coppie di Cooper con i



fononi “*giusti*” che realizzeranno in opportune condizioni la superconduttività. Materiali con alta conducibilità elettrica come oro o argento, sono un caso particolare di materiali che **NON** possiedono i fononi “giusti” per accoppiare gli elettroni sul livello di Fermi e tali materiali **NON** presenteranno mai lo stato superconduttivo.

## La corrente critica superconduttiva e l'ancoraggio dei flussoni

La corrente critica massima dovrebbe essere quella che fornisce un'energia tale per “rompere le coppie di Cooper” in elettroni singoli. Questo accade per i superconduttori di tipo **I** ma purtroppo non avviene per i superconduttori di tipo **II** che possiedono un campo critico magnetico molto alto e quindi ci si aspetta un altrettanto alto valore di corrente critica.

Questo è dovuto al seguente effetto: quando si applica una supercorrente e i quanti di flusso presenti nel materiale subiscono una forza di Lorentz.

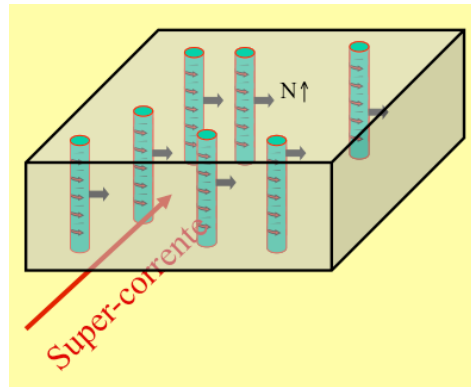


Fig.9 Stato misto in un superconduttore ideale in presenza di un campo magnetico e di una supercorrente: i quanti di flusso sono sottoposti a una forza di Lorentz e si muovono nel materiale.

I quanti di flusso cominciano a muoversi nel superconduttore, ma nel moto i cuori dei flussoni che sono in uno stato normale resistivo producono calore per effetto Joule. Il calore fa aumentare velocemente la temperatura e il materiale transisce nello stato normale.

E' la stessa supercorrente in presenza di campo magnetico che produce la transizione da stato superconduttore a stato normale. In queste condizioni un superconduttore **NON** può sostenere la supercorrente.

La situazione non è inevitabile, anzi ha degli aspetti tecnologici importanti. In generale un materiale reale ha la presenza di imperfezioni, precipitati, difetti, atomi inquinanti, questi rispetto allo stato superconduttore circostante producono zone che sono elettricamente o con una '**superconduttività ridotta**' o in uno '**stato normale**', quindi sono energeticamente favorevoli per posizionare su di essi i cuori normali dei flussoni. Possono essere visti in energia come delle buche di potenziale e formano degli ancoraggi e impediscono il moto dei flussoni.

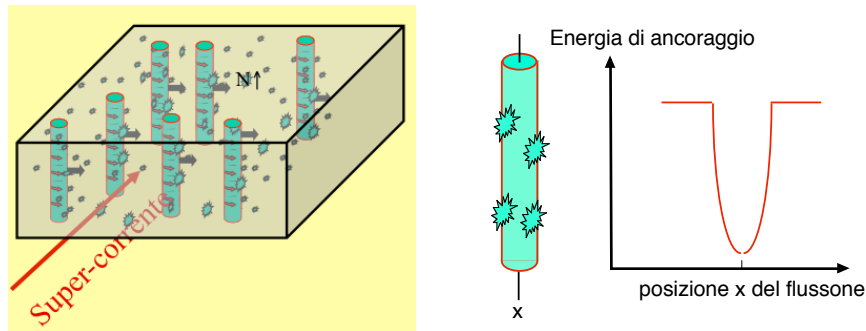


Fig.10 Stato misto in un superconduttore reale in presenza di un campo magnetico e di una supercorrente: i quanti di flusso sono ancorati presso le imperfezioni del materiale. Rispetto al cuore normale del quanto di flusso i difetti sono delle buche di potenziale in energia.

Il valore della corrente critica massima sarà connessa con il più piccolo valore della forza di ancoraggio presente nel superconduttore.

Dal punto di vista tecnologico si può controllare questo stato e così si può aumentare il valore della supercorrente critica introducendo opportuni atomi inquinanti e creando difetti. Quindi è possibile con processi meccanici e chimici aumentare il valore della corrente critica superconduttiva. Valori della densità di corrente critica raggiunti nei superconduttori sia a bassa che alta  $T_c$  sono molto alti, dell'ordine  $10^8$  (Ampere/cm<sup>2</sup>).

## Una spiegazione elegante della superconduttività<sup>1</sup>

Esiste anche una spiegazione più elegante della superconduttività basata su un concetto generale connesso alla simmetria di un sistema. Questa analisi fu intuiva e sviluppata da Landau nel 1947 (Premio Nobel nel 1962). Riguarda il fenomeno chiamato "*rottura spontanea della simmetria*", Landau propose una descrizione fenomenologica indipendente dal meccanismo dettagliato che lo causa. E' alla base delle "*transizioni di fase termodinamiche reversibili*", spiega molti fenomeni, in particolare il ferromagnetismo e la superconduttività ed è stato come esempio il paradigma per predire l'esistenza del bosone di "Higgs".

Affronteremo l'argomento da un punto di vista generale, con particolare attenzione all'immagine fisica. La superconduttività come il magnetismo appare in una certa fase termodinamica e scompare in un'altra fase attraverso una transizione. Parliamo prima del magnetismo che presenta con maggiore facilità il concetto. Un ferromagnete perde la sua magnetizzazione sopra una certa temperatura critica, ma la riacquista quando viene raffreddato. Il processo è una transizione di fase termodinamica reversibile presentabile con un diagramma di fase (simile a quella mostrata per un superconduttore in figura 5A).

La sottostante causa di questo fenomeno è connessa con lo 'spin' elettronico e il corrispondente momento magnetico. Interazioni magnetiche favoriscono l'allineamento degli spin, mentre fluttuazioni termiche tendono a

<sup>1</sup> La trattazione presentata in questa sezione segue fedelmente quella nel testo (in lingua inglese) di Kerson Huang, *Fundamental force of Nature-The story of Gauge Fields*, World Scientific (2007), a cui si rimanda per maggiori dettagli.

rendere casuali le loro direzioni. Queste due tendenze opposte competono per il dominio e il risultato dipende dalla temperatura. Al di sopra della temperatura critica, le fluttuazioni termiche vincono e non c'è magnetizzazione netta. Sotto tale temperatura, l'interazione di spin vince e il sistema diventa un magnete. In un volume all'interno di un sistema macroscopico, lontano dai confini, il sistema **NON** ha una direzione preferenziale nello spazio, il sistema è **"invariante per rotazioni"**. Quando si magnetizza, tuttavia, il momento magnetico totale **DEVE** puntare lungo una direzione nello spazio. Diciamo che il sistema **"rompe l'invarianza rotazionale SPONTANEAMENTE"**.

Il magnete si raffredda da una temperatura elevata e la distribuzione degli spin cambia come illustrato in fig. 11. Inizialmente gli spin erano orientati **'a caso'** nello spazio a causa dell'energia termica. Quando la temperatura diminuisce, in una regione qualsiasi, in modo casuale, cominciano ad allinearsi alcuni spin e iniziano a formare un gruppo che sopravvive per tempi molto brevi, in media la magnetizzazione totale è vicino a zero. Quando la temperatura scende ancora sotto un certo valore critico ( $T_c$ ) avviene un accorpamento con un effetto a valanga e si forma un unico gruppo con spin orientati. La direzione finale della magnetizzazione viene scelta casualmente, essendo casuale la direzione di magnetizzazione scelta dal gruppo dove è iniziata la valanga. La valanga è più veloce in un sistema più grande e nel limite di un sistema infinito accade improvvisamente. Il rumore termico è sempre presente e le direzioni dei singoli spin fluttuano.

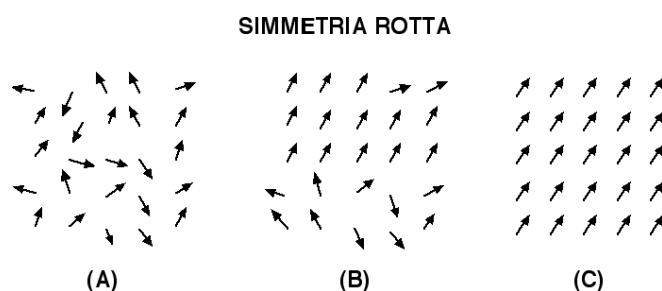


Fig.11 Sviluppo della magnetizzazione spontanea con la diminuzione della temperatura. (A) alta temperatura, gli spin hanno un'orientazione casuale. (B) temperatura in abbassamento, gli spin si allineano per formare raggruppamenti locali, ma il valore totale medio dello spin è ancora zero. (C) temperatura critica: si verifica una valanga verso un unico grande "gruppo" di spin allineati con un valore totale magnetico diverso da zero.

Ad alte temperature i singoli spin oscillano in maniera indipendente e il sistema campiona in breve tempo tutte le possibili direzioni. Quando un gruppo di spin con stessa orientazione inizia a formarsi, il sistema richiede più tempo per campionare gli stati corrispondenti alle rotazioni dell'intero gruppo. Infatti ciò richiede il movimento sincronizzato di un gran numero di spin e raramente accade per caso. Più grande è il gruppo, più raro diventa il moto per caso e la vita media di un gruppo aumenta esponenzialmente con il numero degli spin. Per un magnete con l'ordine del numero di Avogadro di spin ( $10^{23}$ ) cioè una mole di pochi grammi, questa vita è di gran lunga superiore alla età dell'universo, e quindi il sistema mostra la simmetria rotazionale **"ROTTA"**.

Landau insieme a Ginzburg (Premio Nobel nel 2003) svilupparono una teoria fenomenologica quantistica per spiegare la superconduttività (1940) e introdussero l'idea generale di "parametro ordine". Landau osservò che, il sistema dove è presente il magnetismo e/o la superconduttività diventa più "*ordinato*" rispetto a quello normale mentre si raffredda attraverso la temperatura di transizione. Quindi propone di definire una funzione chiamata "*ordinatezza*" del sistema attraverso un campo  $\Phi$  chiamato '*parametro ordine*', modellato considerando questa funzione proporzionale alla densità di magnetizzazione di un sistema magnetico, l'*ordinatezza*' è **ZERO** sopra la temperatura critica, e **NON ZERO** sotto.

L'energia potenziale del sistema dipende dalla temperatura e avrà in funzione del '*parametro d'ordine*' andamenti simili a quelli illustrati in figura 12

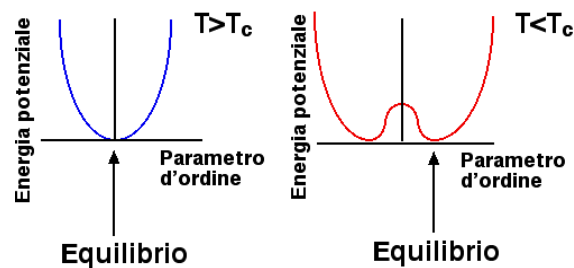


Fig.12. In equilibrio, il parametro d'ordine sta sul minimo di energia potenziale, la cui forma dipende dalla temperatura. Come la temperatura diminuisce passando attraverso un valore critico,  $T_c$ , appaiono due minimi equivalenti, e il parametro d'ordine deve scegliere uno di loro, così spontaneamente si rompe la simmetria

Ad alte temperature avrà una forma parabolica con un unico minimo in cui  $\Phi=0$ , (fig.12A), evidentemente questo andamento è "*simmetrico*" rispetto al parametro d'ordine. Quando la temperatura scende sotto il valore critico,  $T_c$ , l'energia potenziale sviluppa due minimi equivalenti, (fig.12B). Ora lo stato magnetico descritto da  $\Phi$  deve scegliere in modo casuale uno dei due minimi e diventa differente da zero, acquista un valore. In tal modo, si '*rompe spontaneamente la simmetria*'.

Il valore di equilibrio del "parametro d'ordine",  $\Phi$ , riproduce il comportamento della magnetizzazione.  $\Phi$  varia continuamente con la temperatura, ma la sua pendenza salta alla temperatura critica al valore zero (fig.13).

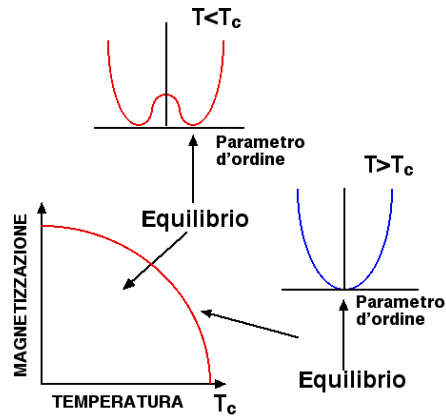


Fig.13 Rottura della simmetria in un sistema coerente: diagramma di fase e parametro d'ordine

Ora consideriamo un aspetto importante per lo stato superconduttivo. Un sistema quantistico, è descritto da una funzione d'onda, il cui "**quadrato**" è la probabilità di quello stato. Quindi, la funzione d'onda che descriverà lo stato magnetico o superconduttore sarà proporzionale al parametro d'ordine, e sarà un numero complesso. Un qualsiasi angolo di fase darà sempre lo stesso valore del quadrato  $\Phi$ , cioè la probabilità dello stato sarà invariante rispetto all'angolo  $\Theta$ :

$$\Phi = Re^{i\Theta}$$

L'energia potenziale avrà una forma tipo "**fondo di una bottiglia**" rispetto all'angolo di fase  $\Theta$ , (fig.14) e ne sarà indipendente, cioè sarà simmetrico rispetto all'angolo  $\Theta$ .

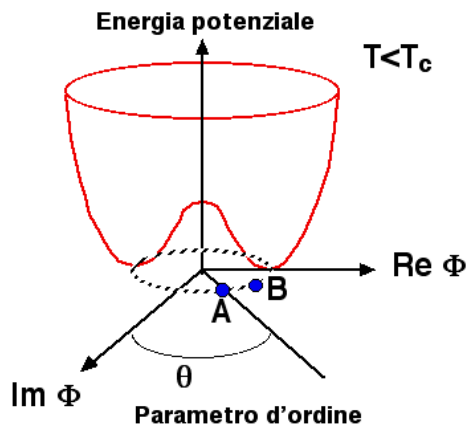


Figura 14. L'energia potenziale con una rottura della simmetria per un sistema che possiede un parametro d'ordine complesso. Il potenziale è una figura di rotazione, a forma di fondo di una bottiglia, tracciata sul piano complesso del parametro d'ordine. Lo stato a minore energia potenziale sarà un qualunque punto del cerchio tratteggiato lungo il cerchio sul fondo più basso della bottiglia, per esempio possono essere il punto A o B. Esiste un modo chiamato "di Goldstone" che è uno stato eccitato nel quale il parametro d'ordine non è uniforme nello spazio, ma corre intorno al cerchio tratteggiato come uno si muove nello spazio

Lo stato di equilibrio del sistema giacerà rispetto al potenziale sul cerchio tratteggiato indicato in figura. Ogni punto sul cerchio è un candidato per lo stato

di equilibrio, ma solo uno può essere realizzato, diciamo il punto A quando il sistema transisce. La scelta di questo valore "**rompe spontaneamente l'invarianza**" perché viene fissato arbitrariamente un particolare angolo di fase  $\Theta$ . Nello stato di equilibrio, il parametro d'ordine avrà quindi il valore A in tutti i punti dello spazio ma il sistema per esempio, poteva scegliere il punto B con un altro angolo di fase.

In generale in un sistema possono esistere anche stati eccitati con più alta energia, dove l'angolo di fase si muove da A a B quando si cambia posizione nello spazio. Per esempio una variazione lungo l'asse x fa corrispondere una variazione lungo il cerchio  $\Theta$  e questo corrisponde a una eccitazione (l'effetto fu scoperto da Goldstone). La forma dell'energia potenziale è invariata, ma l'energia totale è aumentata a causa della variazione dell'angolo di fase  $\Theta$ . Goldstone dimostrò che quando una simmetria è rotta spontaneamente, apparirà uno stato eccitato.

Questa eccitazione venne chiamata "**modo di Goldstone**", la cui nascita è espressione della rottura spontanea della simmetria.

Se consideriamo un magnete, la simmetria rotta è la "**rotazione**" e il "**modo di Goldstone**" saranno "**onde di spin**"; in un solido la simmetria rotta è la "**traslazione**" e il "**modo di Goldstone**" saranno i "**fononi (vibrazioni)**", questo accadrà anche per l'elio liquido superfluido.

Cosa succede per la superconduttività?

Nasce un parametro d'ordine con un valore definito, "**ma**" l'eccitazione cioè il "**modo di Goldstone**" non è presente!

Che accade?

Il superconduttore ed elio liquido superfluido sono entrambi descritti da un parametro ordine complesso,  $\Phi$ , come discusso, esso corrisponde alla funzione d'onda di un sistema condensato di Bose-Einstein. La differenza è che per il superconduttore il parametro d'ordine trasporta "**carica elettrica**" ed è "**accoppiato al campo elettromagnetico**". Si può dimostrare che la variazione dell'angolo di fase  $\Theta$  con la posizione è una trasformazione che non avrà alcun effetto sul sistema, non possiede questo stato eccitato, cioè "**il modo di Goldstone**" NON è presente. Ciò significa che il campo elettromagnetico in uno stato superconduttore deve obbedire a una legge tale che il "**fotone acquisisce un massa  $\Phi$  nel mezzo superconduttore**". Sperimentalmente questo è evidenziato dall'effetto Meissner, cioè un campo magnetico non può esistere all'interno del superconduttore, ma può solo penetrare ad una profondità finita. "**La profondità di penetrazione magnetica  $\lambda$ , corrisponde la massa inversa del fotone**". In altre parole quando questo tipo di "**invarianza è spontaneamente rotta**", il fotone si "**mangia**" il bosone di Goldstone e "**diventa grasso**", cioè acquisisce massa. Fu Anderson, e dopo Nambu, a spiegare l'effetto Meissner in termini di "**rottura spontanea della simmetria**".

Questa è la ragione profonda perché uno stato superconduttore è differente da un conduttore perfetto.

## Per saperne di più

Stephen Blundell, *Superconduttività*, Ed. Codice 2012 (divulgativo)

R.P. Feynman, *La Fisica di Feynman-Meccanica Quantistica*, Vol.3, p.A21  
Zanichelli 2001 (livello più approfondito)