

## Superconduzione: la coppia di Cooper

Annibale D'Ercole

IL fenomeno della superconduzione è stato scoperto nel 1911 dal fisico danese Heike Kammerlingh Onnes (1853-1926), che per questo vinse il Premio Nobel nel 1913. Onnes riuscì a liquefare l'elio che, alla pressione di un'atmosfera, bolle ad una temperatura di 4,2 K (ricordiamo che i gradi kelvin misurano la temperatura assoluta di un corpo; la minima temperatura è 0 K, e vale 273,15 K in corrispondenza del ghiaccio fondente, ossia 0 °C: dunque l'elio liquido bolle a -268,95 °C). Questo risultato permise a Onnes di studiare le proprietà elettriche dei metalli a temperature vicine allo zero assoluto. Egli scoprì così che a circa 4 K la resistenza del mercurio (il cui punto di fusione è 234,32 K) si annulla bruscamente invece di ridursi progressivamente al diminuire della temperatura, come si aspettava (si veda più sotto). Onnes chiamò questo fenomeno "superconduzione" perché, a causa dell'assenza di resistenza, la corrente è in grado di circolare per sempre senza la necessità di applicare una differenza di potenziale che la sostenga. In uno dei suoi esperimenti il fisico danese fece passare una corrente in un filo chiuso raffreddato a 4 K; un anno dopo la corrente ancora fluiva nel filo senza perdite misurabili. Onnes scoprì che molti altri metalli esibiscono la superconduzione una volta raffreddati al di sotto di una certa temperatura critica che varia da metallo a metallo, ma che vale in ogni caso pochissimi gradi kelvin.

Per molti anni il meccanismo della superconduzione è rimasto alquanto oscuro. Nel 1957, tuttavia, è stata formulata la teoria BCS, dal nome di John Bardeen, Leon Cooper e John Schrieffer che per questo

\* Questa rubrica si propone di presentare in modo sintetico e, per quanto possibile, autoconsistente argomenti che stanno alla base della conoscenza astronomica, spesso trascurati nella letteratura divulgativa, in quanto ritenuti di conoscenza generale oppure troppo difficili o troppo noiosi da presentare ad un pubblico non specialistico. Questi "fondamenti di astronomia", volutamente trattati in uno spazio limitato, possono essere letti a due livelli; eventuali approfondimenti per i lettori che desiderino ampliare la conoscenza dell'argomento vengono esposti in carattere corsivo e incorniciati. Si suggerisce questa rubrica, quindi, a studenti dei vari tipi e livelli di scuole. Le *Spigolature astronomiche* si possono trovare anche in rete, nel sito Web del «Giornale di Astronomia», [www.bo.astro.it/sait/giornale.html](http://www.bo.astro.it/sait/giornale.html).

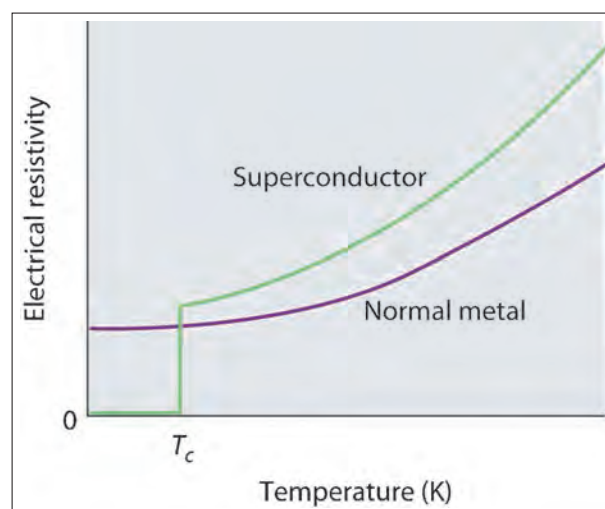


FIG. 1. Andamento della resistenza elettrica in conduttori e in superconduttori. Si noti come per questi ultimi la resistenza si annulla di colpo al di sotto di una certa temperatura critica.

vinsero il Premio Nobel nel 1972.<sup>1</sup> Questa teoria è oggi generalmente accettata, anche se, come vedremo, presenta dei limiti. Essa riposa su concetti di fisica quantistica troppo complessi per poter essere esposti in questa nota. Ci limiteremo pertanto a darne una descrizione classica che, benché approssimata e assai semplificata, è comunque sufficiente a metterne in luce gli aspetti salienti.

Prima di procedere, è necessario richiamare alcuni concetti basilari sulla struttura dell'atomo. Com'è noto, esso può essere rappresentato classicamente come un sistema solare in miniatura con gli elettroni con carica elettrica negativa che ruotano attorno ad un nucleo pesante composto da protoni positivi e neutroni privi di carica. Gli elettroni non possono disporsi lungo orbite arbitrarie, ma devono seguire regole precise. Sull'orbita più interna possono viaggiare al massimo due elettroni. La seconda e la terza orbita (progressivamente più esterne) possono ospitare al massimo otto elettroni cia-

<sup>1</sup> John Bardeen è l'unico al mondo ad aver vinto due premi Nobel per la Fisica. Il primo lo ha ottenuto nel 1956 assieme a William Shockley e Walter Brattain per l'invenzione del *transistor*.

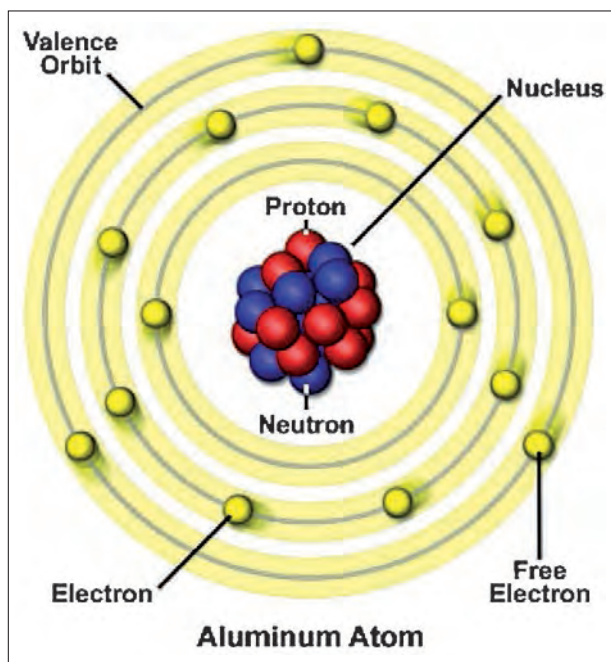


Fig. 2. Rappresentazione schematica dell'atomo di alluminio.

scuna. Consideriamo, ad esempio, l'atomo di alluminio: i suoi 13 elettroni sono disposti due nella prima orbita, otto nella seconda, e i rimanenti tre nella terza, la più esterna; questi ultimi vengono detti elettroni di *valenza*. Nei materiali isolanti questi elettroni di valenza rimangono ancorati ai rispettivi atomi di appartenenza. Al contrario, nei materiali conduttori, come l'alluminio, le orbite più esterne degli atomi che li compongono si "toccano" le une con le altre; di conseguenza gli elettroni di valenza non rimangono legati ad un particolare nucleo atomico, ma "scivolano" da un atomo all'altro lungo le orbite più esterne di ciascuno. Per questo motivo, questi elettroni vengono anche detti "liberi". Gli atomi, privi degli elettroni più esterni, diventano ioni positivi.

L'alluminio, come tutti i metalli, è composto da una distribuzione regolare di atomi basata sulla ripetizione di una cella elementare, ad esempio cubica. Gli ioni sono dunque distribuiti lungo file ordinate, similmente ai filari di alberi in un frutteto, e formano quello che viene detto un *reticolo cristallino*. A causa dell'agitazione termica, gli elettroni liberi si muovono in ogni direzione in modo casuale, in maniera simile alle molecole di un gas; la velocità media di questo "gas" di elettroni è dunque nulla.

Se però mettiamo a contatto i due estremi di un cavo di un materiale conduttore con le due polarità di una batteria, gli elettroni di valenza si muoveranno in direzione della polarità positiva verso cui si sentono attratti, acquisendo una velocità media di spostamento (detta *velocità di deriva*) che si sovrappone al moto casuale: si viene pertanto ad instaurare una corrente elettrica. Questa corrente non deve essere intesa come un libero sciamare degli elettroni, ma piuttosto come un loro faticoso cammino

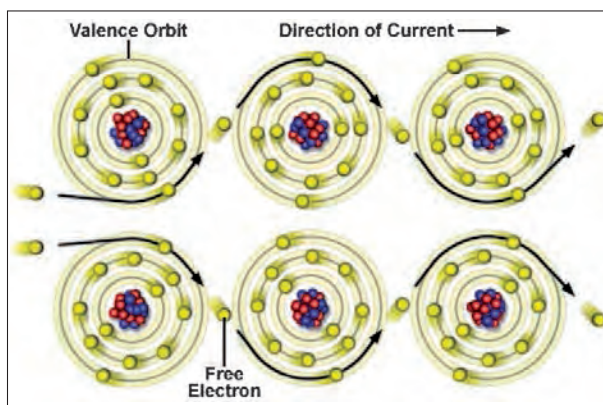


Fig. 3. Rappresentazione schematica di un reticolo di alluminio percorso da elettroni di valenza.

lungo un percorso accidentato. In effetti, la velocità di deriva è soltanto di alcune decine di centimetri all'ora.<sup>2</sup> Un valore così basso è dovuto alla *resistenza elettrica*; lungo il tragitto gli elettroni liberi urtano contro gli ioni che oscillano attorno alla loro posizione di equilibrio a causa dell'agitazione termica. Questi urti aumentano ulteriormente le oscillazioni atomiche e il cavo si scalda a scapito dell'energia elettrica. È dunque naturale attendersi che, riducendo la temperatura del conduttore, diminuisca anche la sua resistenza elettrica, in virtù della minore agitazione termica dei suoi ioni. È altresì naturale aspettarsi che la resistenza non si annulli mai del tutto, anche se ipoteticamente si potesse raggiungere una temperatura nulla (0 K), perché urti tra elettroni e ioni avverrebbero comunque, sia pure in maniera ridotta. Ma Onnes, come abbiamo visto, ha mostrato che alcuni metalli disattendono una simile aspettativa, e annullano improvvisamente la propria resistenza, non appena raffreddano al di sotto di una certa temperatura critica.

Per capire quello che succede in questi casi, immaginiamo un passante che debba attraversare una piazza affollata. Il suo cammino sarà continuamente ostacolato da urti e spinte subiti dalla folla. Il passante allora, chiedendo "permesso", ottiene che gli individui più prossimi si scansino momentaneamente per lasciarlo passare. La folla poi "si richiude" alle sue spalle, tornando ad ostacolare un'eventuale seconda persona che stia seguendo la prima. Se però questa seconda persona è lesta nel seguire da vicino il passante che lo precede, riuscirà a sfruttare il varco prodotto da quest'ultimo e il suo percorso risulterà agevolato. Qualcosa del genere accade in regime di superconduzione. Quando un primo elettrone passa tra i "filari" di ioni, quelli più prossimi si avvicinano l'un l'altro perché attratti dall'elettrone nel mezzo. Non appena l'elettrone è

<sup>2</sup> Nonostante questa "lentezza" la corrente elettrica è comunque in grado di attivare strumenti che richiedono grande potenza, grazie all'enorme numero di elettroni coinvolti: in un centimetro cubo di rame sono presenti circa  $10^{23}$  (100.000 miliardi di miliardi) elettroni di valenza.

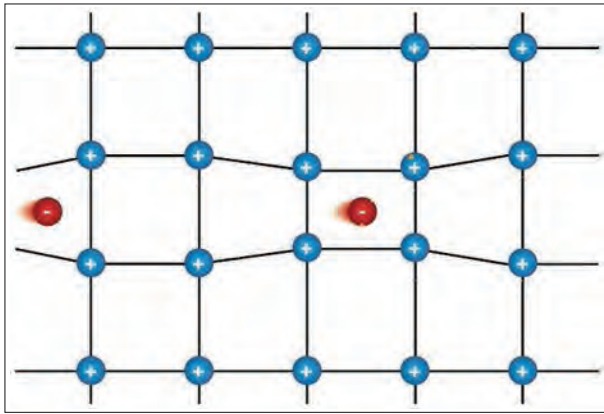


FIG. 4. Reticolo cristallino deformato dal passaggio di un elettrone.

passato oltre, gli ioni tornano rapidamente verso la loro posizione di equilibrio. In alcuni materiali, tuttavia, gli ioni impiegano più tempo a tornare nella loro posizione originaria; questo crea un eccesso locale di carica positiva e un elettrone che si trovi entro una certa distanza, detta “distanza di coerenza”, verrà attratto da tale eccesso accelerando e raggiungendo l’elettrone precedente. Nonostante la repulsione elettrica, i due elettroni rimangono legati tra loro formando quella che viene detta una *coppia di Cooper*, dal nome del fisico americano Leon Cooper che per primo ne evidenziò il meccanismo nel 1956.<sup>3</sup> Le coppie di Cooper sono molto instabili, e si formano e disfano continuamente all’interno del reticolo cristallino. Esse non urtano con gli ioni perché si crea una sorta di “sintonia” tra il passaggio degli elettroni che deformano il reticolo e le deformazioni stesse che facilitano questo passaggio. Perché questa armonia si instauri, innescando la superconduzione, è necessario che la temperatura sia molto bassa in modo che la ridotta agitazione termica degli ioni risulti insufficiente a spezzare le coppie con un urto.

La teoria BCS spiega, tra l’altro, il paradossale risultato sperimentale secondo cui i migliori materiali conduttori non diventano superconduttori. Infatti, come abbiamo visto, la superconduzione risulta da un’opportuna interazione tra gli elettroni liberi e il reticolo atomico. Dal momento che i buoni conduttori sono tali perché questa interazione è bassa, ne deriva che ad esibire la superconduzione sono materiali cattivi conduttori, in cui gli elettroni liberi interagiscono maggiormente con gli ioni.

In linea di principio, la superconduzione potrebbe avere ricadute tecnologiche notevoli. Ad esempio, l’energia elettrica potrebbe essere trasportata dalle centrali dove viene prodotta fino alle utenze distanti centinaia di chilometri, tramite cavi superconduttori che annullerebbero la dissipazione di energia dovuta alla resistenza elettrica. Ma la neces-

sità di dover raffreddare i cavi tramite l’elio liquido rende impraticabile questa opzione. Per questo motivo gli scienziati si stanno sforzando per produrre materiali che possano diventare superconduttori a temperature più elevate. In anni recenti sono riusciti a realizzare superconduttori “ad alta temperatura” con temperature critiche dell’ordine di 130 K. Questa soglia è ancora troppo bassa per poter utilizzare in maniera conveniente questi superconduttori nella vita quotidiana, ma permette di poter usare nei laboratori, come refrigerante, l’azoto liquido (che evapora a 77 K), molto più facile e meno costoso da ottenere dell’elio liquido. Se da un lato questi superconduttori ad alta temperatura rappresentano un incoraggiante progresso tecnologico, essi rappresentano anche un limite della teoria BCS, la quale non è in grado di spiegare la superconduzione per temperature critiche superiori a 23 K.

*Quando un elettrone libero in un metallo passa tra due ioni positivi, esso li attrae e i due ioni si avvicinano l’un l’altro. Si viene così a creare una regione con un “surplus” di carica positiva che produce un potenziale attrattivo per altri elettroni liberi. Classicamente, l’energia potenziale di un elettrone dovuta alla presenza di uno ione positivo si scrive come*

$$U = - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

*dove  $e$  è la carica dell’elettrone,  $\epsilon_0$  è la costante dielettrica nel vuoto, ed  $r$  è la distanza tra ione ed elettrone. Questa energia è normalmente nulla per gli elettroni liberi a causa dell’azione schermante degli altri elettroni che danno luogo ad una forza risultante nulla. Lo squilibrio di carica positiva, cui abbiamo accennato, produce però un termine non nullo dato da*

$$V \approx - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 d^2} \delta,$$

*dove  $d$  è l’abituale distanza tra ioni adiacenti, e  $\delta$  rappresenta lo spostamento di uno ione dalla sua posizione di equilibrio a causa del passaggio di un elettrone.<sup>4</sup> Questo potenziale attrattivo si esercita tra elettrone e ione. Quest’ultimo, dunque, si allontana fino ad una distanza  $\delta$  dalla sua posizione di equilibrio, per poi farvi ritorno dopo un tempo  $\tau$ . Lo ione oscilla attorno alla sua posizione di equilibrio analogamente a quanto fa un pendolo la cui estremità oscilla rispetto al suo punto più basso. Un moto oscillatorio è di tipo periodico ed è quindi*

<sup>3</sup> Contrariamente alla metafora della piazza affollata, gli ioni (la folla) si addensano vicino all’elettrone (il passante) invece che diradarsi. Questo è ovviamente dovuto al ruolo della carica elettrica.

<sup>4</sup> Si consideri la differenza di energia potenziale  $V = U - U'$  tra le energie  $U$  e  $U'$  calcolate rispettivamente nei punti  $d$  e  $d' = d + \delta$ . Assumendo che  $\delta$  sia molto piccolo rispetto a  $d$  ( $\delta/d \ll 1$ ), vale la seguente catena di uguaglianze che giustifica l’espressione di  $V$  riportata nel testo:  $1/d - 1/d' = (d + \delta - d)/(d(d + \delta)) \sim \delta/d^2$ .

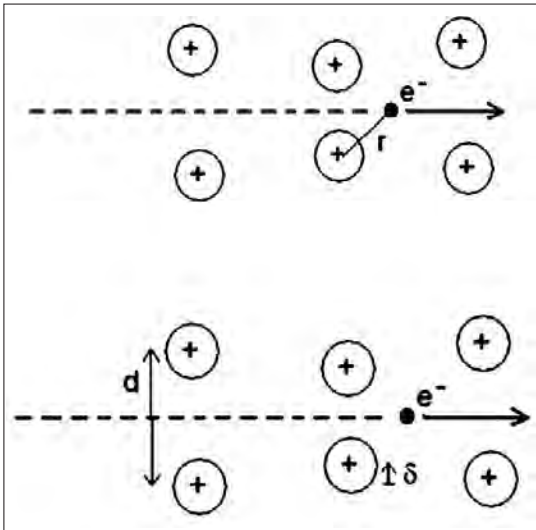


FIG. 5. I due pannelli illustrano il significato delle variabili presenti nelle equazioni riportate nel testo.  $r$  è la distanza tra ione ed elettrone,  $d$  è la distanza tra ioni adiacenti in equilibrio, e  $\delta$  è lo spostamento massimo di uno ione rispetto alla sua posizione di equilibrio a causa del passaggio di un elettrone.

caratterizzato dal tempo necessario per compiere un'oscillazione completa, ovvero dal periodo  $T = 2\pi/\omega$ , dove  $\omega$  è, per definizione, la frequenza di oscillazione. Pertanto abbiamo  $\tau = T/2 = \pi/\omega$ . Durante questo tempo l'elettrone, muovendosi alla velocità  $v$ , percorre una distanza  $l$  pari a<sup>5</sup>

$$l = \frac{\pi v}{\omega}.$$

<sup>5</sup> Per i lettori più "smaliziati", aggiungiamo che la velocità e la frequenza che compaiono in questa formula sono date dalla "velocità di Fermi"  $v_F$  e dalla "frequenza di Debye"  $\omega_D$ , che dipendono dalla composizione e dalle condizioni fisiche del superconduttore: tipicamente, si ha  $v_F = 10^8$  cm/s e  $\omega_D = 5 \times 10^{13}$  s<sup>-1</sup>.

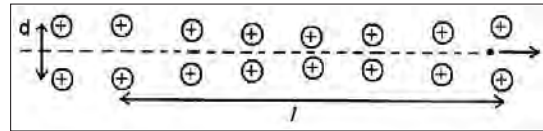


FIG. 6. In questa figura viene illustrata la "scia" di perturbazione dovuta al passaggio di un elettrone. Gli ioni, a causa della loro inerzia, impiegano un certo tempo a tornare nella loro posizione di equilibrio dopo essere stati perturbati; durante questo tempo l'elettrone compie un percorso  $l$  lungo il quale perturba altri ioni. La figura non è in scala, in quanto la lunghezza  $l$  è in generale centinaia o migliaia di volte maggiore di  $d$ , la distanza tra ioni adiacenti.

L'elettrone, dunque, lascia dietro di sé una scia di ioni perturbati che si estende fino ad una distanza  $l$ , dell'ordine della cosiddetta lunghezza di coerenza. Questa scia è carica positivamente ed è in grado di attrarre altri elettroni che vi passino attraverso. Ciò favorisce la formazione di coppie di Cooper. Vale la pena notare che la lunghezza di coerenza è di diverse centinaia di nanometri ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ), ben maggiore della distanza  $d$  tra ioni adiacenti, dell'ordine di qualche decimo di nanometro. All'interno di tale lunghezza, dunque, gli elettroni che fanno parte di una coppia possono essere anche a grande distanza (relativamente a  $d$ ) tra loro. Contrariamente agli elettroni isolati, queste coppie sono in grado di attraversare il reticolo atomico senza impedimenti. Infatti, le oscillazioni del reticolo danno luogo a regioni positive e negative che attraggono e respingono le coppie di Cooper in maniera tale da evitare collisioni. Fintanto che la temperatura rimane sotto la soglia critica, le coppie di Cooper persistono a causa della ridotta energia cinetica associata alle oscillazioni termiche degli ioni. A temperature superiori l'agitazione termica degli ioni spezza le coppie di Cooper e la superconduzione scompare.

**Annibale D'Ercole** si è laureato in Fisica all'Università di Roma "La Sapienza". Astronomo associato presso l'INAF · Osservatorio Astronomico di Bologna, si occupa di simulazioni numeriche di idrodinamica, applicate alle nebulose e al gas interstellare delle galassie. È autore di numerosi articoli divulgativi pubblicati presso questa e altre riviste.