

[as] tecnologia e ricerca

# Contro ogni resistenza.

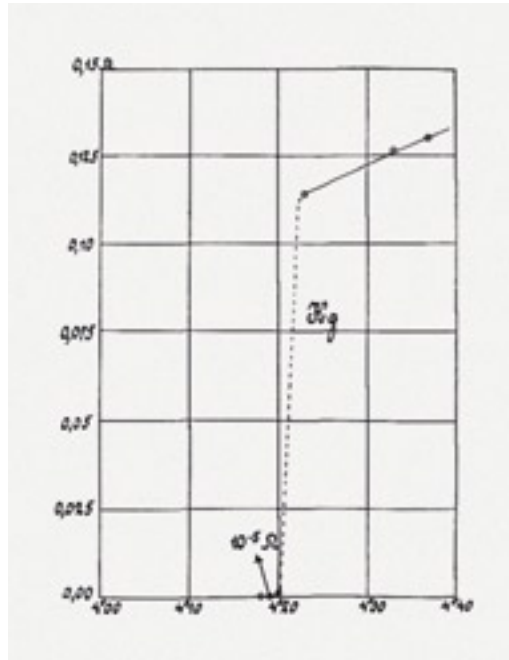
di Pasquale Fabbriatore,

*ricercatore  
della sezione Infn di Genova*

a.  
Fu il fisico olandese Kamerlingh Onnes a ottenere nel 1911 la prima prova sperimentale dell'aumento della conduttività di alcuni metalli in condizioni di temperatura vicine allo zero assoluto.



a.



b.

Nel 1908, il fisico olandese Kamerlingh Onnes realizzò un dispositivo per liquefare l'elio che, normalmente, a temperatura ambiente e pressione atmosferica, è allo stato gassoso. Dovendo raggiungere il punto di ebollizione dell'elio, che a pressione atmosferica si trova a 268,93 gradi centigradi sotto lo zero (4,22 gradi kelvin nella scala assoluta delle temperature), Onnes dovette riprodurre temperature tanto vicine allo zero assoluto da permettergli di effettuare anche esperimenti sulla resistenza elettrica dei metalli in queste condizioni estreme. Con grandissima sorpresa, nel 1911 scoprì che al di sotto di 4,15 gradi kelvin la resistenza elettrica del mercurio tendeva bruscamente ad annullarsi (nei limiti della sensibilità degli apparati di misura). Come resero evidente esperimenti successivi, altri elementi mostravano la proprietà di perdere la resistenza elettrica scendendo sotto un valore di temperatura  $T_c$ , detta *critica*. Il valore critico della temperatura non era lo stesso per tutti gli elementi chimici che presentavano questa proprietà, ma variava tra pochi centesimi di grado kelvin fino a un massimo di 9,2 gradi kelvin (nel caso del niobio). Questi materiali furono chiamati superconduttori. Tuttavia, i superconduttori non sono semplicemente dei conduttori perfetti e la resistenza elettrica non è l'unico parametro a caratterizzarne il comportamento: l'applicazione di un campo magnetico sufficientemente elevato o di una corrente elettrica sufficientemente

intensa, infatti, distruggono le proprietà superconduttive. Queste risultano così essere confinate non solo al di sotto di una temperatura critica, ma anche al di sotto di un valore di campo magnetico critico  $H_c$  e di una densità di corrente critica  $J_c$ .

Una caratteristica fondamentale dei superconduttori è legata al fatto che essi espellono completamente il flusso magnetico. Questo meccanismo fisico avviene attraverso la generazione di supercorrenti che scorrono sulla loro superficie e che sono in grado di schermare completamente il campo magnetico esterno; all'interno del materiale, quindi, il campo magnetico è uniformemente uguale a zero. Questa non è però l'unica tipologia di superconduttori esistenti. Un progresso notevole nella comprensione dei superconduttori avvenne in seguito alla scoperta dell'esistenza di una seconda categoria di superconduttori, detta del II tipo. Nei superconduttori di questa famiglia le correnti elettriche possono scorrere anche all'interno del materiale, che presenta così due campi magnetici critici: al di sotto del primo valore, più basso, il materiale espelle completamente il flusso magnetico; per valori di campo magnetico compresi tra il primo e il secondo campo critico, il flusso magnetico entra progressivamente con una struttura a vortici fino a distruggere le proprietà superconduttive. Materiali con campi critici elevati sono per lo più leghe (come il NbTi, niobio titanio) o composti intermetallici (Nb<sub>3</sub>Sn, niobio-3-stagno). Questi

b.

La misura originale di Kamerlingh Onnes, con la resistenza elettrica del mercurio che scende bruscamente e assume un valore nullo a una temperatura detta critica compresa tra 4,10 gradi kelvin e 4,20 gradi kelvin.

materiali, se opportunamente trattati, possono condurre correnti elevatissime, fino a diverse migliaia di ampère per millimetro quadrato, e sono quelli utilizzati nelle applicazioni tecnologiche che richiedono la conduzione di elevate correnti senza dispersione di energia. È interessante notare che il fenomeno della superconduttività è rimasto per molto tempo non compreso nei suoi meccanismi fondamentali. Seppure fossero già state sviluppate molte teorie fenomenologiche, solo nel 1957 venne formulata una teoria microscopica per descrivere la superconduttività, la teoria BCS, dai fisici che la elaborarono, Bardeen, Cooper e Schrieffer e che per questo ottennero il Nobel (vd. “La particella che dà la massa”, p. 4).

La bassa temperatura critica dei materiali superconduttori è stata un limite allo sviluppo delle applicazioni tecnologiche, e lo è tuttora, in quanto richiede che i dispositivi siano raffreddati attraverso il contatto con fluidi criogenici, come l'elio liquido, complessi da gestire e ad alti costi. Dal 1986, la tecnologia dispone di una nuova generazione di superconduttori, gli ossidi ceramici, caratterizzati da temperature critiche e campi magnetici critici molto più elevati e quindi più semplici da gestire. Tuttavia, questi nuovi superconduttori, detti ad alta  $T_c$ , hanno strutture complesse e il meccanismo della loro superconduttività non è lo stesso dei superconduttori tradizionali. Inoltre, sono materiali fragili: i cavi, quindi, sono di difficile realizzazione. Al momento i risultati migliori in termini di trasporto di corrente si ottengono su

nastri di YBCO (ittrio bario ossido di rame, con  $T_c = 92$  kelvin, pari a  $-181$  °C), che però necessitano di ulteriori sviluppi prima di poter essere applicati su larga scala.

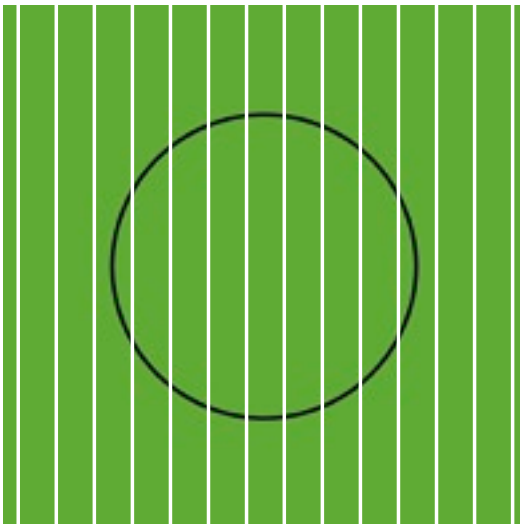
L'applicazione della superconduttività ha avuto un grande successo in medicina, con la risonanza magnetica medicale (MRI, acronimo inglese per Risonanza Magnetica per Immagini) e nel campo della ricerca, con le applicazioni agli acceleratori o alle tecnologie per la fusione nucleare. Si è stimato che nel 2007 è stato investito in strumentazione per la risonanza magnetica circa l'80% del mercato globale della superconduttività, che ammonta a circa 4 miliardi di euro, mentre il 16% è stato destinato alle applicazioni nella ricerca scientifica.

L'industria italiana dei cavi, dei magneti e della criogenia è da anni in prima fila in questo scenario di tecnologia avanzata, grazie a una forte sinergia tra industria, centri di ricerca e università. Un importante e recente risultato è il magnete dell'esperimento Cms del Large Hadron Collider del Cern, il cui cuore è un solenoide superconduttore di grandi dimensioni. Suddiviso in 5 moduli, il solenoide è stato costruito presso l'ASG Superconductors di Genova (già Ansaldo Superconduttori) dopo un lungo processo di sviluppo in ambito progettuale, presso la sezione di Genova dell'Infn, e in ambito dei processi industriali, in ASG: solo il continuo interscambio tra queste due realtà ha permesso la realizzazione del cuore di Cms, ora attivo nella sala 5 di Lhc, che ospita l'esperimento (vd. “I giganti a caccia”, p. 24).

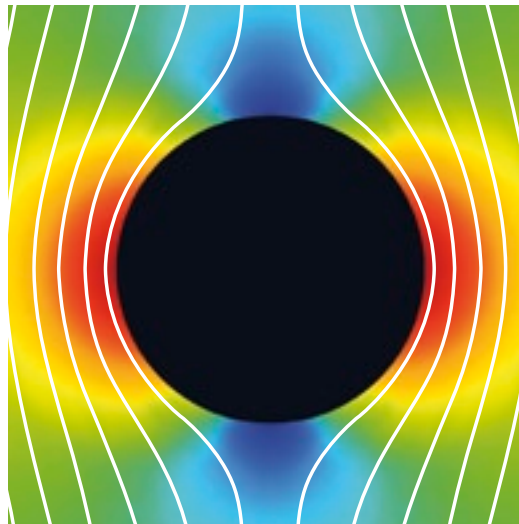
c. / d.

Un oggetto cilindrico superconduttore immerso in un campo magnetico. Al di sopra della temperatura critica (fig. c), il flusso magnetico penetra il materiale. Al di sotto (fig. d) il flusso viene espulso e quindi all'interno del materiale il campo magnetico è uniformemente uguale a zero (zone in blu nella figura). Questo è possibile perché sulla superficie circolano supercorrenti che schermano il campo magnetico esterno e alterano il campo magnetico immediatamente al di fuori del cilindro fino a raddoppiarne il valore (zone in rosso).

c.



d.





- 1.
- 2.
- 3.



### 1. / 2.

I tomografi MRI si presentano con due possibili configurazioni: in una il campo magnetico è generato da un solenoide (fig. 1), nella seconda è prodotto da due solenoidi contrapposti (fig. 2); questi ultimi sono detti sistemi aperti in quanto permettono di mantenere il contatto visivo con il paziente durante l'esame.

### 3.

Immagine assiale dell'encefalo: si distingue con chiarezza il diverso segnale della corteccia cerebrale, composta da materia grigia, e della sostanza bianca sottostante. Al centro i ventricoli contenenti fluido cerebrospinale.

[as] <sup>box</sup>

## Salutari risonanze

È interessante osservare come alcuni tra i concetti più sorprendenti della fisica moderna siano di casa negli ospedali: l'antimateria, cara ai lettori di fantascienza, è alla base delle immagini Pet (*Positron Emission Tomography*; vd. *Asimmetrie* n. 7) preziose tanto in neuroscienze che in oncologia; la superconduttività, d'altra parte, ci permette di ottenere immagini di risonanza magnetica nucleare (*Magnetic Resonance Imaging*, MRI). Tali immagini sono in realtà mappe dell'idrogeno nel corpo: presenti nelle molecole di acqua e nel tessuto adiposo del corpo umano, i nuclei di idrogeno hanno difatti proprietà magnetiche, un po' come minuscoli aghi di bussola, e possono essere studiati utilizzando onde radio a condizione di trovarsi in campi magnetici intensi e di applicare la radiofrequenza opportuna, detta appunto *frequenza di risonanza*. Fortunatamente alcune proprietà del

segnale di risonanza magnetica nucleare dipendono dall'ambiente chimico in cui le molecole si trovano, ad esempio il segnale dell'acqua della materia grigia è diverso da quello delle materia bianca, e ciò rende le immagini ricche di informazioni.

Gli elementi fondamentali di un sistema per la risonanza magnetica per immagini sono quindi un magnete e un sistema di antenne per emettere e ricevere onde radio. Lo strumento è nella maggior parte dei casi un solenoide, un sistema di avvolgimenti di cavo superconduttore in configurazione a ciambella, nel cui foro si accomodano i pazienti. Per i bambini e per le persone che soffrono di claustrofobia, tuttavia, sono disponibili sistemi "aperti" basati su due sistemi magnetici cilindrici contrapposti.

Il magnete superconduttore genera un campo magnetico di intensità tra i 0,5 e i 3 tesla: se messo

a confronto con i 0,05 millesimi di tesla del campo magnetico terrestre, un tomografo per risonanza magnetica da 1,5 tesla – il più usato – sottopone il paziente a un campo magnetico 30.000 volte più intenso di quello in cui viviamo.

La risonanza magnetica per immagini è così diffusa perché permette di visualizzare con grande dettaglio le strutture anatomiche. Non utilizzando radiazioni ionizzanti, inoltre, permette l'acquisizione di numerose immagini senza alcun rischio per il soggetto.

Questo ha aperto le porte a studi funzionali sugli organi in movimento, come nel caso del cuore, o mentre essi svolgono le loro funzioni, come nel caso del cervello durante l'esecuzione di un compito cognitivo o motorio.

[Renata Longo, *Università e sezione Infm di Trieste*]