



32

36

40



MICROCOPY RESOLUTION TEST CHART
NATIONAL BUREAU OF STANDARDS
STANDARD REFERENCE MATERIAL 1010a
(ANSI and ISO TEST CHART No. 2)

M. SPADONI

**LA SUPERCONDUTTIVITÀ E LE SUE APPLICAZIONI:
STATO DELL'ARTE E PROSPETTIVE FUTURE**

178900006



**COMITATO NAZIONALE PER LA RICERCA E PER LO SVILUPPO
DELL'ENERGIA NUCLEARE E DELLE ENERGIE ALTERNATIVE**

Associazione EURATOM-ENEA sulla Fusione

LA SUPERCONDUTTIVITÀ E LE SUE APPLICAZIONI: STATO DELL'ARTE E PROSPETTIVE FUTURE

M. SPADONI

ENEA - Dipartimento Fusione, Centro Ricerche Energia Frascati

Testo pervenuto nel marzo 1988
Progetto Enea: Ingegneria del reattore a fusione (DC)

Questo rapporto è stato preparato da Servizio Studi e Documentazione - ENEA, Centro Ricerche Energia Frascati, C.P. 65 - 00044 Frascati, Roma, Italia.

Questo Servizio sarà lieto di inviare su richiesta ulteriori copie di questo rapporto.

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'Enea rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'ente.

Summary

This paper, after a short introduction to superconductivity and to multifilamentary superconducting composites is aiming to review the state of the art and the future perspectives of some of the applications of the superconducting materials.

The main interest is focussed to large scale applications like, for instance, magnets for accelerators or fusion reactors, superconducting systems for NMR tomography etc.

A short paragraph is dedicated to applications for high sensitivity instrumentation.

The paper is then concluded by some considerations about the potentialities of the newly discovered high critical temperature materials.

Riassunto

Questo articolo, dopo una breve introduzione sul fenomeno della superconduttività e sui cavi compositi superconduttori, si propone di passare in rassegna lo stato dell'arte e le future prospettive di alcune delle straordinarie proprietà di questi materiali.

L'interesse principale è rivolto alle applicazioni di larga scala, come ad esempio i magneti per acceleratori di particelle o per reattori fusione, sistemi a superconduttori per la tomografia mediante la risonanza magnetica nucleare etc.

Un breve paragrafo viene dedicato alle applicazioni per la realizzazione di strumentazione di alta sensibilità.

L'articolo si chiude con alcune considerazioni sul potenziale impatto dei nuovi materiali ad alte temperature critiche, recentemente scoperti.

1 - INTRODUZIONE

Agli inizi di questo secolo, esattamente nel 1908, il fisico olandese Kamerlingh Onnes, messo a punto il primo liquefattore a elio, riuscì a produrre quantità di elio liquido sufficienti ad aprire la possibilità di misurare proprietà fisiche fino a temperature vicine allo zero assoluto.

Ciò ha provocato un formidabile impulso ad investigare le proprietà dei materiali in condizioni così estreme. E, come è spesso avvenuto, un incremento nelle capacità tecnologiche ha fornito un impensato ed impreveduto passo avanti nelle conoscenze scientifiche fondamentali. Infatti, nell'ambito di un'indagine generale sulla dipendenza dalla temperatura della resistività di alcuni metalli, Kamerlingh Onnes si trovò di fronte a quelli che battezzò come «superconduttori», metalli come il mercurio, il piombo, lo stagno che, al di sotto di una temperatura caratteristica per ciascuno di essi — la temperatura critica T_c —, passavano improvvisamente dal normale ed usuale stato resistivo ad una nuova condizione, nella quale la resistività si annullava completamente.

Oltre agli aspetti d'interesse fondamentale, Onnes intuì subito le possibilità applicative dei superconduttori nel campo dell'elettrotecnica, come materiali ideali per la costruzione di elettromagneti di dimensioni contenute in grado di generare campi magnetici elevati senza dissipazione. L'insuccesso fu però clamoroso e bruciante, e la ragione risiede nel fatto che i superconduttori sono caratterizzati anche da un'induzione critica, B_c , al di sopra della quale tali materiali perdono lo stato superconduttore e tornano ad essere normali e resistivi metalli. Nei metalli superconduttori che Onnes aveva scoperto e tentato di utilizzare le induzioni critiche erano molto basse, dell'ordine di (0.1 - 0.2) T.

Ci sono voluti circa 50 anni perché venissero scoperti nuovi superconduttori, leghe o composti intermetallici, caratterizzati da induzioni critiche molto elevate, (10 - 20) T, ed in grado di trasportare elevate densità di corrente. Vedremo in seguito che, ai fini pratici, oltre alle proprietà fondamentali come temperatura critica e induzione critica, legate alla chimica dell'elemento o del composto in esame, un superconduttore va anche caratterizzato in termini di corrente critica, definibile come la massima corrente che, ad una certa temperatura e campo magnetico, può fluire nel materiale senza dissipazione ohmica. La corrente critica non è una proprietà fondamentale, ma è invece legata alla microstruttura del materiale, al suo stato metallurgico, pa-

rametro sul quale si può intervenire durante il processo di fabbricazione.

È chiaro quindi che ciò che importa nello sviluppo applicativo è anzitutto l'individuazione di superconduttori caratterizzati da temperatura e induzione critica quanto più possibile elevati. L'ottimizzazione delle proprietà di trasporto sarà quindi affidata allo studio di opportuni metodi di fabbricazione.

La peculiarità dei superconduttori, che li fa andare oltre la definizione riduttiva di conduttori perfetti, è ben evidenziata dal cosiddetto effetto Meissner, che è una totale espulsione del flusso magnetico dall'interno del campione. Tale effetto, che è reversibile, si verifica sia quando un materiale già superconduttore viene immerso in un campo magnetico, sia, quando il materiale allo stato normale viene immerso in un campo magnetico e quindi raffreddato al di sotto di T_c .

Un superconduttore è quindi caratterizzato come un diamagnete perfetto, dotato di una conducibilità infinita.

L'induzione magnetica non va a zero improvvisamente alla superficie di un superconduttore, ma decresce esponenzialmente su una distanza caratteristica λ , detta profondità di penetrazione. L'espressione teorica per λ è, allo zero assoluto,

$$\lambda_L(0) = \left\{ \frac{m^*}{N(0) e^2 \mu_0} \right\}^{1/2} \quad (1)$$

dove $N(0)$ è la densità elettronica degli stati alla superficie di Fermi, m^* è la massa efficace della coppia di elettroni ed e la loro carica. Valore tipico di λ per un metallo puro è di $\approx 5 \cdot 10^{-8}$ m. Supercorrenti scorrono in uno spessore di materiale pari alla profondità di penetrazione, producendo un campo nel superconduttore tale da annullare esattamente il campo esterno applicato. Lo stato Meissner è uno stato di equilibrio termodinamico e come tale può essere descritto mediante la termodinamica classica. L'energia libera dello stato superconduttore è minore di quella dello stato normale di una quantità ΔG_n per unità di volume, detta energia di condensazione dello stato superconduttore. L'esclusione di flusso aumenta l'energia libera di una quantità $B^2/2\mu_0$ per volume unitario, dove μ_0 è la permeabilità magnetica del vuoto. L'induzione critica B_c è quel valore al quale i due termini si eguagliano:

$$B_c^2/2\mu_0 = \Delta G_n \quad (2)$$

Poiché l'energia di condensazione può essere correlata alla temperatura critica, è possibile ottenere un'espressione per l'induzione critica

allo zero assoluto⁽¹⁾

$$B_c(0) = 7 \cdot 10^{-4} \gamma^2 T_c \quad (3)$$

dove γ è la costante di Sommerfeld.

Un elevato campo critico è quindi favorito da alti valori di T_c e di γ .

Se però la formula (3) viene applicata a materiali a T_c elevate, come quelli del tipo A15 (Nb₃Sn, Nb₃Al, V₃Si, ecc.), si ottiene la previsione di un'induzione critica di (0.5 ÷ 0.6)T, mentre per tali composti si osservano valori (40 ÷ 50) volte superiori.

La formula (3) è però valida solo se le dimensioni del superconduttore sono molto maggiori della profondità di penetrazione λ . Per un filamento o un film sottile di spessore $d \leq \lambda$, lo stato superconduttore persisterà fino a valori d'induzione B_d più elevati, pari a

$$B_d = B_c(\lambda/d). \quad (4)$$

Quindi se il superconduttore potesse suddividersi in filamenti o lamelle di spessore $d < \lambda$, separate da zone normali in cui il campo possa penetrare, lo stato superconduttivo potrebbe persistere fino a valori d'induzione maggiori di B_c .

Per proseguire nel discorso ed introdurre la differenza tra i superconduttori del primo tipo e quelli del secondo tipo, bisogna ora definire un'altra lunghezza caratteristica, la lunghezza di coerenza ξ . Tale lunghezza fornisce la scala della distanza sulla quale la funzione d'onda elettronica può variare dal comportamento normale a quello superconduttore.

Si può quindi dire che ξ è la dimensione possibile di una regione superconduttrice circondata da materiale normale.

Nei metalli puri $\xi \geq 10^{-6}$ m ed è quindi 20 volte maggiore di λ . Ciò significa che in tali superconduttori, detti del primo tipo, i minimi filamenti superconduttori realizzabili sono sempre tali da non permettere un'apprezzabile penetrazione di campo.

È tuttavia possibile, per esempio mediante alligaggio, ottenere dei materiali per i quali $\lambda > \xi$; tali materiali vengono definiti superconduttori del secondo tipo. La teoria che tratta i superconduttori del secondo tipo è quella GLAG (Ginzburg-Landau-Abrikosov-Gorkov)^(2,3). Essa fornisce anche il criterio di distinzione tra le due classi di superconduttori. Un materiale è del primo tipo se $K = \lambda/\xi < (\sqrt{2})^{-1}$, mentre è del secondo tipo se $K > (\sqrt{2})^{-1}$. Il parametro K viene normalmente definito come parametro di Ginzburg-Landau.

Un superconduttore del secondo tipo si

comporta come un superconduttore ideale del primo tipo con effetto Meissner completo fino ad un valore d'induzione detta induzione critica inferiore, il cui valore è molto basso, dell'ordine di 10^{-2} T. Al di sopra di tale valore il flusso magnetico penetra nel materiale sotto forma di vortici di supercorrenti quantizzati, ciascuno dei quali trasporta un quanto di flusso $\Phi = h/2e = 2 \cdot 10^{-15}$ Wb. Una linea vorticale può essere visualizzata come una canna flessibile di conduttore normale di raggio ξ . Il flusso all'interno del nocciolo normale è mantenuto da supercorrenti che fluiscono in un raggio λ .

Proseguendo sempre con un'immagine intuitiva e quindi necessariamente approssimata del fenomeno, si può immaginare che, aumentando il campo esterno, la densità di linee vorticali aumenti fino ad una sovrapposizione totale dei noccioli, situazione nella quale tutto il materiale è ormai diventato normale. Il valore d'induzione al quale ciò avviene è l'induzione critica superiore B_{c2} . Un'idea delle grandezze che intervengono nel determinare B_{c2} si ha immediatamente esaminando la relazione⁽⁴⁾

$$B_{c2}(0) = 3.11 \cdot 10^3 \gamma \rho_N T_c \quad (5)$$

La (5) è valida nel limite di materiali molto impuri e si applica piuttosto bene alle leghe.

Per esempio, una tipica lega Nb-44%Ti ha $\gamma = 990 \text{ J m}^3 \text{ K}^{-2}$, $\rho_N = 65 \cdot 10^{-8} \text{ } \Omega \text{ m}$, $T_c = 9.3 \text{ K}$ e si trova quindi $B_{c2}(0) = 18.5 \text{ T}$, un valore lievemente maggiore di quello osservato sperimentalmente. Ciò può essere dovuto alla cosiddetta limitazione paramagnetica; infatti il paramagnetismo abbassa l'energia libera dello stato normale, rendendo così energeticamente favorevole una transizione del superconduttore ad un campo inferiore rispetto a quello che si avrebbe con uno stato normale magneticamente neutro.

Come è già stato detto, la relazione (5) è valida per materiali impuri come le leghe, nelle quali la lunghezza di coerenza viene diminuita riducendo con l'alligaggio il cammino libero medio degli elettroni.

I composti intermetallici, del tipo dello Nb₃Sn, sono invece caratterizzati da una formula stechiometrica ben precisa ed hanno la struttura cristallina del tungsteno β . In questi materiali la ξ ha un valore intrinsecamente basso, mentre il cammino libero medio elettronico può essere relativamente elevato. Non è quindi sorprendente che tali composti non si comportino secondo le previsioni della formula (5).

In tutti i discorsi precedenti, trattandosi di un articolo a sfondo applicativo, si sono pri-

vilegiati gli approcci empirico-fenomenologici. Prima di procedere su questa strada è però opportuno fare un breve accenno al meccanismo che produce il fenomeno della superconduttività ed alla teoria che su di esso si basa.

Si tratta della teoria di Bardeen, Cooper e Schrieffer⁽¹⁾, la quale, ipotizzando una forza attrattiva tra coppie di elettroni, trasmessa attraverso le vibrazioni reticolari, mostra che tale legame può produrre una condensazione quantistica e permette di ottenere descrizioni e previsioni sul comportamento dei superconduttori. La teoria BCS, delle cui previsioni ci siamo già serviti per alcune delle formule precedenti, fornisce anche un'espressione per la temperatura critica

$$T_c = T_D e^{-1/N(0)V} \quad (6)$$

Nella (6) T_D è la temperatura di Debye, $N(0)$ è la densità elettronica degli stati alla superficie di Fermi, proporzionale alla costante di Sommerfeld γ , V è il cosiddetto parametro d'interazione, elemento di matrice che descrive l'interazione elettrone-fonone, responsabile dello stato superconduttivo.

La teoria BCS non è di enorme aiuto per la ricerca di materiali ad alte T_c . Mentre T_D e γ sono noti per molti elementi, il parametro d'interazione V è ignoto e non calcolabile. L'indicazione della (6) è di puntare su materiali che abbiano un'elevata temperatura di Debye e un'alta densità elettronica degli stati alla superficie di Fermi. In particolare quest'ultima affermazione sembra smentita nei nuovi superconduttori ad alta T_c , nei quali la densità degli stati è invece particolarmente bassa.

2 - CORRENTI CRITICHE

Abbiamo in precedenza stabilito che i superconduttori potenzialmente interessanti per le applicazioni di larga scala sono quelli del secondo tipo, caratterizzati da campi critici molto elevati. Si è anche detto che la densità critica di corrente J_c , la massima che il superconduttore può sopportare senza dissipazione, è un indice della qualità applicativa del materiale.

Vogliamo ora chiarire con qualche maggior dettaglio come le modalità di preparazione del campione possano influenzare molto le correnti critiche.

Si può dimostrare in termini abbastanza semplici che un superconduttore ideale del

secondo tipo, ad esempio un monocristallo di Nb_3Sn , una volta entrato nello stato misto, non sarebbe in grado di sopportare nessuna corrente di trasporto senza sviluppare un campo elettrico e quindi dar luogo a fenomeni dissipativi.

Infatti i flussoidi sono soggetti ad una forza di Lorentz F_L quando una corrente di densità J fluisce nel superconduttore. Tale forza è, per unità di volume,

$$F_L = J \wedge B, \quad (7)$$

dove J è la densità di corrente e $B = n\Phi_0$ è l'induzione, poiché n è la densità superficiale di flussoidi e Φ_0 è un vettore che ha come modulo un quanto di flusso ed è diretto lungo la tangente locale ai flussoidi.

Sotto l'azione della forza F_L le linee verticali si muoveranno, se non esiste qualcosa che le trattiene, inducendo in tal modo un campo elettrico

$$E = nv \wedge \Phi_0 = V \times B, \quad (8)$$

dove v è la velocità dei flussoidi. In tali condizioni il superconduttore mostra una resistenza indotta, come dimostrato da Kim *et al.*⁽²⁾. Se adesso definiamo come «critica» quella corrente alla quale inizia a svilupparsi una tensione ai capi del superconduttore, comprendiamo immediatamente che, al di sopra di B_c , la corrente critica sarà nulla se non esiste un qualche meccanismo capace di impedire il moto ai flussoidi. Fortunatamente ciò avverrebbe solo in un superconduttore ideale del secondo tipo. Nella pratica, infatti, tutti i superconduttori del secondo tipo sono non ideali e possono quindi essere caratterizzati da un valore non nullo della corrente critica. Si è appurato che questo «ancoraggio» dei flussoidi è fondamentalmente determinato da proprietà microstrutturali, poiché viene realizzato da regioni le cui caratteristiche superconduttrici sono diverse da quelle della matrice. Usualmente dislocazioni, bordi di grani, precipitati e vuoti sono responsabili dell'impedimento al moto dei flussoidi.

Acceniamo brevemente ai meccanismi con i quali si generano le barriere che si oppongono al moto dei flussoidi.

Quando si tratta di distorsioni di microstruttura che hanno dimensioni caratteristiche maggiori della profondità di penetrazione λ , l'induzione si adatterà localmente alle caratteristiche superconduttrici di quella zona nella quale il parametro K di Ginzburg-Landau

differisce dal resto della matrice. Ciò si applica a precipitati, bordi di grano, insiemi di dislocazioni.

Si è dimostrato che la variazione d'induzione così ottenuta agisce come barriera al movimento dei flussoidi⁽⁷⁾. Questo tipo di meccanismi è presente nei composti intermetallici (Nb₃Sn, Nb₃Al).

Se le variazioni microstrutturali sono su una scala minore di λ , l'ancoraggio viene invece prodotto attraverso la variazione di energia libera del nocciolo normale dei flussoidi dovuta alle variazioni di K nella microstruttura⁽⁸⁾. Ciò avviene, per esempio, nell'*NbTi* dove l'ancoraggio è prodotto da una fine struttura cellulare di dislocazioni.

Ovviamente maggiore è l'interazione, tanto più elevato è l'ancoraggio dei flussoidi e conseguentemente tanto più elevati sono i valori di corrente critica. Lavorazioni meccaniche a freddo e/o opportuni trattamenti termici sono i sistemi normalmente usati per ottimizzare le correnti critiche nei materiali superconduttori utilizzati commercialmente.

3. MATERIALI SUPERCONDUTTORI OGGI DISPONIBILI PER APPLICAZIONI DI LARGA SCALA

Accenneremo in seguito ai nuovi materiali ad alte T_c , i composti a base di ossidi metallici, ed alle eccitanti prospettive legate al loro sviluppo. In questo paragrafo vogliamo invece esaminare i materiali già oggi disponibili per le applicazioni.

Una prima grande suddivisione si può effettuare distinguendo tra leghe e composti intermetallici.

Una lega al 50% di Nb e Ti, duttile e facilmente lavorabile, è oggi di gran lunga il materiale più diffuso. Esso ha una $T_c = 9.2$ K in assenza di campo magnetico e senza corrente di trasporto.

La sua induzione critica allo zero assoluto è $B_c(0) \approx 15$ T e si riduce a meno di 11 T a 4.2 K, temperatura dell'elio in ebollizione.

In fig. 1 è riportata una curva $J_c(B)$ per *NbTi* di elevata qualità, prodotto con i più recenti metodi di ottimizzazione⁽⁹⁾.

In pratica conduttori a base di *NbTi* vengono utilizzati per applicazioni in elio liquido a 4.2 K fino ad un campo di 8 T, mentre in elio superfluido a 1.8 K possono raggiungere circa 10 T. Facendo ricorso ad una lega ternaria Nb-Ti-Ta⁽¹⁰⁾ ad 1.8 K, si possono ottenere campi fino a 11 T.

Applicazioni recenti, come i magneti sottili per rivelatori di particelle o i magneti superconduttori per tomografia NMR, richiedono

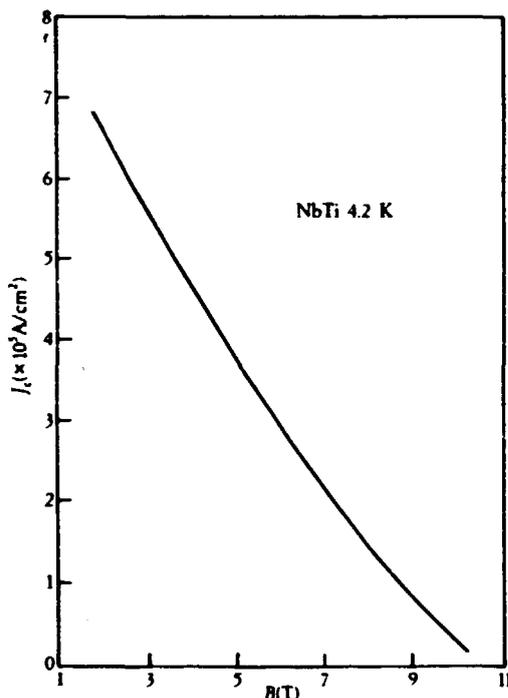


Fig. 1: Andamento tipico della densità di corrente in funzione del campo magnetico per *NbTi* ottimizzato⁽⁹⁾

l'utilizzazione dell'*NbTi* a campi relativamente bassi ($2 \div 4$ T).

La conoscenza dei meccanismi di ancoraggio dei flussoidi nell'*NbTi* permette oggi di ottimizzare la densità di corrente ai campi d'interesse, variando opportunamente i trattamenti metallurgici durante la produzione.

L'*NbTi* è un superconduttore che può oggi considerarsi ottimizzato ed altamente sviluppato e, a dimostrazione di ciò, esso rappresenta circa il 90% della produzione totale di superconduttori.

Per applicazioni che richiedono campi magnetici superiori a ($10 \div 11$) T vengono oggi utilizzati dei composti intermetallici, detti A15 poiché hanno tutti la struttura cristallografica del tungsteno β . Tali composti, molto duri ma fragili, hanno una formula stechiometrica del tipo A₃B con A=Nb, Vd e B=Sn, Al, Ga, Si. La fragilità di questi superconduttori richiede metodi di preparazione lunghi e complicati con costi di produzione notevolmente superiori a quelli delle leghe di Nb-Ti.

In fig. 2 sono riportate le curve di $B_c(T)$ per molti composti A15. Bisogna sottolineare che gli A15, oltre a presentare campi critici sensibilmente più elevati dell'*Nb-Ti*, hanno anche temperature critiche che vanno da 18 a 23.2 K. Quest'ultima temperatura critica, ottenuta su campioni di Nb₃Ge⁽¹¹⁾, ha rappresentato, fino a circa un anno fa, il massimo

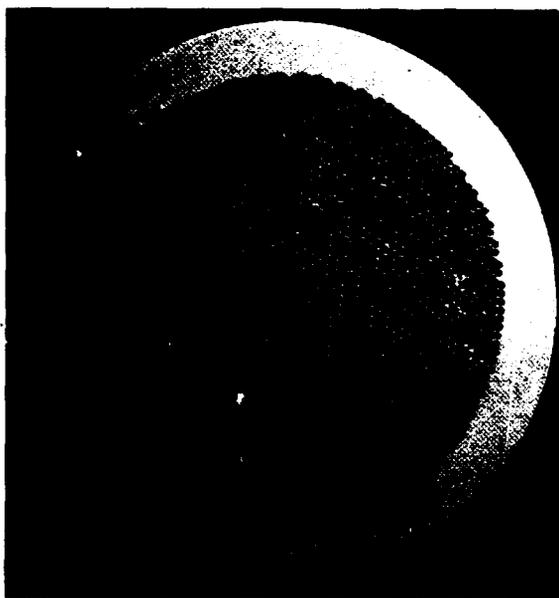


Fig. 4: Sezione di un conduttore multifilamentare di NbTi in matrice di Cu prodotto dalla I.MI, Firenze

fortemente influenzata da inomogeneità chimiche del lingotto originale di NbTi, evitabili con procedimenti di fusioni multiple.

I conduttori compositi di Nb,Sn hanno, nel loro stadio finale, un aspetto analogo a quelli di NbTi. Essi sono generalmente disponibili in forma di fili con diametro compreso tra 0.2 e 1 mm.

L'intrinseca fragilità dei superconduttori A15 richiede però che le lavorazioni meccaniche siano effettuate su componenti duttili; la fase superconduttrice viene formata alla fine dei trattamenti di riduzione mediante ricotture a $(650 \div 750)^{\circ}\text{C}$. A tale temperatura l'intermetallico Nb₃Sn si forma per diffusione solida dell'Sn contenuto nel bronzo, che è una lega Cu-Sn, nel quale sono immersi filamenti di Nb.

L'approccio più immediato parte da una billetta forata di bronzo nella quale vengono inserite barrette di Nb. La lavorabilità del bronzo impone però di non superare il 13% in Sn, limitando così la quantità di superconduttore che può formarsi.

Questo inconveniente può essere superato ricorrendo a processi di fabbricazione più complicati e quindi più costosi.

Il metodo della diffusione dall'esterno parte con billette forate di Cu puro e barrette di Nb. Quando il multifilamentare di Nb in matrice di Cu è arrivato alle dimensioni finali, esso viene rivestito elettroliticamente da un opportuno strato di Sn. Una serie di trattamenti termici permette quindi il passaggio dell'Sn nel Cu e la successiva formazione dell'Nb₃Sn⁽¹⁷⁾. In pratica con questo metodo

si è limitati a diametri massimi di 0.5 mm, per non dilatare enormemente i tempi dei trattamenti termici.

Nella diffusione dall'interno, la billetta forata di Cu viene riempita con barrette di Nb e di Sn nelle proporzioni richieste⁽¹⁸⁾. In questo processo è necessario controllare accuratamente la temperatura durante i trattamenti di riduzione, per evitare la formazione di bronzo e le conseguenti rotture del conduttore.

In molte applicazioni di larga scala, per ridurre l'induttanza degli avvolgimenti, si richiedono cavi superconduttori capaci di trasportare correnti di migliaia di ampere, talvolta anche con caratteristiche meccaniche non ottenibili da un composito composto unicamente da rame e superconduttore. In tali casi i multifilamentari che abbiamo appena descritto vengono utilizzati come elementi base per comporre, mediante cablatura, un cavo di maggiori dimensioni al quale può eventualmente essere aggiunto altro materiale, come l'acciaio inossidabile per rinforzo strutturale e/o quantità addizionali di Cu o Al per migliorarne la stabilità.

A titolo esemplificativo in fig. 5 sono mostrate le foto di sezioni di cavi in NbTi prodotti dall'industria italiana, mentre la fig. 6 mostra la struttura di un conduttore a base di A15 previsto per applicazioni future nel campo della fusione termonucleare controllata.

5. APPLICAZIONI DI LARGA SCALA

È questo il tipo di applicazioni che Kamerlingh Onnes aveva immediatamente individuato, all'indomani della scoperta del fenomeno della superconduttività.

Esse possono essere suddivise in due grandi classi, a seconda che siano legate ad attività di ricerca o in qualche modo destinate ad utilizzazioni energetiche.

La prima categoria è rappresentata dalle utilizzazioni nel campo della fisica delle alte energie. I magneti superconduttori vengono infatti usati per deflessioni e foccheggiamento di fasci di particelle in acceleratori circolari oppure per generare campi magnetici su rivelatori di grandi dimensioni.

Sulle applicazioni energetiche il discorso si fa più articolato. In alcuni casi, come per il futuro reattore a fusione, i magneti superconduttori rappresentano un elemento fondamentale del sistema. In altre applicazioni essi sostituiscono con vantaggio altre tecnologie già esistenti ed è il caso dei grandi solenoidi previsti per accumulo di energia e livellamen-



Fig. 5: Conduttore a circolazione forzata per il magnete SULTAN (in alto) e cavo composto per i magneti di HERA

to di carico nella rete di distribuzione elettrica, concepiti in sostituzione di metodi tradizionali come il pompaggio di acqua tra bacini a differenti livelli. C'è infine da segnalare l'uso a scopo di risparmio energetico rispetto a sistemi convenzionali, motivo che ha spinto a studiare le applicazioni di magneti superconduttori per la tomografia NMR, per la separazione magnetica di minerali e per la levitazione di veicoli.

5.1. - Magnet per acceleratori

La fisica delle alte energie è stata finora il campo che più attivamente ha sollecitato e

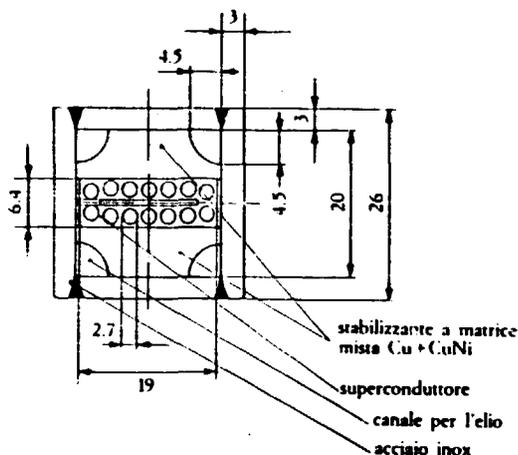


Fig. 6: Un possibile cavo superconduttore in A15, rinforzato in acciaio, per il NET. (Corrente di lavoro 17 kA, corrente critica 32 kA a 11 T e 4.5 K) Dimensioni in mm

favorito consistenti applicazioni della superconduttività.

La possibilità di produrre campi magnetici elevati permette infatti di contenere l'enorme aumento degli acceleratori conseguente ad una domanda orientata ad energie sempre crescenti dei fasci di particelle, con ovvi riflessi anche sulle potenze elettriche da impegnare.

Gli acceleratori circolari richiedono magneti dipolari che, producendo un campo perpendicolare al loro asse, mantengono il fascio di particelle sull'orbita richiesta e magneti quadrupolari, che generano un gradiente di campo magnetico per il focheggiamento del fascio stesso. Per assicurare la necessaria qualità di campo vengono inoltre usati numerosi magneti di correzione.

Il Tevatron⁽¹⁹⁾, protosincrotrone da 1 TeV, situato negli Stati Uniti al Fermilab, è stato il primo esempio di utilizzazione di magneti superconduttori, i quali, installati sotto i preesistenti magneti tradizionali, hanno consentito di portare l'energia del fascio da 400 MeV a 1 TeV.

Nell'acceleratore, che ha il raggio di 1 km, sono stati installati 774 dipoli, 216 quadrupoli ed oltre 1000 magneti di correzione.

I dipoli hanno un'apertura di 7.5 cm, sono lunghi 6.4 m e producono un campo pari a 5 T. I quadrupoli sono invece lunghi 1.5 m con un'apertura di 8.7 cm. Per l'insieme di magneti sono state usate circa 5 tonnellate di conduttore multifilamentare in Nb-Ti.

Anche il sistema di refrigerazione è il più grande oggi esistente nel mondo. I magneti sono mantenuti a 4.6 K da 24 refrigeratori satelliti distribuiti intorno all'acceleratore. I satelliti hanno ciascuno una capacità refrige-

rante di 1000 W e devono essere riforniti di liquido da un liquefattore centralizzato capace di produrre 4000 l/h di elio liquido⁽¹⁹⁾.

Il Tevatron è oggi in funzione per gli esperimenti ed il pieno successo del progetto ha dato impulso alla costruzione di altri acceleratori dotati di magneti superconduttori, poiché ha dimostrato che è possibile impostare su scala industriale la produzione di magneti con tolleranze meccaniche estremamente ridotte, come quelle necessarie a raggiungere la richiesta accuratezza di campo magnetico.

A Serpukov, in Russia, è in corso di realizzazione l'UNK, un acceleratore di protoni da 3 TeV, i cui magneti sono ispirati a quelli del Tevatron. L'UNK richiederà 2160 dipoli da 5 T, lunghi 6 m e 348 quadrupoli⁽²⁰⁾.

Ugualmente in corso di costruzione ad Amburgo, presso DESY, è HERA⁽²¹⁾ (Hadron Electron Ring Accelerator) che consiste in un anello di elettroni da 30 GeV e da uno di protoni da 820 GeV, con circonferenza di 6,3 km. L'anello per protoni verrà realizzato con magneti superconduttori. Saranno necessari 422 dipoli, circa 224 quadrupoli e molte bobine di correzione. I dipoli avranno un campo al centro di 4,65 T ed una lunghezza magnetica di 8,886 m.

Ogni dipolo, lungo 6 m, conterrà al suo interno un quadrupolo e bobine di correzione di sestupolo. I quadrupoli avranno un gradiente al centro di 90 T/m.

Oltre 900 km di cavo composto da conduttori multifilamentari in NbTi saranno necessari per costruire questi magneti.

Anche in HERA, analogamente a quanto fatto nel Tevatron, i magneti saranno raffreddati con elio supercritico in circolazione forzata.

L'installazione dei magneti superconduttori nel tunnel inizierà nell'estate 1987 e continuerà nel 1988. Le tre unità di refrigerazione saranno operative entro il 1987. Gli esperimenti di fisica sono previsti per il 1990. La fig. 7 mostra schematicamente la configurazione della macchina e l'ubicazione delle aree sperimentali.

La fig. 8 mostra un dipolo prototipo per HERA, costruito dall'Ansaldo. Per tali magneti viene utilizzato il conduttore LMI già illustrato in fig. 5.

La prossima generazione di macchine per la fisica delle alte energie, quelle che saranno operative tra una decina d'anni, prevede un ulteriore significativo aumento di energia fino a (10 + 20) TeV.

Pur ritenendo scontato l'uso di magneti superconduttori, i progettisti devono compiere una scelta iniziale: basarsi sulle tecnologie già provate, come l' NbTi a 4,5 K, ed incre-

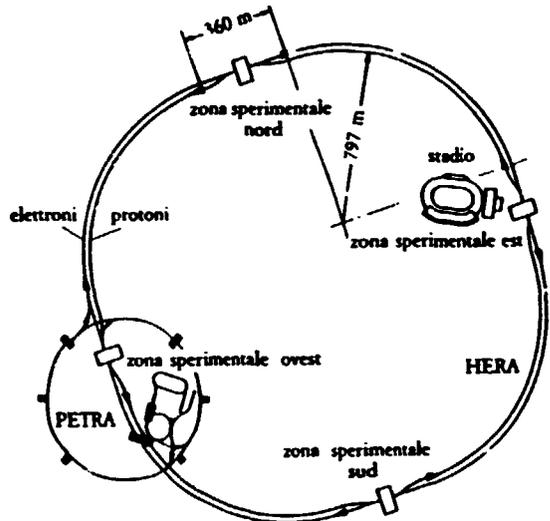


Fig. 7: Schema di HERA⁽²¹⁾

mentare le dimensioni degli acceleratori oppure prevedere campi magnetici nettamente più alti, confidando nello sviluppo dei materiali A15 (Nb_3Sn , Nb_3Al) o nella realizzazione di magneti in NbTi operanti a 1,8 K con raffreddamento ad elio superfluido.

L'LHC (Large Hadron Collider), proposto dal CERN, punta sui campi magnetici elevati per poter utilizzare il tunnel già esistente del LEP, mentre il gigantesco Superconducting Super Collider, recentemente approvato negli Stati Uniti, prevede un aumento di dimensioni.

L'LHC, una macchina per collisioni protone-protone, vuole raggiungere negli esperimenti energie di (6,5 + 8,5) TeV.

Ciò vuol dire che i dipoli dovranno produrre un campo compreso tra 8 e 10 T. Per aggiungere pepe ad un piatto già piccante, le densità di corrente nell'avvolgimento sono molto alte a causa del poco spazio disponibile e l'omogeneità di campo impone filamenti superconduttori del diametro di pochi micrometri.

Il CERN ha lanciato un programma di ricerca e sviluppo per i conduttori e magneti dell'LHC, al quale ha chiamato a collaborare tutti i laboratori e le industrie attivi in Europa nel campo.

In una prima fase di studio l'opzione d'uso di materiali A15 e l'alternativa dell' NbTi a 1,8 K verranno sviluppate in parallelo.

Un'idea del cambiamento di scala, e notiamo che LHC è la macchina «compatta», si può avere tenendo presente che circa 1200 tonnellate di conduttore composito (Cu + superconduttore) saranno necessarie per costruire i 1860 dipoli (10 T al centro a lunghezza 10 m), i 550 quadrupoli da 2,7 m e i

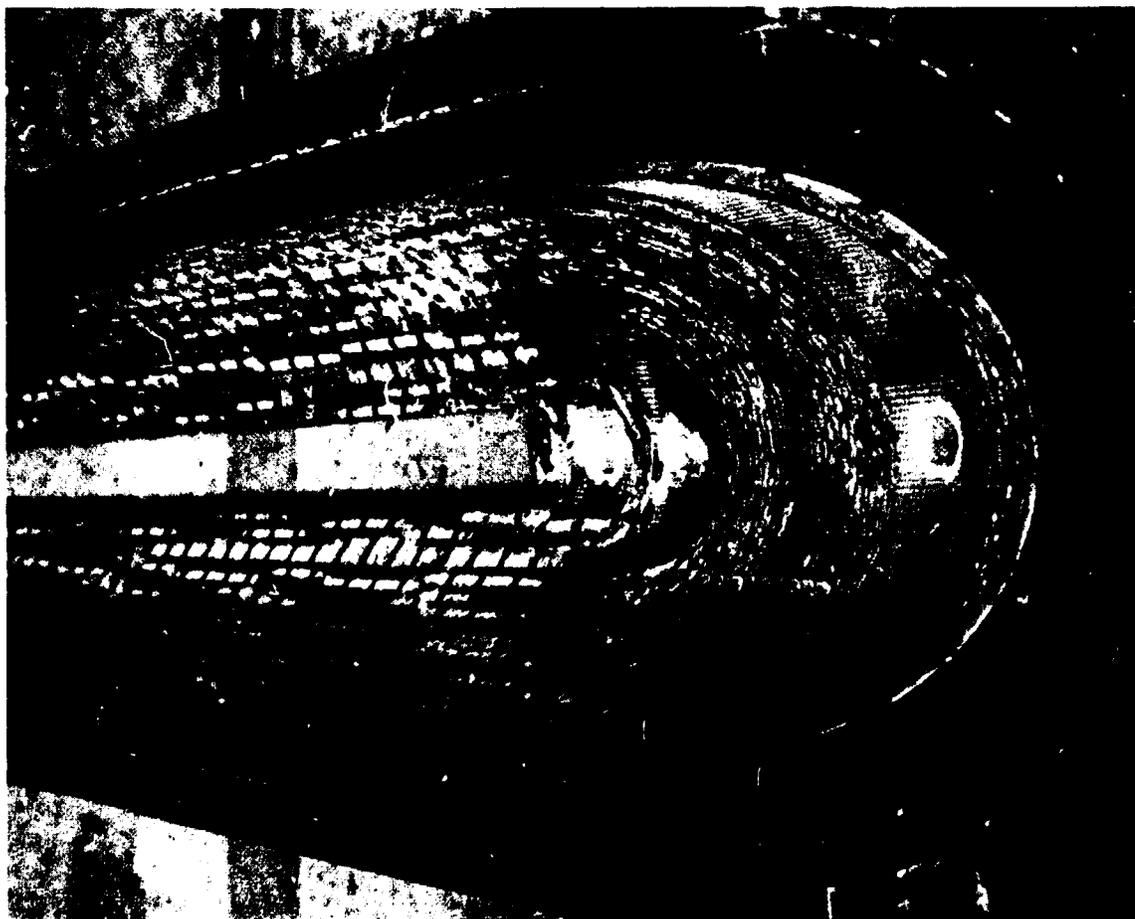


Fig. 8: Magnete dipolare costruito dall'Ansaldo per HERA con il conduttore mostrato in Fig. 5

circa 700 tra sestupoli e dipoli di correzione da 1 m⁽²²⁾. A titolo di paragone è utile ricordare che l'attuale mercato dell'NbTi non supera le 50 tonnellate per anno!

Naturalmente anche le specifiche di refrigerazione sono elevatissime: è necessario poter rimuovere circa 120 kW a 4.5 K.

Tutti gli elementi forniti chiariscono senza ombra di dubbio la complessità dell'impresa LHC, per realizzare la quale sarà necessario un lungo ed accurato lavoro di ricerca e sviluppo con un efficace coordinamento della cooperazione internazionale.

Alla fine del 1986 il governo americano ha dato la prima approvazione al progetto del Superconducting Super Collider (SSC), che dovrebbe essere completato entro il 1996.

Lo SSC prevede due fasci di protoni da 20 TeV, circolanti in cammini separati e portati in collisione in zone rettilinee dell'acceleratore.

Il progetto è basato su dipoli da 6.6 T e ciò comporta una macchina con una circonferenza di quasi 100 km⁽²³⁾!

I dipoli avranno una lunghezza di 16 m e dovranno soddisfare ai noti stringenti requisiti sulla qualità del campo prodotto.

La scelta americana si basa quindi sul più tradizionale NbTi, utilizzato a 4.5 K.

Bisogna sottolineare che nel progetto del Tevatron si era usato dell'NbTi capace di 1800 A/mm² a 5 T e 4.2 K. Per SSC, invece, si è dapprima utilizzato come dato di progetto, nel 1984, 2400 A/mm² che, nel rapporto sul progetto concettuale, è stato aumentato fino a 2750 A/mm². In realtà i risultati sperimentali hanno superato ampiamente quelle specifiche, poiché alla metà del 1986 si erano prodotti campioni di NbTi capaci di 3400 A/mm² (vedi fig. 1).

Questo risultato non è casuale, ma è stato il frutto di un intenso lavoro di ricerca e sviluppo, stimolato dal progetto SSC, che ha permesso di ottenere questi traguardi attraverso miglioramenti sia nei materiali che nelle tecniche di produzione dei conduttori multifilamentari⁽²⁴⁻²⁶⁾.

5.2. - Magneti per rivelatori

Gli esperimenti con macchine nelle quali avvengono collisioni di fasci di particelle sono necessariamente limitati ai pochi punti

d'intersezione dei fasci stessi. Ciò ha comportato una tendenza a concepire rivelatori molto grandi e simili nella configurazione. In questo caso i campi magnetici richiesti non sono particolarmente elevati ($2 \div 3$) T e la scelta tra soluzioni convenzionali o con magneti superconduttori è fondamentalmente basata su criteri di fattibilità scientifica, tecnica e sui costi.

Magneti di tipo solenoidale, per la simmetria che presentano, sono l'ideale per l'uso nei rivelatori, e consentono inoltre di ridurre anche i problemi legati agli sforzi elettromagnetici.

Limitandoci a magneti da installare all'interno dei calorimetri, essi devono avere uno spessore di radiazione il più possibile ridotto e saranno quindi grandi solenoidi a pareti sottili. Al momento attuale c'è una suddivisione equilibrata fra soluzioni convenzionali e superconduttrici. Per quanto riguarda queste ultime esistono 5 magneti solenoidali già costruiti o in via di completamento, come CDF⁽²⁷⁾, TOPAZ⁽²⁸⁾, VENUS⁽²⁹⁾, DELPHI⁽³⁰⁾, ALEPH⁽³¹⁾. Tra gli altri programmi citiamo il magnete del rivelatore ZEUS⁽³²⁾ per HERA, che rappresenterà un contributo totalmente italiano in quanto a progettazione (INFN + ENEA), fabbricazione del conduttore (LMI) e costruzione del magnete (Ansaldo).

Per dare un'idea delle dimensioni, i magneti più grandi, come DELPHI ed ALEPH, hanno un diametro di 5 m e lunghezza di circa 7 m.

Caratteristica comune a tutti i magneti citati è l'uso di cavi a base di NbTi, in cui la massima parte del metallo di stabilizzazione non è l'usuale Cu ma Al di elevata purezza, allo scopo di ridurre lo spessore di radiazione. Il legame metallurgico tra cavo superconduttore e matrice di Al è di primaria importanza per garantire buone proprietà elettriche, termiche e meccaniche del conduttore. Esso viene ottenuto utilizzando processi di costruzione a temperature opportune.

Oggi industrie in diversi paesi europei, inclusa l'Italia, e in Giappone sono in grado di garantire l'affidabilità di conduttori stabilizzati in Al.

5.3. - Magneti per fusione

La fusione termonucleare controllata rappresenta una possibile futura sorgente di energia particolarmente interessante poiché sembra offrire una combinazione ottimale di bassi costi, universale disponibilità di combustibile e ridotti problemi d'impatto ambientale.

Macchine sperimentali del tipo Tokamak,

basate sul confinamento magnetico del plasma, rappresentano oggi l'approccio più perseguito e sviluppato verso i futuri reattori a fusione. Questi ultimi avranno un sistema di magneti toroidali capace di produrre campi dell'ordine di ($5 \div 6$) T sul plasma, con volumi magnetici di centinaia di metri cubi.

L'uso di magneti tradizionali, oltre a produrre notevoli aumenti di dimensioni, richiederebbe anche una tale quantità di energia per il suo funzionamento da inficiare l'economicità del reattore a fusione.

I magneti superconduttori per questa applicazione hanno delle caratteristiche del tutto peculiari, legate al loro uso, come

- elevata energia magnetica,
- peso notevole,
- alte correnti di lavoro,
- tensioni elevate che possono generarsi tra le spire,
- sforzi elevati sui conduttori,
- riscaldamento dovuto ad irraggiamento di particelle ed alla presenza di campi magnetici variabili.

L'insieme di questi requisiti non è comune ad altre applicazioni, e si è quindi reso necessario un lavoro mirato di ricerca e sviluppo, tutt'ora in corso, per avvicinarsi alle specifiche richieste.

Nell'ipotesi di fattibilità scientifica del confinamento del plasma, le previsioni basate sull'attuale impegno di ricerca e di finanziamento, collocano tra ($30 \div 40$) anni il primo reattore sperimentale.

L'attività internazionale di sviluppo dei magneti superconduttori per la fusione è bene esemplificata dai progetti in corso di prova o di costruzione.

Un programma di collaborazione internazionale, sotto gli auspici dell'International Energy Agency, è il Large Coil Test Facility, nato proprio allo scopo d'investigare problemi progettuali e costruttivi di magneti superconduttori per un reattore a fusione del tipo Tokamak.

Sono stati costruiti ed assemblati in una struttura toroidale 6 magneti, tre dei quali rappresentano il contributo degli Stati Uniti ed uno ciascuno quelli di Giappone, Svizzera e Comunità Europea. Essi hanno una forma a D, per questioni di sforzi, sono alti circa 5 m, pesano 40 tonnellate ed hanno un campo magnetico massimo sul superconduttore pari a 8 T. Le dimensioni sono circa la metà di quelle previste per macchine attualmente in progettazione, come NET e FER, alle quali accenneremo in seguito.

La varietà di soluzioni adottate nei diversi

Tabella I. - Alcune caratteristiche dei Tokamak superconduttori in costruzione.

	TORE SUPRA	T15	TRIAM-IM
Raggio minore (m)	2.25	2.43	0.85
Corrente di plasma (MA)	1.7	1.4-2.3	0.5
Durata del plasma (s)	~30	5	~1
<i>Magneti toroidali</i>			
Superconduttore	NbTi	Nb ₃ Sn circolazione forzata	Nb ₃ Sn immersione
Numero di magneti	18	24	16
Raggio esterno (m)	2.8	~3	1 (forma a D)
Massimo campo toroidale (T)	9	6.5-9.3	11
Corrente (kA)	1.4	3.9-5.6	6.2
Energia magnetica (MJ)	600	384-792	76
Refrigeratore	1 kW a 4.5 K +0.3 kW a 1.7 K	3.6 kW a 4.5 K	0.46 kW a 4.5 K

magneti⁽³³⁻³⁶⁾ rende questo impianto molto utile per i dati di progetto e le informazioni relative alle tecniche di costruzione da applicare ai sistemi di magneti per la prossima generazione di macchine per la fusione. Sono attualmente in corso le prove, secondo una sequenza studiata per fornire il massimo di dati sperimentali, ma in via preliminare si può affermare che tutti i magneti hanno raggiunto con successo le specifiche.

Sempre negli Stati Uniti, al Lawrence National Laboratory, è situata la Mirror Fusion Test Facility (MFTF).

Si tratta di una macchina che utilizza il confinamento magnetico del plasma, ma in una struttura lineare con specchi magnetici diversa da quella toroidale di una macchina del tipo Tokamak. La MFTF è molto importante dal punto di vista dei magneti superconduttori, poiché è dotata del più grande sistema oggi esistente al mondo⁽³⁷⁾. I magneti sono 24, tra cui 12 solenoidi del diametro di 5 m e due coppie di enormi magneti del tipo Ying-Yang. La maggior parte utilizza conduttori a base di NbTi, ma per due inserti, che raggiungono il campo di 12.7 T su un diametro di 0.36 m, è stato usato il Nb₃Sn.

Un'idea delle dimensioni di questo impianto si ha dal peso totale del sistema magnetico, che è di 1350 tonnellate. Anche l'energia di 3 GJ è la più elevata fino ad oggi generata da un sistema di magneti superconduttori.

Nel febbraio del 1986 il sistema è stato alimentato con successo e si può dire che esso rappresenta un confortante supporto all'utilizzazione di magneti superconduttori in un reattore a fusione.

Rimanendo nell'ambito di macchine in costruzione è opportuno descrivere brevemente TORE SUPRA, T-15 e TRIAM-IM. TORE SUPRA è un Tokamak che utilizza NbTi raffreddato ad 1.8 K, mediante immersione in elio liquido superfluido, per permettere al conduttore di raggiungere affidabilmente 9 T⁽³⁸⁾.

Il T-15 russo ha dimensioni simili a quelle di TORE SUPRA e, per quanto riguarda l'aspetto superconduttori, è interessante poiché utilizzerà Nb₃Sn e un sistema di raffreddamento con circolazione forzata di elio liquido a 4.5 K, con il quale si vogliono raggiungere campi di picco di 9.3 T⁽³⁹⁾.

Il TRIAM-IM è una macchina più piccola delle precedenti, il cui sistema magnetico è basato sull'Nb₃Sn raffreddato a 4.5 K per immersione, che punta a campi di picco dell'ordine di 11 T.

In tabella I sono riportate le principali caratteristiche di queste tre macchine. Si tratta, per quanto attiene allo sviluppo dei superconduttori, di sistemi che forniranno un apprezzabile contributo d'informazioni complementari sui molti aspetti progettuali, costruttivi e di funzionamento di sistemi superconduttori per reattori a fusione.

Per quanto riguarda i programmi futuri sulla fusione, la situazione più definita si ha in Europa e in Giappone, dove sono rispettivamente previsti intorno al 2000 il Next European Torus (NET) ed il Fusion Experimental Reactor (FER) con obiettivi simili.

Il NET, che nella strategia europea dovrebbe rappresentare l'ultimo passo intermedio prima di un reattore dimostrativo, si pone ambiziosi traguardi sia di fisica che tecnologici. La macchina infatti, utilizzando una miscela di deuterio e trizio, dovrebbe realizzare l'ignizione controllata con impulsi riproducibili e di lunga durata (500 ÷ 1000 s).

Gli obiettivi tecnologici sono l'utilizzazione di progetti e soluzioni estrapolabili al reattore e il potere effettuare prove di componenti in condizioni operative. La fig. 9 mostra una vista schematica complessiva del NET⁽⁴⁰⁾, mentre la tabella II ne elenca i dati fondamentali.

Sia la macchina europea che quella giapponese prevedono sistemi magnetici toroidali superconduttori che per dimensioni, campi di picco e sforzi rappresentano una realizzazione

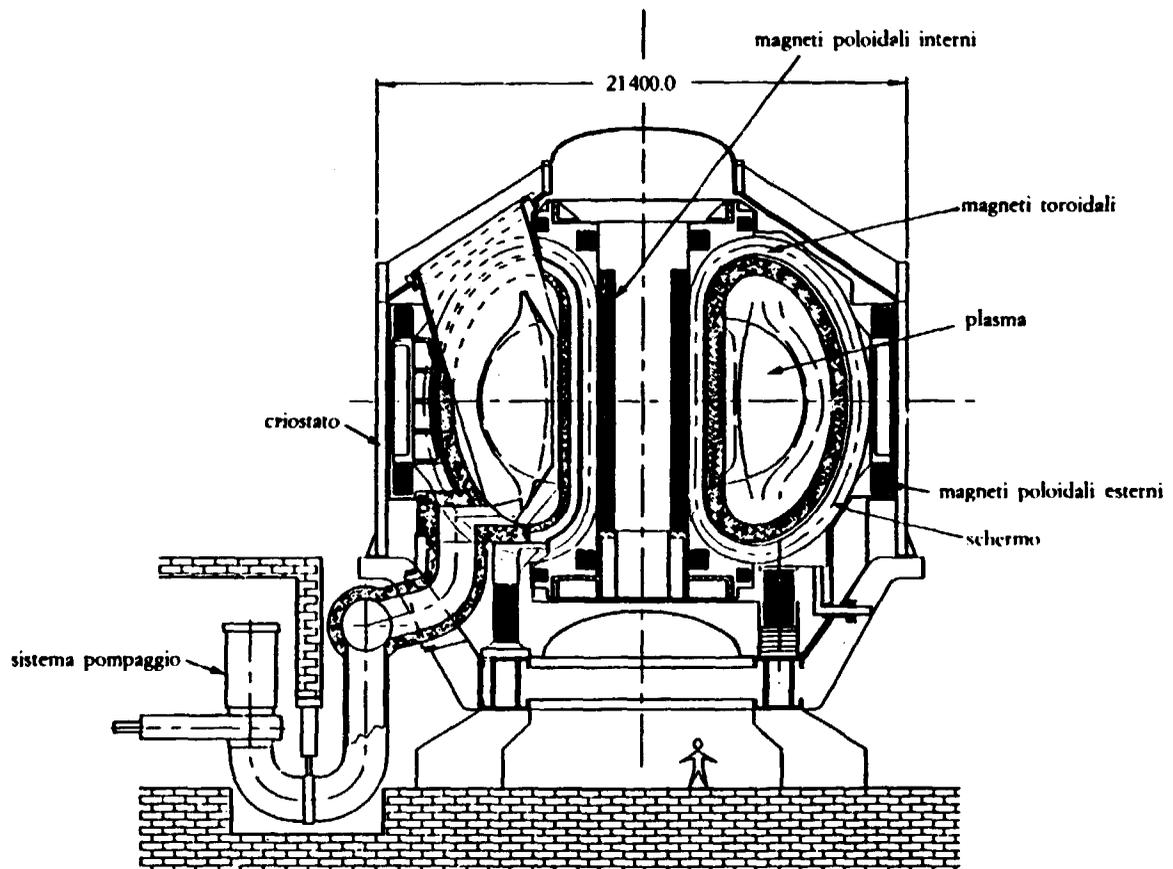


Fig. 9: Vista schematica del NET

Tabella II. - Parametri indicativi del NET (versione 22 B).

Raggio maggiore (m)	5.18
Campo dell'asse (T)	5.0
Corrente di plasma (MA)	10.77
Minima durata reazione (s)	300
Numero magneti toroidali	16
Massimo campo toroidale	11.0
Energia magnetica totale (GJ)	24.8

Magneti toroidali

Superconduttore	Nb ₃ Sn, con circolazione forzata di elio a 4.5 K	
Ingombri esterni (forma a D)	verticale (m)	12.38
	orizzontale (m)	6.07
Sezione avvolgimento (m ²)		0.60 × 0.64
Corrente di lavoro (kA)		17
Densità di corrente media nell'avvolgimento (MA/m ²)		21

ne di notevole complessità e contenuto tecnologico. L'attuale stato dell'arte dei magneti superconduttori per la fusione, con i rapidi sviluppi specifici in questo campo, ha raggiunto un livello tale da giustificare ottimismo sulla possibilità di realizzare questi grandi sistemi magnetici. L'attivo programma di ricerca e sviluppo coordinato dalla Comunità Europea vede la partecipazione italiana attra-

verso il Laboratorio Superconduttività del Centro Ricerche Energia dell'ENEA di Frascati, nel quale vengono svolte attività di sviluppo di materiali e cavi superconduttori ad alto campo e vengono studiati aspetti progettuali e costruttivi dei magneti toroidali del NET.

5.4. - Magnete per tomografia mediante la risonanza magnetica nucleare

Come è noto, si può avere risonanza magnetica nucleare quando una sostanza chimica composta da nuclei di rapporto giromagnetico γ è immersa in un campo magnetico uniforme B_0 e sottoposta a radiazione elettromagnetica di frequenza ν_0 . La risonanza avverrà quando $2\pi\nu_0 = \gamma B_0$.

Gli spettri di risonanza permettono di estrarre molte informazioni sul numero di nuclei coinvolti, l'ambiente chimico nel quale si trovano, le condizioni dinamiche della sostanza esaminata, ecc.

Sulla base di questi principi è stata sviluppata la tomografia a risonanza magnetica nu-

cleare (NMR), basata su una misura della densità di protoni in funzione delle coordinate. Essa consente di ottenere immagini dettagliate di qualità paragonabile ed in taluni casi superiore a quella di una tomografia assiale computerizzata (TAC).

Senza entrare in dettagli che esulano dal contesto di questo articolo, conviene però accennare brevemente ai vantaggi che la tomografia NMR presenta. Essa infatti consente⁽⁴¹⁾ alta risoluzione, alto contrasto, possibilità di distinguere tessuti. Inoltre le ossa non interferiscono, le immagini sono tridimensionali (possibilità di esame su molti piani), non sono necessari agenti di contrasto, si possono ottenere informazioni chimiche ed infine non vengono usate radiazioni ionizzanti.

Questa tecnica va sempre più diffondendosi nella diagnostica clinica ed è stata già utilizzata per esami su cuore, cervello, muscoli, ossa, tumori, dinamica del flusso ematico, ecc.

È questo un importante campo di utilizzazione dei superconduttori, poiché rappresenta la prima applicazione di larga scala della superconduttività in ambiente non esperto.

I requisiti tipici di un magnete per indagini sull'intero corpo (avvolgimento di tipo solenoideale con bobine di correzione) sono i seguenti:

- campi in DC moderati (0.15 ÷ 2.0) T;
- alta precisione di campo magnetico: 0.1 p.p.m. su una sfera del diametro di 100 mm, 20 p.p.m. su una sfera del diametro di 500 mm;
- notevole volume di campo ($\approx 0.1 \text{ m}^3$);
- buona stabilità temporale ($\approx 0.1 \text{ p.p.m./ora}$).

Queste caratteristiche sono in linea di principio ottenibili anche con sistemi resistivi o a magneti permanenti. Per i primi però le potenze dissipate ed i conseguenti necessari sistemi di raffreddamento rappresentano un notevole inconveniente, mentre con magneti permanenti è difficile realizzare la stessa qualità di campo ed i materiali ad alta densità di energia sono costosi.

I sistemi a superconduttori offrono i vantaggi di un miglior posizionamento dei conduttori (migliore qualità di campo) e permettono di ottenere campi più elevati, consentendo così anche ricerche di spettroscopia *in vivo*. La necessità di avere elevata qualità di campo ha portato a sviluppare conduttori multifilamentari nei quali la posizione e distribuzione dei filamenti devono essere definite e controllate con tolleranze strettissime.

Altro importante elemento, anzi il fondamentale per gli approcci industriali, è quello

economico, poiché si stima che per campi magnetici superiori a (0.3 ÷ 0.4) T il sistema a superconduttori sia economicamente favorevole rispetto ai suoi competitori.

La rapida espansione di apparati NMR è testimoniata dal fatto che attualmente la quantità di cavi in NbTi destinati a tale uso è largamente superiore alla somma di tutte le altre applicazioni raggiungendo l'80% della produzione totale.

Notevole è anche la pressione sull'industria criogenica per sviluppare nuove tecniche di refrigerazione con l'obiettivo di migliorare l'affidabilità e ridurre i costi del sistema criogenico connesso all'impianto NMR.

5.5. - Separazione magnetica dei minerali

Questo metodo è già usato industrialmente per estrarre da minerali in polvere sostanze contenute in mezzi di suscettività magnetica diversa. La forza magnetica che agisce sulle particelle del materiale da separare è una funzione lineare dell'intensità di campo magnetico e del suo gradiente⁽⁴²⁾. Nelle configurazioni dette ad alto gradiente quest'ultimo viene ottenuto ponendo fibre ferromagnetiche in un campo costante. Ciò consente elevati gradienti ma limitata estensione spaziale della forza magnetica, e le sostanze da separare vengono catturate alla superficie delle fibre stesse⁽⁴³⁾.

La configurazione detta a gradiente aperto produce forze molto più modeste ma che agiscono su volumi molto maggiori; in tal caso la separazione avviene per deflessione di particelle e non per cattura⁽⁴⁴⁾.

Poiché le analisi di capacità produttiva di tali impianti indicano chiaramente i vantaggi degli alti campi magnetici, è abbastanza strano notare come i magneti superconduttori non abbiano finora avuto impatti commerciali pratici in questo campo.

Prototipi di sistemi a magneti superconduttori sono stati realizzati in ambedue le configurazioni ed hanno chiaramente mostrato le loro potenzialità^(44,45).

L'ostacolo principale è probabilmente dovuto a remore di natura psicologica, per l'uso di tecnologie ritenute sofisticate in ambienti industriali ostili.

L'efficacia, robustezza e affidabilità dei sistemi convenzionali ha quindi finora avuto il sopravvento, nonostante gli alti costi d'investimento e di gestione di tali impianti.

È probabile che gli sviluppi di criogenia associati con i sistemi per la tomografia NMR possano avere una benefica ricaduta anche in questo campo.

5.6. - Altre applicazioni industriali

In questo paragrafo accenneremo in modo abbastanza succinto alle applicazioni di magneti superconduttori alla produzione di energia elettrica per conversione magnetoidrodinamica (MHD), al sostentamento magnetico dei veicoli ed infine alla possibile utilizzazione di enormi magneti per l'accumulo di energia.

Il sistema MHD (vedi fig. 10) usa i gas prodotti in un qualsiasi processo di combustione per realizzare una conversione diretta in energia elettrica. I gas di combustione, che si trovano ad alta temperatura, vengono drogati con sostanze facilmente ionizzabili e fatti passare in un campo magnetico trasverso che deflette le particelle cariche su opportuni elettrodi.

Questo sistema dovrebbe garantire un'efficienza di conversione più elevata rispetto ai sistemi convenzionali e quindi potrebbe dare un contributo in termini di risparmio energetico. Anche in questo caso, come per il reattore a fusione, i magneti superconduttori sono fondamentali per permettere ad un sistema MHD di produrre realmente energia.

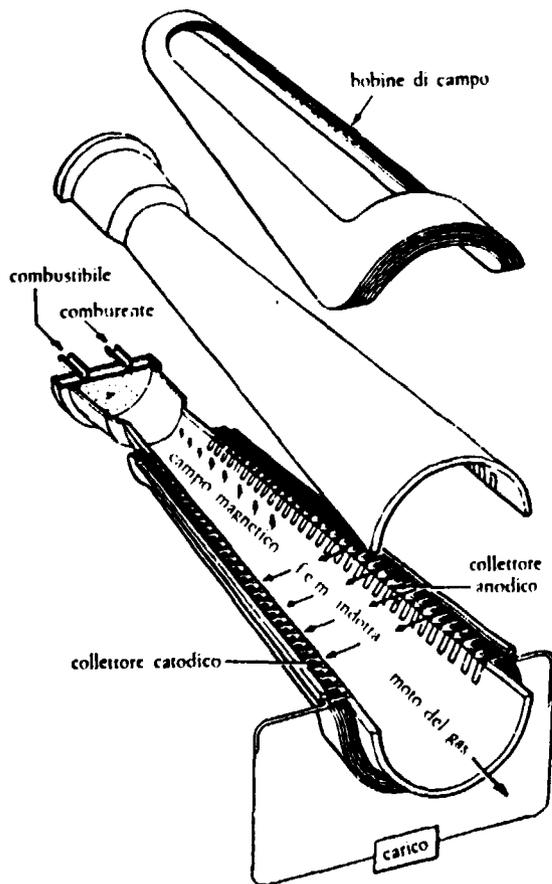


Fig. 10: Schema di un canale MHD

Per l'MHD sono necessari magneti dipolari del tipo di quelli utilizzati negli acceleratori ma con apertura molto più grande, dell'ordine di qualche metro, per alloggiare il condotto nel quale fluiscono i gas.

Indicativamente, un magnete dipolare per un impianto da 1000 MW elettrici dovrebbe generare un campo di 6 T sull'asse di un cilindro del diametro di 4 m e lungo 16 m. L'energia magnetica sarebbe di 10 GJ ed il peso dell'avvolgimento con conduttori di NbTi supererebbe le 250 tonnellate⁽⁴⁶⁾.

Modelli di magneti in scala 1:6 sono stati costruiti e provati con successo⁽⁴⁷⁾.

La tecnologia dei conduttori di NbTi è del tutto adeguata per questa applicazione.

Non è oggi chiaro se questo tipo d'impianti per la produzione di energia, del quale si parla da oltre 20 anni, decollerà in maniera decisa in un prossimo futuro.

Il sostentamento magnetico di treni è stato ottenuto utilizzando magneti superconduttori a bordo. Il veicolo muovendosi induce corrente su binari metallici disposti nel terreno e l'interazione tra le correnti indotte ed il campo dei magneti superconduttori genera una forza che, al di sopra di una certa velocità, permette il sostentamento del mezzo.

I treni a levitazione magnetica sono stati proposti per realizzare trasporti di superficie con velocità dell'ordine di 500 km/h. I treni convenzionali hanno infatti il loro limite intorno ai 300 km/h per problemi di allineamento dei binari, di ammortizzatori e di trazione insufficiente per vincere gli attriti al di sopra di tale velocità.

L'alternativa del sostentamento a cuscino d'aria, investigata negli anni passati, è stata poi accantonata per i seri problemi incontrati.

I treni levitati ad alta velocità sono particolarmente studiati in Giappone, con un programma di ricerca delle Ferrovie dello Stato nipponiche⁽⁴⁸⁾. I magneti superconduttori all'NbTi vengono usati per le tre funzioni di sospensione, guida e propulsione. La fig. 11 mostra una sezione schematica del veicolo⁽⁴⁸⁾.

Veicoli di (8 ÷ 10) m di lunghezza e del peso di 10 tonnellate sono stati provati con successo, anche con uomini a bordo. La massima velocità raggiunta con un solo veicolo è stata di 517 km/h. Stime economiche giapponesi indicano che il costo di un sistema di questo tipo è paragonabile a quello del treno superelevato Shinkansen.

Come ultima applicazione, che potrebbe realmente diventare di larga scala, citiamo la proposta di uso di enormi magneti come serbatoi di energia per il livellamento del carico

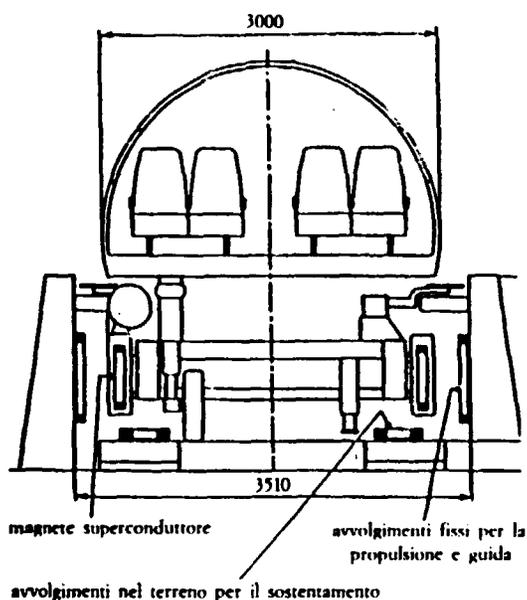


Fig. 11: Sezione di MLU 001, veicolo giapponese a levitazione magnetica⁽⁴⁰⁾. Dimensioni in mm

nelle reti elettriche. Esistono progetti concettuali che prevedono magneti solenoidali del diametro di centinaia di metri, con correnti vicine al milione di ampere ed energie di circa 10^{13} J^(49,50). Tali magneti verrebbero costruiti direttamente nel sottosuolo, in tunnel scavati nella roccia, che dovrebbero servire anche come criostati e per il contenimento degli sforzi.

Un più recente progetto concettuale giapponese⁽⁵¹⁾ per un sistema da $1.8 \cdot 10^{13}$ J prevede un sistema di tre magneti del diametro di 200 m circa, di altezza dagli 11 ai 18 m, costruiti nel sottosuolo ad oltre 100 m di profondità.

I problemi più seri, attualmente allo studio, sono legati all'estrazione di energia dai magneti, che deve essere ben controllabile e non influenzata dal tipo di carico utilizzato.

La fattibilità tecnica di questi sistemi è accettata e le previsioni pongono intorno al 2000 la loro possibile utilizzazione.

6. APPLICAZIONE PER STRUMENTAZIONE AD ALTA SENSIBILITÀ

Non si può chiudere un discorso sulle applicazioni della superconduttività senza parlare della realizzazione di strumentazione ad altissima sensibilità.

Abbandoniamo quindi il campo delle utilizzazioni di larga scala, per entrare in un argomento di estremo interesse, una classe di applicazioni direttamente correlate con la na-

tura quantistica dei fenomeni associati allo stato superconduttore.

È il caso, ad esempio, dei magnetometri SQUID (Superconducting Quantum Interference Devices) il cui funzionamento è basato su fenomeni d'interferenza quantistica macroscopica (effetto Josephson) in un anello superconduttore interrotto da uno o due «weak link».

Lo SQUID è sensibile al flusso magnetico e fornisce una tensione di uscita linearmente proporzionale ad esso⁽⁵²⁾. Una descrizione non strettamente specialistica sui principi di funzionamento ed applicazioni dei sistemi basati su SQUID è fornita in⁽⁵³⁾.

Per dare un'idea della versatilità d'impieghi di tali sistemi, accenniamo brevemente ad alcune loro utilizzazioni.

SQUID sono stati usati in laboratorio per misure di suscettività magnetica su campioni molto piccoli, per la rivelazione di risonanza magnetica nucleare e per determinare temperature attraverso misure di rumore.

In ambiente non specializzato vi sono state applicazioni per misure magnetotelluriche e di magnetismo delle rocce

Sistemi a SQUID sono stati montati anche su esperimenti di notevoli dimensioni come le antenne gravitazionali e i rivelatori di monopolo magnetico.

Esiste un'altra interessante applicazione, sulla quale spenderò qualche parola in più, ed è l'utilizzazione di strumentazione SQUID alla rivelazione di campi biomagnetici.

Tali campi sono usualmente così deboli, vedi fig. 12, che la strumentazione necessaria può essere realizzata soltanto con magnetometri SQUID.

Per fare un esempio, il biomagnetismo cardiaco, che produce i segnali più elevati, è associato a campi 10^{-6} volte più piccoli di quello terrestre⁽⁵⁴⁾.

Magnetometri SQUID sono stati principalmente utilizzati in indagini cliniche sulla fisiologia cardiaca e cerebrale. Tali studi hanno fornito notevoli contributi nello studio del sistema di conduzione del cuore, nell'analisi delle attività cerebrali sia spontanee che in reazione a stimoli ed infine nella localizzazione spaziale di attività cerebrale patologica. Allo stato attuale i sistemi più avanzati utilizzati nei laboratori contengono un numero limitato di sensori, dell'ordine di $8 \div 10$.

La linea di sviluppo tecnologico dei sistemi di analisi biomagnetica è quella di realizzare apparati multicanale, dotati di $(50 \div 100)$ sensori, con i quali sarà possibile analizzare in contemporanea regioni estese del corpo. Ciò consentirà di studiare correlazioni spaziali di campo e ridurrà il tempo richiesto per le

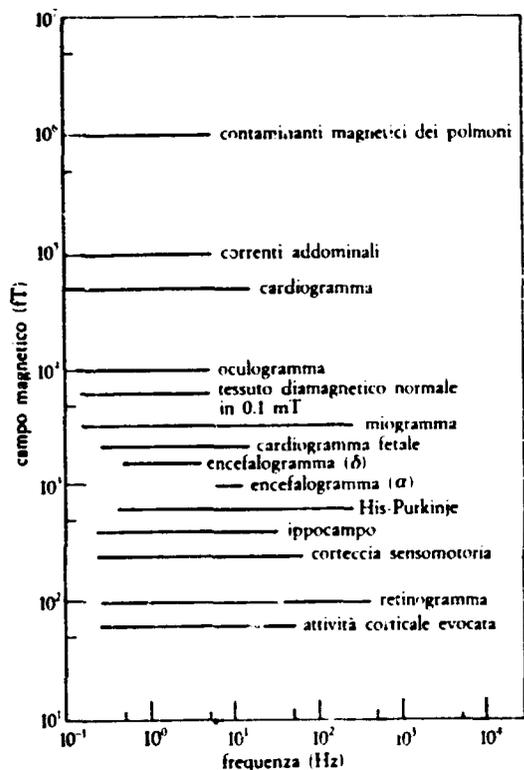


Fig. 12: Ampiezze e frequenze tipiche associate ad alcuni campi biomagnetici ($1\text{T} = 10^{15}\text{T}$) (52)

mappature, che attualmente vengono realizzate muovendo il sensore nell'area da studiare. Sulla base della situazione ed evoluzione attuali è ragionevole pensare che tale obiettivo sarà raggiunto nei prossimi (5 ÷ 10) anni.

Per maggiori dettagli sulle applicazioni biomediche rimandiamo allo specifico lavoro di rassegna di (53).

Concludiamo questo paragrafo citando l'importante contributo dell'effetto Josephson alla determinazione di costanti fisiche fondamentali.

In una giunzione ad effetto Josephson sottoposta ad una radiazione elettromagnetica di frequenza ν_0 , le caratteristiche corrente-tensione mostrano un andamento a gradini. La larghezza ΔV di tali gradini è legata alla frequenza ν_0 dalla relazione

$$\Delta V = \frac{h}{2e} \nu_0,$$

dove e è la carica dell'elettrone ed h la costante di Planck. Si è quindi potuto misurare con elevatissima precisione il rapporto e/h tra due costanti fisiche fondamentali. Queste misure hanno portato ad un riaggiustamento di tutte le costanti fisiche fondamentali (54).

Una volta noto il valore di e/h si sono usa-

te giunzioni ad effetto Josephson per il mantenimento dello standard di tensione. L'effetto Josephson viene infatti utilizzato per confrontare i campioni di tensione esistenti in diversi paesi.

Una trattazione completa ed approfondita degli argomenti citati in questo paragrafo si trova nell'ottimo libro di A. Barone e G. Paternò: *Physics and Applications of the Josephson Effect* (57).

7. NUOVI MATERIALI AD ALTE TEMPERATURE CRITICHE

Durante la stesura di questo articolo ci sono stati sensazionali sviluppi che potrebbero imprimere una clamorosa accelerazione alle applicazioni dei superconduttori. Negli ultimi 15 mesi, infatti, le massime temperature critiche sono state improvvisamente incrementate di ben 4 volte, raggiungendo i 100 K!

Fino a quel momento l'incremento delle temperature critiche aveva mostrato un'evoluzione temporale prevedibile, come indicato in fig. 13 e, nel 1986, la massima temperatura critica, osservata in Nb_3Ge nel 1973 (11), era pari a 23.2 K.

Lo scorso anno Bednorz e Müller, all'IBM di Zurigo, hanno evidenziato la superconduttività in una nuova classe di materiali, gli ossidi metallici, caratterizzati da una struttura di perovskite stratificata analoga a quella del K_2NiF_4 . In particolare il primo materiale di questo tipo nel quale si è osservata la transizione superconduttiva è stato il $\text{La}_{1-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ (58).

Curiosamente, è passato qualche mese prima che la notizia si diffondesse negli ambienti specializzati, anche a causa della pubblicazione del risultato su una rivista dalla diffusione relativamente limitata. Una volta però che il risultato è stato replicato in diversi la-

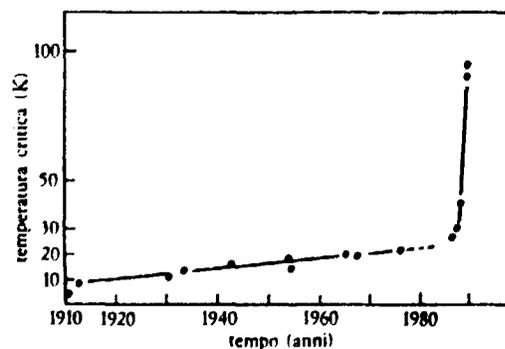


Fig. 13: Il cosiddetto grafico di Matthias con l'andamento temporale delle massime temperature critiche misurate

boratori, si è scatenata una frenetica attività su questo tipo di materiali. La sostituzione del La con Y ha portato la temperatura critica a ben 95 K⁽³⁹⁾.

A ciò si deve aggiungere che anche i campi critici di questi materiali sembrano molto elevati poiché dalle stime finora effettuate si hanno indicazioni di valori di gran lunga superiori ai (50 ÷ 100) T⁽³⁴⁾.

La grande novità è la possibilità di usare l'azoto liquido, che bolle a 77 K, invece dell'elio a 4.2 K. Ciò significa una semplificazione enorme ed una drastica riduzione dei costi di refrigerazione. L'azoto, al contrario dell'elio, è reperibile in natura in quantità illimitata, ha un calore latente di evaporazione molto più elevato e consente di realizzare i criostati in modo molto più immediato.

È per questa ragione che molte applicazioni della superconduttività, già previste in passato e confermate da esperimenti ma non decollate per motivi puramente economici, potrebbero essere riproposte ora con ben altri presupposti.

Questi ragionamenti sono ovviamente validi per tutte le applicazioni delle quali abbiamo parlato in precedenza. Per completezza conviene accennare ad altre possibilità che per ragioni di brevità non erano state indicate. È il caso dei cavi per trasmissione di potenza elettrica in continua a bassa tensione, per i quali la fattibilità è già stata dimostrata con i materiali tradizionali ma che sono stati scartati per le complicazioni criogeniche e la non economicità.

Un discorso analogo è fattibile anche per le macchine elettriche in continua, come motori e generatori omopolari.

Potrebbero inoltre tornare alla ribalta anche applicazioni ai calcolatori, per renderli più compatti e veloci di quelli attuali.

Tenendo presente che, anche per le applicazioni più sviluppate già al momento attuale, il passaggio dall'elio liquido all'azoto liquido darebbe uno straordinario impulso, si può ben capire che, come è stato detto, si potreb-

be essere alla soglia di una rivoluzione tecnologica di enorme portata.

È necessario però sottolineare che gli ossidi superconduttori sono ancora ben lontani da uno stadio di sviluppo che permetta la loro utilizzazione per applicazioni pratiche. Inoltre le densità critiche di corrente misurate a 77 K in assenza di campo magnetico (≈ 10 A/mm²) sono molto più basse di quelle ottenute nei materiali tradizionali a 4.2 K, dove è usuale avere 10⁴ A/mm² o più. Recenti realizzazioni all'IBM Watson Center, negli USA, di film epitassiali del composto YBa₂Cu₃O_{7-x}, nei quali si sono misurate densità di corrente superiori ai 10³ A/mm² a 77 K e di 10⁴ A/mm² a 4.2 K, hanno mostrato che è possibile e prevedibile migliorare le proprietà di trasporto di tali materiali.

Ricordando che dalla scoperta dell'*Nb-Ti* e *Nb₃Sn* alla disponibilità di conduttori multifilamentari di buona qualità sono passati circa 20 anni e tenendo presente l'enorme interesse di queste applicazioni, si può pensare che un periodo di ricerca e sviluppo di (5 ÷ 10) anni dovrebbe essere sufficiente per portare all'utilizzazione pratica delle ceramiche superconduttrici.

A parte l'interesse applicativo, questi materiali, che venivano precedentemente studiati perché con piccole variazioni di composizione si poteva passare da un comportamento tipico di un isolante ad una conduzione metallica, hanno stimolato un'enorme attività di ricerca fondamentale, poiché, ad esempio, non è ancor oggi chiaro se lo stato superconduttore sia provocato dal classico meccanismo di accoppiamento di elettroni tramite fononi.

Per concludere si può dire che non è da escludere che, una volta chiariti i meccanismi che provocano la superconduttività a temperature così elevate, non sia possibile mirare con cognizione di causa a composti superconduttori a temperature ancora più elevate. Oggi, la superconduttività a temperatura ambiente comincia a non essere più considerata un'utopia irrealizzabile.

Bibliografia

- (1) B. MÜHLISCHLEGEL: *Z Phys.* **155**, 313 (1959).
- (2) L. P. GOR'KOV: *Sov. Phys. JETP*, **9**, 1364 (1960); **10**, 998 (1960).
- (3) A. A. ABRIKOSOV: *Sov. Phys. JETP*, **5**, 1174 (1957).
- (4) J. B. KIM, C. F. HEMPSTEAD and A. R. STERNAD: *Phys. Rev.*, **139**, 1163 (1965).
- (5) J. BARDEEN, L. N. COOPER and J. R. SCHRIEFFER: *Phys. Rev.*, **108**, 1175 (1957).
- (6) Y. B. KIM, C. F. HEMPSTEAD and A. R. STERNAD: *Phys. Rev.*, **131**, 2846 (1963).
- (7) C. P. BEAN and J. D. LIVINGSTON: *Phys. Rev. Lett.*, **12**, 14 (1964).
- (8) R. G. HAMPSHIRE and M. T. TAYLOR: *J. Phys. F*, **2**, 89 (1972).
- (9) LI CHENGREN and D. C. LARBALESTIER: in pubblicazione su *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-23** (1987).
- (10) D. G. HAWKSWORTH and D. C. LARBALESTIER: *Adv. Cryog. Eng.*, **26**, 479 (1980).
- (11) J. R. GAVALER: *Appl. Phys. Lett.*, **23**, 480 (1973).
- (12) H. HYRABAYASHI: *J. Phys. (Paris)*, **C.1**, 359 (1984).
- (13) J. D. LIVINGSTON: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-14**, 611 (1978).
- (14) E. SPRINGER, M. WILHELM, H. J. WISSE and R. RUPP: *Adv. Cryog. Eng.*, **30**, 747 (1984).
- (15) K. TACHIKAWA, H. SREIN and Y. IJIMA: *J. Appl. Phys.*, **53**, 5354 (1982).
- (16) D. C. LARBALESTIER: *Proceedings of MT-9*, edited by C. MARINUCCI and P. WEYMUTH, Zurich, September 1985, p. 453.
- (17) G. PASZTOR and J. W. ECKIN: *Adv. Cryog. Eng.*, **30**, 787 (1984).
- (18) B. A. ZEITLIN, D. PHILLIPS, K. HELMACHALAM, G. OZERYANOV, J. D. SCUDIERRE, C. KING, D. W. HAZELTON and W. D. MARKIEWICZ: *Proceedings of ICEC 11*, Berlin 1985, p. 705.
- (19) J. R. ORR: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-19**, 195 (1983).
- (20) I. VARBA: *Proceedings of Particle Accelerator Conference* (1981), paper C2.
- (21) S. WOLFF: *Proceedings of MT-9*, edited by C. MARINUCCI and P. WEYMUTH, Zurich, September 1985, p. 62.
- (22) R. PERIN: *ICFA Proceedings of Workshop on Superconducting Magnets and Cryogenics*, Brookhaven National Laboratory, May 1986, p. 25.
- (23) M. TIGNER: *ibidem*, p. 7.
- (24) P. DURUIS, J. MALDY, J. C. RENARD, J. GÖVÉR, H. NIEHART and J. L. SABBIE: *Proc. ICEC 8*, 1980 (IPC Science and Technology Process, London) p. 505.
- (25) D. C. LARBALESTIER: *Proceedings of MT-9*, edited by C. MARINUCCI and P. WEYMUTH, Zurich, September 1985, p. 62.
- (26) D. C. LARBALESTIER: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-21**, 257 (1985).
- (27) H. MINEMURA *et al.*: *Nucl. Instrum. Methods A*, **238**, 18 (1985).
- (28) A. YAMAMOTO *et al.*: *J. Phys. (Paris)*, **C.1**, 337 (1984).
- (29) M. WAKE *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-21**, 493 (1985).
- (30) R. D. APSEY *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-21**, 490 (1985).
- (31) H. DESPORTES *et al.*: *J. Phys. (Paris)*, **C.1**, 341 (1984).
- (32) THE ZEUS COLLABORATION: *The ZEUS Detector Technical Proposal*, marzo 1986, pubblicato da DESY, Amburgo.
- (33) R. K. KIBBE *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-21**, 234 (1985).
- (34) J. A. ZICHY *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-21**, 245 (1985).
- (35) W. HERZ *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-21**, 249 (1985).
- (36) H. TSUII *et al.*: *Cryogenics*, **25**, 539 (1985).
- (37) R. E. TATKO *et al.*: *Proceedings of MT-9*, edited by C. MARINUCCI and P. WEYMUTH, Zurich, September 1985, p. 28.
- (38) R. AYMAR *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-15**, 542 (1979).
- (39) B. KADOMISEV *et al.*: *Proc. of 12th SOFT* (Pergamon Press, London, 1983), p. 208.
- (40) THE NET TEAM: *Status Report on NET*, December 1985, Commission of the European Community, NET Report 51.
- (41) R. RICHARDS: *J. Phys. (Paris)*, **C.1**, 681 (1984).
- (42) H. K. COLLAN, M. A. KOKKALA, T. MEINANDER and O. E. TOIKKA: *Trans. Inst. Min. Metall. C*, **5**, 91 (1982).
- (43) M. R. PARKER: *J. Phys. (Paris)*, **C.1**, 753 (1984).
- (44) J. A. GOOD and K. WHITE: *J. Phys. (Paris)*, **C.1**, 759 (1984).
- (45) Y. YANAGISAWA, T. HASUDA and J. IWASAKI: *J. Phys. (Paris)*, **C.1**, 771 (1984).
- (46) *Open Cycle MHD Power Generation*, edited by J. B. HEYWOOD and G. J. WENZACK (Pergamon Press, London, 1969).
- (47) S. T. WANG *et al.*: *Adv. Cryog. Eng.*, **23**, 17 (1978).
- (48) Y. KYOTANI: *Proceedings of MT-9*, edited by C. MARINUCCI and P. WEYMUTH, Zurich, September 1985, p. 327.
- (49) W. V. HASSENZAHN: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-11**, 482 (1975).
- (50) R. W. BOOM, B. C. HAINSON, G. E. MCINTOSH, H. A. PETERSON and W. C. YOUNG: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-11**, 475 (1975).
- (51) M. MASUDA and T. SHINTOMI: *Proceedings of MT-9*, edited by C. MARINUCCI and P. WEYMUTH, Zurich, September 1985, p. 357.
- (52) G. I. ROMANI, S. J. WILLIAMSON and L. KAUFMAN: *Rev. Sci. Instrum.*, **53**, 1815 (1982).
- (53) J. CLARKE: *Phys. Today*, March 1986, 36 (1986).
- (54) G. I. ROMANI: *Proceedings of MT-9*, edited by C. MARINUCCI and P. WEYMUTH, Zurich, September 1985, p. 236.
- (55) G. I. ROMANI and I. NARICI: *Med. Prog. Technol.*, **11**, 123 (1986).
- (56) B. N. TAYLOR, W. H. PARKER and D. N. LANGENBERG: *Rev. Mod. Phys.*, **41**, 375 (1969).
- (57) A. BARONE and G. PATERNO: *Physics and Applications of the Josephson Effect* (John Wiley and Sons Publishers, New York, N.Y., 1982).
- (58) J. G. BEDNORZ and K. A. MÜLLER: *Z. Phys. B*, **64**, 189 (1986).
- (59) C. W. CHU, P. H. HOR, R. L. MENG, L. GAO, Z. J. HUANG and Y. Q. WANG: *Phys. Rev. Lett.*, **58**, 405 (1987).
- (60) P. CHAUDHARI, R. H. KOCH, R. B. LAIBOWITZ, T. R. MCGUIRE and R. J. GAMBINO: *Phys. Rev. Lett.*, **58**, 2684 (1987).
- (61) M. N. WILSON: *Superconducting Magnets*, Oxford Science Publications (Clarendon Press, Oxford, 1983).

**Edito dall'ENEA, Direzione Centrale Relazioni.
Viale Regina Margherita, 125 - Roma
Finito di stampare in settembre 1988**

**Fotoriproduzione e stampa
a cura della «Arti Grafiche S. Marcello»
Viale Regina Margherita, 176 - Roma**

Questo fascicolo è stato stampato su carta riciclata