

Parliamo dei

# SUPERCONDUTTORI

PAOLO LOMBARDI

Il trasporto della energia elettrica è oggi affidato ai metalli cosiddetti "conduttori" perché capaci di permettere attraverso ad essi il passaggio della corrente elettrica. È stato sempre didatticamente comodo paragonare il fenomeno del passaggio attraverso a un conduttore della corrente elettrica, cioè di una energia che non si vede, al passaggio di un liquido attraverso a un tubo; la differenza di livello tra due recipienti che sono collegati da un tubo (il conduttore) rappresenta la differenza di potenziale; la quantità di liquido che passa nell'unità di tempo (la portata) rappresenta la intensità della corrente (Ampère).

La corrente elettrica è trasportata attraverso un filo conduttore grazie alla attività o concorso di alcuni elettroni, disponibili nei metalli, che appartengono alla cosiddetta "banda di conduzione", capaci di correre attraverso il metallo perché liberi dall'impegno di posizione intorno a nuclei.

Sono pertanto conduttori, secondo una certa graduatoria, quei metalli che dispongono di tali elettroni in quantità diverse; sono non conduttori quei materiali che mancano di elettroni di conduzione.

L'argento è il miglior conduttore, seguito dal rame e dall'alluminio. Nel concetto di conducibilità si deve tener presente che gli elettroni disponibili di conduzione trovano continui ostacoli nella loro corsa con urti e quindi con cessione di energia nel loro passaggio attraverso i miliardi di ioni del corpo metallico. Ciò giustifica i fenomeni di riscaldamento di un conduttore per il passaggio della corrente, come anche la diminuzione della conducibilità del conduttore all'aumentare della temperatura, che provoca maggiori vibrazioni degli elementi del reticolo e rende più probabili e frequenti gli urti degli elettroni di conduzione, rallentando la loro corsa.

È pertanto intuitiva la considerazione che un aumento di tempera-

tura diminuisce la conducibilità di un conduttore, mentre una diminuzione della temperatura la aumenta.

Una scoperta del Kamerlingh Onnes nell'anno 1911 ha aperto problemi completamente nuovi e impensati, con previsioni di applicazioni straordinarie e rivoluzionarie per il futuro.

Alcuni metalli che si comportano come "non conduttori" a temperatura ordinaria, portati a temperature estremamente basse, ad esempio a meno 270-260°C (si ricorda che la temperatura assoluta, sotto la quale non è possibile scendere è di 273°C sottozero) diventano improvvisamente conduttori eccezionali: essi non presentano più resistenza al passaggio della corrente e hanno, come si suol dire, "una conducibilità infinita".

Per dare un esempio: un filo di rame può portare a temperatura ordinaria circa 1,5A/mm<sup>2</sup> di corrente; un superconduttore, ad es. niobio-titanio, può portare nelle dovute condizioni di temperatura, oltre 1.500 A/mm<sup>2</sup>; un superconduttore potrà pertanto essere realizzato, a parità di prestazioni, con una sezione 1.000 volte inferiore!

La scoperta della superconduttività è troppo recente perché il fenomeno possa essere già chiarito da una esatta e definitiva interpretazione, capace di soddisfare tutte le espressioni del fenomeno. Teorie attendibili molto valide sono basate sulla corsa di coppie di elettroni anziché singoli, l'uno dei quali permette reciprocamente all'altro di correre senza perdita di energia come facesse da battistrada; praticamente l'energia persa da un elettrone per urti è recuperata dall'altro, così che la somma delle energie della coppia rimane costante.

La teoria del fenomeno è complessa e affascinante, ma esula dalla descrizione soprattutto pratica che ci siamo proposta.

Possiamo però intuire che vi è su-

perconduttività quando è offerta al metallo la possibilità di organizzarsi a coppie di elettroni e scompare la superconduttività quando si escludono le condizioni che permettono questo accoppiamento.

La lega Niobio-Titanio nel rapporto in peso di circa 1:1 riesce a disporsi nelle condizioni di superconduttività quando è portata a temperature inferiori a 8° Kelvin (0°K = -273°C). Se la temperatura si eleva al disopra di 8°K scompaiono le "coppie di elettroni" e il superconduttore perde la sua caratteristica, cioè come suole dirsi "transisce", passando dallo stato di superconduttore a normale cattivo conduttore.

Insieme alla temperatura vi è un altro fattore che fa transire il superconduttore: la potenza del campo magnetico dal quale è investito, campo che può provenire dall'estero o che è provocato per autoinduzione dal superconduttore stesso, attraversato dalla corrente.

I parametri che classificano i superconduttori, cioè ne definiscono le caratteristiche e le possibili prestazioni sono:

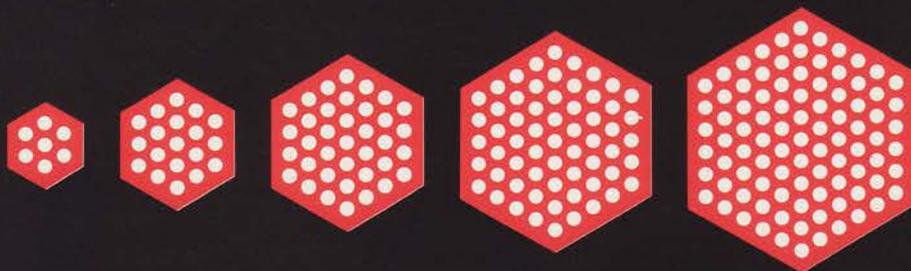
- "temperatura critica Tc" cioè la temperatura massima che un metallo può sopportare, comportandosi da superconduttore;
- "campo critico Hc" cioè il campo magnetico massimo che un metallo può sopportare, comportandosi da superconduttore.

Il superconduttore attualmente più sperimentato, perché è il più semplice a prepararsi, è la lega Niobio-Titanio nel rapporto ponderale di circa 1:1. Esso offre le seguenti caratteristiche:

- temperatura critica Tc: 8°K;
- campo magnetico critico Hc: 14 Tesla (alla temperatura dell'elio liquido: 4,2°K)

e ogni superconduttore che offre valori Tc e Hc più elevati rappresenta un progresso.

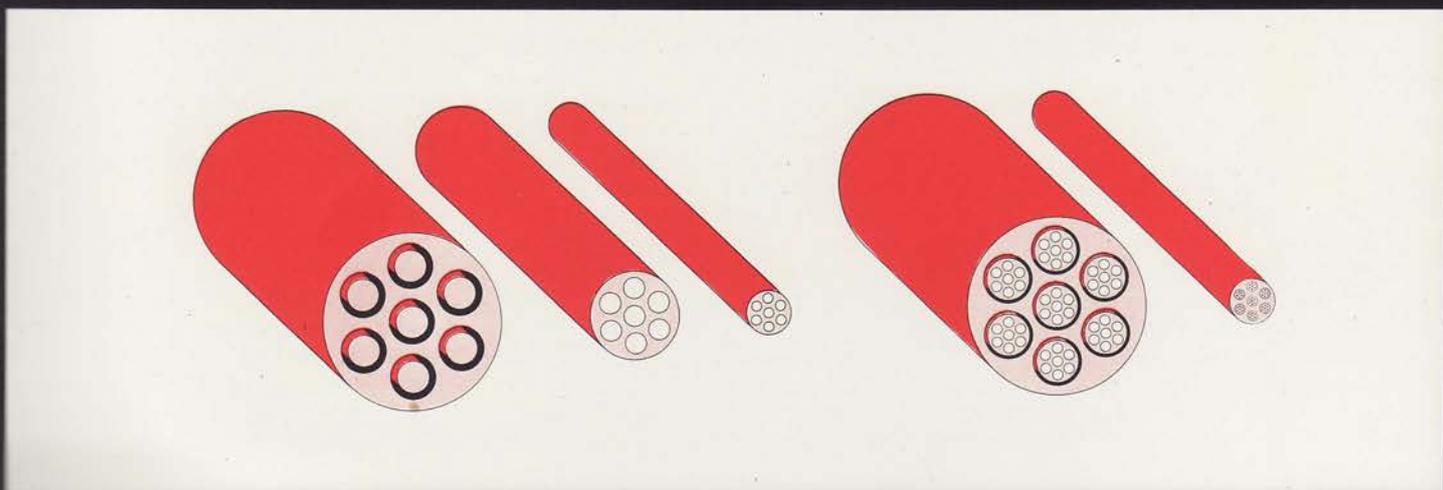
Attualmente sono in studio, ad



*Schemi di possibili strutture geometriche di superconduttori.*



*Schemi di due tipi di cicli per la preparazione di superconduttori multifilamentari.*



*Corda composta di fili superconduttori multifilamentari.*

*Fili superconduttori multifilamentari cordati su tubo di rame, per la circolazione dell'elio liquido: tutto il sistema è racchiuso da una guaina di rame. Il cavo è stato realizzato presso il CERN di Ginevra.*



Magnete bipolare in Nb-Ti con giogo esterno in ferro, realizzato presso il Laboratorio Superconduttività del Centro di Frascati del CNEN.

## Parliamo dei SUPERCONDUTTORI

Magnete superconduttore a sezioni concentriche da 110 KG in Nb<sub>3</sub>Sn realizzato presso il Laboratorio Superconduttività del Centro di Frascati del CNEN.



A pag. 13, nella foto grande, plastico dimostrativo di una possibile struttura geometrica di superconduttori.



esempio, i seguenti altri tipi di superconduttori:

	T <sub>c</sub> (°K)	H <sub>c</sub> (Tesla)
Nb <sub>3</sub> Al	18	32
Nb <sub>3</sub> (Al,Ge)	21	41
Nb <sub>3</sub> Ga	20	—
Nb <sub>3</sub> Ge	23	37
Nb <sub>3</sub> Sn	18	24
V <sub>3</sub> Ga	17	21

Trattasi di superconduttori, che per le loro maggiori prestazioni potranno avere interessanti applicazioni industriali.

### Come si producono i superconduttori

I superconduttori sono prodotti sotto forma di filamenti capillari, immersi in una matrice di metallo conduttore, il rame.

L'impiego del rame è dovuto al fatto che nel caso in cui il superconduttore "transisca", la corrente potrà ancora passare attraverso la matrice; decine, centinaia e spesso migliaia di filamenti capillari di superconduttore sono così immersi nel rame e costituiscono il filo superconduttore finito, il quale, a sua volta, può essere cordato in maniera tradizionale.

La preparazione di un filo superconduttore contenente nel suo interno migliaia di filamenti capillari è affidata a una tecnologia molto delicata, della quale illustriamo in schema un ciclo tipico: su un lingotto di rame, destinato alla estrusione in una pressa, si praticano ad esempio 19 fori quasi passanti, in ciascuno dei quali si introduce una bacchetta del superconduttore.

Il lingotto, considerato ora come un pezzo unico, subisce le successive lavorazioni plastiche di estrusione, laminazione e trafilatura, fino al diametro finito voluto (ad esempio di mm 1).

Si ottiene in questo caso un filo di rame contenente 19 filamenti superconduttori.

Se si desidera un filo superconduttore, sempre nel diametro finito di mm. 1, ma contenente centinaia di filamenti superconduttori, si inizia la lavorazione come sopra, ma si sospende la trafilatura ad esempio, al diametro mm 10; questo tondo è sottoposto a una ulteriore trafilatura che lo porta a sezione esagonale.

Sette spezzoni di tale esagono, della lunghezza ad esempio di 1 m, sono "mazzettati", a composizione tale da simulare un cerchio e sono introdotti in un tubo di rame che li contiene in maniera esatta.

Lo spezzone così composto, che conterrà nella sua sezione:  $7 \times 19 = 133$  filamenti superconduttori è successivamente trafilato fino a diventare un filo finito.

Se si ripete lo stesso ciclo di operazioni (trafilatura a esagono e ricomposizione) per "n" volte si potrà in definitiva disporre di un filo del diametro finito voluto, contenente  $19 \times 7^n$  filamenti superconduttori.

Un analogo risultato può essere ottenuto moltiplicando i filamenti per ripetizione della prima operazione sul lingotto forato:

si tratta di introdurre in un lingotto bacchette provenienti da precedenti trafila, così che la ripetizione di "n" volte del ciclo offrirà un superconduttore, nel diametro finale desiderato, contenente  $19 \times 19^n$  filamenti superconduttori. Un procedimento simile è anche seguito qualora si voglia ottenere un superconduttore sottoforma di piattina.

Gli schemi riportati a pag. 11 illustrano le tecniche sopra descritte, lavorando a ciclo ripetuto su esagoni o su lingotti forati.

Con simili processi sono oggi realizzati ad esempio fili del diametro di mm 1, contenenti 13.255 fila-

menti di NbTi del diametro di 8 micron cad.

Si tenga presente che un superconduttore deve essere tenuto a temperatura bassissima e questo è possibile soltanto per contatto del superconduttore con elio liquido, tenuto in circolazione (4,2°K).

Per questa esigenza la tecnologia nella costruzione di un cavo superconduttore completo si complica notevolmente, dovendosi disporre tutti i fili superconduttori intorno a un tubo, entro il quale deve circolare l'elio liquido di raffreddamento.

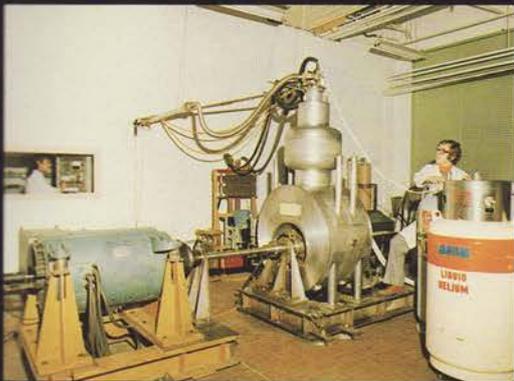
Si tratta di tecnologie molto sofisticate che ciascuna industria interessata al settore studia, mantenendo la dovuta riservatezza sui procedimenti che ne hanno permesso la realizzazione.

Per completare il quadro dei delicati problemi metallurgici riguardanti la preparazione dei fili e dei cavi superconduttori è necessaria ancora una informazione: i tipi di superconduttori che offrono più favorevoli temperature e campi magnetici critici e sui quali si insiste perché considerati i superconduttori dell'avvenire, sono quelli cosiddetti a struttura intermetallica tipo A15, ottenuti da una vera reazione a composto intermetallico tra due metalli, ad esempio Nb con Al oppure Nb con Sn ed altri; sono di questo tipo i nuovi e futuri superconduttori sopra elencati. Alcuni di questi metalli sono capaci di formare una serie di composti intermetallici, dei quali uno soltanto è superconduttore.

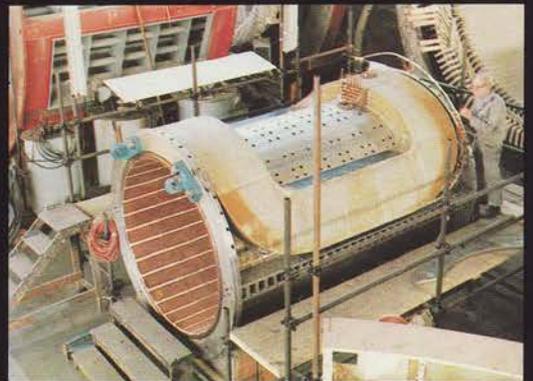
Nel caso, ad esempio, del superconduttore NbAl, i due metalli formano tre diversi composti intermetallici: NbAl; Nb<sub>2</sub>Al; Nb<sub>3</sub>Al, dei quali soltanto l'ultimo è superconduttore; la tecnologia deve pertanto cercare di favorire la formazio-

Parliamo dei  
**SUPERCONDUTTORI**

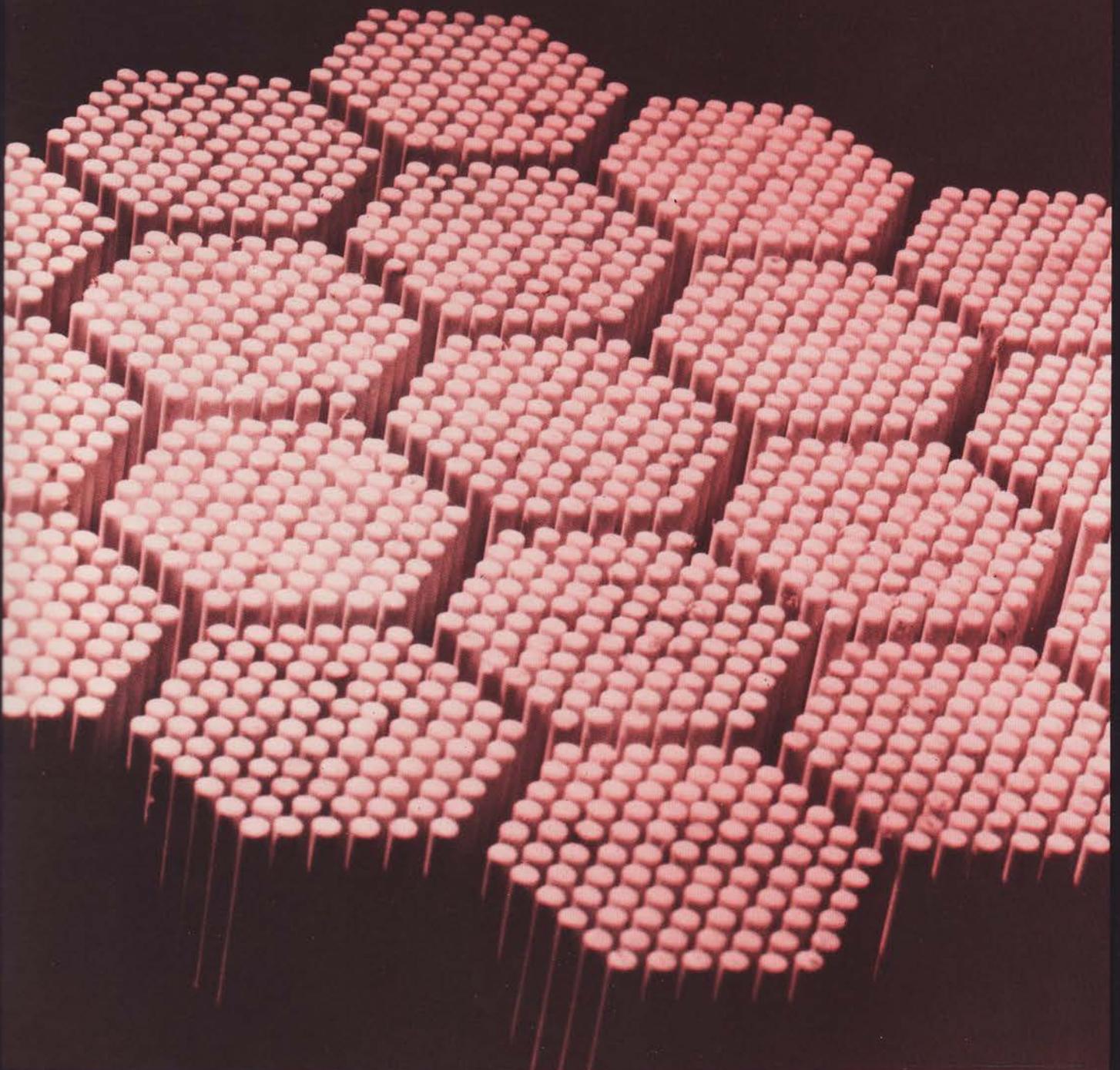
*Dipolo superconduttore costruito dall'ANSALDO per il CERN di Ginevra su progetto dell'ing. M. Morpurgo del CERN: montaggio di una bobina.*



*Bobina superconduttrice realizzata nei laboratori ANSALDO per l'eccitazione di un generatore sperimentale.*



*Generatore sperimentale a superconduttori, tipo omopolare, realizzato nei laboratori ANSALDO.*



## Parliamo dei SUPERCONDUTTORI

*Modello di treno a superconduttori da utilizzarsi su una pista sperimentale germanica - Velocità massima prevista 500 Km/h.*



*In basso: Pista sperimentale circolare installata a Erlangen (Germania) della lunghezza totale di ca. 900 m - Velocità massima raggiunta 200 Km/h, così limitata a causa delle forze centrifughe.*

*Modello di veicolo a superconduttori di costruzione giapponese.*



ne di quest'ultimo.

Ma i composti intermetallici, che offrono buone caratteristiche di superconduttività, sono fragilissimi e pertanto non è possibile preformarli e immergerli nella matrice di rame per lavorare il tutto plasticamente sotto forma di barra o filo: i superconduttori intermetallici non accetterebbero alcuna deformazione plastica e si romperebbero immediatamente come vetro!

Occorre allora realizzare sistemi di lavorazione particolari, inserendo nei lingotti di rame il Nb e l'Al come metalli separati, ambedue deformabili a caldo e a freddo; soltanto quando si sarà raggiunta la forma e la dimensione finale o ancora meglio, quando il filo sarà avvolto in bobina, allora sarà sottoposto a un trattamento termico capace di trasformare i due metalli, fino a quel momento separati, nel composto intermetallico desiderato, perché superconduttore.

L'introduzione dei superconduttori su larga scala industriale potrà portare entro qualche anno ad una "rivoluzione" tecnologica.

— Molte macchine elettriche, come alternatori, trasformatori, magneti etc. sono oggi costruite nelle grandi dimensioni richieste in base alle capacità conduttrici del filo di rame; con il superconduttore il volume della macchina, a parità di prestazione, si miniaturizza.

— Una immediata applicazione in fase sperimentale, sta nella realizzazione di piccoli magneti, capaci ad esempio di rivoluzionare la tecnica ferroviaria: potenti magneti a superconduttori, disposti su vetture ferroviarie che corrono su speciali binari, permettono di sollevare magneticamente le vetture così da permettere velocità triplicate.

In Germania e in Giappone sono in fase di realizzazione linee ferroviarie sperimentali che consentono velocità fino a 500 km/h.

— In un futuro più lontano si può anche prevedere la possibilità di tendere linee elettriche per il trasporto di energia a grandi distanze, ricorrendo a sottili fili superconduttori in sostituzione di complicati e pesanti cavi oggi supportati da grandi palificazioni.

— I superconduttori troveranno un ampio campo di utilizzazione nella costruzione di speciali potenti magneti destinati a creare le condizioni per realizzare le reazioni della "fusione nucleare" cioè per la produzione della "energia pulita", quella energia inesauribile che il mondo attende per risolvere tutti i problemi della economia energetica.

La fusione nucleare è ottenuta dalla trasformazione dell'idrogeno pesante in elio, ove parte della materia è trasformata in energia, secondo la legge di Einstein.

Tale reazione si verifica se il plasma è portato a temperature di  $10^9$  °K e ad una densità ionica tale che, moltiplicata per il "tempo di confinamento"  $\tau$ , dia un prodotto uguale o maggiore di  $10^{20}$

$$\left(\frac{n^{\circ} \text{ ioni}}{m^3} \cdot \tau \geq 10^{20}\right);$$

valori irrealizzabili con le normali tecniche, ma che si sperano possibili soltanto con l'azione di potenti campi magnetici, creati da superconduttori.

Una difficoltà alla applicazione dei superconduttori è certamente la necessità dell'esercizio a temperature estremamente basse, garantite soltanto dall'elio liquido; gli studi devono continuare e orientarsi verso tipi di superconduttori a caratteristiche critiche sempre più favorevoli.

In dieci anni di studi dedicati a questi materiali siamo passati da temperature critiche di 8°K (-265°C) a 22°K (-251°K) e in simile rapporto sono migliorati i campi magnetici critici. Non è pertanto fantasia poter prevedere continui progressi in questa direzione, con la messa a punto di nuovi superconduttori, per i quali, come mezzo di raffreddamento potrà essere usato azoto liquido o idrogeno anziché l'elio.

La LMI, produttrice di tutti i tipi di conduttori tradizionali di rame, ha impostato da tempo un accurato programma di studio e sviluppo dei superconduttori e partecipa con i suoi esperti alle ricerche condotte a livello nazionale e internazionale.

**Paolo Lombardi**

