

Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-62/112 (1962)

G. Sacerdoti: APPLICAZIONI TECNICHE DELLA SUPERCONDUTTIVITA'.

Estratto da: L'Elettrotecnica, 49, 804 (1962)

APPLICAZIONI TECNICHE DELLA SUPERCONDUTTIVITÀ

G. SACERDOTI (*)

Nell'articolo si riassumono le principali applicazioni o proposte di applicazione del fenomeno della superconduttività. Vengono in particolare esaminati i magneti, le memorie superconduttrici e le guide d'onda per acceleratori lineari.

INTRODUZIONE.

La superconduttività è quel fenomeno per cui in un materiale la resistenza elettrica si annulla quando si scende al disotto di una certa temperatura (chiamata temperatura critica).

Non tutti i materiali godono di questa proprietà e non si conoscono materiali che sopra i 18°K siano superconduttori.

Il fenomeno fu scoperto da Kamerling Onnes nel 1911 mentre studiava la resistenza elettrica appunto del mercurio al variare della temperatura il cui andamento è riportato in fig. 1.

Anche nel caso della superconduttività, come per la conduttività normale dei metalli, il moto degli elettroni è la causa della corrente elettrica. A differenza di quanto avviene nella normale conducibilità dei metalli, in cui

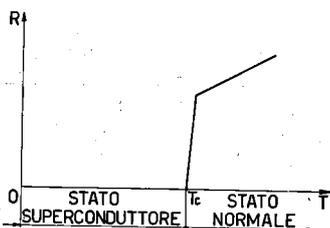


Fig. 1. — Andamento qualitativo di $R = f(T)$ per un materiale superconduttore.

la agitazione termica riesce a disordinare il moto d'insieme degli elettroni, il che fa sorgere la resistenza elettrica (effetto Joule), quando il metallo diventa superconduttore il moto degli elettroni diventa estremamente ordinato e l'agitazione termica è così bassa che non riesce più a provocare le deviazioni e gli urti degli elettroni che sono la causa del sorgere della resistenza elettrica. Si capisce così che la presenza di un agente esterno (come un campo magnetico, anche stazionario, purchè sufficientemente elevato) può, agendo sugli elettroni in movimento, perturbarne il moto fino al punto in cui l'effetto della temperatura riesce di nuovo a far sorgere la resistenza elettrica.

Si chiama campo magnetico critico H_c quel valore di campo magnetico capace di far passare un materiale superconduttore che si trova alla temperatura generica T (v. fig. 2) dallo stato superconduttore a quello normale.

Questo fatto è stato messo in evidenza sperimentalmente ed il campo magnetico H_c che distrugge la superconduttività può essere prodotto da un magnete esterno o dalla stessa corrente che scorre nel filo.

Tanto più è bassa la temperatura, tanto maggiore è il valore del campo magnetico critico necessario per disordinare il moto degli elettroni e ripristinare la resistenza elettrica facendo passare il superconduttore dalla fase superconduttrice a quella normale.

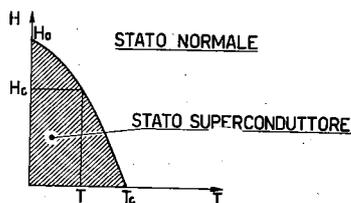


Fig. 2. — Andamento qualitativo di $H_c = f(T)$ di un materiale superconduttore.

La relazione che lega il campo magnetico critico alla temperatura è data dalla seguente espressione:

$$(1) \quad H = H_0 [1 - (T/T_c)^2]$$

T = temperatura del materiale (in °K)

T_c = » critica (in °K)

H_0 = campo magnetico critico allo zero assoluto

H_c = » » » alla temperatura T .

In fig. 2 è riportato in diagramma l'espressione (1) che lega H_c a T_c e che divide il piano $H-T$ in due zone: una tratteggiata, in cui il materiale si trova allo stato superconduttore e l'altra in cui il materiale è allo stato normale.

Negli ultimi anni l'interesse per i problemi della superconduttività è aumentato sia per quanto concerne la ricerca tecnica e scientifica sia per quanto concerne le applicazioni industriali. Questo interesse è dovuto anche alla maggiore diffusione che hanno avuto nel mondo gli apparecchi per liquefare l'elio (1) (a temperatura di 4,2°K a pressione atmosferica) ed è giustificato dalle interessanti applicazioni che la superconduttività ha trovato. Oggigiorno i liquefattori di elio vengono prodotti in piccole serie da ditte americane, mentre un certo numero di ditte europee è in grado di progettare e costruire impianti di liquefazione con le caratteristiche desiderate dal cliente e con forte capacità di produzione. In Italia, per es., vi sono tre piccoli impianti di liquefazione: uno a Frascati presso i Laboratori del CNEN, uno a Milano ed uno a Torino. La potenzialità di questi impianti da laboratorio è dell'ordine di qualche litro di elio liquido all'ora (circa 7 l/ora quello di Frascati) ed il costo di 1 litro di elio liquefatto è di circa 7 000 lire (3 000 di liquefazione e 4 000 di gas (2)). Recuperando il gas di evaporazione (che però deve essere successivamente purificato) il costo scende a circa 3 500 L/litro.

Per completezza ricordiamo che un materiale superconduttore presenta anche proprietà diamagnetiche, cioè un campo magnetico esterno non può penetrare in esso indi-

(1) Infatti il modo più semplice per portare alla temperatura di 4°K un corpo è di immergerlo in elio liquido.

(2) L'elio viene ricavato in gas da sorgenti naturali.

(*) GIANCARLO SACERDOTI, Laboratori Nazionali di Frascati del C.N.E.N.

pendentemente dal modo con cui il corpo viene sottoposto al campo magnetico.

Inoltre, solo l'anno scorso è stato messo in evidenza sperimentalmente che il flusso abbracciato da un anello superconduttore perfetto è quantizzato secondo multipli interi di $\varphi = 2,01 \times 10^{-7}$ gs cm² [7, 8] e si è così trovata giusta l'ipotesi già fatta dal London una decina di anni fa.

APPLICAZIONI TECNICHE.

Le proposte di applicazioni tecniche della superconduttività sono le seguenti:

- A) Magneti.
- B) Memorie per calcolatrici digitali.
- C) Supporti.
- D) Particolari apparecchi di misura.
- E) Guide d'onda per acceleratori di particelle.

Di queste applicazioni, indubbiamente la più importante è quella dei magneti.

È evidente infatti che se si può disporre di materiali in cui non si ha dissipazione di energia al passaggio di forti correnti elettriche, si può aprire la possibilità di costruire magneti ad alto campo con risparmi economici sensibili.

Infatti il vantaggio di non avere dissipazione è in parte attenuato dal fatto che una densità di corrente od un campo magnetico prodotto troppo alti distruggono la superconduttività, ed inoltre vi è la spesa necessaria a raffreddare e mantenere freddo il magnete.

Da indagini preliminari fatte su alcuni magneti ad alto campo sembra possibile ridurre il costo fino al 30 % di quelli equivalenti in rame ed al 50 % di quelli criogenici al sodio [9]. L'economia nel costo di questi magneti probabilmente permetterà la costruzione di macchine idrodinamiche per la conversione diretta del calore in elettricità.

Per quel che riguarda gli elementi per memorie, sono stati fatti progressi particolarmente rapidi sia per quanto riguarda la riduzione al minimo degli ingombri, sia per quanto riguarda la velocità di risposta degli elementi binari.

Per i supporti e le apparecchiature di misura l'interesse è limitato a qualche isolata ricerca di fisica.

L'applicazione della superconduttività alle guide d'onda per acceleratori è in corso di studio, ed una realistica valutazione della convenienza non è ancora stata fatta.

Nei paragrafi che seguono discuteremo e daremo informazioni soprattutto sulle applicazioni A) e B).

MAGNETI SUPERCONDUTTORI.

Fin dal 1913 Kamerling Onnes pensò alla possibilità di costruire magneti superconduttori. I materiali di cui disponeva avevano un campo magnetico critico molto basso e perciò abbandonò presto l'idea ($H_c < 0,07$ Wb/m²).

Nel 1931 Haas e Voogd trovarono una lega di piombo e bismuto che aveva un campo magnetico critico di 1,5 Wb/m². Tentarono di costruire un magnete ma non vi riuscirono. Nel 1960 finalmente Autler riuscì a costruire un solenoide superconduttore in aria raggiungendo in un primo tempo 0,43 Wb/m² e poi 1 Wb/m².

Solo nel 1961 si misero in luce proprietà superconduttrici di alcune leghe che potranno sicuramente rivoluzionare la tecnica di costruzione di magneti: infatti le leghe di Nb Sn e di Nb Zr sembrano avere campi magnetici critici (H_c) dell'ordine rispettivamente di 25 e di 15 Wb/m² (3) [10, 12]. Come già abbiamo detto si comprende

(3) Campo applicato longitudinalmente al provino. Applicato trasversalmente tale valore si riduce a metà (4).

quindi anche intuitivamente che poter ottenere un campo magnetico dell'ordine di 8-12 Wb/m² senza avere dissipazione ohmica porta a dei vantaggi economici notevoli. Come vedremo in seguito, dovremo, nel confronto economico tra magneti superconduttori e magneti normali, prevedere le spese anche per l'impianto di liquefazione. Nonostante ciò il costo di un magnete superconduttore da 10 Wb/m², tenuto conto delle spese di impianto e delle spese di esercizio, può ridursi a meno di un terzo rispetto ad un magnete in rame alla temperatura ambiente.

Aggiungiamo ora per inciso che per ottenere alti campi magnetici vi è la possibilità di usare anche nuclei di materiali (come il disprosio e l'olmio) che diventano ferromagnetici rispettivamente a 80 °K e 20 °K con campi magnetici di saturazione di circa 4 Wb/m²: questa possibilità potrebbe aumentare di 4 Wb/m² il campo magnetico che si può ottenere in magneti con avvolgimenti superconduttori.

I materiali superconduttori si dividono in due categorie: «duri» e «teneri». I «teneri» sono in genere metalli a basso punto di fusione e presentano la caratteristica peculiare di avere, quando sono superconduttori, un campo magnetico interno nullo: la corrente si dovrà, per le equazioni di Maxwell, distribuire perciò solamente sulla superficie, in uno spessore di penetrazione valutabile sia teoricamente che sperimentalmente dell'ordine di 10⁻⁵ cm. In generale il campo magnetico critico in questi conduttori è assai basso (dell'ordine di 0,1 Wb/m²).

Quelli «duri» in generale sono costituiti da metalli o leghe ad alto punto di fusione che presentano la proprietà di aver alto campo magnetico critico agli effetti della distruzione della superconduttività.

Per interpretare il comportamento di questi superconduttori si può immaginare che vi siano filamenti superconduttori moltiplicemente connessi tra di loro, immersi in una massa non superconduttrice. Sembra che i filamenti superconduttori siano di diametro inferiore a 10⁻⁵ cm e che si intreccino e si ricolleghino all'interno del filo stesso (v. fig. 3). Questo spiega:

a) che il campo magnetico critico sia alto. I filamenti superconduttori, per ipotesi molto sottili, come i film sottili depositati per evaporazione (e ciò si spiega anche teoricamente) hanno campo magnetico di taglio superiore ai conduttori massicci;

b) che il campo magnetico può penetrare entro il conduttore a differenza di quanto avveniva nei superconduttori teneri e alzando e abbassando il campo magnetico

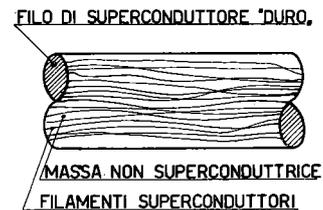


Fig. 3. — Struttura filiforme di un superconduttore «duro».

esterno si hanno fenomeni di isteresi per cui vi rimane congelato un campo magnetico per le correnti di circolazione che si richiudono tra i vari filetti tra loro connessi come nel caso di un anello, anche quando il campo magnetico esterno va a zero;

c) che la corrente di taglio in un superconduttore aumenta (almeno finché le sezioni sono abbastanza piccole) quasi proporzionalmente all'area del filo poiché il numero di filamenti che portano la corrente aumenta quasi proporzionalmente all'area della sezione (si ha però sempre un addensamento di filamenti alla superficie).

Le leghe di Nb Sn e Nb Zr hanno comportamento intermedio tra i superconduttori « duri » ed i « teneri ».

Data una certa temperatura, il campo magnetico che contribuisce alla distruzione della superconduttività (H_c) potrà essere prodotto da tre termini:

- 1) campo magnetico esterno (H_e);
- 2) campo magnetico prodotto dalla corrente stessa che circola nel filo;
- 3) campo magnetico dovuto al diamagnetismo del filo (o nel caso di superconduttori « duri » alla distribuzione anomala della corrente dovuta alla struttura delle zone superconduttive).

Se noi abbiamo un certo campo magnetico esterno vi sarà un valore della corrente (corrente critica) che a causa del campo magnetico ad essa associato taglia la superconduttività.

Nella fig. 4 riportiamo per $T = 4,2$ °K la curva $\delta = f(B)$ per fili di Nb Zr e Nb Sn. Le proprietà di queste leghe dipendono notevolmente dal ciclo meccanico e termico che hanno subito durante la lavorazione, per cui le curve sono solo indicative e riferite al particolare provino in esame.

La corrente critica con $H_e = 0$ produce un campo magnetico sulla superficie del filo molto inferiore a H_c (*) ma taglia egualmente la superconduttività perchè produce un campo magnetico locale pari ad H_c sulla superficie

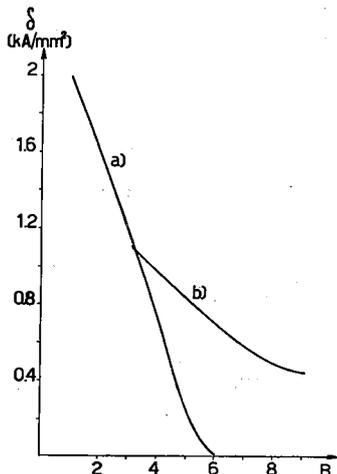


Fig. 4. — Curva $\delta = f(B)$ di un campione di Nb Zr e di uno di Nb Sn.

- a) Filo Nb-Zr al 25 % $\varnothing = 0,25$ mm
- b) Filo Nb₃ Sn $\varnothing = 0,15$ mm rivestito al Nb puro.

dei filetti superconduttori e rende verosimile e giustificata l'ipotesi di una struttura filiforme.

I problemi tecnici che si presentano nella costruzione di questi magneti sono di varia natura e possono essere così elencati:

- 1) alimentazione esterna per « energizzare » il magnete;
- 2) dispositivi per cortocircuitare il magnete dopo averlo energizzato ai fini di isolarlo termicamente dall'esterno (il che non sarebbe possibile per la presenza delle barre di adduzione della corrente);
- 3) dispositivi di sicurezza per evitare che per un riscaldamento improvviso, distruggendosi la superconduttività, tutta l'energia magnetica vada ad evaporare l'elio con conseguenti possibili danni all'impianto;
- 4) progetto del dewar;
- 5) problemi relativi alla bobina, come contatti, sal-

(*) $H_c = H_e$ per $I = 0$.

dature (che provocano la perdita delle proprietà superconduttrici), isolamento, ancoraggio meccanico, ecc.

Non entriamo qui in particolari che non sono oggetto del presente articolo.

Riportiamo a titolo di esempio in tab. 1 un confronto sommario tra un magnete normale ed uno superconduttore.

Si è pensato ultimamente alla possibilità di usare film sottili come conduttori invece di fili massicci; infatti è da molto tempo noto che i materiali superconduttori in film sottili hanno un campo magnetico critico molto superiore.

Però attualmente non è stato ancora esaminato in via sperimentale il comportamento di film sottili di Nb Sn e Nb Zr per cui difficilmente si possono prevedere i vantaggi che la realizzazione dei magneti di questo genere possono presentare [10].

Per i film sottili, ad es. di piombo o di stagno, l'andamento del campo magnetico critico per spessori molto minori dello spessore di penetrazione è:

$$(2) \quad H_c = H_{cm} 2 \sqrt{3} \frac{\lambda}{d}$$

$H_{cm} = H_c$ di un conduttore massiccio

λ = profondità penetrazione campo

d = spessore film

In tab. 2 sono riportati i dati che possono essere utili alla progettazione di questi magneti.

Come abbiamo detto, in tutti questi magneti bisogna avere particolari precauzioni per il pericolo che, per qualche riscaldamento locale, l'energia magnetica si trasformi in calore con conseguente evaporazione dell'elio.

L'energia magnetica per unità di volume a 10 Wb/m² è di 40 J/cm³ corrispondente a 10 volte il calore latente di evaporazione di 1 cm³ di elio ed è 1/10 della quantità di calore necessaria a portare l'elio già evaporato da 4 a 300 °K.

Una precauzione che si può prendere è quella di sistemare attorno alla bobina un anello di rame chiuso che, in caso di variazioni di campo, assorba per induzione, sotto forma di calore Joule la variazione di energia magnetica (fig. 5).

In piccole bobine sperimentali (con campi di 10÷40 000 gs su $\sim \frac{1}{2}$ cm³) curate dall'autore presso i Laboratori di Frascati, non era stato necessario prendere queste precauzioni poichè, per le piccole dimensioni delle bobine stesse, non c'erano pericoli di esplosione per violenta evaporazione.

La possibilità di disporre di forti campi magnetici continui ad alta stabilità nel tempo, oltre a rendere possibile un certo numero di esperienze (come su maser, sulle ri-

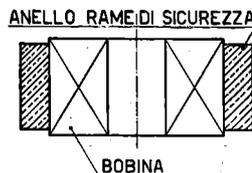


Fig. 5. — Magnete superconduttore con anello esterno di rame di sicurezza.

sonanze ciclotroniche e sulla smagnetizzazione adiabatica), rende più economica la sperimentazione con macchine acceleratrici di alta energia, poichè più economici diventano i magneti analizzatori, i magneti per focheggiamento ed i magneti per le camere a bolle [11].

Così pure viene facilitata la ricerca sui plasmi e, probabilmente, diventano economicamente possibili le mac-

chine magnetoidrodinamiche per la conversione diretta del calore in energia elettrica.

Anche per la propulsione di missili con plasma possono trovare utili applicazioni i magneti superconduttori.

Un magnete superconduttore può servire anche a schermare i cosmonauti dalle radiazioni Van Allen.

MEMORIE MAGNETICHE.

I dispositivi [14 - 15 - 16 - 17] basati sul fenomeno della superconduttività nelle macchine calcolatrici sono due:

- 1) il cryotron;
- 2) il persistron.

Il primo fu proposto da Buck nel 1956 ed è probabilmente più importante del persistron; infatti è oggi largamente studiato dalle industrie costruttrici di macchine calcolatrici.

Questo dispositivo consiste, nello schema originariamente proposto, in un filo di tantalio chiamato « gate » circondato da un solenoide di niobio chiamato « avvolgimento di controllo ». Una corrente sufficientemente elevata nell'avvolgimento di controllo può riportare il filo di tantalio dallo stato superconduttore a quello normale senza che l'avvolgimento cessi di essere superconduttore perchè il campo magnetico critico che taglia la superconduttività nel tantalio non la taglia nel niobio. Il cryotron si comporta quindi come un relè.

Si chiama guadagno di corrente il rapporto tra la corrente « tagliata » e la corrente di comando. Il guadagno è dato da:

$$(3) \quad g = 2 \pi n r$$

dove n = numero di spire per unità di lunghezza del solenoide, r = raggio del filo di tantalio.

Con due cryotrons si può costruire un sistema bistabile (fig. 6). Questo circuito fu proposto da McMaon. Le due condizioni a , b di stabilità sono descritte dalla seguente situazione

$$(4) \quad a) \quad I_1 = I_0 \quad I_2 = 0 \quad R_1 = 0 \quad R_2 \neq 0$$

$$(5) \quad b) \quad I_1 = 0 \quad I_2 = I_0 \quad R_1 \neq 0 \quad R_2 = 0$$

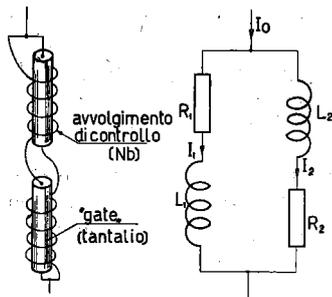


Fig. 6. — Schema costruttivo e circuito equivalente di un sistema bistabile ottenuto con 2 « cryotrons ».

Per pilotare il dispositivo è necessario complicare il circuito ed usare 5 cryotrons (fig. 7).

Costruttivamente il dispositivo ha assunto aspetti notevolmente diversi poichè i fili, nei dispositivi più elaborati, sono stati sostituiti da film superconduttori con i vantaggi di diminuire il volume occupato dalle memorie, di diminuire le potenze necessarie al pilotaggio ⁽⁵⁾ ed inoltre aumentare la rapidità di risposta fino a scendere a tempi di qualche microsecondo.

Lo spessore dei film è dell'ordine di 10^{-4} ÷ 10^{-5} cm e l'evaporazione deve avvenire sotto ad un vuoto molto

⁽⁵⁾ Infatti durante la transizione si ha una piccola dissipazione di energia.

spinto (10^{-11} ÷ 10^{-9} mm Hg) per evitare l'inclusione di gas che peggiorano notevolmente le caratteristiche del film.

I persistrons sono stati proposti da Crowe. Essi consistono in un anello superconduttore diviso in due segmenti

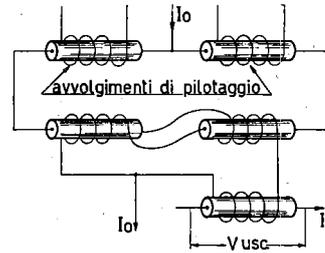


Fig. 7. — Circuito bistabile completo di sistema di pilotaggio impiegante 5 « cryotrons ».

I_1 I_2 (fig. 8). Se noi inviamo una corrente dall'esterno essa si divide proporzionalmente alle due induttanze e le correnti nei due rami saranno:

$$(6) \quad I_1 = I L_2 / (L_1 + L_2)$$

$$(7) \quad I_2 = I L_1 / (L_1 + L_2)$$

ove L_1 ed L_2 ($L_1 < L_2$) sono le induttanze rispettivamente dei due rami I_1 e I_2 .

Se I però aumenta fino a che la corrente in uno dei rami (nel caso del disegno nel ramo I_1 che ha induttanza

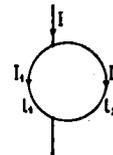


Fig. 8. — Circuito schematico del « persistron ».

minore) superi il valore di I_c la corrente non potrà più aumentare in tale ramo e si distribuirà nella seguente maniera:

$$(8) \quad I_1 = I_c$$

$$(9) \quad I_2 = I - I_c$$

La situazione si può pensare come sovrapposizione di due correnti:

$$(10) \quad I_1 = I L_2 / (L_1 + L_2)$$

$$(11) \quad I_2 = I L_1 / (L_1 + L_2)$$

ed una corrente circolatoria (concorde con I_2) pari a

$$(12) \quad I' = I L_2 / (L_1 + L_2) - I_c$$

Se dopo aver raggiunto questa condizione si riporta la corrente esterna al valore zero rimane la corrente di circolazione, cioè persiste, da cui il nome del dispositivo « persistron ».

Il persistron non è stato studiato sperimentalmente come il cryotron e non se ne conoscono quindi i limiti relativamente alla costante di tempo.

Crowe ha cercato di migliorare il persistron ricorrendo ai film sottili e pilotando il dispositivo invece che con corrente diretta esterna, in maniera induttiva. Nelle celle sviluppate da Crowe, invece di un anello si ha un buco in un film sottile di piombo con una striscia che l'attraversa secondo il diametro (fig. 9). Le correnti persistenti seguono un cammino ad otto passando attraverso la striscia centrale e richiudendosi attraverso ai bordi laterali. Il campo magnetico si chiude intorno alla striscia cen-

trale. Per energizzare la cella si usa un filo montato parallelamente alla striscia e da essa separato da un sottile strato di isolante.

Il segnale di uscita si ricava da un filo simile a quello pilota situato dal lato opposto del film. Lo spessore di

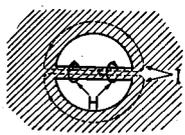


Fig. 9. — Cella di Crowe (realizzazione pratica del « persistron » di fig. 5).

questi film è di circa 1000 Å. Per capire il meccanismo di funzionamento ragioniamo come segue. Il film è inizialmente superconduttore. Se l'avvolgimento di comando viene eccitato con la corrente I_p , si ha con evidente significato di simboli

$$(13) \quad L \frac{dI_s}{dt} + R I_s = M \frac{dI_p}{dt}$$

I_s = corrente nel secondario (striscia centrale).

I_p = corrente nel primario di eccitazione.

Essendo $L = M$, $R = 0$ si ha:

$$(14) \quad I_p - I_s = \text{costante}$$

ed essendo inizialmente $I_p = I_s = 0$ si ha:

$$(15) \quad I_p = I_s.$$

Questo è vero finché I_s raggiunge I_c cioè il valore di corrente critica per cui la striscia centrale diventa normale. Poiché la transizione dallo stato superconduttore a quello normale non è istantanea, I_s supera I_c un po' prima che il secondario diventi normale. I_s comincia a decrescere esponenzialmente al valore:

$$I_{0s} = M \frac{dI_p}{dt} \frac{1}{R_n}$$

R_n = resistenza striscia allo stato normale.

Ci si potrebbe aspettare che non appena I_s scende sotto ad I_c la striscia centrale diventi nuovamente superconduttrice e che I_s cominci così di nuovo ad aumentare.

In questa maniera I_s oscillerebbe intorno al valore I_c ma questo non si riscontra: infatti, a causa del cambiamento di stato, la resistenza secondaria è diversa da zero per un breve intervallo di tempo ed in questo periodo la resistenza alza un po' la temperatura della striscia; questo riduce la corrente critica cosicché I_s deve decadere ulteriormente prima che la striscia trasversale ridiventi superconduttrice. Levando la corrente esterna di pilotaggio rimane così immagazzinato un segnale. Le costanti termiche hanno quindi un ruolo determinante in questi tipi di celle.

Per tutti gli elementi per macchina calcolatrice c'è un problema comune: il problema del raffreddamento poiché, come si è detto, ad ogni transizione dallo stato superconduttore a quello normale c'è una piccola dissipazione di energia. Tale energia è comunque assai piccola; infatti in un complesso di 10^7 elementi (contenuto in un cubo di appena 40 cm di lato) che compie $2 \cdot 10^7$ transizioni al secondo, l'evaporazione dell'elio è dell'ordine di soli pochi cm^3 all'ora, tenendo conto anche del calore di entrata attraverso le pareti ed i conduttori che portano i segnali di informazione nel recipiente.

ALTRE APPLICAZIONI.

Come abbiamo detto, le altre applicazioni sono forse meno importanti ma non per questo meno suggestive. Le indagini sulle applicazioni della superconduttività

nelle direzioni che ora descriveremo non sono state ancora approfondite a dovere e sarà necessario altro tempo perché ci si possa fare un'idea sulle reali possibilità che si hanno sia dal punto di vista tecnico che economico.

a) Acceleratori lineari [18].

Un acceleratore lineare di particelle è costituito schematicamente (v. fig. 10) da una guida d'onda eccitata con Klystrons ogni 5-8 m, in cui l'onda, che ha una componente del campo elettrico nella direzione del moto della particella, si propaga sincrona alle particelle da accelerare cedendo ad esse energia.

I campi elettrici che si adoperano sono elevatissimi ($10 \div 30 \cdot 10^6$ V/m) per non dover allungare troppo la guida d'onda, cioè l'acceleratore. Le frequenze usate sono anch'esse molto alte (> 400 Mc/sec) per non dover eccedere troppo nelle dimensioni radiali della guida d'onda.

Come è noto, un limite all'intensità degli acceleratori

VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DELL'ONDA

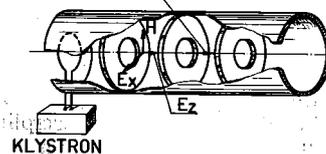


Fig. 10. — Schema di principio di un acceleratore lineare.

lineari sta nella necessità di dover adottare un regime impulsato di funzionamento con tempi di utilizzazione dell'ordine dell'1% per evitare un conseguente troppo forte riscaldamento delle pareti. Infatti con i campi elettrici di accelerazione suddetti e data la resistenza elettrica delle pareti, le perdite ohmiche diventano fortissime e tali da bruciare le pareti se il regime di funzionamento fosse continuo.

In Inghilterra un gruppo di studio della Rutherford High Energy Laboratory ha esaminato la possibilità di costruire un acceleratore lineare superconduttivo. Se le pareti infatti sono superconduttrici, in linea teorica si possono ridurre le perdite ohmiche, e quindi il funzionamento dell'acceleratore, se fornito di alimentatori di sufficiente potenza, potrebbe essere continuo con evidente aumento dell'intensità del fascio (di un fattore 100).

Dobbiamo però per completezza ricordare alcune difficoltà che nascono. In corrente alternata, anche i superconduttori presentano una perdita ohmica e questa perdita aumenta all'aumentare della frequenza (6). Questo fatto obbliga, nel caso degli acceleratori lineari, a non salire oltre i 200-400 Mc/sec per cui le dimensioni radiali del tubo di accelerazione non possono ridursi come negli acceleratori lineari normali. Inoltre nascono difficoltà per la regolazione e stabilizzazione della frequenza poiché il coefficiente di qualità del tubo di accelerazione viene a dipendere fortemente dall'intensità del fascio di particelle da accelerare. Queste sono le difficoltà tecniche a cui bisogna aggiungere le incognite di carattere economico dovute alle spese di raffreddamento e l'incognita che rappresenta la presenza di radiazioni intense agli effetti del deterioramento delle proprietà superconduttrici che per le singolarità della struttura possono essere previste negli studi preliminari solo approssimativamente.

Gli autori di questo studio traggono come conclusione che questo problema deve essere, per le prospettive che offre, per lo meno studiato. Oltre allo studio teorico è necessario completare prove sperimentali per ricavare i

(6) La teoria e le prime prove sperimentali su questo punto sono state fatte da Pippard.

dati che ancora mancano per poter garantire la sicura riuscita di un'impresa del genere (?).

b) Supporti superconduttori.

Come è noto dalle leggi elementari dell'elettrotecnica, un superconduttore, non potendo essere attraversato da campi magnetici, esercita azioni repulsive su calamite o bobine percorse da corrente. Questo fatto suggerisce la possibilità di usare superconduttori per supporti senza attrito anche per oggetti di notevole peso. Questi supporti sono stati realmente costruiti e sperimentati ed hanno aperto ulteriori possibilità di esperienze di fisica pura [19].

Sono stati studiati anche e sperimentati, supporti senza attrito per piccoli motori elettrici per usi particolari.

CONCLUSIONI.

Come abbiamo visto, la superconduttività può aprire nuove strade e possibilità sia nelle applicazioni dell'elettrotecnica sia per quel che riguarda la ricerca pura.

Alle basse temperature si apre un mondo estremamente diverso da quello in cui viviamo e la superconduttività è uno degli aspetti più singolari ed imprevisti che questo mondo ci presenta.

Probabilmente non tutte le proposte di applicazioni fatte dai pionieri di questa nuova disciplina troveranno il consenso dell'economista e potranno perciò essere di utilità alla vita umana, però le prospettive sembrano, almeno in alcuni casi, essere favorevoli.

TABELLA I.

Confronto economico sommario tra un magnete superconduttore ed uno normale di rame e ferro, entrambi adatti ad ottenere 5 Wb/m² su di un'area circolare del diametro di 50 cm.

	Costo di un magnete normale (in milioni di L.)	Costo di un magnete supercond. (in milioni di L.)
Bobina	160	160
Nucleo di ferro	60	100
Liquefattore (50 W a 2 °K)		
Alimentatore (7 MW)	300	
Costo d'impianto	520	260
Costo energia per 5 anni	500	200
	1020	460

a) Valori medi della conducibilità termica (K) espressi in W/cm °K.

TABELLA II.

	$T_2 = 300 \text{ °K}$ $T_1 = 77 \text{ °K}$	$T_2 = 300 \text{ °K}$ $T_1 = 4 \text{ °K}$	$T_2 = 77 \text{ °K}$ $T_1 = 4 \text{ °K}$	$T_2 = 4 \text{ °K}$ $T_1 = 2 \text{ °K}$
Pyrex	0,0082	0,0068	0,0025	0,0007
Acc. inox	0,123	0,103	0,045	0,0022
Rame	4,1	5,7	9,8	4

(?) Danni da radiazioni, controllo della legge che dà la resistenza al variare della frequenza, ecc.

b) Evaporazione.

- 1 W fa evaporare circa 1 l/h di elio liquido;
- 1 W fa evaporare circa 0,022 l/h di azoto liquido.

c) Raffreddamento materiali.

- 1 kg di rame che si raffredda da 300° a 77 °K fa evaporare circa 0,46 litri di azoto.
- 1 kg di rame che si raffredda da 77° a 4 °K fa evaporare circa 1,4 litri di elio.
- 1 kg di alluminio che si raffredda da 300° a 77 °K fa evaporare circa 1 litro di azoto.
- 1 kg di alluminio che si raffredda da 77° a 4 °K fa evaporare circa 2,2 litri di elio.
- 1 kg di ferro che si raffredda da 300° a 77 °K fa evaporare circa 0,48 litri di azoto.
- 1 kg di ferro che si raffredda da 77° a 4 °K fa evaporare circa 0,9 litri di elio.
- 1 kg di teflon che si raffredda da 300° a 77 °K fa evaporare circa 1 litro di azoto.
- 1 kg di teflon che si raffredda da 77° a 4 °K fa evaporare circa 3 litri di elio.

d) Dewar.

La dissipazione di un dewar da elio dipende dalla tecnica usata per l'isolamento termico.

Possiamo comunque riportare il quadro seguente:

Tipo di isolamento	Salto di temperatura (°K)	Flusso di calore (W/m ²)
Vuoto 10 ⁻⁵ mm Hg	300 - 77	12,5
» 10 ⁻⁵ mm Hg	77 - 4	0,25
» 10 ⁻⁶ mm Hg	77 - 4	0,07
Schermature multiple di 12 mm spessore	300 - 4	0,7
Schermature multiple 40 mm di spessore	300 - 4	0,25

Manoscritto pervenuto il 12 giugno 1962.

BIBLIOGRAFIA

- [1] B. SERIN: *Superconductivity - Experimental part.* - «Encyclopedia of Physics», vol. XV, 1956.
- [2] J. BARDEEN: *Theory of Superconductivity.* - «Encyclopedia of Physics», vol. XV, 1956.
- [3] D. SHOENBERG: *Superconductivity.* - Cambridge University Press, 1952.
- [4] F. LONDON: *Superfluids.* - Wiley & Sons Inc., New York, 1950, vol. I
- [5] J. E. KUNZLER ed altri: «Phys. Rev. Letters», 6, 3 (1961).
- [6] MATTHIAS: «Phys. Rev. Letters», 6, 6 (1961).
- [7] B. S. DEEVER Jr. e W. M. FAIRBANK: «Phys. Rev. Letters», 7, 2 (1961).
- [8] R. DOLL e M. NABAUER: «Phys. Rev. Letters», 7, 2 (1961).
- [9] R. F. POST e C. E. TAYLOR: *Advances in Cryogenic Engineering.* - Plenum Press Inc., New York, 1960, 5.
- [10] R. H. KROPSCHOT e V. ARP: *Superconducting magnets* (relazione sottoposta a «Cryogenics» per la pubblicazione. Cryogenic Engineering Laboratory, Boulder, Colorado.
- [11] P. R. ARON, H. P. HERNANDEZ, H. C. HITCHCOCK: *Recent Superconductivity tests and studies.* - Lawrence Radiation Laboratory, Berkeley, California.
- [12] J. E. KUNZLER: «Review of modern Physics», 33, 4 (ottobre 1961).
- [13] S. H. AUTLER: «Rev. Sci. Instr.», 31, 369 (1960).
- [14] D. YANG: «Electronics», 14-10-60.
- [15] E. H. RHODERICK: «Brit. Journ. of Appl. Phys.», 10, 193 (1959).
- [16] D. A. BUCK: «Proc. I.R.E.», 482 (1956).
- [17] C. M. W. LITTING: «Brit. Journ. of Appl. Phys.», maggio 1961.
- [18] A. P. BANFORD e G. H. STAFFORD: *The Feasibility of a superconducting proton linear accelerator.* - Rutherford High Energy Laboratory, Harwell, Didcot, Berkshire, 1961.
- [19] BUCKHOLD: *Cryogenics*, giugno 1961.