

LNF-73/55

2 Novembre 1973

E. P. Balsamo, G. Paternò, G. Lucano, S. Pace and G. L.  
Romani: UN MAGNETOMETRO SUPERCONDUTTORE A  
RADIOFREQUENZA: -

E. P. Balsamo, G. Paternò, G. Lucano<sup>(x)</sup>, S. Pace<sup>(x)</sup> e G. L. Romani:  
UN MAGNETOMETRO SUPERCONDUTTORE A RADIOFREQUENZA. -

#### INTRODUZIONE. -

La scoperta dell'effetto Josephson<sup>(1)</sup> nel 1962, ha aperto in quest'ultimo decennio nuove possibilità nel campo della strumentazione basata su dispositivi superconduttori.

Un tale tipo di strumentazione è tuttora in fase di ricerca avanzata e sviluppo e si presenta molto promettente perchè trova applicazione in moltissimi campi, tra i quali citiamo la medicina, la biofisica, la metrologia. Essa rappresenta inoltre una delle punte più avanzate della moderna strumentazione ad altissima sensibilità.

In particolare, una notevole importanza rivestono i magnetometri superconduttori, sia per la loro elevata sensibilità (rendono infatti possibili misure di campi magnetici estremamente deboli,  $\approx 10^{-7}$  gauss, su campi di oltre 1000 gauss), che per la vasta gamma di applicazioni possibili e per la loro versatilità.

In quest'ultimo anno, nell'ambito di una collaborazione tra i Laboratori Nazionali di Frascati del CNEN e l'Istituto di Fisica della Università di Roma, è stato realizzato un magnetometro superconduttore a punta di contatto, la cui descrizione e discussione è oggetto della presente nota.

#### PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO. -

Un magnetometro superconduttore a punta di contatto, o SQUID

---

(x) - Istituto di Fisica dell'Università di Roma.

2.

(superconducting quantum interference device) consiste essenzialmente di un cilindro superconduttore interrotto da un "weak link" (un contatto debolmente superconduttore) accoppiato ad un circuito risonante ad una frequenza di circa 20 MHz.

Per comprendere il principio di funzionamento di tale dispositivo conviene considerare dapprima le cosiddette "caratteristiche statiche" del cilindro superconduttore interrotto dal "weak link".

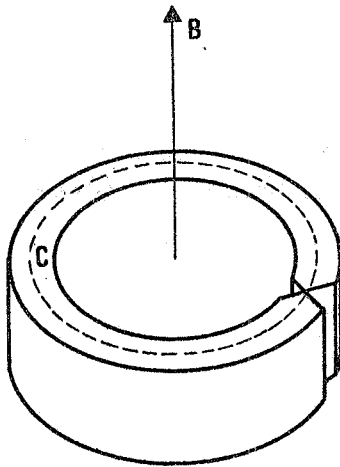


FIG. 1

Applichiamo un campo magnetico  $B$  parallelo all'asse del cilindro (v. Fig. 1) quando questo è nello stato superconduttore (link compreso): per la quantizzazione del flussoide si ha:

$$(1) \quad \oint_C \frac{m}{n e^2} \vec{J} \, dx + \phi_{\text{int.}} = n \phi_0$$

dove:

$n =$  intero,

$\phi_0 = 2,07 \times 10^{-7}$  gauss  $\times$  cm<sup>2</sup>,

$=$  densità di corrente nel supercond.

$\phi_{\text{int.}} = \int_s B \, d\sigma$

$s =$  area sottesa dal cammino  $C$ .

Poichè lo spessore del cilindretto è molto maggiore della lunghezza di penetrazione del superconduttore, scegliendo in maniera opportuna il cammino  $C$ , l'unico contributo all'integrale a primo membro della (1) viene dalla zona del link, e cioè la (1) diventa:

$$(2) \quad \gamma Li + \phi_{\text{int}} = n \phi_0$$

dove:

$i =$  corrente totale circolante

$L =$  induttanza del cilindretto ( $\approx 10^{-10}$  H)

$\gamma =$  fattore adimensionale  $\ll 1$ , dato da (2)

$\gamma = md / \rho e AL$

$d =$  lunghezza link,

$m =$  massa

$e =$  carica

$\rho =$  resistività link

$A =$  area trasversa del link.

Se il campo magnetico esterno applicato è tale che  $\phi_{\text{int}} = n \phi_0$  la corrente circolante  $i$  nel cilindretto è nulla. Aumentando il campo viene

indotta nel cilindretto una corrente  $i$  tale da riportare il valore del flussoide al valore di partenza  $n\phi_0$ . Questo è possibile finchè la corrente  $i$  non raggiunge il valore  $i_c$  della corrente critica del link. A questo punto il weak link passa nello stato normale e la (2) cessa di essere valida, in quanto è legata alla presenza di un cammino chiuso superconduttore. Il campo esterno penetra nel cilindretto provocando una variazione di flusso, la quale sarà uguale a  $\phi_0$  se la corrente critica del link soddisfa la relazione

$$(3) \quad Li \geq \phi_0/2 \quad (\text{ma non troppo maggiore})$$

Tenendo presente che

$$(4) \quad \phi_{\text{int}} = \phi_{\text{ext}} + Li$$

da questa e dalla (2) si ricavano le relazioni

$$(5) \quad \begin{aligned} \phi_{\text{int}} &\cong (n\phi_0 + \gamma\phi_{\text{ext}}) \\ Li &\cong (n\phi_0 - \phi_{\text{ext}})^{(x)} \end{aligned}$$

Le (5) costituiscono le caratteristiche statiche e sono riportate in Fig. 2<sup>(+)</sup>.

Come si vede in Fig. 2, le transizioni avvengono tra livelli corrispondenti a valori del flussoide che differiscono tra loro di un quanto di flusso: tale condizione è indispensabile al funzionamento del magnetometro a radio frequenza<sup>(o)</sup>, e dipende dalla validità della (3). Si comprende così il ruolo determinante del weak link, che deve possedere una corrente critica di valore opportuno.

Se si accoppia il cilindretto descritto (v. Fig. 3) con un circuito risonante LC, polarizzato in corrente, percorso da una corrente

$$i_{\text{RF}} = I_0 \cos \omega t$$

---

(x) - Per semplicità si è approssimato  $(1 + \gamma) \simeq 1$ .

(+) - La pendenza è pari a  $\gamma$

(o) - In tal caso la risposta del magnetometro ha, come vedremo, una periodicità pari a un quanto di flusso.

4.

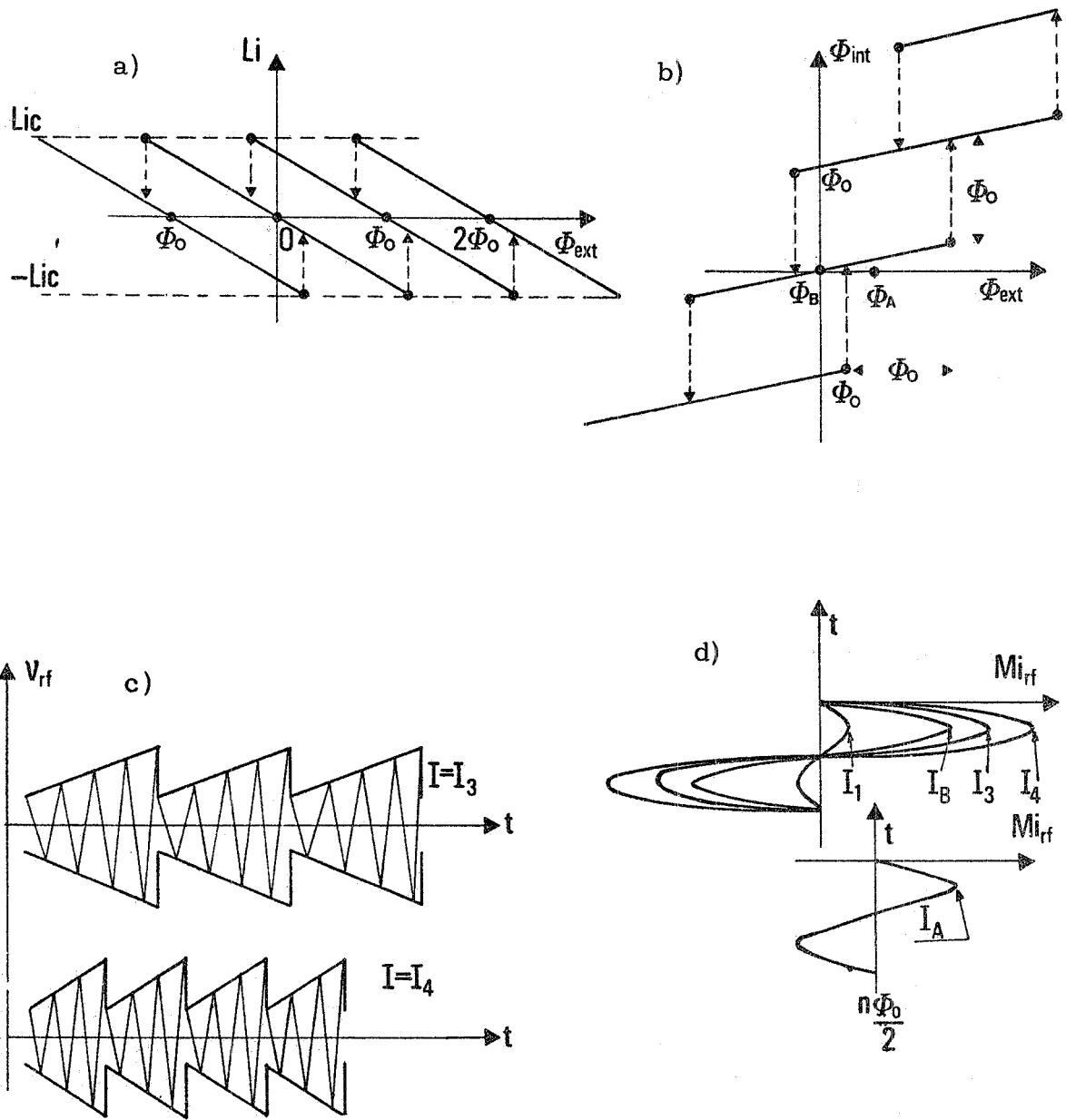


FIG. 2

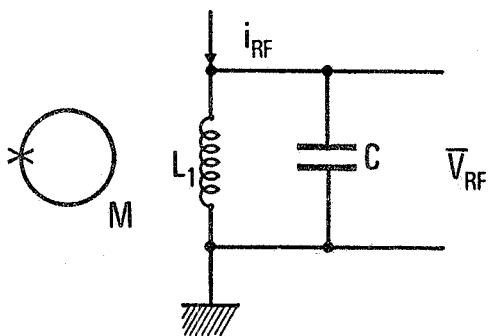


FIG. 3

con  $\omega$  pari alla frequenza di risonanza del circuito stesso, (v. Fig. 3), il flusso a radiofrequenza concatenato con il cilindretto è dato da

$$\phi_{RF} = M i_{RF}$$

dove  $M$  è il coefficiente di mutua induzione tra la bobina  $L_1$  e il cilindretto.

In presenza di un campo esterno costante il flusso totale esterno è :

$$\phi_{tot} = \phi_{ext} + M I_0 \cos \omega t$$

in queste condizioni la risposta dell'apparato è illustrata in Fig. 4 (caratteristiche dinamiche), dove  $\bar{V}_{RF}$  e  $\bar{I}_0$  sono rispettivamente il valor medio della tensione ed il valor medio della corrente a radiofrequenza nel circuito risonante. Osservando la figura 4a si nota la dipendenza della caratteristica dinamica dal campo magnetico statico  $\phi_{ext}$ : le due curve si riferiscono ai casi estremi

$$\phi_{ext} = n \phi_0 / 2 \quad ; \quad \phi_{ext} = n \phi_0$$

Tale dipendenza porta alla caratteristica illustrata in Fig. 4b, che lascia intravedere immediatamente la possibilità di utilizzare lo strumento come misuratore di campi magnetici: infatti, polarizzando lo SQUID ad una corrente di valore  $\bar{I}_0$  corrispondente ad un punto intermedio del plateau di Fig. 4a, ad una variazione del campo magnetico statico esterno, corrisponde una variazione periodica della  $\bar{V}_{RF}$  ai capi del circuito, variazione di periodo  $\phi_0$  e riportata in Fig. 4b.

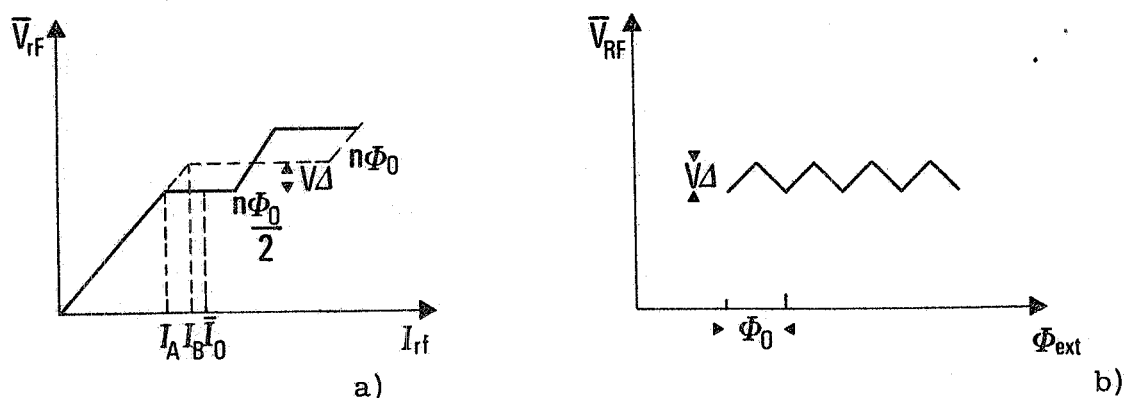


FIG. 4

6.

E' possibile dedurre qualitativamente le caratteristiche dinami che (v. Fig. 4a) dalle caratteristiche statiche di Fig. 2.

Consideriamo dapprima il caso  $\phi_{\text{ext}} = n (\phi_0/2)$  con  $n=1, 2, 3, \dots$  e per semplicità esaminiamo il caso  $n=1$ , essendo gli altri equivalenti. In tale condizione il sistema si trova nel punto corrispondente a  $\phi_A$  nelle caratteristiche statiche (v. Fig. 2b). Applicando al circuito risonante una corrente a radiofrequenza di intensità

$$i_{\text{RF}} = I_0 \sin \omega_0 t$$

il flusso totale nello SQUID diviene

$$\phi_{\text{tot}} = \phi_A + M I_0 \sin \omega_0 t$$

Fino a che l'ampiezza del segnale a radiofrequenza è tale che  $M I_0$  è minore della metà del flusso corrispondente ad un ciclo di isteresi, le correnti di schermo non raggiungono  $i_c$  ed il circuito risonante si comporta linearmente<sup>(x)</sup>. Questa situazione corrisponde al tratto lineare delle caratteristiche dinamiche.

Ma non appena l'ampiezza della corrente a radiofrequenza è tale che  $M I_0$  superi il suddetto valore di flusso, il weak link transisce allo stato normale, avendo le correnti di schermo raggiunto il valore  $i_c$ . A tale interruzione del cammino superconduttore corrisponde una variazione del carico sulla bobina a radiofrequenza, ovvero una variazione dell'induttanza effettiva della bobina stessa. In conseguenza di ciò il circuito LC esce di risonanza ed il livello di radiofrequenza si abbassa di colpo. Il sistema inoltre è obbligato a percorrere il primo ciclo di isteresi di Fig. 2b e perciò assorbe energia dall'esterno.

La transizione allo stato normale avviene in tempi molto brevi rispetto al periodo della radiofrequenza, dopo di che il weak link ritorna nello stato superconduttore; lo stesso non accade al circuito risonante che impiega un tempo molto maggiore per ripristinare il livello di radiofrequenza che aveva al momento della transizione; quando ciò accade il link transisce di nuovo e tutto il processo si ripete periodicamente, generando così una modulazione a dente di sega del segnale a radio frequenza (v. Fig. 2c).

Se si aumenta  $I_0$ , cresce la frequenza della modulazione a dente di sega del livello a radiofrequenza mentre la tensione  $\bar{V}_{\text{RF}}$  ai capi del circuito risonante rimane pressochè costante (zona del plateau nelle ca

---

(x) - La tensione ai capi del circuito è ovviamente  $V_{\text{RF}} = \omega L I$ .

ratteristiche dinamiche). Allorchè l'ampiezza di  $i_{RF}$  è tale che è sufficiente un solo ciclo a radiofrequenza per fornire al circuito risonante l'energia persa a causa della transizione del link, il valore  $\bar{V}_{RF}$  riprende ad aumentare linearmente. Quando l'ampiezza di  $i_{RF}$  è tale da far percorrere al sistema tre cicli di isteresi<sup>(x)</sup>, si ristabilisce il regime di non linearità (secondo plateau nella caratteristica dinamica).

Se invece il sistema si trova inizialmente nella condizione  $\phi_{ext} = n\phi_0$  ed in particolare  $n=0$ , (punto  $\phi_B$  delle caratteristiche statiche Fig. 2b) il regime di non linearità si stabilisce quando l'ampiezza di  $i_{RF}$  è tale da far percorrere al sistema due (o, in generale un numero pari) cicli di isteresi. Detto  $I_B$  tale valore, e  $I_A$  quello relativo al caso precedente (v. Fig. 4a), risulta immediatamente che

$$I_B - I_A = \frac{\phi_0}{2M}$$

e quindi, l'ampiezza  $V_\Delta$  dei triangoli di Fig. 4b, risulta

$$V_\Delta = \frac{1}{2} \omega L_1 \frac{\phi_0}{M}$$

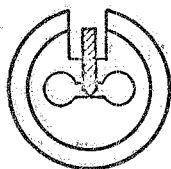
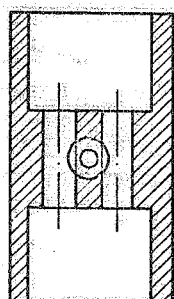


FIG. 5

#### DESCRIZIONE DELLO STRUMENTO E RISULTATI SPERIMENTALI. -

L'elemento sensibile dello strumento è formato da un cilindretto di Niobio lungo 25 mm e di diametro di 9,5 mm. L'interno del cilindretto è forato in modo da realizzare due cammini superconduttori chiusi uniti da un contatto puntiforme (v. Fig. 5).

Tale configurazione è dovuta a Zimmermann<sup>(3)</sup> ed unisce al vantaggio di una considerevole stabilità meccanica quello di un buon autoschermaggio dai campi esterni. In una dei due fori viene infilata la bobina a radiofrequenza (in modo da realizzare un accoppiamento debole), mentre l'altro viene accoppiato tramite un trasformatore su perconduttore al campo magnetico che si vuole misurare.

Il contatto puntiforme è stato dapprima realizzato mediante uno spinotto di Nb appuntito ad una estremità mandato a forzare entro una sede conica nel corpo dello SQUID. L'avanzamento poteva essere regolato

(x) - In generale un numero dispari di cicli di isteresi.



mediante un micrometro, quando lo SQUID si trovava a temperatura dell'elio. Un tal tipo di configurazione permette dunque di regolare "in situ" la corrente critica del link<sup>(x)</sup>; d'altra parte presenta lo svantaggio di richiedere ogni volta la regolazione della punta.

Successivamente il contatto puntiforme è stato realizzato mediante una vite di Nb di diametro 1 mm e di passo 0,25 mm, bloccata sullo SQUID mediante un controdado. Tale configurazione richiede la necessità di una regolazione a temperatura ambiente del contatto puntiforme, ma offre il vantaggio di una lunga ciclabilità.

Il segnale a radiofrequenza viene inviato alla bobina del circuito risonante tramite un cavo coassiale costituito da due tubi concentrici di acciaio inox di diametro esterno rispettivamente 2 mm e 10 mm. La linea è lunga circa 90 cm ed è immersa parte in elio parte in aria. Il circuito risonante viene accoppiato al generatore a radiofrequenza mediante una piccolissima capacità (< 1 pF) in modo da essere pilotato in corrente.

Il circuito risonante è formato da una bobina di 13 spire di filo di rame di diametro 0,15 mm avvolte su un supporto cilindrico di fenovit di diametro 1 mm; la capacità (un condensatore a mica) in parallelo alla bobina è di 500 pF. La frequenza di lavoro è in tal modo di 19,0 MHz circa, mentre il Q del circuito risonante all'elio è circa 100.

In Fig. 6 è riportato lo schema a blocchi del circuito che permette di osservare le caratteristiche dinamiche dello SQUID.

L'amplificatore a radiofrequenza, a basso rumore d'ingresso e alta impedenza, è dotato di un guadagno maggiore di 60 db ed è stato realizzato presso il gruppo radiofrequenza dei Laboratori Nazionali di Frascati.

Per osservare le caratteristiche dinamiche di Fig. 4a (a "gradini") occorre modulare a bassa frequenza (circa 500 Hz) il segnale a radiofrequenza: il segnale ai capi del circuito risonante viene rivelato, demodulato e inviato sull'asse Y dell'oscilloscopio mentre sull'asse X dello stesso viene inviato il segnale di modulazione a bassa frequenza. Il circuito di misura è quello indicato in Fig. 6 quando l'interruttore è in posizione A. La curva sperimentale osservata è riportata in Fig. 7.

Quando l'interruttore è chiuso invece sulla posizione B, si osservano le caratteristiche dinamiche 4b (a "triangoli"). In questo caso il segnale ad audio frequenza fornisce il campo magnetico quasi statico

---

(x) - Requisito importante qualora si voglia scendere a temperature inferiori a 4,2°K.

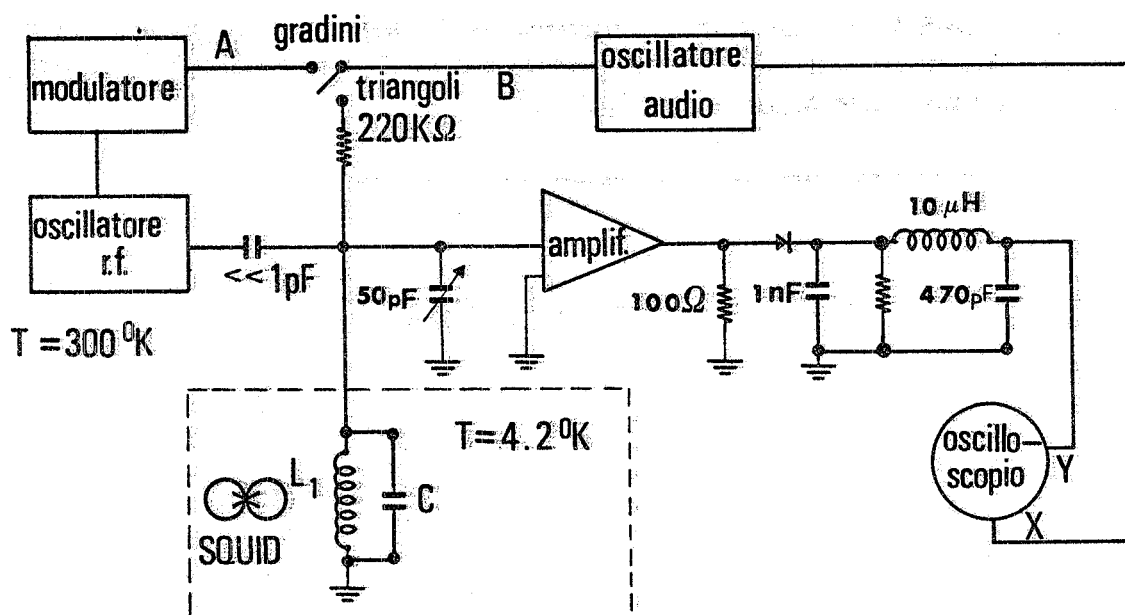


FIG. 6

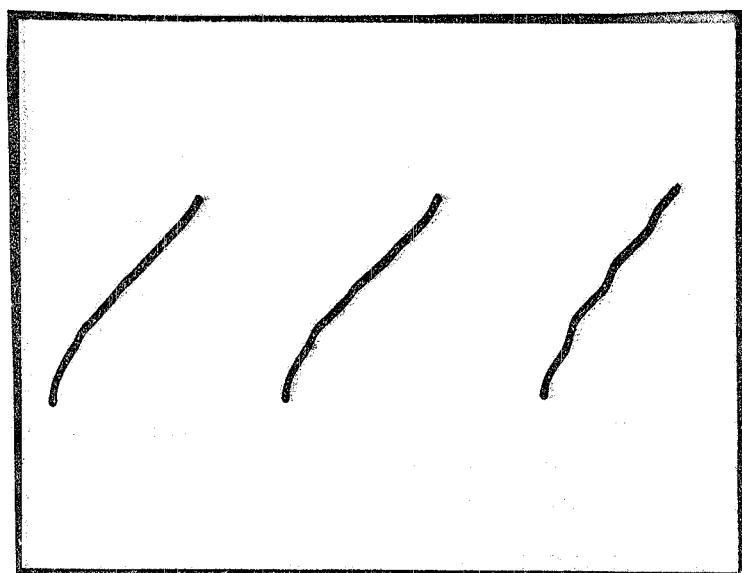


FIG. 7 - Andamento di  $\bar{V}_{\text{RF}}$  in funzione di  $I_{\text{RF}}$ . Le varie curve corrispondono a valori diversi della frequenza del segnale di polarizzazione a r.f.

applicato allo SQUID. Le curve sperimentali osservate sono riportate in Fig. 8. Le varie curve corrispondono a livelli crescenti del segnale a radiofrequenza applicato allo SQUID.

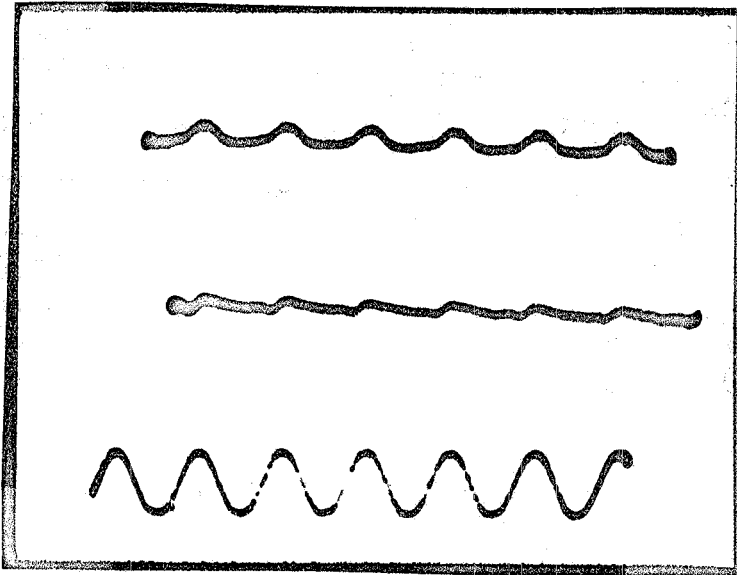


FIG. 8 - Andamento di  $\bar{V}_{RF}$  in funzione del campo magnetico applicato. Le varie curve corrispondono a valori diversi dell'ampiezza della  $I_{RF}$ . La periodicità è uguale a  $\phi_0 = 2.07 \cdot 10^{-7}$  Gauss  $\times$  cm<sup>2</sup>.

#### APPLICAZIONI E SVILUPPI. -

Il magnetometro a radiofrequenza da noi realizzato è uno strumento capace di misurare frazioni ( $10^{-2} \div 10^{-3}$ ) di quanto di flusso  $\phi_0$  ( $\phi_0 = 2,07 \times 10^{-7}$  gauss  $\times$  cm<sup>2</sup>) con costanti di tempo di  $10^{-2}$  sec in campi magnetici anche di qualche Kgauss.

Con particolari accorgimenti lo strumento può diventare un picovoltmetro<sup>(4)</sup>, capace di misurare tensioni di  $10^{-14}$  Volt con costante di tempo di 1 sec.

Usato come strumento di zero in un ponte a bassa frequenza esso permette ad esempio, di misurare<sup>(5)</sup> una resistenza di  $1 \mu \Omega$  con una precisione di  $10^{-5}$  con dissipazione minore di  $10^{-12}$  watt.

Tale strumento, per la sua versatilità e sensibilità, trova applicazione in moltissimi campi. Tra questi citiamo:

Medicina: in particolare nel campo della magnetocardiografia<sup>(6)</sup>. Si misura il campo magnetico generato dalle correnti del cuore; si possono

dedurre informazioni supplementari a quelle di un normale elettrocardiogramma<sup>(7)</sup>.

Biofisica: in particolare nel campo della magnetochimica<sup>(8)</sup>; misurando la suscettività magnetica di macromolecole contenenti ioni paramagnetici, si hanno informazioni sulla struttura delle molecole e sui legami chimici.

Gravimetria<sup>(9)</sup> e rivelazione di onde gravitazionali<sup>(10)</sup>: si misurano le variazioni di flusso magnetico prodotte dal movimento dovuto a variazioni del campo gravitazionale, di una sferetta superconduttrice, levitata magneticamente.

#### CONCLUSIONI. -

La linea di ricerca sin qui seguita ci ha permesso di acquisire l'indispensabile bagaglio tecnologico e scientifico, necessario per portare avanti in maniera originale tutti quei possibili miglioramenti che mirino ad aumentare la sensibilità e la versatilità dello strumento.

In particolare la direzione in cui ci stiamo muovendo è quella di aumentare la frequenza di polarizzazione dello SQUID; cosa che consentirà di migliorare il rapporto segnale rumore e di diminuire il tempo di risposta dello strumento.

Gli autori ringraziano in particolare l'Ing. Tazzioli e il Sig. Fascetti per la realizzazione dell'amplificatore a radiofrequenza. Ringraziano altresì il Dr. M. Cerdonio per gli utili suggerimenti e discussioni e il Sig. G. Bitti per la collaborazione nella lavorazione meccanica dello SQUID.

## BIBLIOGRAFIA. -

- (1) - B. D. Josephson, Phys. Letters I, 251 (1962).
- (2) - A. H. Silver and J. E. Zimmermann, Phys. Rev. 157, 317 (1967).
- (3) - J. E. Zimmermann, P. Thiene and J. T. Harding, J. App. Phys. 41, 1572 (1970).
- (4) - J. E. Lukens et al., J. App. Phys. 42, 27 (1971).
- (5) - R. P. Giffard et al., J. of Low Temp. Phys. 6, 533 (1972).
- (6) - D. Cohen et al., App. Phys. Letters 16, 278 (1970); J. E. Zimmermann et al., App. Phys. Letters 19, 16 (1971); G. M. Baule et al., Amer. Heart Journ. 79, 223 (1970).
- (7) - P. J. Karp et al., Report TKK-F-A194 (1973).
- (8) - M. Cerdonio et al., Proc. Conf. on Low Temp. Phys., Boulder Colorado, (1972).
- (9) - W. A. Prothero jr. et al., Rev. Sci. Instr. 39, 1257 (1968).
- (10) - P. Carelli, M. Cerdonio, U. Giovanardi, G. Lucano and I. Modena, Communication at Colloque International ondes e radiation gravitationelle, Parigi (1973).