

COMITATO NAZIONALE PER L'ENERGIA NUCLEARE
Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-75/43(R)
15 Settembre 1975

G. Baldacchini: DEWAR OTTICO MAGNETICO - DOM.

LNF-75/43(R)
15 Settembre 1975

G. Baldacchini: DEWAR OTTICO MAGNETICO - DOM. -

1. - INTRODUZIONE. -

In questi ultimi anni grazie al vertiginoso sviluppo della tecnologia della preparazione di fili superconduttori, capaci di condurre alte correnti, $I > 50$ A, in presenza di alti campi magnetici, $B > 50$ KG, si è assistito ad un sempre maggior uso di magneti superconduttori nei più svariati campi della ricerca scientifica e tecnologica. In Fisica dello Stato Solido in particolare, la possibilità di avere a disposizione campi magnetici maggiori di 30 KG, quasi un limite fino a qualche decennio fa per i tradizionali magneti in ferro, oltre ad avere permesso una migliore verifica di fenomeni osservati in precedenza, ha aperto nuovi campi alla indagine scientifica. Ad esempio la Magneto-Ottica ha visto ultimamente un enorme sviluppo.

Poichè era mia intenzione iniziare delle misure in questo campo, mi si è posto il problema di come reperire un criostato ottico con un magnete superconduttore capace di raggiungere ~ 80 KG. Un'altra richiesta molto stringente per questo tipo di indagine è la mancanza assoluta di attività ottica nelle finestre; in altre parole le finestre non debbono essere soggette a sforzi meccanici.

Attualmente è possibile reperire un simile complesso Magnete + Criostato ottico presso ditte altamente specializzate. Esistono però delle difficoltà. Generalmente le prestazioni di questi apparati non sono sempre all'altezza delle aspettative e comunque eventuali danni, inevitabili dopo un certo numero di cicli termici, sono difficilmente riparabili. Inoltre da non trascurare è il loro costo spesso proibitivo. Tutto ciò, unito al fatto che esistevano (ed esistono) nel mio laboratorio le competenze tecniche richieste, mi ha spinto a realizzare "in casa" un tale complesso.

L'apparato denominato Dewar Ottico Magnetico (DOM) è stato

2.

effettivamente costruito e da circa un anno è in funzione. Attualmente viene usato per esperienze ottico magnetiche in centri F e studi Zeeman di luminescenza in semiconduttori. Fino ad ora sono state effettuate circa trenta esperienze ed il suo funzionamento non ha subito variazioni di sorta rispetto alla prima prova sperimentale. Le sue caratteristiche sono ottime da tutti i punti di vista, paragonabili se non superiori a quelle di simili apparati commerciali.

In quel che segue è mia intenzione fare una dettagliata descrizione del criostato e del magnete superconduttore, accompagnata naturalmente dalle caratteristiche di funzionamento in una reale prova sperimentale. Una delle ragioni che mi ha spinto a scrivere questa nota è la possibilità che in questo modo viene offerta a quei piccoli laboratori, che non possiedono capacità di progettazione o conoscenze appropriate in materia, di poter realizzare apparati similari o di poter cogliere per altri scopi particolari soluzioni tecniche adottate nella realizzazione del DOM.

2. - CRIOSTATO. -

In Fig. 1 è riportato il disegno costruttivo di assieme del criostato, che è formato da un involucro esterno, il cui compito principale è quello di mantenere un buon vuoto, dal contenitore interno, parte del quale va riempito di Elio liquido e dallo schermo di radiazione tra i due.

L'involucro esterno, eccetto la flangia superiore 4 ed il colletto 2, entrambi in acciaio inox, è realizzato in lega di Alluminio Anticorodal. Gli spessori delle pareti, 3.5 mm per la Tank 6, 6 mm per la sottocoppa 9, 13 mm per la flangia della sottocoppa 8, 10 mm per la flangia superiore 4 e 1.5 mm per il colletto 2, sono stati calcolati con un buon margine di sicurezza al fine di evitare possibili implosioni. La scelta di una lega leggera per la maggior parte dell'involucro è stata invece dettata dal vantaggio pratico conseguente il minor peso complessivo del contenitore.

Il contenitore interno è invece realizzato completamente in acciaio inox 18/8. La parte inferiore 38 in lamiera da 4 mm, il contenitore di riserva 35 da 1 mm, la flangia di raccordo 34 da 5 mm e la boccia di sup porto 16 da 1 mm. Un discorso a parte meritano il collo del dewar 32 e la flangia inferiore 39.

Una parte notevole dell'ingresso di calore nel bagno di Elio liquido è dovuto alla conduzione lungo il collo del dewar. In formula si ha⁽¹⁾ $Q = \bar{\lambda} (2 \pi r s / l) \Delta T$, in cui $\bar{\lambda}$ è la conducibilità media del materiale tra 300 K e 4 K, $\Delta T \approx 300$ K, l la lunghezza del collo e r ed s il suo raggio e lo spessore. Per ridurre il valore di Q al minimo, una volta scelto il materiale (per l'acciaio $\bar{\lambda} \approx 0.103$ W/cmK), si cerca di rimpicciolire il diametro $2r$, lo spessore s e di aumentare la lunghezza l . In questo caso

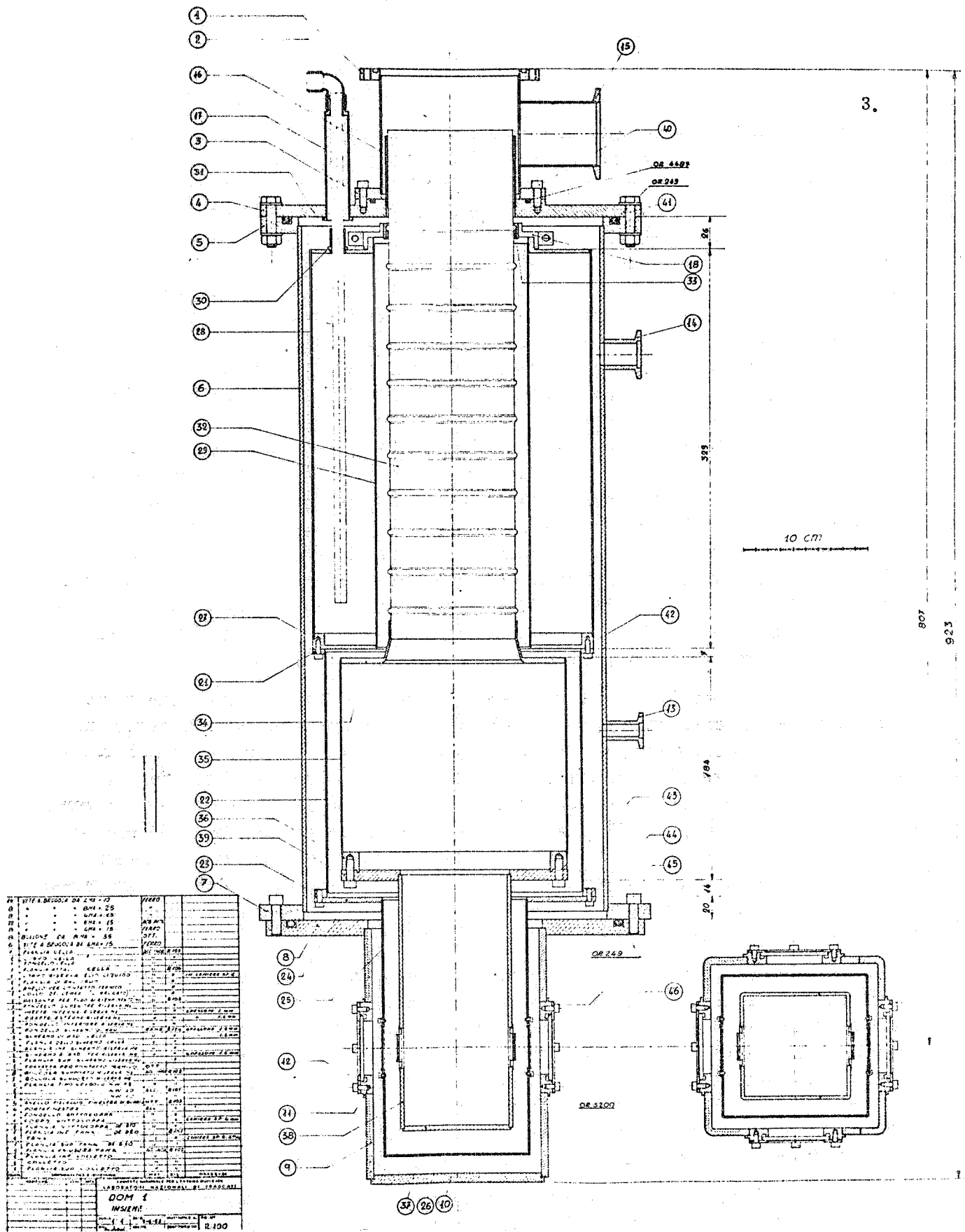


FIG. 1 - Disegno costruttivo del Criostato.

4.

il diametro minimo è fissato dal massimo ingombro orizzontale del magnete superconduttore, ~ 100 mm. La lunghezza l non può superare certi valori imposti da limitazioni generiche sull'ingombro totale del dewar. Lo spessore s non può essere inferiore ad un valore dettato da ragioni di robustezza e dal fatto che il tubo deve essere a prova di buchi a basse temperature. A tale scopo si è usato un tubo di acciaio inox, ottenuto dalla Thor Cryogenics, con $2r = 101.6$ mm e $s = 0.38$ mm. E' chiaro che con questa scelta non abbiamo tenuto conto della robustezza meccanica. Infatti la pressione di implosione per un tubo simile è di circa 0.3 atmosfere⁽²⁾. La sua robustezza meccanica è stata aumentata corrugandolo a freddo lungo tutta la sua lunghezza, come può essere ben visto in Fig. 1. Malgrado questi accorgimenti l'ingresso di calore per conduzione è ~ 1 Watt. Per abbassare ulteriormente questo valore, un po' troppo alto per un dewar sperimentale di questo tipo, il collo del tubo è stato ancorato alla riserva di Azoto liquido tramite la cravatta 18 non rigida, realizzata in Ottone e treccia di Rame. La non rigidità della cravatta è essenziale al fine di permettere alla parte interna del dewar movimenti liberi causati dalle inevitabili contrazioni termiche. In questo modo l'ingresso di calore viene ridotto a ~ 400 mW. Naturalmente si deve tener presente che una parte notevole di questo calore viene neutralizzato dai vapori freddi ascendenti di Elio, ma di questo parleremo in un secondo tempo.

La flangia 39 ha uno spessore, 9 mm, di gran lunga superiore a quello strettamente necessario, 3 - 5 mm, a sopportare la differenza di pressione di 1 atmosfera. Infatti questa flangia esercita una funzione particolare unitamente alla controflangia 36, e cioè una perfetta tenuta all'Elio superfluido tra la parte inferiore 38, detta cella, e la riserva vera e propria di Elio liquido 35. La tenuta è assicurata da una guarnizione di Indio stretta tra un dente ed una gola circolari per mezzo di dodici viti da 6 mm su una circonferenza di 170 mm di diametro. Tale accorgimento è stato adottato per evitare la possibile apertura di un superleak durante i numerosi cicli termici cui è soggetta la cella.

Come può ben essere visto in Fig. 1, per la cella e la parte inferiore del dewar si è scelta una sezione quadrata. Ciò è dovuto alle seguenti ragioni. La sezione orizzontale del magnete superconduttore è approssimativamente quadrata, ed avere un contenitore quadrato significa risparmiare spazio. Inoltre la distanza tra il centro della bobina e un lato del quadrato è più piccola rispetto ad un cerchio circoscritto e ciò è molto importante per esperienze ottiche. Infine è molto più semplice montare finestre ottiche su una superficie piana che su una cilindrica.

Un'altra peculiarità del criostato è che la sua parte inferiore è completamente asportabile. Ciò è stato fatto in parte per semplificarne il montaggio ed in maggior misura per accedere con facilità alle tre coppie di finestre che possono danneggiarsi o più semplicemente sporcarsi. Inoltre la geometria della cella può essere cambiata a piacimento. In una prospettiva di sviluppo è stata già prevista una diversa cella per soddisfare

particolari esigenze sperimentali.

Lo schermo per radiazioni è composto da un recipiente a sezione di corona circolare le cui pareti 28 e 29, di acciaio inox, hanno uno spessore di 1.5 e 1.0 mm rispettivamente. Questo contenitore, che ha un volume di ~ 8 litri, è appeso alla flangia superiore 4 tramite tre tubi di acciaio inox a pareti sottili, 0.2 mm, e tre boccole di supporto 17. Nella Fig. 1 solo uno dei tre tubi è visibile, ed è quello usato per immettere Azoto liquido. Nella flangia inferiore 27 è attaccato il resto dello schermo costituito da due pezzi smontabili 22 e 25, entrambi realizzati in lamiera di Rame da 1.5 mm di spessore al fine di avere una buona conduzione termica.

Per ridurre al minimo gli ingressi di calore dovuti all'irraggiamento di corpo nero della tank esterna, gli schermi di radiazione sono stati dorati e le superfici di acciaio lucidate. Per lo stesso motivo tutta la superficie esterna del contenitore di Elio liquido, compreso il collo 32, è stata ricoperta con uno strato di mylar alluminato. Con questo accorgimento l'ingresso di calore per irraggiamento risulta essere ~ 15 Watts per lo schermo di Azoto liquido e ~ 10 mW per il contenitore di Elio liquido. Questo ultimo valore è quasi completamente trascurabile in confronto all'ingresso termico per conduzione lungo il collo 32, circa 400 mW come si è visto in precedenza. Al contrario per lo schermo di Azoto liquido l'irraggiamento rappresenta la causa principale di ingresso di calore essendo quello dovuto alla conduzione attraverso la cravatta 18 circa 5 Watts; i tre tubi di sostegno conducono un ordine di grandezza di meno. In ogni caso il volume di Azoto liquido a disposizione dovrebbe assicurare un raffreddamento efficiente dello schermo per più di 12 ore.

A questo punto vorrei ricordare che tutte le saldature sono state eseguite ad Argon-elettriche ad eccezione di quelle tra il collo 32 e la boccola di supporto 16 a Stagno, tra i tre tubi di acciaio e le boccole di supporto 17 pure a Stagno e tra i tre tubi di acciaio e i passanti 30 a Castolin 1802.

L'interno della cella è accessibile otticamente tramite tre coppie di finestre di quarzo fuso della Quartz & Silice. La prima a temperatura ambiente di Puropsil A, $\phi = 55.5$ mm e spessore 3 mm, la seconda alla temperatura dell'Azoto liquido di Puropsil A, $\phi = 37.0$ mm e spessore 1 mm, e la terza alla temperatura dell'Elio liquido di Tetrasil SE, $\phi = 22.0$ mm e spessore 1.6 mm. In pratica le prime due finestre assicurano una trasparenza superiore al 90% tra 0.26 e 2.5 μ m mentre la terza ha una banda leggermente più larga, 0.18 - 2.5 μ m.

La prima finestra, con luce effettiva di ~ 44 mm, ha la tenuta di vuoto assicurata da un O-ring. La seconda non ha problemi di vuoto ed è tenuta sul posto da tre grappe metalliche. La sua ragione di essere risiede

nel fatto che essa blocca la radiazione di corpo nero, $T=300$ K, che verrebbe assorbita dal contenitore di Elio liquido in sua assenza. Una stima ragionevole dà ~ 200 mW per finestra. Poichè questa radiazione ha il suo massimo ad una lunghezza d'onda di $10 \mu\text{m}$, una finestra trasparente fino a $2,5 \mu\text{m}$ e alla temperatura dell'Azoto liquido ne blocca più del 90% e riemette una quantità di energia $\sim (300/77)^4 \simeq 200$ volte inferiore e quindi trascurabile.

Per le finestre alla temperatura dell'Elio liquido si dovevano risolvere due difficoltà. La perfetta tenuta all'Elio liquido superfluido e la mancanza totale di stress meccanici. A questo fine diverse soluzioni sono state proposte da vari autori⁽³⁾, vedi anche lo White⁽¹⁾ a pag. 185, ma io ho trovato molto più soddisfacente il sistema adottato da Mollenauer⁽⁴⁾, che per conoscenza diretta sapevo aver funzionato per lungo tempo ed in modo soddisfacente. Non starò qui a descrivere come sono stati realizzati in pratica i portafinestra in Rame OFHC, per i quali rimando alla pubblicazione su citata. Dirò invece che l'incollaggio tra quarzo, portafinestra e parete di acciaio del criostato è stato eseguito con Epikote 828 + Epikure K 61 B della Shell nelle proporzioni 10/1 e con un ciclo di cura di 2 h a 60 C e 1/2 h a 150 C. In Fig. 2 è riportata la fotografia della parte inferiore del dewar montato in cui può essere osservata la disposizione delle tre finestre.

Il vuoto di isolamento nella intercapedine viene effettuato tramite la flangia 14, Leybold NW20, da una pompa rotativa da $15 \text{ m}^3/\text{h}$ attraverso una linea di 40 mm di diametro e lunga ~ 10 m. Per evitare che i vapori di olio della pompa possano accedere nell'intercapedine del dewar e quindi sporcare le finestre ottiche, una trappola a zeolite a temperatura ambiente è stata inserita lungo la linea. La flangia 13, Leybold NW10, è usata per la misura del vuoto. Con questo sistema il vuoto di isolamento raggiunge a caldo un valore di 10^{-3} torr. Immediatamente a ridosso delle flangie 13 e 14 sono state poste due valvole con le quali è possibile isolare completamente l'intercapedine dalle linee esterne. La valvola connessa alla linea di pompaggio viene chiusa quando c'è Elio liquido nel criostato. Infatti le pareti fredde agiscono da pompa criogenica in modo molto più efficiente della rotativa. Il vuoto "statico" che si raggiunge in questo caso, misurato esternamente al dewar, è di $7+8 \cdot 10^{-6}$ torr. Senza dubbio migliore è il vuoto presente in prossimità delle superfici criogeniche. La bontà del vuoto di isolamento permette di trascurare completamente gli ingressi termici per conduzione gassosa, vedi lo White⁽¹⁾ a pag. 209.

La flangia 15, Leybold NW75, è utilizzata per aspirare sul bagno di Elio ed abbassarne ulteriormente la temperatura. Una pompa rotativa da $60 \text{ m}^3/\text{h}$, attraverso una linea di 100 mm di diametro (50 mm nell'ultimo tratto) e lungo ~ 10 m, è usata a tal uopo.

Entrambe le pompe di cui sopra sono state poste a notevole di-

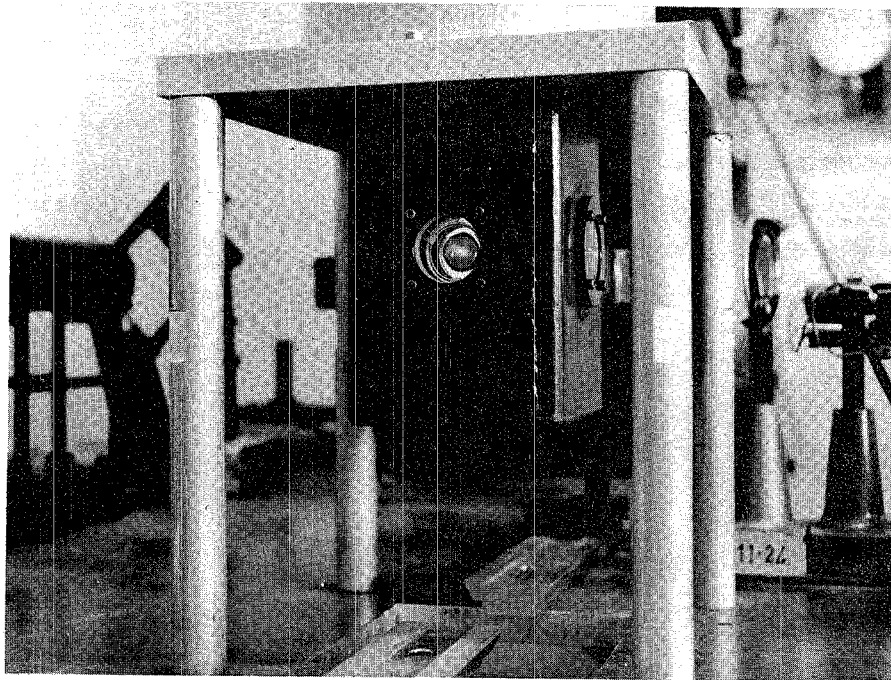


FIG. 2 - Fotografia della parte inferiore del criostato.

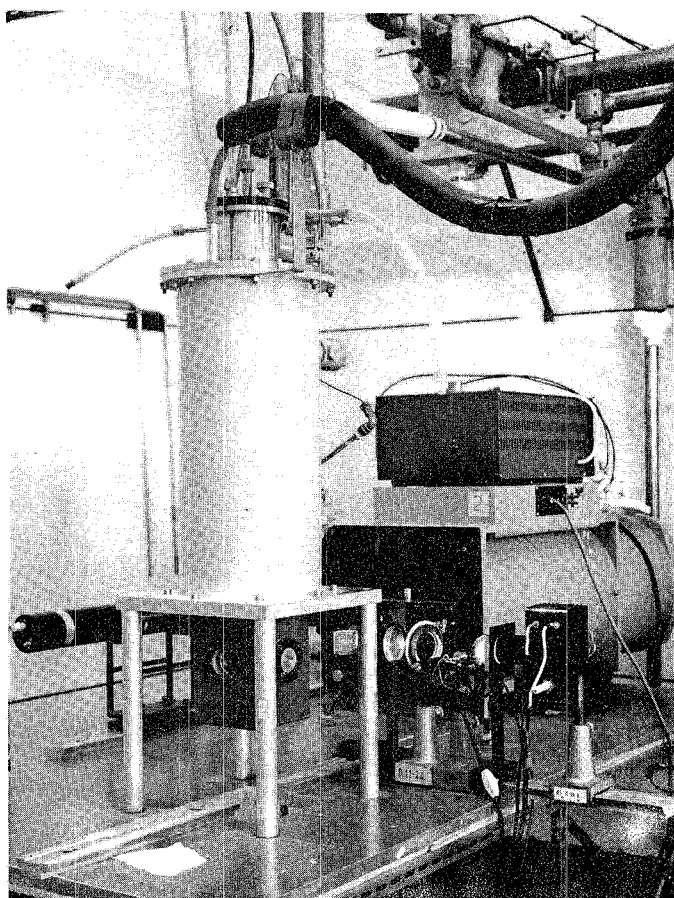


FIG. 3 - Fotografia del criostato montato sul banco ottico.

stanza dal dewar per evitare sia il rumore che le vibrazioni. Per eliminare ancora di più queste ultime, due pezzi lunghi ~ 50 cm delle linee di pompaggio sono stati sostituiti con tubi di neoprene rinforzato.

In Fig. 3 è mostrata la foto del DOM montato sul banco ottico. In alto a destra si possono vedere le linee di pompaggio che partono da un lato, poco invisibile nella foto, del dewar. Tutto il complesso poggia per mezzo della sporgenza della flangia 7, Fig. 1, su una mensola sorretta da quattro colonnine di Anticorodal. Il tutto è sostenuto da un pianale ottico pure in Anticorodal, spesso 25 mm, di $2 \times 1 \text{ m}^2$; una serie di fori filettati 8 MA a mò di reticolo, passo 146 mm, permettono un comodo montaggio di tutte le apparecchiature ottiche. Con questo tipo di struttura la parte inferiore del dewar è facilmente accessibile per operazioni di smontaggio ed inoltre lo spazio ottico intorno alle finestre è sufficientemente sgombro. La distanza dal piano della guida ottica, in Anticorodal e visibile sul pianale ottico in Fig. 3, al centro delle finestre è di 240 mm.

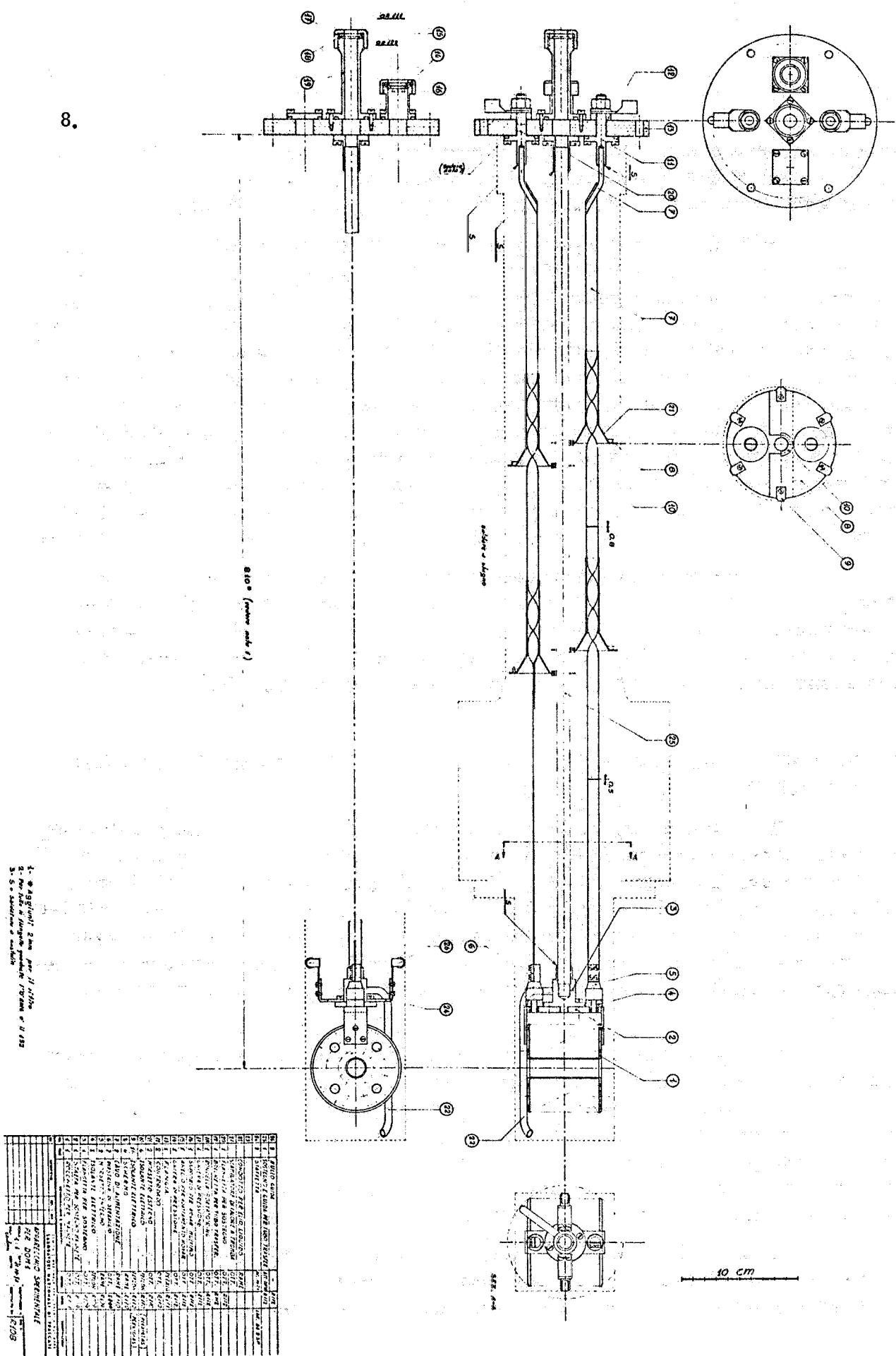
Prima di chiudere questo paragrafo vorrei far notare che il disegno costruttivo di Fig. 1 rappresenta la situazione con il criostato in funzione, cioè con i liquidi criogenici al suo interno. Infatti bisogna tener conto che sia lo schermo di radiazione che il contenitore interno subiscono un accorciamento di ~ 2 mm quando sono raffreddati.

3. - MAGNETE SUPERCONDUTTORE, SUPPORTO E CAVI DI ALIMENTAZIONE. -

Il magnete superconduttore è composto da 9521 spire di filo su perconduttore multicore Nb-Ti Niomax-FM A 61/40 della Imperial Metal Industries. La bobina di 70 strati ha un raggio minimo di 17.8 mm, un raggio massimo di 73.4 mm ed è alta 60.3 mm. Il filo, lungo 1340 m, è avvolto su un rocchetto di ottone isolato con fogli di mylar di altezza 65 mm, diametro massimo 78 mm e foro (bore) 16 mm. Il magnete è stato calcolato in modo da fornire un campo di ~ 80 KG con una corrente di ~ 50 A.

In Fig. 4 è mostrata la fotografia del magnete completo di attacchi elettrici. Come può essere facilmente visto un certo numero di fori è stato praticato lateralmente sul rocchetto per permettere all'Elio liquido di fluire più facilmente tra le spire dell'avvolgimento e raffreddare quindi più efficacemente la bobina. Un disegno schematico della bobina si ha anche nella parte bassa di Fig. 5, che nel suo complesso rappresenta l'intero apparato sperimentale connesso al magnete.

Il tubo di acciaio 25 a pareti sottili, 0.2 mm, sostiene il magnete del peso di 1.5 Kgr e viene usato anche come guida per il tubo di trasferimento. Alla sua estremità inferiore è comunicante con il tu-



1. * Aggunti 2 mm per 1/10
 2. per tubo a flange grande forma n° 133
 3. per tubazione a valvole

FIG. 5 - Disegno schematico dell'apparecchio sperimentale.

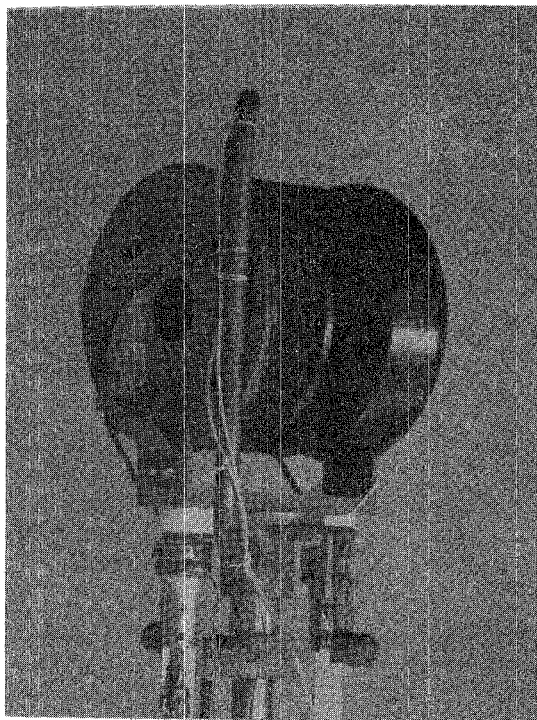


FIG. 4 - Fotografia del magnete superconduttore.

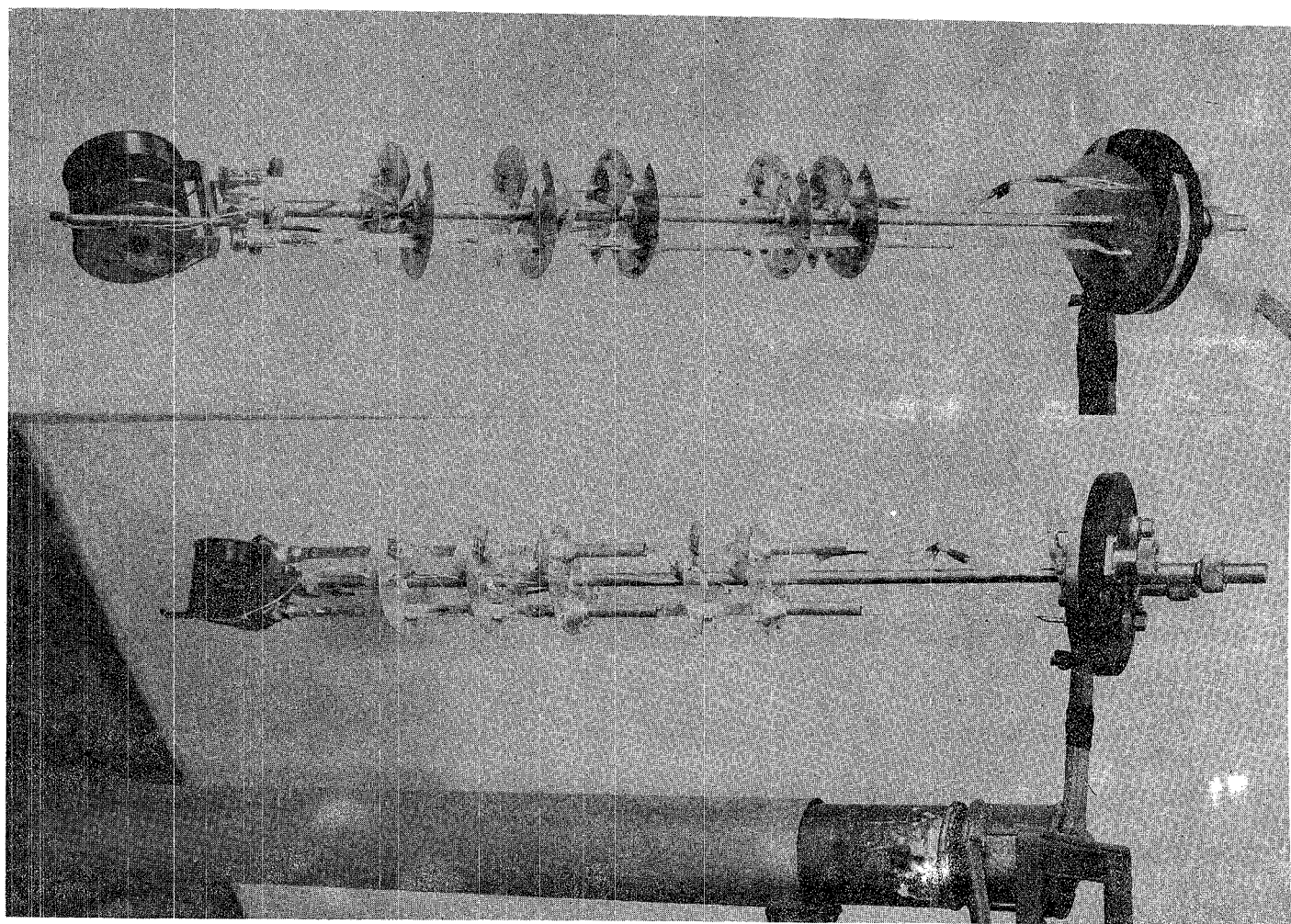


FIG. 6 - Fotografia dell'apparecchio sperimentale visto da due angolazioni diverse.

bicino di Rame 22, ben visibile in Fig. 4 e Fig. 6, che ha lo scopo di convogliare l'Elio liquido al di sotto del magnete superconduttore. Questa precauzione è stata dettata dalla presenza di una notevole massa da raffreddare e dalla necessità quindi di trasferire l'Elio liquido con la massima efficienza di refrigerazione. Nella parte superiore il tubo è sospeso ad una flangia di Plexiglas 13 dalla quale si dipartono i due cavi 7 che alimentano il magnete ed un certo numero di fili metallici isolati, vedi Fig. 6, che sono utilizzati per operazioni di controllo del livello di Elio liquido e del magnete.

La sezione dei cavi di alimentazione in Rame, 8 mm^2 , è stata calcolata in modo da minimizzare gli ingressi di calore per una corrente pari a $\sim 50 \text{ A}$. Come è stato mostrato da Mc Fee⁽⁵⁾, si ha un valore di minimo quando gli ingressi termici per conduzione eguagliano quelli per dissipazione Joule. Se A è la sezione, L la lunghezza dei cavi ed I la corrente che vi fluisce, il minimo si ha per il Rame quando $LI/A = 5 \cdot 10^4 \text{ A/cm}$. Essendo $L = 75 \text{ cm}$, si ottiene $A \simeq 8 \text{ mm}^2$ per $I = 50 \text{ A}$. Inoltre poichè una minore sezione è richiesta quando la temperatura del cavo si abbassa, nel tratto inferiore si è usata una sezione di 5 mm^2 . Malgrado questa ottimizzazione l'ingresso di calore è pari a $\sim 2 \text{ Watts}$ per cavo, un valore troppo grande per le capacità del dewar. E' allora necessario utilizzare le proprietà refrigeranti dei vapori ascendenti di Elio. Varie soluzioni tecniche sono state escogitate negli ultimi anni per risolvere questo problema e con buoni risultati^(6, 7). In questo caso invece di costruire un sistema di raffreddamento già noto dalla letteratura, ho preferito svilupparne uno nuovo, anche se è una derivazione più o meno indiretta di altri.

In modo da offrire una maggiore superficie di scambio ai vapori freddi i cavi di alimentazione sono a forma di piattina. Inoltre il flusso di vapore ascendente è obbligato ad avere un più stretto "contatto" con i conduttori per la presenza delle trombe rovesciate 21 e degli avvolgimenti elicoidali delle piattine all'interno delle trombe, vedi anche la Fig. 6. Non ho eseguito conti teorici per determinare le dimensioni ottimali di questi elementi refrigeranti, ma piuttosto mi sono lasciato guidare dal comune buon senso ed in parte da alcune prove sperimentali. A questo proposito è bene sottolineare che è sufficiente utilizzare il $30+40\%$ della capacità refrigerante del gas per avere il 90% e più di efficienza nel raffreddamento⁽⁸⁾.

Attaccato a ciascuna tromba uno schermo di Rame ha il compito di aumentare la superficie di scambio e di schermare il bagno di Elio dalla radiazione di corpo nero proveniente dalla flangia superiore 13 a 300 K . Sembrerebbe opportuno a prima vista montare un numero considerevole di schermi, ma ciò avrebbe l'inconveniente, oltre quello ovvio di appesantire l'apparato, di diminuire la velocità di aspirazione sul bagno

di Elio e quindi precluderebbe la possibilità di raggiungere basse temperature, $T \leq 2$ K. Inoltre si deve tener conto che l'aggiunta di un nuovo schermo dopo due già presenti migliora l'efficienza della refrigerazione solo di qualche per cento⁽⁹⁾.

Un filo superconduttore è stato saldato parallelamente alle piattine di Rame nel tratto inferiore dei cavi, in pratica nel tratto che inizialmente è in bagno di Elio. Questo accorgimento elimina completamente la dissipazione per effetto Joule nei tratti immersi in Elio liquido, sempre che esista un buon contatto elettrico e termico tra il filo superconduttore ed il normale^(8,10). Per assicurare un buon raffreddamento del tratto inferiore dei cavi sono stati aggiunti in un secondo tempo due schermi, chiaramente visibili in Fig. 6. La loro funzione è quella di eliminare parte del calore sviluppatosi localmente per effetto Joule quando i cavi si scoprono dal bagno di Elio e quindi il filo superconduttore diviene normale.

I cavi, le trombette e gli schermi sono stati argentati per assicurare nel tempo una buona superficie metallica. Ciò è importante sia per un ottimo scambio termico metallo-vapori, sia per il basso valore di emissività degli schermi.

Il contatto elettrico tra i due capi del magnete ed i cavi di alimentazione è stato eseguito avvolgendo circa dieci volte il filo superconduttore in una gola ricavata sul morsetto cilindrico 5, diametro 15 mm, ben visibile nelle Fig. 4 e 6. Morsetto e filo sono poi stati saldati con Stagno. Per evitare transizioni superconduttore \rightarrow normale è infatti necessario che la saldatura tra filo e cavo sia estesa. Inoltre si debbono evitare curvature molto strette al filo che potrebbe essere danneggiato irreversibilmente.

L'isolamento elettrico dei cavi è assicurato dai pezzi in Teflon 4, 9 e 10. Da notare che gli isolanti 4 permettono ai cavi di alimentazione una libera contrazione dovuta ad un diverso coefficiente di espansione termica dei vari materiali.

I due rulli di guida 26 evitano durante l'estrazione (l'immissione) del magnete dal (nel) criostato che esso urti con le pareti. Inoltre i due rulli impediscono oscillazioni o spostamenti all'intero apparato una volta posizionato. Ciò è molto importante se si pensa che l'apparecchio è stato costruito per esperienze ottiche. Due molle di bronzo fosforoso sono state aggiunte in un secondo momento per eliminare oscillazioni ortogonali la congiungente i due rulli. Le molle e i rulli sono ben visibili nelle Fig. 4 e 6.

Il livello dell'Elio liquido è controllato in modo discreto da tre resistenze Allen-Bradley da 3,3 k Ω a temperatura ambiente. Una è posta subito al di sopra del magnete superconduttore, un'altra al di sotto delle trombette più basse (massimo livello raggiungibile dall'Elio liquido) e

l'ultima in una posizione di mezzo, vedi Fig. 6. Il metodo di rivelazione consiste nel porre in parallelo alle resistenze delle lampade al Neon ed energizzarle il tutto a 125 V d.c. Non può essere usata l'alternata per questa operazione perchè ciò provocherebbe la transizione superconduttore-normale del magnete. Le lampade si accendono quando le resistenze sono bagnate dall'Elio liquido e il loro valore è dell'ordine del $M \Omega$; praticamente tutta la corrente passa nelle lampadine. Quando le resistenze si trovano nei vapori freddi la dissipazione, ≥ 10 mW, è tale che riescono a scaldarsi ed il valore della resistenza si abbassa. Quindi le lampade si spengono perchè la corrente fluisce principalmente nelle resistenze. Per fare in modo che il sistema possa rispondere con piccoli tempi morti, ~ 1 sec, il guscio ceramico delle resistenze è stato tolto. Di fianco al magnete, vedi Fig. 4 e 6, è stata posta una resistenza metallica da $1 k\Omega$ che viene usata come riscaldatore, 2 Watts massimi. La sua presenza è molto utile quando ultimata una esperienza si vuole far evaporare l'Elio liquido residuo per riscaldare rapidamente l'intero apparato.

4. - FUNZIONAMENTO DEL CRIOSTATO E DEI CAVI DI ALIMENTAZIONE. -

Le prove di consumo del criostato con i cavi di alimentazione energizzati sono state effettuate ponendo al posto del magnete una piastrina superconduttrice di Nb_3Sn^* capace di sostenere correnti superiori a 100 A. Questa sostituzione è stata dettata dal desiderio di provare a correnti maggiori di 50 A la efficienza dei cavi del sistema di raffreddamento. E' in via di completamento infatti un progetto di un nuovo magnete split-coil con un buon accesso ottico trasverso; per la sua alimentazione si prevede necessaria una corrente di $\sim 70 \div 80$ A. Non starò qui a dare in dettaglio i risultati di tutte le prove, ma mi limiterò a riportare esclusivamente i risultati più significativi.

In Fig. 7 l'ingresso di calore^(o) dovuto ai cavi di alimentazione è riportato in funzione della corrente che vi fluisce. I dati si riferiscono all'apparecchio completo come mostrato in Fig. 6, eccetto che per il magnete naturalmente. Piuttosto che riportare i singoli punti sperimentali, che scatteranno entro qualche %, ho preferito tracciare curve, che rappresentano un best fit manuale dei punti. Questo vale sia per la Fig. 7

(x) - Il materiale è stato gentilmente fornito dal gruppo Magneti dei LNF.

(o) - Gli ingressi di calore nel bagno di Elio liquido sono misurati in mW. Lo stesso numero indica anche i litri di gas evaporato per ora a ~ 22 C e 760 Torr. Questa coincidenza ha permesso una rapida e precisa misura, qualche %, dell'ingresso termico attraverso la utilizzazione di un flussimetro realizzato con un capillare, 1.5 mm di diametro e lungo 50 mm, e tarato in precedenza direttamente in mW.

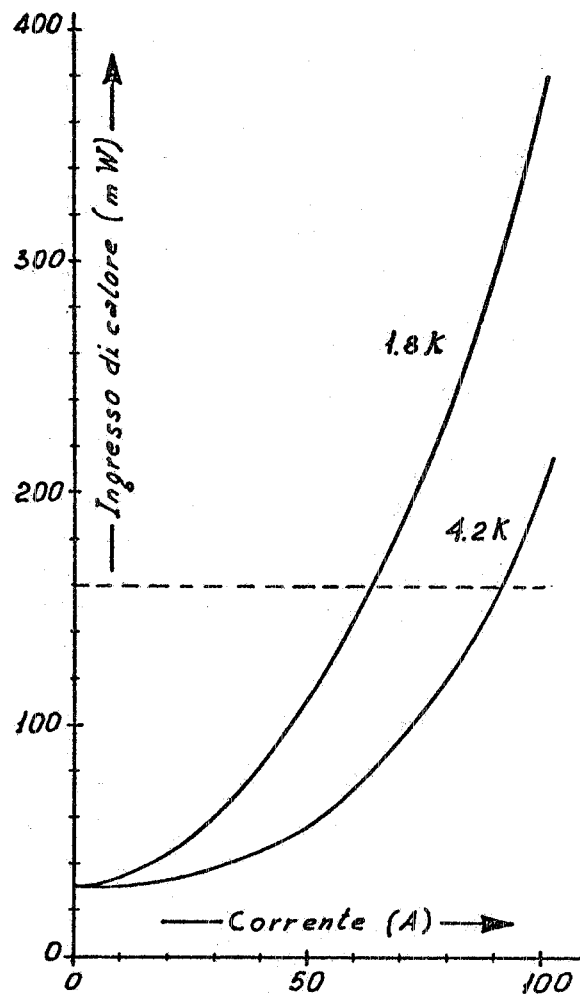


Fig. 7 - Ingresso di calore nel Criostato in funzione della corrente.

che per le altre che saranno presentate nel seguito. L'ingresso di calore per corrente zero rappresenta la conduzione termica dei cavi. Si può osservare che gli ingressi termici per conduzione ed effetto Joule sono circa gli stessi per $I \approx 50$ A e $T = 4.2$ K, come si era calcolato nel precedente paragrafo. Un risultato inatteso invece è stato il maggior ingresso di calore ad 1.8 K rispetto a 4.2 K. Nella letteratura riguardante il raffreddamento forzato dei cavi non mi è mai capitato di incontrare la descrizione di un tal caso. Il fatto è che ad entrambe le temperature il flusso totale del gas è circa lo stesso e quindi ci si aspetterebbe lo stesso raffreddamento. Ovviamente la diversa pressione del gas, 10 torr ad 1.8 K e 760 torr a 4.2 K, e la maggiore velocità del vapore ascendente ad 1.8 K rispetto a 4.2 K sono le cause nelle quali va ricercata la differenza

di comportamento mostrata in Fig. 7. Varrebbe la pena in un prossimo futuro cercare di chiarire questo punto facendo delle misure sperimentali ancora più dettagliate ed in condizioni diverse.

La linea tratteggiata a 160 mW rappresenta l'ingresso di calore dovuto al criostato, che, come si è visto nel paragrafo 2, proviene quasi totalmente dalla conduzione termica lungo il collo corrugato del recipiente interno. Si ricorderà che il valore calcolato era di ~ 500 mW. Il fatto che solo 160 mW raggiungono il bagno significa che si ha un discreto scambio termico tra parete e vapori freddi. La Fig. 7 si riferisce ad una situazione sperimentale in cui il livello di Elio liquido si trova a circa 14 cm sopra i contatti del magnete.

Voglio ora presentare alcuni risultati relativi alla variazione degli ingressi di calore con il livello di Elio liquido, l , dai quali si potrà comprendere l'importanza che riveste l'aggiunta e del filo superconduttore in parallelo al tratto inferiore dei cavi, e degli ultimi due schermi.

In Fig. 8a sono riportati gli ingressi di calore in funzione di l per l'apparato senza gli schermi aggiuntivi e senza (con) filo superconduttore in parallelo ai cavi di Rame, curve tratteggiate (curve continue). In Fig. 8b oltre al parallelo superconduttore-Rame sono stati aggiunti anche i due schermi inferiori, la cui posizione è approssimativamente indicata dalle due linee verticali tratteggiate. Infine in Fig. 8c è riportato, per un confronto più completo, l'ingresso termico del Criostato senza cavi, curva tratteggiata, e dei soli cavi di alimentazione, curva continua. Il significato delle Fig. 8a, b e c è così chiaro che non abbisogna di alcun commento. Voglio solo far notare che mentre gli ingressi termici per conduzione ed irraggiamento diminuiscono al diminuire del livello di Elio liquido, Fig. 8c, come ci si aspetta, gli ingressi termici per effetto Joule sono approssimativamente indipendenti da l , Fig. 8b. E' chiaro che questo risultato dipende esclusivamente dalle particolari soluzioni tecniche adottate nel costruire i cavi di alimentazione ed il sistema di raffreddamento. Il livello l è misurato a partire dai contatti 5, Fig. 5, tra i cavi di alimentazione ed il magnete superconduttore. Quindi il livello $l=0$ corrisponde al magnete ancora coperto di Elio liquido per qualche cm.

Ciò che si è detto poc'anzi a proposito degli schermi aggiunti in una seconda fase degli esperimenti non deve far passare inosservata l'importanza rivestita dal sistema schermi+trombe, 8 e 21 di Fig. 5. Infatti la loro efficienza, cioè il rapporto tra il calore sottratto dai vapori freddi ed il calore sviluppato per effetto Joule è ~ 0.9 . Un terzo schermo senza trombe, invisibile in Fig. 6, aggiunto tra i due non ha dato un aumento apprezzabile dell'efficienza confermando così a posteriori la bontà della forma geometrica a tromba scelta per gli scambiatori di calore.

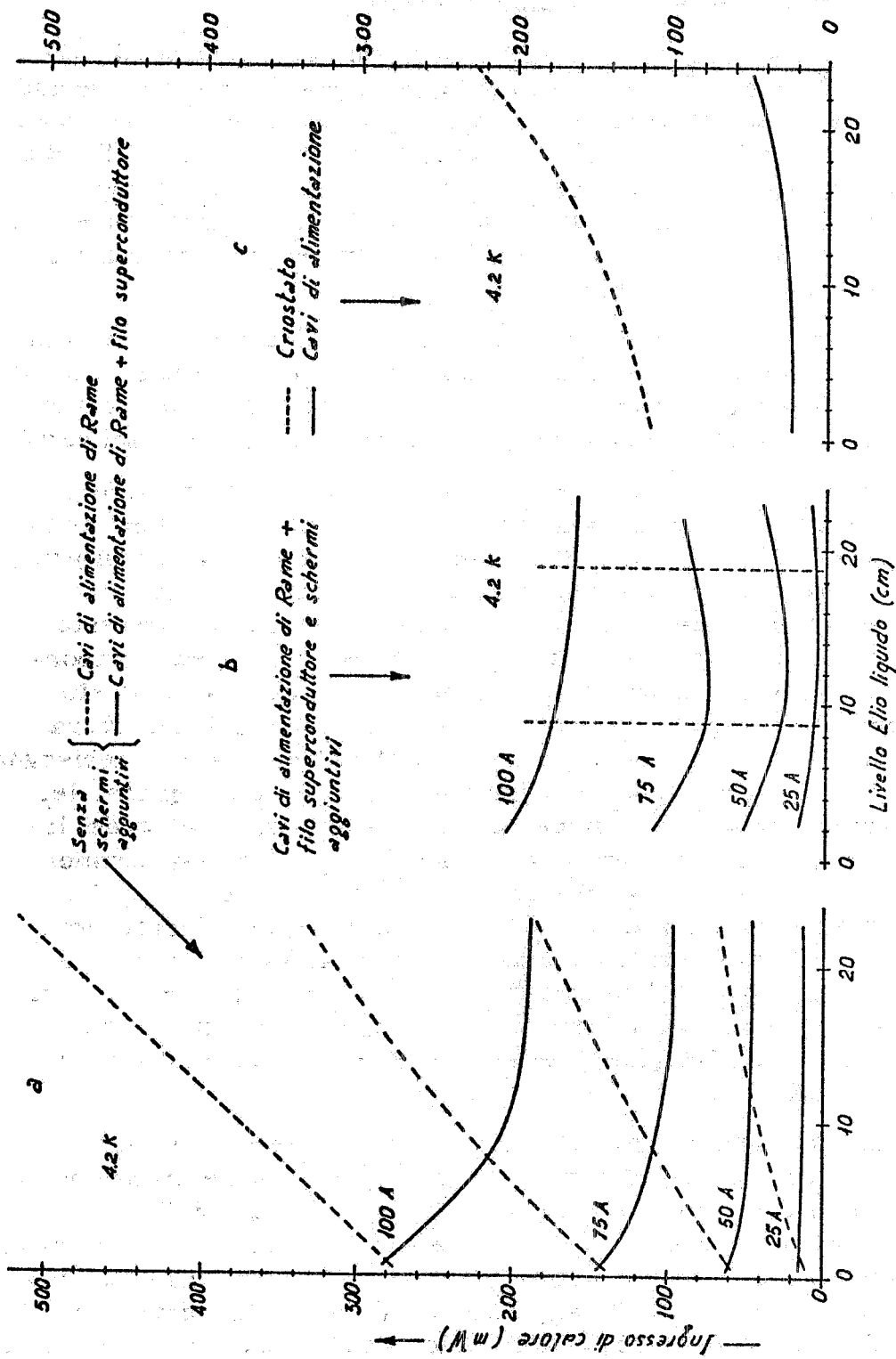


FIG. 8 a, b e c - Ingresso di calore in funzione del livello di Elio liquido nelle condizioni descritte sui grafici.

Prima di chiudere il paragrafo è bene considerare la durata effettiva dell'Elio liquido in varie condizioni. In pratica nel programmare una esperienza si deve conoscere a priori il tempo che si ha a disposizione prima che il magnete transisca, anche per decidere le varie modalità con le quali eseguire la esperienza stessa, ed al limite se può essere fatta. In Fig. 9 la durata effettiva, in ore, ai fini sperimentali è rappresentata in funzione della corrente nel magnete ed a due diverse temperature. Questo grafico è stato costruito utilizzando dati sperimentali solo in parte presentati in questo paragrafo. La grande differenza di durata tra 1.8 e 4.2 K è dovuta sia al maggior ingresso di calore a 1.8 K rispetto a 4.2 K, sia al fatto che la quantità di Elio liquido a disposizione a 4.2 K è maggiore che a 1.8 K. Infatti inizialmente, subito dopo il trasferimento, a 4.2 K si hanno a disposizione ~ 5 l di Elio liquido ($\cong 3500$ l gas a 22 C e 760 torr). Se si vuole scendere ad 1.8 K si deve pompare per circa 1+2 ore, ma a questo punto il liquido si è ridotto a ~ 1.8 l ($\cong 1300$ l gas a 22 C e 760 torr).

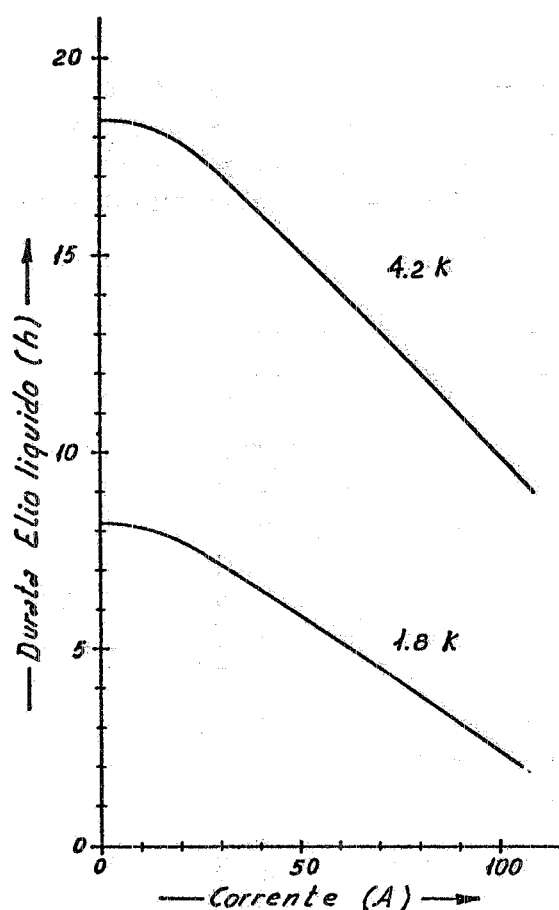


FIG. 9 - Durata dell'Elio liquido in funzione della corrente a 1.8 e 4.2 K.

La ragione per cui si scende sotto $T_{\lambda} = 2.18$ K è che l'Elio cessa di bollire e quindi nelle esperienze ottiche non si hanno più disturbi dovuti alla diffusione della luce sulle bollicine di vapore.

Il volume del recipiente interno del criostato, collo escluso, è stato scelto in sede di progettazione in modo da avere a disposizione un tempo utile di parecchie ore nelle condizioni peggiori, essendo appunto di qualche ora il tempo minimo necessario per eseguire con una certa comodità i più comuni esperimenti di magneto-ottica. Inoltre un'altra grandezza di cui si è tenuto conto è la energia immagazzinata nel campo magnetico pari a $LI^2/2$. Poichè $L = 1.5$ Henry (L è l'induttanza del magnete), per la massima corrente di 50 A si ha una energia di 1.900 Joules. Se il magnete transisce questa energia viene quasi completamente dissipata in Elio liquido. Poichè il calore latente dell'Elio è pari a 2.7 Joule/cm³, se ne avrebbe una evaporazione di ~ 0.7 l.

E' quindi evidente che si doveva realizzare un contenitore con un volume ~ 10 volte questa quantità, sia per avere ancora Elio sufficiente a proseguire l'esperienza, sia per motivi di sicurezza nella eventualità di una transizione superconduttore-normale. Se il magnete transisce in presenza di una quantità di Elio pari a $\sim 0,71$ si corre il rischio di fondere parte del filo superconduttore.

5. - COMANDI E TARATURA DEL MAGNETE. -

La prima volta che il magnete venne usato si tentò ingenuamente di energizzarlo girando manualmente la manopola dell'alimentatore. La manovra fallì miseramente poichè il voltaggio indotto $-LdI/dt$ era tale da far impazzire qualsiasi alimentatore. Si ricorda che $L = 1,5$ Henry, un valore enorme rispetto a quello di normali induttanze che si è abituati a maneggiare nella pratica giornaliera. Inoltre poichè la resistenza totale dei cavi di alimentazione interni ed esterni al criostato è $\sim 0,01 \Omega$, la costante di tempo del circuito serie RL è $\tau = L/R \simeq 100$ sec, un valore decisamente troppo lungo.

In Fig. 10 è rappresentato lo schema a blocchi definitivo del circuito di comando e di controllo del magnete. Il primo problema da risolvere era quello di diminuire il valore di τ . Poichè l'alimentatore a disposizione era (ed è) uno HP da 0-10 V, 0-100 A ed essendo la resistenza dei cavi pari a $\sim 0,01 \Omega$, solo 1 V a 100 A era usato.

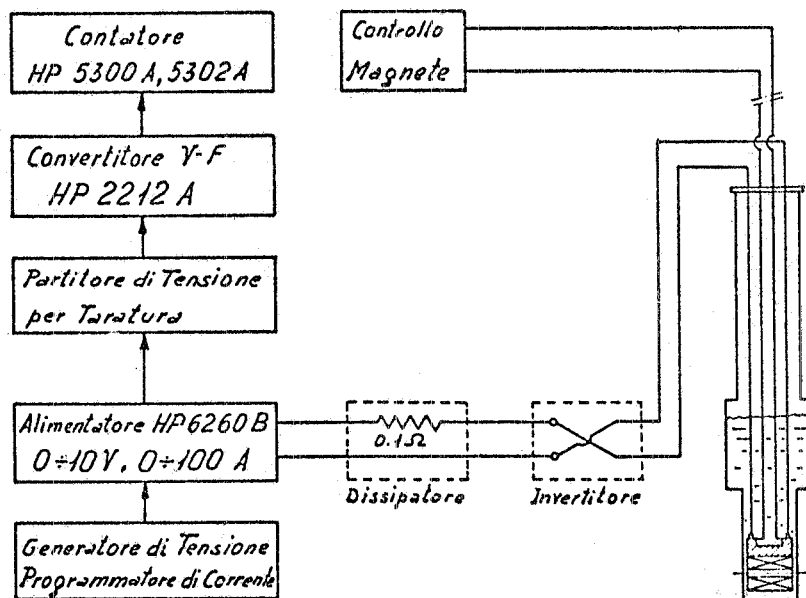


FIG. 10 - Schema di comando e di controllo del magnete.

Allora si è posto in serie una "resistenza" da $0,1 \Omega$ in modo da utilizzare tutta la potenza a disposizione. Così τ viene ridotta a ~ 10 sec, valore più accettabile del precedente. La "resistenza" è costituita da 10 elementi da 1Ω ciascuno, posti in parallelo. Ognuno di questi elementi è realizzato con un metro di filo di acciaio AISI 304, $\phi = 1$ mm, e può dissipare fino a ~ 1 KW senza subire un danno permanente. Proprio in virtù della potenza dissipata, la "resistenza" è indicata sullo schema a blocchi con il nome di Dissipatore. Dopo questo elemento è stato montato un Invertitore con il quale è possibile invertire il senso della corrente e quindi il verso del campo magnetico. 5 metri di cavo flessibile congiungono l'invertitore, che insieme a tutta l'apparecchiatura elettrica di controllo si trova su di un rack, ai morsetti 12, Fig. 5, dei cavi discendenti sulla flangia di Plexigas.

L'alimentatore è stato programmato in modo che la corrente di uscita sia proporzionale ad un comando di tensione esterno. Il generatore di tensione è semplicemente un integratore con varie costanti di tempo capace di variare la corrente nell'alimentatore da un massimo di 24 A/m ad un minimo di $0,05$ A/m. Con comandi manuali è possibile aumentare, tenere stabile e diminuire la corrente. E' stato anche realizzato un dispositivo che blocca automaticamente l'integratore quando la tensione, e quindi la corrente, supera un valore prefissato.

Per un controllo della corrente fornita dall'alimentatore si misura la d. d. p. ai capi di uno shunt interno allo stesso alimentatore, $0,005 \Omega$, 20 p.p.m. Questo potenziale viene inviato ad un partitore di tensione, preciso e stabile all'1‰ e più, e quindi al convertitore voltaggio-frequenza, HP 2212A. Infine il contatore HP 5300A, 5302 A misura e visualizza la tensione trasformata in frequenza. Conoscendo la costante del magnete, Gauss/Ampere, è possibile tarare una volta per tutte il partitore in modo che si possa leggere sul contatore direttamente il campo magnetico in Gauss. Per evitare possibili errori è stato aggiunto uno shunt esterno con il quale si può controllare la bontà delle risposte del circuito di lettura.

Come si vede in Fig. 10, direttamente ai capi del magnete sono collegati due fili, di Evanohm all'interno del criostato, tramite i quali è possibile effettuare vari controlli sul magnete. Ad esempio misurare la sua resistenza durante il raffreddamento iniziale equivale a conoscerne la temperatura e ciò può aiutare a migliorare l'efficienza del trasferimento di Elio liquido. Ancora si può misurare la d. p. p. ai capi del magnete e prevenire possibili transizioni; la d. d. p. non deve mai superare $10-20 \mu V$ in condizioni statiche.

La taratura del campo magnetico è stata effettuata misurando accuratamente il massimo splitting della riga di emissione R_1 di una pia

strina di rubino rosa (pink ruby). Se il rubino viene posto in un campo magnetico la riga R_1 , 6934 \AA , si separa in quattro componenti. I fattori spettroscopici sono stati misurati molto accuratamente da vari autori⁽¹¹⁾ e quindi è possibile risalire alla separazione delle due righe esterne in funzione del campo. Se $\Delta\lambda$ è la separazione di queste due righe in \AA e B il campo magnetico in Gauss si ha:

$$B = (0.7472 \pm 0.0002) 10^4 \Delta\lambda, \quad B \perp c$$

$$B = (1.2699 \pm 0.0004) 10^4 \Delta\lambda, \quad B // c$$

dove c è l'asse ottico principale del cristallo. Nel nostro esperimento $B \perp c$ e quindi per un campo di $\sim 80 \text{ KG}$ la separazione $\Delta\lambda$ è di circa 10 \AA . Se si vuole una taratura precisa a qualche ‰ è necessario misurare questa separazione con la precisione di $\sim 0.1 \text{ \AA}$. Ciò è stato fatto usando uno spettrometro Jarrell-Ash da 1 metro con una risoluzione di 0.5 \AA ; non è conveniente scendere come risoluzione al di sotto di questo valore dato che le righe da analizzare sono larghe $\sim 1 \text{ \AA}$. Prendendo il baricentro delle righe si è potuto raggiungere la precisione di $\sim 0.2 \text{ \AA}$. Da sottolineare che la separazione $\Delta\lambda$ ha anche una piccola dipendenza dalla polarizzazione della luce rivelata cioè a seconda che $E \perp c$ od $E // c$, in cui E è il vettore elettrico dell'onda elettromagnetica emessa.

In ogni caso la taratura del magnete ha dato come risultato:

$$(1588 \pm 7) \frac{\text{Gauss}}{\text{Ampere}}$$

costante del
magnete

Una volta predisposto il sistema di controllo, il magnete è stato provato svariate volte e sono stati misurati i parametri relativi alla transizione superconduttore-normale, rivelatesi molto vicini a quelli calcolati, come può essere visto nella seguente tabella:

Temperatura (K)	Corrente critica (A)	Campo Magnetico critico (kG)
4,2	44,6	70,8
1,6	52,6	83,5

Concludendo possiamo affermare, ad un anno di distanza dalla realizzazione del DOM, che le sue prestazioni hanno nettamente superato le aspettative iniziali e che fino ad ora nessun esperimento è fallito a causa di un suo qualsivoglia difetto di funzionamento.

RINGRAZIAMENTI. -

A questo punto sento il dovere di ringraziare tutti coloro che hanno collaborato con me nella realizzazione del DOM ed in particolare:

Pietro Cardoni per la progettazione e per il suo interessamento durante la costruzione.

Mauro Giardoni per il montaggio dei vari componenti e per l'aiuto datomi durante le prove.

Giorgio Pasotti ed Alessandro Bianchini per la progettazione ed il paziente lavoro di avvolgimento della bobina superconduttrice.

Italo Giabbai per il progetto e l'installazione del banco ottico e da vuoto.

Aldo Vietti per la realizzazione degli apparati elettronici.

Il Dott. Umberto Grassano per utili scambi di idee durante e dopo la fase di progettazione.

BIBLIOGRAFIA. -

- (1) - G.K. White, *Experimental Techniques In Low-Temperature Physics*, (Oxford, 1968).
- (2) - F.E. Hoare et al., *Experimental Cryophysics*, (Butterworths, 1961) pag. 122.
- (3) - E. Beckman et al., *Cryogenics*, 11, 147 (1971); V. Biricikoglu, *Appl. Opt.* 12, 1831 (1973); G.B. Corlin, *Cryogenics* 14, 407 (1974); P. Loose et al., *Cryogenics* 14, 470 (1974).
- (4) - L.F. Mollenauer et al., *Rev. Sci. Instr.* 39, 1958 (1968).
- (5) - R. Mc Fee, *Rev. Sci. Instr.* 30, 98 (1959).
- (6) - S. Deiness, *Cryogenics* 5, 269 (1965).
- (7) - K.R. Efferson, *Rev. Sci. Instr.* 38, 1776 (1967).
- (8) - V.E. Keilin et al., *Cryogenics* 6, 222 (1966).
- (9) - A. Bejan, *Cryogenics* 15, 290 (1975).
- (10) - P.W. Matthews et al., *Cryogenics* 5, 213 (1965).
- (11) - R.A. Manenkov et al., *Sov. Phys. JETP* 1, 611 (1955); S. Sugano et al. *J. Phys. Soc. Jap.* 13, 899 (1958); F. Varsanyi et al., *Phys. Rev. Letters* 3, 544 (1959).