

Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-61/59 (28. 10. 61)

L. Olivi: PROGETTO E COSTRUZIONE DI UN CRIOSTATO AD ^3He .
(Tesi di Laurea).

Estratto dalla: Tesi di Laurea.

Laboratori Nazionali di Frascati del C.N.E.N.
Servizio Documentazione

Nota interna: n° 100
28 Ottobre 1961

L. Olivi: PROGETTO E COSTRUZIONE DI UN CRIOSTATO AD ^3He .
(Tesi di laurea).

P.S. - Per i disegni mancanti, rivolgersi al Lab. Criogeni
co.

INTRODUZIONE

In questi ultimi anni le ricerche a basse temperature (°) hanno assunto un ruolo di primaria importanza nella fisica.

Esperienze sulle proprietà dell' ^4He e dell' ^3He allo stato condensato, sulla superconduttività, sull'allineamento dei nuclei, si sono moltiplicate.

La necessità di ottenere e mantenere basse temperature ha sollecitato la risoluzione del problema tecnico fondamentale, cioè la costruzione di criostati, questo ha comportato lo sviluppo di tutta una tecnologia delle basse temperature comprendenti i problemi di isolamento termico e la conoscenza, almeno approssimata, del comportamento dei materiali a queste temperature.

Alcune delle esperienze in corso presso il Laboratorio Criogenico di Frascati del C.N.E.N. richiedono l'uso di temperature inferiori ad 1°K , questo si può ottenere sia con criostati ad ^3He , sia con refrigeratori a smagnetizzazione adiabatica, i primi sono preferibili quando le esperienze, che si debbono effettuare, comportano una notevole dissipazione di calore.

In questa tesi si descrive un criostato ad ^3He , progettato e costruito in laboratorio, per misure di mobilità in elio liquido e misure di effetto termomolecolare.

La materia è stata esposta con il criterio seguente.

Nel primo capitolo vengono descritti i criostati più comunemente usati, con particolare attenzione ai criostati ad ^3He ; fra questi si danno i dettagli di tre dei più tipici.

(°) In questa tesi, per basse temperature si intendono quelle inferiori alla temperatura di ebollizione dell' ^4He a pressione atmosferica, e cioè $4,2^\circ\text{K}$.

Il secondo capitolo comprende la descrizione e il progetto del criostato da noi costruito. Alla fine del capitolo si descrivono gli impianti ausiliari, in parte esistenti e in parte espressamente costruiti (in particolare il bagno di raffreddamento ad ^4He), necessari al funzionamento del criostato.

Alla misura della temperatura è stata riservata la trattazione del terzo capitolo.

Infine l'ultimo capitolo riguarda i risultati delle prove effettuate.

CAPITOLO I CENNI SUI CRIOSTATI PER BASSE TEMPERATURE

1. Generalità

Esistono, oggi, diversi metodi e dispositivi per ottenere basse temperature; taluni di questi sono ormai classici e li nomineremo solo se interesseranno, anche marginalmente, i problemi che dovremo trattare: ossia ci limiteremo a confrontare criticamente quei sistemi con il nostro, per poi trarne conclusioni sulla loro utilizzazione, distinguendo in quali campi e per quali operazioni servano più l'uno, o gli altri. Cionondimeno tratteremo brevemente di quegli apparecchi che solitamente sono chiamati criostati e che interessano da vicino il nostro lavoro.

Un criostato per esperienze di basse temperature è un apparecchio mediante il quale si possono raffreddare campioni in una certa regione di spazio (spazio sperimentale) entro il quale lo sperimentatore può variare la temperatura con precisione e dentro certi limiti. Le apparecchiature che si usano per questo scopo sono più o meno complicate, perchè in un unico sistema i metodi di raffreddamento sfruttati possono essere diversi. In un criostato ideale si dovrebbe poter variare la temperatura dello spazio sperimentale da $\sim 0^{\circ}\text{K}$ a temperatura ambiente, ma la realizzazione pratica di un tale dispositivo è laboriosa e complicata dal numero di stadi di raffreddamento, necessari a coprire un così largo "range" di temperature. D'altra parte, a meno di misure particolari, generalmente le esperienze sono condotte in intervalli più ristretti ed è perciò più logico costruire oggetti semplici, di sicuro e facile impiego, anche se utilizzabili per un numero minore di esperienze.

Come si vedrà in seguito, il buon funzionamento di qual

siasi apparecchiatura a basse temperature dipende da molti fattori e le cause di guasti sono, la maggior parte delle volte, imprevedibili e occasionali, quindi la semplicità di un oggetto è spesso buona garanzia del suo funzionamento e della sua efficienza. A questo va aggiunto che, a basse temperature, sono poco note le proprietà fisiche dei materiali, perciò la costruzione di un criostato, oltre a raggiungere lo scopo principale di poter eseguire certe misure, ha quasi sempre come scopo secondario quello di conoscere meglio le caratteristiche dei materiali usati. Questo va detto perchè è oggi molto difficile fare dei calcoli meno che grossolani sugli scambiatori di calore a basse temperature (è problematico anche condurre le cose empiricamente) e perchè i materiali disponibili sono troppo spesso fragili e sempre soggetti ad invecchiamento.

Per fissare le idee vediamo quali sono i metodi di raffreddamento e gli apparecchi dei quali ci si serve man mano che si scende dai 4,2°K (elio bollente a pressione atmosferica) verso lo zero assoluto.

2. Criostati ad ^4He

La temperatura di un liquido in equilibrio con il suo vapore è funzione crescente della pressione, quindi il problema di realizzare criostati ad ^4He che funzionino con questo metodo si riduce a quello di produrre basse pressioni su un bagno di ^4He . Un criostato si può quindi realizzare, per esempio, nel modo seguente.

Un dewar di vetro, incamiciato in un altro dewar contenente azoto liquido, che assorba parte del calore che entra per irraggiamento, può contenere elio in evaporazione per diverse ore; con semplici dispositivi si può collegare ermeticamente la bocca di questo dewar ad una linea di pompaggio e diminuire così la tensione di vapore e quindi la temperatura del bagno. Gli oggetti da raffreddare vi saranno immersi con il grande vantaggio di avere ottimo contatto termico dal liquido e una temperatura, costante su tutto lo spazio sperimentale, facilmente controllabile. Come vedremo, questo problema (termoregolazione) non è dei più facili a risolversi in altri tipi di criostati, come per esempio in quelli a smagnetizzazione adiabatica.

La realizzazione di criostati di questo tipo è piuttosto semplice; bisogna invece ricordare che per alcune caratteristiche dell' ^4He a bassa temperatura, il campo della sua pratica utilizzabilità è piuttosto ristretto. Infatti, analizzando superficialmente la curva tensione di vapore-temperatura dell' ^4He , si potrebbe pensare di raggiungere temperature dell'ordine di $0,7^\circ\text{K}$, in quanto non v'è alcuna difficoltà nel raggiungimento di pressioni dell'ordine di 10^{-3} mm Hg; invece questo è arduo se non praticamente impossibile. Come è noto sotto i $2,2^\circ\text{K}$ (punto λ) cambiano anormalmente le proprietà fisiche dell' ^4He , e si verificano dei fenomeni del tutto singolari come la super-

fluidità. Kammerling Onnes nel 1922 scoprì che, a temperature inferiori a λ , l' ^4He liquido contenuto in due diversi dewars, non comunicanti tra loro e posti l'uno dentro l'altro alla stessa temperatura, passava da un recipiente all'altro, fino a quando i livelli non si eguagliavano. Il meccanismo di questo effetto è il seguente: uno strato sottile di fluido (film) sale lungo le pareti del dewar più pieno e scende a riempire quello più vuoto. Su questo fenomeno sono stati fatti numerosi lavori sperimentali e sono state costruite alcune teorie per interpretarlo, che chiariscono solo in parte le esperienze eseguite. (1) Per quel che ci riguarda la superfluidità diminuisce di molto l'intervallo di utilizzabilità di un criostato ad ^4He . Infatti il "film" di liquido sale lungo le pareti del dewar aumentando, in tal modo, notevolmente la superficie libera del liquido e giungendo nelle zone dove l'ingresso termico è maggiore, (basti pensare che il flusso termico è inversamente proporzionale alla lunghezza dei tubi) e qui evapora. Il gas evaporato, tutto o in parte, ricondensa nel liquido liberando il suo calore di condensazione; questa specie di convezione aumenta di molto l'ingresso termico e quindi, in definitiva, la quantità di elio che evapora.

Per queste ragioni il raffreddamento per pompaggio su ^4He liquido è fruttuoso tra i $4,2^\circ\text{K}$ e $0,9^\circ\text{K}$ ($^\circ$) che sono raggiungibili con un impianto in serie di pompe Booster e rotativa (con una normale rotativa si raggiungono gli $1,2^\circ\text{K}$).

Questo tipo di criostato è molto importante perchè è strumento indispensabile per ottenere qualsiasi temperatura sotto i $4,2^\circ\text{K}$ anche utilizzando altri sistemi di raffredda-

($^\circ$) Con refrigeratori appositamente studiati, forniti di diaframmi per diminuire il "film", alcuni sperimentatori hanno raggiunto gli $0,71^\circ\text{K}$ (Keesom 1932, Lazarev e Eselson 1942).

mento dei quali forma sempre il primo stadio. Storicamente è stato di importanza fondamentale in quanto con esso sono iniziate le prime ricerche sulle basse temperature e in particolare sulla fisica dell' ^4He .

Il criostato ad ^4He è quindi il prototipo dei criostati e attualmente viene costruito in tutti i laboratori criogenici in forma e per scopi diversi e specializzati per le esperienze da eseguire. Il suo impiego è oggi molto diffuso anche per esperienze che non riguardano direttamente la fisica dell'elio (è utile ricordare che misure di calore specifico, conducibilità termica, conducibilità elettrica, effetto Hall, proprietà meccaniche della materia, suscettività magnetica, sono state eseguite con refrigeratori di questo tipo) cosicchè esiste ormai una bibliografia completa e cospicua su questo argomento (2), del quale non diremo di più; alcuni particolari tecnici e costruttivi che interesseranno direttamente anche il nostro criostato ad ^3He saranno esposti e chiariti in seguito.

3. Criostati ad ^3He

Se si esamina l'andamento della tensione di vapore in funzione della temperatura dell' ^3He liquido e si confronta con quello dell' ^4He si vede subito che a parità di pressione di vapore, la temperatura dell' ^3He è minore di quella dell' ^4He ; questo significa che con un metodo analogo a quello precedentemente descritto, servendosi di ^3He , si possono ottenere temperature molto più basse di quelle ottenute con ^4He . A 1°K la tensione di vapore dell' ^3He è 35 volte e a $0,5^\circ\text{K}$ è 10.000 volte quella dell' ^4He . A questo bisogna aggiungere ancora il duplice vantaggio della non superfluidità dell' ^3He e della sua maggiore entropia per $T < 1,5^\circ\text{K}$

In ^4He è necessaria una pompa 800 lt/sec per raggiungere una pressione di regime di $\sim 10^{-2}$ mm Hg, corrispondente ad una temperatura di $\sim 0,9^\circ\text{K}$; una pressione ancora più bassa, $\sim 10^{-3}$ mm Hg, si può raggiungere in un bagno di ^3He con una pompa a diffusione da 20 lt/sec e la temperatura del bagno è di $\sim 0,3^\circ\text{K}$.

Questi vantaggi sono però bilanciati negativamente dalla rarità dell' ^3He . Fino a pochi anni fa era praticamente impossibile fare esperienze con questo gas, dato il suo enorme costo e la difficoltà di possederne quantità ragionevoli; oggi la sua produzione nei reattori nucleari (°) ha ridotto notevolmente questi ostacoli e un laboratorio ben attrezzato può permettersi di possederne qualche litro gassoso S.T.P. ossia qualche cm^3 liquido. Quindi uno dei problemi da risolvere per realizzare un efficiente refrigeratore, è quello di lavorare con poco fluido raffreddante per un tempo abbastanza lungo e con apparecchi a sicura tenuta.

(°) $^6\text{Li} + n = ^4\text{He} + ^3\text{H}; \quad ^3\text{H} = ^3\text{He} + e^-$

Disponendo di una buona quantità di ^3He , cioè di 2 o 3 litri S.T.P. si possono fare esperienze abbastanza lunghe (dell'ordine delle 30-40 ore), limitando ragionevolmente le entrate di calore ai 100 ÷ 200 erg/sec. Per esempio ammettendo di aver liquefatto nella cella 2 litri S.T.P. di gas e cioè circa 0,08 moli di ^3He , se l'entrata termica fissa a 0,3°K è di 200 erg/sec, la durata della operazione sarà:

$$h = \frac{n C}{\dot{q} \times 3.600} = \frac{0,08 \times 2,68 \cdot 10^8}{200 \times 3.600} = 31 \text{ ore}$$

dove n è il numero di moli, C il calore latente in erg/moli e \dot{q} l'entrata di calore in erg/sec.

Tutti i tipi di refrigeratori ad ^3He funzionano secondo il principio che abbiamo dianzi esposto e hanno perciò alcune caratteristiche comuni; inoltre, data la scarsità dell' ^3He , il recipiente nel quale esso si liquefa (cella) non supera quasi mai il volume di 3 cm³. Il campione da raffreddare è posto in contatto termico con esso.

Un primo stadio di raffreddamento è costituito da un bagno di ^4He , a temperatura compresa tra gli 1,2°K e i 0,9°K, secondo il sistema usato per pompare sul liquido; a queste temperature la tensione di vapore dell' ^3He ha valori compresi tra i 13 mm Hg e i 5 mm Hg cioè minori delle pressioni d'innesco di alcune pompe a diffusione a mercurio oggi in commercio.

Una cella del volume di qualche cm³, collegata mediante un tubo ad un adatto sistema di pompaggio, contenuta in un involucro nel quale si possa fare il vuoto realizza quindi in pratica un modello di principio del criostato ad ^3He . D'ora in poi chiameremo sempre cella ^3He o semplicemente cella, il recipiente contenente l' ^3He liquido sotto pompaggio e cioè la vera e propria sorgente di freddo; chiameremo

remo involucro, o camicia, o intercapedine di vuoto, il recipiente che isola la cella dal bagno di ^4He , anche se in realtà tra cella e bagno non vi sia isolamento termico perfettamente, ma soltanto quando si lavora tra 1°K e $0,3^\circ\text{K}$.

Il refrigeratore ad ^3He si può costruire in due versioni: di tipo discontinuo e continuo.

Nel primo l' ^3He viene condensato e quindi pompato, la temperatura scende da $\sim 1^\circ\text{K}$ fino a quella di lavoro, e il raffreddamento dura fintantochè vi sia disponibilità di liquido; una volta che questo sia evaporato completamente bisogna ricominciare l'operazione dall'inizio e cioè da circa 1°K e poi ritornare alla temperatura di lavoro e quindi eventualmente interrompere l'esperienza.

Il secondo tipo, invece, è costruito in modo che l' ^3He pompato possa ricondensarsi attraverso un tubo di ritorno nella cella, in modo da prolungare indefinitamente il tempo di lavoro e soprattutto di risparmiare sulla quantità di ^3He . Daremo più tardi dettagliate descrizioni di alcuni refrigeratori già in funzione chiarendo meglio la differenza fra criostato discontinuo e continuo.

In questo paragrafo abbiamo deliberatamente omissso la descrizione di tutti i servizi necessari al funzionamento dei criostati, che hanno un ruolo importantissimo nelle esperienze e la cui progettazione e preparazione occupa una buona parte del tempo totale di lavoro. Ci riserviamo di descrivere in dettaglio gli impianti realizzati per il nostro criostato. (Cap. II, 4).

Il criostato non continuo è un apparecchio molto più semplice del continuo: si può costruire più rapidamente e più facilmente; le operazioni sull'apparecchio sono meno complicate che con il continuo e gli eventuali guasti, che inevitabilmente si producono con l'uso, sono meno probabi-

li. Il fatto di essere meccanicamente più semplice, cioè di avere un numero minore di saldature, giunti e rubinetti, è una garanzia a priori contro perdite e rotture spesso così difficili a localizzarsi e a ripararsi da essere la causa fondamentale di gravi ritardi nella conduzione di una esperienza.

Lo svantaggio principale di questo apparecchio è, naturalmente, il suo tempo di utilizzabilità. Questo dipende dalla quantità di ^3He con cui si opera e dall'ingresso di calore nello spazio sperimentale: fino a qualche anno fa la rarità del fluido usato consigliava l'uso di criostati continui, oggi per la relativa abbondanza e la forte diminuzione del costo dell' ^3He , questo argomento cade, almeno per quelle esperienze che non richiedano tempi eccezionalmente lunghi. Seidel e Keesom usando 3 lt di ^3He gas S.T.P. nel loro calorimetro sono riusciti a lavorare a $0,3^\circ\text{K}$ per ben 80 ore consecutive.

Non bisogna dimenticare, in queste considerazioni, che anche il bagno preraffreddante di ^4He , cioè il primo stadio di un criostato, non dura indefinitamente e quindi se si desidera un'esperienza lunga a $0,3^\circ\text{K}$, è necessario non solo avere una continua alimentazione dell' ^3He , ma anche fare in modo che il bagno dell' ^4He sia rifornito ogni tanto con il liquido a 1°K . Questo non si può fare facilmente con il classico criostato ad ^4He in dewar di vetro come quello già descritto precedentemente, ma è necessario usare artifici che complicano anche la realizzazione di questo primo stadio, che altrimenti non offrirebbe nessuna difficoltà. Sono stati progettati, infatti, criostati continui costruiti tutti in metallo, sia lo stadio ad ^4He che quello ad ^3He , che possono essere usati indefinitamente; la sola realizzazione pratica di questi oggetti, oltre ad essere molto costosa, può raggiungere tempi di lavoro di molti mesi e quin

di è consigliabile solo per esperienze molto lunghe.

Ciononostante il refrigeratore continuo non è affatto uno strumento superato. Infatti se nelle prime indagini sulla fisica delle basse temperature, le esperienze erano concettualmente piuttosto semplici e abbastanza brevi, ora, e per eseguire misure più raffinate, e per indagare nei campi di studio che si sono aperti, si richiede una apparecchiatura più complessa e cioè un maggiore spazio sperimentale disponibile, un maggior numero di conduttori elettrici e tubi che lo colleghino con l'esterno e comunque una maggior massa, costituita dall'apparecchio di esperienza, da mantenere fredda. Questo vuol dire maggior tempo di lavoro e maggiore entrata di calore e quindi una maggiore quantità di ^3He per un refrigeratore discontinuo o, meglio, la disponibilità di un apparecchio continuo.

Come cenno storico diremo che il primo criostato fu di tipo non continuo e fu costruito da Roberts e Sydorjak nel 1954, che lavorarono con qualche litro di ^3He e studiarono l'andamento della tensione di vapore in funzione della temperatura dello stesso fluido tra $0,45^\circ\text{K}$ e 1°K , seguiti poi da Seidel e Keesom nel 1957 che, sempre con un apparecchio discontinuo, fecero misure di calorimetria e usarono 3 lt S.T.P. Altri ricercatori, Taconis, Peshkov e Zinovieva, Garwin e Reich hanno costruito con tecniche sempre più perfezionate e con esperienze diverse, refrigeratori dei due tipi (4), (6), (7), (8), (9), (10) (11).

Ne descriveremo ora tre esemplari, cioè il calorimetro di Seidel e Keesom, il criostato continuo di Reich e Garwin e quello di Peshkov e Zinovieva che possono essere presi come i prototipi; degli altri diremo quali sono le sostanziali differenze. Abbiamo scelto tra gli altri il calorimetro di Seidel e Keesom perchè le misure di capacità termica sono

tra le più delicate da eseguire, e per la durata della esperienza e per l'esatta valutazione delle entrate di calore nel campione e nello spazio sperimentale.

L'apparecchio di Seidel e Keesom è mostrato in fig. 1. All'interno di una camicia di vuoto, immersa in bagno di ^4He , è montato un recipiente di rame diviso in tre scomparti. La parte indicata in figura con d, contiene il bagno di ^3He e la sua pressione può essere ridotta a valori intorno a 10^{-3} mm Hg pompando attraverso un tubo di German-Silver da 0,1 mm di spessore e di 4 mm di diametro. (Il tubo è indicato con c nella figura). Il campione, del quale si vuol conoscere il calore specifico, (comprendente un riscaldatore ed un termometro a carbone)^(°) può essere alzato ed abbassato mediante un opportuno sistema di pulegge. Un'asta di rame solidale al contenitore dell' ^3He e quindi in buon contatto termico con esso, sostiene una piastra di rame polita sulla quale si fa appoggiare il campione quando lo si vuol raffreddare. E' stato escogitato questo sistema di raffreddamento per evitare di usare gas di scambio, l'evacuazione del quale sarebbe costata la perdita di molto tempo (circa 12 ore per un isolamento sufficiente per misure di capacità termica). Il gas di scambio veniva pompato a 4,2°K; il raffreddamento del campione con il contatto termico richiedeva 6 ore. La più bassa temperatura raggiunta è stata di 0,35°K, 0,05°K maggiore di quella del bagno; la differenza si spiega con l'ingresso di calore portato dal termometro a carbone. La parte bassa del disegno mostra lo scomparto contenente il sale paramagnetico per la misura della temperatura (°) di tutto l'involucro di rame, dalla misura della suscettività magnetica del sale. Con questo termometro veniva anche tarato il termometro a

(°) V. Cap. III, 1 e 2.

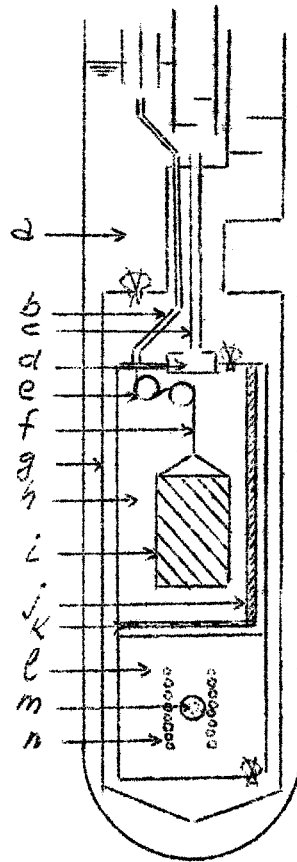
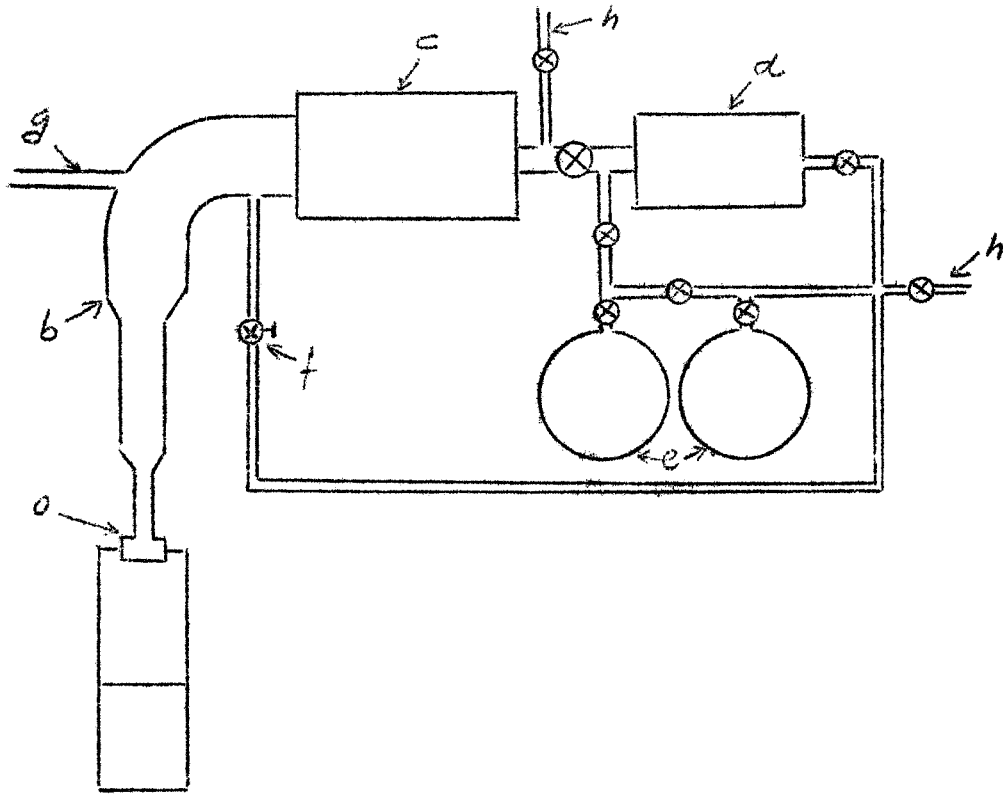


FIG. 1

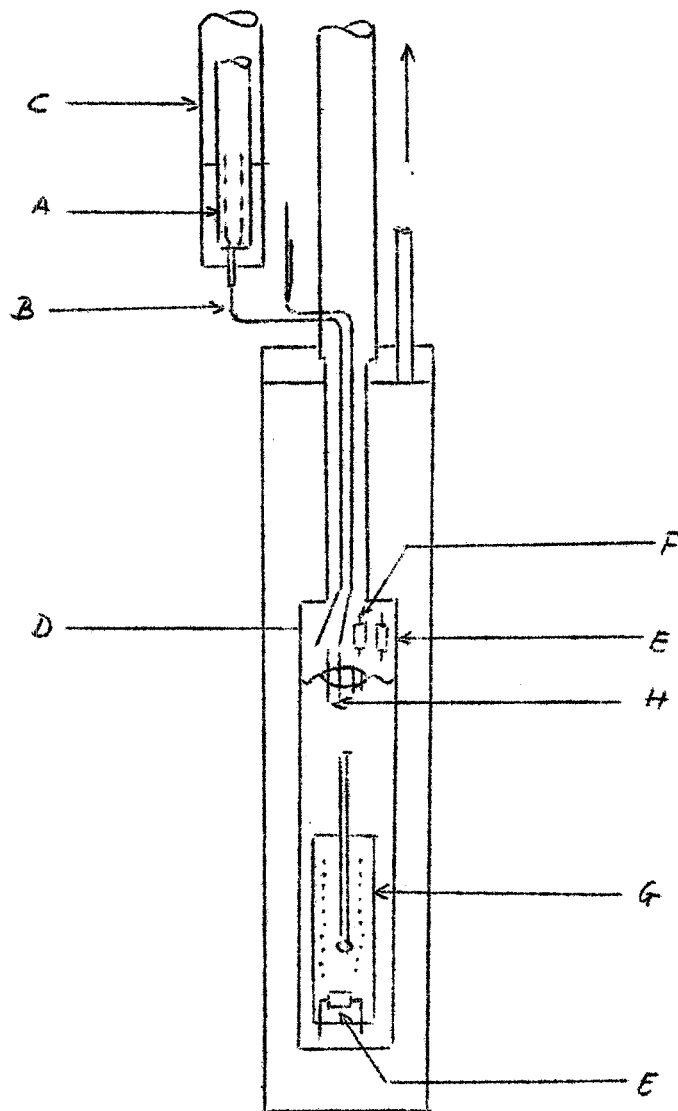
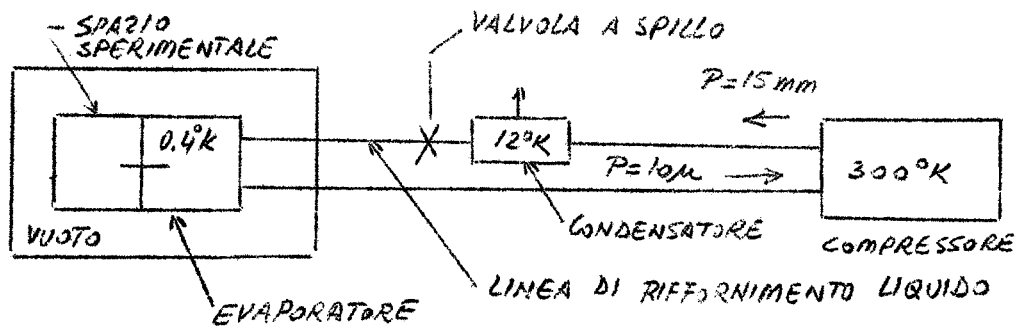


FIG. 2

carbone dopo aver effettuato la misura di capacità termica.

E' importante notare che le vibrazioni meccaniche dovute allo spostamento del campione sulla verticale erano sufficienti per riscaldarlo, in modo che la temperatura di una misura non era riproducibile.

Come è già stato detto Seidel e Keesom usarono per questa esperienza 3 litri S.T.P. di ^3He e ogni operazione poteva durare per 80 ore.

I criostati di Garwin e Reich e di Peshkov e Zinovieva sono continui.

Il primo è un apparecchio costruito per misurare il coefficiente di autodiffusione in ^3He , è tutto in metallo e lo schema è mostrato in fig. 2.

Nella valvola C (condensatore) immersa nel bagno di ^4He avviene la liquefazione dell' ^3He ; attraverso il capillare B, il liquido rientra nel recipiente D (evaporatore) sul quale si pompa attraverso il tubo grande. Nell'evaporatore sono anche contenuti un riscaldatore E, un termometro a carbone F e lo spazio sperimentale G nel quale arriva il capillare H per riempimenti con ^4He come gas di contatto.

Gli autori hanno lavorato con questa apparecchiatura usando 80 cm^3 S.T.P. La maggior parte di questo gas occupava lo spazio morto della pompa (circa 1 lt a 30 mm di Hg).

Peshkov, Zinovieva e Filimonof costruirono nel 1959 un refrigeratore simile al precedente, ma più grande.

Come si vede nella fig. 3b, l' ^3He è condensato nel tubo 1 (lungo 5 metri \varnothing int. 1,4 mm, \varnothing est. 2,0 mm), passa successivamente nella valvola 2, fluisce quindi attraverso il tubo 3 (lungo 20 cm, \varnothing int. 0,2 mm) nello scambiatore di calore 3 in contatto con il gas di evaporazione e gocciola infine nella cella dell' ^3He 4. Questa contiene un evaporatore 5 costituito da una striscetta di rame saldata sul

fondo a spirale per un migliore contatto termico. La valvola è in buon contatto termico con il bagno di ^4He e funziona come trappola di radiazione dall'esterno. Il recipiente di rame 6 del volume di 200 cm^3 era riempito con ^4He liquido del bagno attraverso la valvola 7 e il capillare di German-Silver 8.

La più bassa temperatura raggiunta è stata di $0,5^\circ\text{K}$; la ragione di questo rendimento relativamente basso era dovuta alla entrata di calore attraverso l' ^4He contenuto nel tubo 8; la conducibilità termica di questo infatti, è enorme (sono presenti in questo caso i fenomeni dovuti alla superfluidità citata in precedenza) in confronto a quella del tubo metallico (lunghezza 160 mm, \varnothing int. 1,4 mm, spessore 0,2 mm). Questo inconveniente si sarebbe potuto parzialmente evitare se la valvola 7 fosse stata fatta nella camicia di vuoto 9, o totalmente se il riempimento di ^4He fosse stato eseguito con un'altra linea. Senza ^4He , infatti, la temperatura raggiunta è stata di $0,35^\circ\text{K}$. La camicia di vuoto era riempita a temperatura ambiente con ^4He alla pressione di 0,5 mm Hg; questo gas favoriva un eccellente scambio termico durante il raffreddamento e veniva automaticamente evacuato mediante adsorbimento di una piccola trappola a carbone attivo, non appena veniva raggiunta la temperatura di 1°K .

Il tempo necessario per raffreddare lo spazio di lavoro 6 riempito con ^4He da $4,2^\circ\text{K}$ a $0,5^\circ\text{K}$ era meno di un'ora mentre da 1°K era di 5' o 10'.

La temperatura del bagno di ^4He era misurata con termometro a resistenza di bronzo fosforoso: due fili superconduttori, uno di alluminio puro (50μ) ed uno di puro cadmio (67μ) sono connessi in serie con il filo del termometro e le loro temperature di transizione sono usate come

punti di taratura per il termometro.

Questo apparecchio, al contrario dei precedenti, è tipico non per essere stato costruito per una speciale esperienza, ma perchè consente esperienze diverse avendo a disposizione, come abbiamo già detto, un notevole spazio sperimentale (200 cm^3), gli autori non specificano quali lavori con esso siano stati fatti. Nella fig. 3c è rappresentato un altro criostato ad ^3He costruito da Peshkov e Zinovieva, che ha la particolarità di essere in vetro.

Un problema importante nella fisica delle basse temperature, è la termoregolazione, cioè l'insieme delle operazioni, che mantengono la temperatura dello spazio sperimentale ai valori desiderati durante le esperienze. I metodi usati sono progettati di volta in volta e suggeriti dalle condizioni di lavoro.

Per mantenere costante la temperatura di un liquido in equilibrio con il suo vapore bisogna mantenere costante la pressione; questo si può ottenere in due modi.

- Regolando la velocità di aspirazione del sistema di pompaggio.
- A velocità di aspirazione costante regolando l'ingresso termico nello spazio sperimentale.

Il secondo metodo si realizza in pratica con un riscaldatore ausiliario posto nello spazio sperimentale oppure, nel caso di un refrigeratore continuo, regolando il flusso di ^3He ricondensato nella cella.

4. Criostati a smagnetizzazione adiabatica

Consideriamo un sistema termodinamico, lo stato del quale, per le trasformazioni che prenderemo in esame, sia completamente descritto dai tre parametri: S , entropia, T , temperatura e da un parametro generico X ; sul piano T, S riponiamo la famiglia di curve che descrive l'andamento delle funzioni $S=S(T)$ per $X = \text{cost.}$ Come è noto la

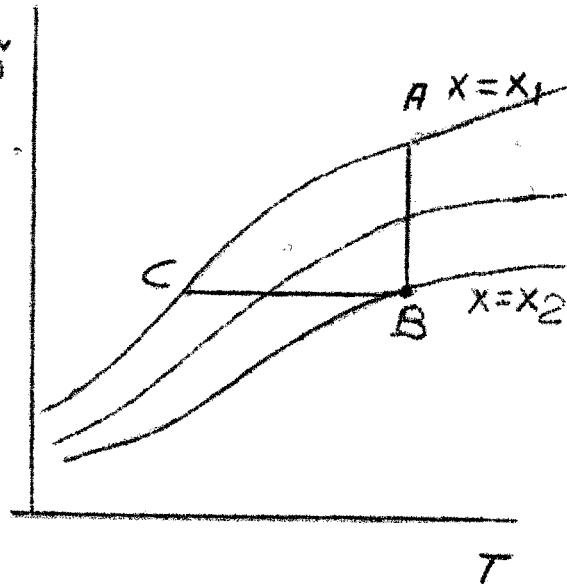


fig. 4

entropia è funzione crescente della temperatura.

Illustreremo ora una trasformazione tipo per raffreddare il sistema; si mostrerà un processo, che, come si dice, utilizza l'entropia. Partendo dal punto A nel diagramma in figura e eseguendo una trasformazione isoterma AB, cioè facendo variare il parametro X da X_1 a X_2 a T cost., si provoca la corrispondente variazione di entropia. Ora isolando termicamente il sistema e, avendo cura che la trasformazione sia reversibile, possiamo realizzare l'isentropica BC, se riportiamo il parametro X_2 al valore primitivo X_1 , ottenendo come risultato finale l'abbassamento di temperatura $T_2 - T_1$.

Caso particolare di questo processo è il raffreddamento di un gas ottenuto con compressione isoterma e successiva espansione adiabatica (metodo di Claude): il parametro generico X è in questo caso la pressione del gas.

Un caso in cui il parametro X non è una classica grandezza termodinamica, è quello della smagnetizzazione adiabatica, dove il ruolo di variare l'entropia spetta ad un campo

magnetico esterno.

L'entropia dà una misura quantitativa dell'ordine di un sistema ed un insieme di dipoli magnetici orientati avrà entropia minore di un sistema di dipoli liberi e disordinati.

Pensiamo di applicare il procedimento descritto ad un sistema formato da dipoli sufficientemente lontani l'uno dagli altri cosicchè non interagiscano tra di loro; il parametro X sarà in questo caso un campo magnetico esterno H . Si otterrà raffreddamento con le due trasformazioni seguenti: magnetizzazione isoterma e smagnetizzazione adiabatica.

Debye e Giauque suggerirono questa esperienza indipendentemente l'uno dall'altra, nel 1926; De Haas e Wiersma a Leiden e Giauque e McDougall a Berkeley nel 1933-34 ottennero i primi risultati soddisfacenti.

Sostanze che approssimino sufficientemente bene un insieme di dipoli indipendenti sono alcuni allumi di Fe e di Cr nei quali i dipoli sono rappresentati dagli ioni paramagnetici Fe^{+++} e Cr^{+++} . In essi infatti questi ioni sono uniformemente distribuiti e, grazie alla presenza di abbondante acqua di cristallizzazione, le distanze interioniche sono tali da rendere trascurabile l'interazione reciproca. Per queste loro proprietà sono stati studiati e utilizzati un gran numero di allumi e altri sali paramagnetici dei quali oggi si conoscono perfettamente le caratteristiche e si sfruttano le proprietà criogeniche e termometriche.

La fig. 4 rappresenta schematicamente l'andamento delle curve dell'entropia a campo magnetico costante di tali sali. Come si vede esiste una temperatura (H) attorno alla quale tutte le curve ad H cost. cadono bruscamente e la loro dipendenza dal campo diventa poco sensibile. A questa

brusca variazione della curvatura delle $S(T)$ corrisponde un massimo del calore specifico $C_V = T (dS/dT)_V$, dopo del quale esso diventa molto più piccolo e perciò viene drasticamente ridotta la possibilità di raffreddare altre sostanze; ne segue che il limite di utilizzazione di un sale paramagnetico viene dato dalla temperatura Θ . Inoltre la presenza di questo massimo fa sì che la risalita della temperatura, dopo la smagnetizzazione, sia piuttosto lenta o sia agisca come tampone termico.

Vogliamo ora aggiungere alcune considerazioni sul comportamento dei sali paramagnetici. Chiariremo cioè, un po' più in dettaglio, anche se qualitativamente, il meccanismo di una smagnetizzazione adiabatica. Supponiamo di applicare ad un sistema di ioni paramagnetici un forte campo magnetico esterno, i dipoli, prima disordinati, ora tenderanno ad orientarsi nella direzione del campo; questo aumento di ordine corrisponde ad una diminuzione di entropia. Questo processo non dà effetti apprezzabili alle temperature ordinarie perchè l'energia magnetica degli ioni è del tutto trascurabile rispetto all'energia termica del cristallo; quando invece queste diventano dello stesso ordine, tale processo diventa vantaggioso.

Considerazioni più rigorose dovrebbero tener presenti gli aspetti quantistici dei fenomeni. Possiamo accennare che uno ione, di momento angolare $\hbar \sqrt{J(J+1)}$ nello stato fondamentale, in assenza di campo magnetico, si trova in uno stato $(2J+1)$ volte degenerato. La presenza di un campo magnetico H scinde questo livello in $(2J+1)$ livelli equidistanti di $\Delta E = g \mu_B H$ (dove g è il fattore di Landé). Perchè il processo sia utilizzabile, questa energia deve essere dello stesso ordine di grandezza di KT . Si può vedere che il prodotto $g \mu_B H$, per gli ioni Fe^{+++}

e per un campo $H = 10.000$ gauss, diventa dell'ordine di KT per $T \approx 1^\circ K$.

Il lavoro sperimentale per utilizzare questa tecnica è laborioso e delicato, i criostati sono generalmente ad un solo stadio di smagnetizzazione e solo per esperienze molto raffinate ne sono stati costruiti a due stadi in cascata, utilizzando il primo stadio per assorbire il calore di magnetizzazione del secondo.

Il recente impiego dell' ^3He come fluido raffreddante, nel primo stadio, permette ora di effettuare la magnetizzazione isoterma a temperatura già molto bassa, $(0,3 \div 0,4^\circ K)$ e quindi con grande rendimento di raffreddamento finale. Di qui l'importanza della costruzione di criostati ad ^3He che con il loro "range" di temperatura d'impiego, $1 \div 0,3^\circ K$, copronono parte di quello che una volta era dei refrigeratori a diabatici e permettono di usare questi a temperature molto più basse.

Per quanto riguarda la termoregolazione osserviamo che, in un criostato a smagnetizzazione, questa è praticamente impossibile. Normalmente gli sperimentatori eseguono le esperienze mentre la temperatura risale; naturalmente la lentezza di questa salita dipende dalla capacità termica del sale e dalle perdite termiche: con campioni di sale molto grandi e con perdite piccole si possono ottenere dei tempi di diverse ore per coprire l'intervallo di temperatura $0,05^\circ K \div 0,9^\circ$.

5. Considerazioni conclusive

Abbiamo parlato diffusamente di questo ultimo metodo perchè, prima dell'impiego dell' ^3He come fluido refrigerante, era l'unico con il quale si potesse scendere a temperature inferiori a circa $0,9^\circ\text{K}$. Facciamo perciò ora uno schematico utile confronto fra i due sistemi.

	<u>Refrig. a smagnetizzazione.</u>
Range d'impiego	$0,9^\circ\text{K} \div 0,01^\circ\text{K}$ e anche meno
Perdite termiche medie tollerate	circa 20 erg/sec
Termoregolazione	quasi impossibile
	<u>Criostato ad ^3He</u>
Range d'impiego	$0,9^\circ\text{K} \div 0,3^\circ\text{K}$
Perdite termiche medie tollerate	circa 200 erg/sec
Termoregolazione	facile

Da quanto sopra si deducono le seguenti conclusioni. Sotto i $0,3^\circ\text{K}$ non si può che usare un refrigeratore a smagnetizzazione perchè questo è il limite del criostato ad ^3He . A temperature superiori, la scelta è ovvia; a vantaggio del secondo vano, la semplicità di realizzazione e di operazione, la facilità di termoregolare il bagno e di lavorare a T costante e le perdite termiche permesse più alte; intorno a quest'ultimo argomento aggiungeremo che è molto difficoltoso lavorare intorno ai $0,5^\circ\text{K}$ con un refrigeratore a smagnetizzazione, perchè già a questa temperatura il gas residuo nel vuoto di isolamento può portare un notevole ingresso termico che fa salire abbastanza rapidamente la temperatura. In un criostato ad ^3He questo effetto è molto diminuito per la maggior tolleranza a ingressi di calore.

CAPITOLO II PROGETTAZIONE DI UN CRIOSTATO AD ^3He 1. Descrizione del criostato

Il criostato che ora descriveremo è stato costruito con lo scopo di eseguire le misure più disparate in un intervallo di temperatura tra $0,3^\circ\text{K}$ e $4,2^\circ\text{K}$. Per questa ragione si è avuto cura di avere disponibile, per lo spazio sperimentale, almeno 120 cm^3 ; la cella ^3He è filettata all'esterno perchè vi sia la possibilità di collegarla, così, facilmente alla cella per esperienze che può essere cambiata a seconda delle misure che si desiderano eseguire. Le dimensioni esterne della cella sono standardizzate con quelle delle celle da esperienza in uso nel nostro Laboratorio.

La regione a bassa temperatura del criostato è stata inoltre collegata con un certo numero di conduttori elettrici schermati e no e con un capillare per esperienze sull' ^4He o sull' ^3He . Infatti le prime esperienze alle quali è destinato sono la misura dell'effetto termomolecolare dell' ^3He tra $0,3^\circ\text{K}$ e 1°K e la misura della mobilità degli ioni in ^3He sempre nello stesso intervallo di temperatura.

Nella fig. 5 è riportato lo schema dell'apparecchio. Un insieme di tubi discendenti (1, 4, 6, 7, 9) attraversano la flangia 5 bloccati ad essa a tenuta di vuoto con saldatura a stagno. Il tubo centrale costituisce la linea di pompaggio e di rifornimento di ^3He sulla cella 8. Esso è formato da tre tronchi di dimensioni diverse, scelte, come vedremo nel progetto, per avere la massima portata con una ragionevole entrata di calore per conduzione. Il tubo laterale 4 - 5 in acciaio inossidabile è formato anch'esso da due tronchi ed è munito al terminale inferiore di una trappola per radiazione; esso serve a fare il vuoto di isolamento

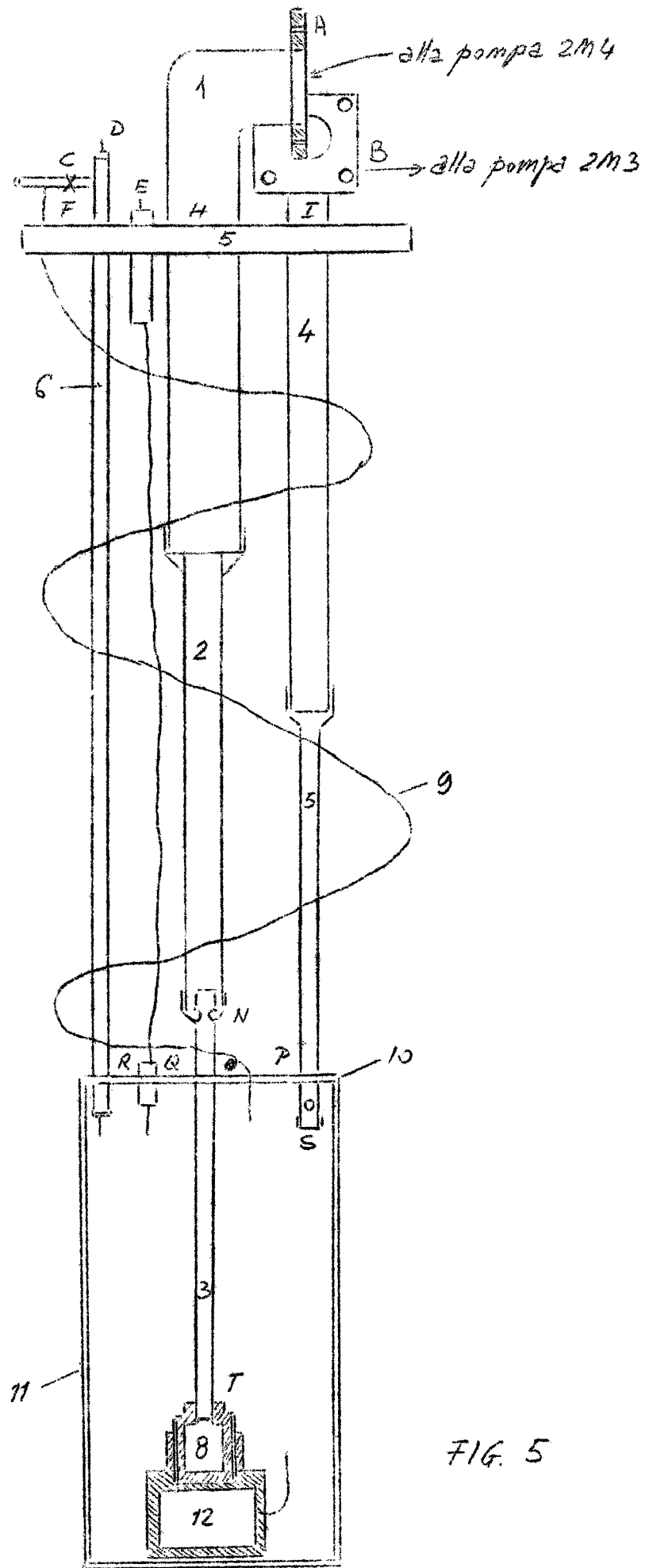


FIG. 5

nel recipiente 11, saldato a stagno alla flangia inferiore 10; Altri tre tubi, (indicati nella figura con uno solo 6) anche essi in acciaio inossidabile, di 4 mm di diametro, 0,2 mm di spessore, schermano conduttori elettrici, o servono ad eventuali misure di pressione. Il capillare 9 di Monel fornisce ^4He o ^3He nella cella per esperienze 12.

L'apparecchio funziona in modo discontinuo, ma è possibile con facili modifiche trasformarlo in ciclo continuo. In fatti se si volesse ottenere rifornimento continuato dell' ^3He liquido nella cella, basterebbe collegare l'uscita della linea di pompaggio con un capillare che riporti l'elio all'interno del dewar fino ad una valvola a spillo, posta nel bagno di ^4He , dalla quale un secondo capillare più sottile, per ridurre l'ingresso termico, entrando nella regione 3 del tubo di pompaggio, faccia gocciolare l' ^3He nella cella. Il cammino che il gas deve percorrere prima di giungere al bagno deve essere lungo abbastanza, perchè un completo contatto termico sia avvenuto tra esso e il bagno di ^4He , quindi il capillare dovrebbe essere avvolto a serpentina, come già il 9, che viene usato per esperienze. La valvola verrebbe posta nelle regioni fredde perchè ha anche funzioni di riserva di liquido. Il secondo capillare dovrebbe essere progettato in maniera tale, che l' ^4He entrante faccia il miglior scambio termico possibile con i vapori uscenti, per giungere nella cella alla stessa temperatura del liquido in evaporazione (v. Peshkov e Zinovieva, fig. 3b).

Nello stadio di condensazione l' ^3He viene fatto liquefare nella cella 8, di circa 1 cm^3 di volume, il recipiente 11 viene riempito di ^4He fino a circa 10^{-2} mm Hg per favorire lo scambio termico. A condensazione avvenuta si fa il vuoto nell'intercapedine 11 attraverso il tubo 4 e, ad isolamento raggiunto, si pompa sull' ^3He liquido attraverso lo

stesso condotto usato per la condensazione.

I particolari di queste manovre saranno dati in seguito quando descriveremo le misure esatte (Cap. II, 4). I dettagli tecnici della costruzione, e cioè il tipo di materiali usati, le dimensioni, il tipo di saldature sono elencati nel disegno costruttivo (fig. 6)

2. Progetto del criostato

a) Considerazioni preliminari.

Esporremo, qui di seguito e dettagliatamente, il progetto del nostro criostato, spiegheremo cioè l'insieme delle soluzioni scelte a risolvere i problemi tecnici man mano incontrati.

Dalla curva di tensione di vapore dell' ^3He si vede che, per ottenere una temperatura di $0,3^\circ\text{K}$, bisogna raggiungere nella celletta una pressione di $1,5 \cdot 10^{-3}$ mm Hg in equilibrio con il liquido che continua ad evaporare.

L'inizio del nostro lavoro è stato quindi quello di valutare con una stima approssimata l'entrata di calore nella cella dell' ^3He ; da questo dato si è quindi ricavata la velocità di pompaggio nella celletta, perchè la pressione sul bagno raggiungesse i limiti desiderati.

Nota questa e la velocità della pompa, si sono calcolate le conduttanze delle linee di pompaggio ragionevolmente realizzabili con i tubi disponibili e si sono confrontati i due dati ottenuti in termini di velocità di pompaggio sul bagno, verificando che fossero dello stesso ordine di grandezza.

La limitata disponibilità dei materiali, le dimensioni standard dei dewars in vetro per ^4He , la quantità limitata di ^3He , hanno in certo modo ristretto il numero delle soluzioni possibili. Ottenuti risultati concreti e verificata la possibile costruzione del nostro apparecchio, ne abbiamo disegnato uno schema di massima, seguendo il criterio di eliminare il più possibile le difficoltà tecniche di realizzazione, compatibilmente con le conclusioni tratte dai calcoli eseguiti. Su questo progetto di massima abbiamo rifatto con più accuratezza i calcoli di flusso attraverso i

tubi di pompaggio e delle entrate termiche parassite, verificando che le condizioni iniziali fossero ancora soddisfatte.

Il criostato è stato costruito secondo le dimensioni date nell'esposizione che segue; qualche leggera variazione, dovuta a necessità di costruzione, non modifica le previsioni di questi calcoli.

b) Schema del calcolo. $\frac{lt.}{sec.}$

La velocità di pompaggio di una pompa a diffusione è funzione della sua pressione di entrata, l'andamento è mostrato in fig.7.

Immaginiamo che il nostro apparecchio stia funzionando a regime, allora il numero di moli che evaporano dal liquido deve esse-

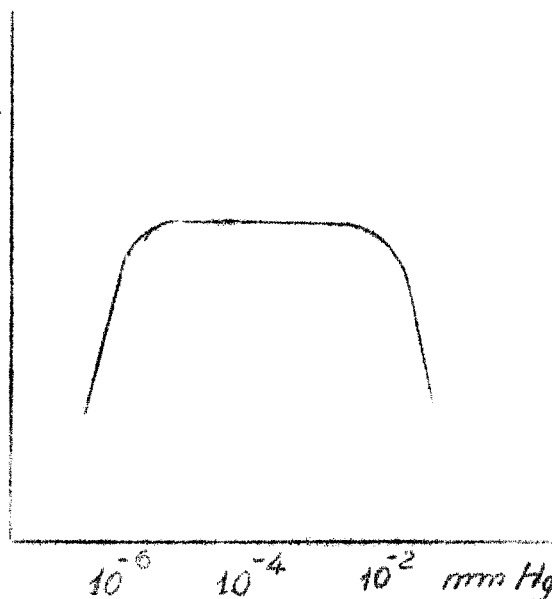


fig. 7

re uguale al numero di moli che vengono aspirate dalla pompa; vale a dire, se z è l'asse del tubo di pompaggio e $\dot{n}(z)$ le moli che attraversano le sue sezioni nell'unità di tempo, allora si deve avere:

$$d\dot{n}/dz = 0.$$

Se S è la velocità della pompa in litri al secondo, per la legge dei gas abbiamo:

$$S = \dot{V} = \dot{n}RT/P;$$

cioè

$$\dot{n} = PS/RT;$$

Ricordiamo che, se j è il calore latente di evaporazione per mole dell' ${}^3\text{He}$, \dot{n} è proporzionale alle perdite termiche nella misura:

$$\dot{n} = \dot{q}/j;$$

dove \dot{q} misura il calore entrante per unità di tempo (°)

(°) Si deve specificare che \dot{q} è la quantità di calore che entra direttamente nella celletta contenente ${}^3\text{He}$ liquido. In realtà il \dot{q} del criostato è maggiore (entrato sul tubo di pompaggio), ma una parte viene ceduta al vapore di ${}^3\text{He}$ nel salto di temperatura $0,3^\circ\text{K}-1,2^\circ\text{K}$ fra celletta e il bagno di ${}^4\text{He}$.

Immaginiamo che sia nota la funzione che lega S a P; possiamo allora riassumere le considerazioni fatte nel seguente sistema:

$$\dot{n} = \dot{q}/j$$

$$S = S(P)$$

$$\dot{n} = PS/RT;$$

Dal quale si ricava facilmente il valore di P all'ingresso della pompa in funzione del calore entrante:

$$P = \dot{q}RT/jS(P) = f(\dot{q}RT/j);$$

Come dopo mostreremo, il numero di moli che passano nel tubo nell'unità di tempo, è funzione anche delle dimensioni del tubo e dell'argomento $P_0/\sqrt{T_0} - P/\sqrt{T}$, dove P_0 è la tensione di vapore dell' ^3He alla temperatura T_0 raggiunta dal bagno e P e T la pressione e la temperatura esterna, per ciò noti \dot{n} , P, T si può risalire a $P_0/\sqrt{T_0}$.

Nell'eseguire il calcolo ora schematizzato siamo stati costretti ad alcune semplificazioni; infatti non ci era perfettamente nota la funzione $S = S(P)$ e l'abbiamo sostituita con valori numerici approssimati.

Esporremo ora le formule che abbiamo usato per i nostri calcoli numerici.

c) Flusso attraverso un tubo.

Queste formule sono valide per pressioni piuttosto basse ($< 5 \cdot 10^{-2}$ mm Hg a temperatura ambiente) e quindi si riferiscono alle temperature più basse raggiungibili con il criostato. Per le temperature più alte e per le condizioni iniziali non di regime si dovrebbe partire da una formula diversa dalle (1) e (2).

a) Caso del tubo a temperatura costante (3) in regime molecolare:

$$Q = \frac{4}{3} (2\pi RT)^{\frac{1}{2}} \frac{a^3}{l} (P_1 - P_2) \quad (1)$$

dove Q è la quantità di gas che fluisce nel tubo misurata in PV, a il raggio del tubo, l la sua lunghezza, $P_1 - P_2$ il salto di pressione tra i terminali. Questa formula vale solo se il cammino libero medio L è molto maggiore di a , se a è molto minore di l e se $\frac{dN(T)}{dz}$ è molto piccola; dove $N(T)$ è la densità del gas.

b) Caso del tubo sottoposto a gradiente di temperatura.

Nelle stesse condizioni del caso precedente per un tubo a sezione circolare, la quantità di gas che attraversa una sezione nell'unità di tempo (3) è

$$\dot{m} = -\frac{4}{3} \sqrt{\frac{2\pi M}{R}} a^3 \frac{d}{dz} \left(\frac{P}{\sqrt{T}} \right);$$

(m sono i grammi di gas). Ossia:

$$\dot{n} = -\frac{4}{3} \sqrt{\frac{2\pi}{RM}} a^3 \frac{d}{dz} \left(\frac{P}{\sqrt{T}} \right); \quad (2)$$

siccome attraverso una qualsiasi sezione del tubo $\dot{n} = \text{cost.}$, integrando si ha:

$$\dot{n}(z_i - z_{i-1}) = \frac{4}{3} \sqrt{\frac{2\pi}{RM}} a_i^3 \left(\frac{P_{i-1}}{\sqrt{T_{i-1}}} - \frac{P_i}{\sqrt{T_i}} \right) \quad (3)$$

dove gli indici i sono riferiti a tratti di tubo ciascuno con sezione s_i non necessariamente uguale a quelle dei tratti precedenti e successivi, nel caso si abbia una successione a sezioni variabili di tubi saldati.

Sommando le (3) si ottiene:

$$\begin{aligned} \dot{n} &= \frac{4}{3} \sqrt{\frac{2\pi}{RM}} \frac{L}{\sum_k \left(\frac{l_k}{a_k^3} \right)} \Delta \left(\frac{P}{\sqrt{T}} \right) = \\ &= \frac{4}{3 \times 8} \sqrt{\frac{6,28}{8,315 \cdot 10^7}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{M} \sum_k \frac{l_k}{a_k^3}} \Delta \left(\frac{P}{\sqrt{T}} \right) \right\} = \\ &= 4,57 \cdot 10^{-5} \left\{ \frac{1}{\sqrt{M} \sum_k \frac{l_k}{a_k^3}} \Delta \left(\frac{P}{\sqrt{T}} \right) \right\}; \end{aligned} \quad (4)$$

Da queste formule si può ritrovare, per esempio, quella per un tubo di dimensioni d, l a T cost. in aria a 20°C ; per ottenere la conduttanza C bisogna moltiplicare membro a membro la (4) per RT ;

$$C = 4,57 \cdot 10^{-5} \sqrt{\frac{T}{M}} R \frac{d^3}{l} = 12,09 \frac{d^3}{l};$$

questa è in accordo con White e con Guthrie.

La (4) è calcolata in c g s, quindi usando come misura di pressione i mm Hg e come fluido $l'^3\text{He}$ diventa:

$$\dot{n} = \frac{4,57 \times 1,33 \times 10^{-5}}{1,732} \frac{L}{\sum_K \frac{l_K}{d_K^3}} \Delta\left(\frac{P}{\sqrt{T}}\right);$$

$$\dot{n} = 3,52 \cdot 10^{-2} \frac{\Delta\left(\frac{P}{\sqrt{T}}\right)}{\sum_K \frac{l_K}{d_K^3}}; \quad (5)$$

Nota: Per le formule usate in questo paragrafo vedere in Bibliografia al n. (3), al n. (12) e al n. (14).

d) Calcoli numerici.

Il calore latente di evaporazione dell' ^3He é a $0,3^\circ\text{K}$, $6,4 \text{ cal/mole} = 2,68 \cdot 10^8 \text{ erg/mole}$; per ogni erg evaporano quindi

$$n = 3,73 \cdot 10^{-9} \frac{\text{moli}}{\text{erg}};$$

quindi per un flusso di \dot{q} erg/sec:

$$\dot{n} = 3,73 \cdot 10^{-9} \dot{q} \quad (6)$$

Pessimisticamente parlando la velocità di pompaggio della pompa 2M4 con la trappola ad azoto liquido é di 20lt/sec quindi il numero di moli che saranno pompate via dal sistema é:

$$\dot{n} = \frac{20 \times P}{R T}; \quad (7)$$

e tenendo conto della (6)

$$3,73 \cdot 10^{-9} \dot{q} = \frac{20 P}{62,39 \times 300}; \quad (8)$$

da cui:

$$P = \frac{3,73 \cdot 10^{-9} \times 62,39 \times 300}{20} \dot{q} \text{ mm Hg} =$$

$$= 3,49 \cdot 10^{-6} \dot{q} \text{ mm Hg}; \quad (9)$$

che da la pressione all'ingresso della pompa in funzione del \dot{q} .

Nel caso che il criostato sia realizzato secondo lo schema di fig. 6

$$\sum_k \frac{l_k}{d_k^3} = 149,57 \text{ cm}^{-2}; \quad (10)$$

Allora la (5) diventa

$$\dot{n} = 2,35 \cdot 10^{-4} \Delta \left(\frac{P}{\sqrt{T}} \right); \quad (11)$$

combinando questa con la (6) e la (9)

$$\begin{aligned} 3,73 \cdot 10^{-9} \dot{q} &= 2,35 \cdot 10^{-4} \left(\frac{P_0}{\sqrt{T_0}} - \frac{3,49}{\sqrt{300}} \cdot 10^{-6} \dot{q} \right) = \\ &= 2,35 \cdot 10^{-4} \left(\frac{P_0}{\sqrt{T_0}} - 2,01 \cdot 10^{-7} \dot{q} \right); \end{aligned}$$

quindi:

$$\frac{P_0}{\sqrt{T_0}} = 1,607 \cdot 10^{-5} \dot{q}; \quad (12)$$

Dove ricordiamo che P_0 e T_0 sono rispettivamente la pressione e la temperatura nella celletta.

Nella seguente tabella sono dati alcuni valori di P_0 e di $P_0/\sqrt{T_0}$ in funzione di T .

T	\sqrt{T}	$P_0(T)$	$P_0/\sqrt{T_0}$
0,30	0,5477	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,73 \cdot 10^{-3}$
0,35	0,591	$7,17 \cdot 10^{-3}$	$1,213 \cdot 10^{-2}$
0,40	0,632	$24,05 \cdot 10^{-3}$	$3,80 \cdot 10^{-2}$
0,45	0,670	$63,55 \cdot 10^{-3}$	$9,48 \cdot 10^{-2}$
0,50	0,707	0,1418	0,20
0,55	0,741	0,2789	0,37
0,60	0,774	0,4985	0,64
0,65	0,806	0,8267	1,025
0,70	0,836	1,291	1,54

$P_0/\sqrt{T_0}$ é stata graficata in funzione di T e di \sqrt{T} nei grafici delle fig. 8 e 9 tenendo presente i valori di $P = P(T)$ della tensione di vapore secondo Peshkov e Zinovieva (4); sotto $0,3^\circ\text{K}$ sono state fatte estrapolazioni.

La (12) é stata graficata nella fig. 10 dove si é anche disegnato l'andamento di $T = T(P_0/\sqrt{T_0})$ in modo da leggere facilmente il valore di T per ogni \dot{q} . $T_0(\dot{q})$ é stata disegnata nella fig. 11.

Dalla lettura dei grafici risulta che la temperatura ragionevolmente raggiungibile con ottimo isolamento termico (50 erg/sec) é di $0,275^\circ\text{K}$. Nella fig. 12 é stata graficata la funzione $P_0/\dot{q}\sqrt{T_0} = f(S)$ dove S é la velocità di pompaggio. Si vede che la funzione varia poco al variare di S e tra $f(\infty)$ e $f(1)$ si ha

$$\frac{\Delta f}{f(1)} \sim \frac{0.5}{2} = 0.25.$$

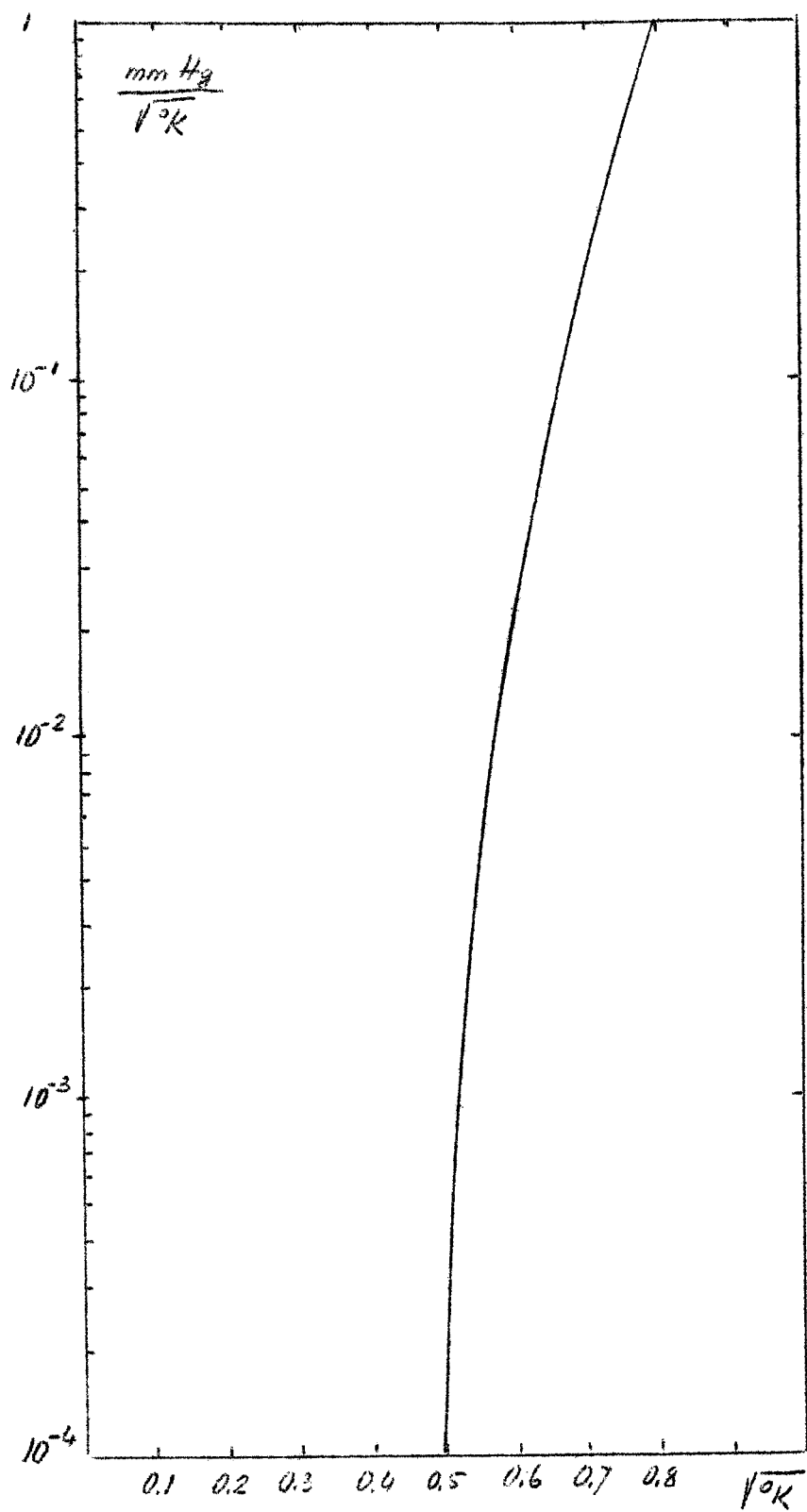


FIG. 8

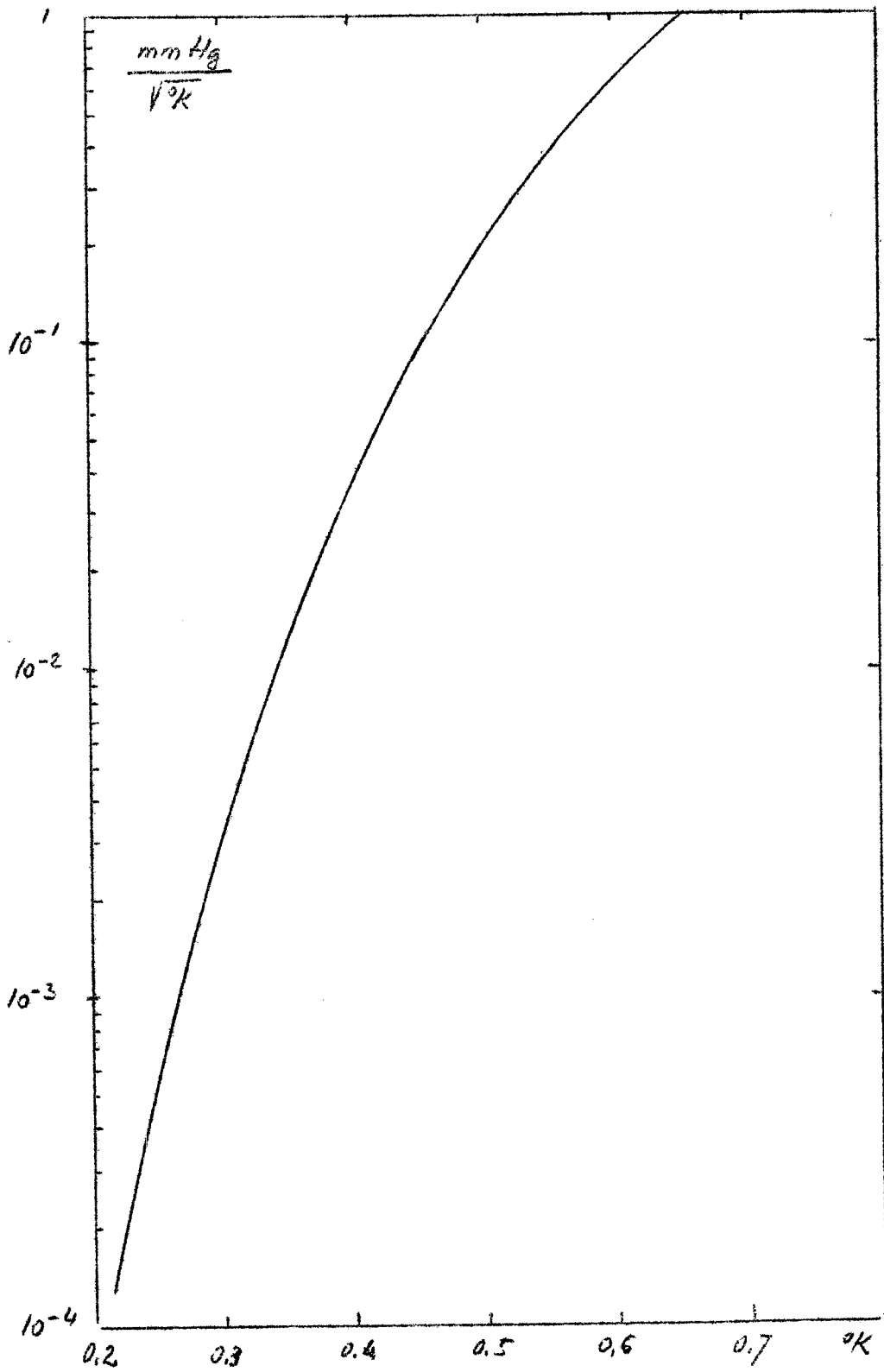


FIG. 9

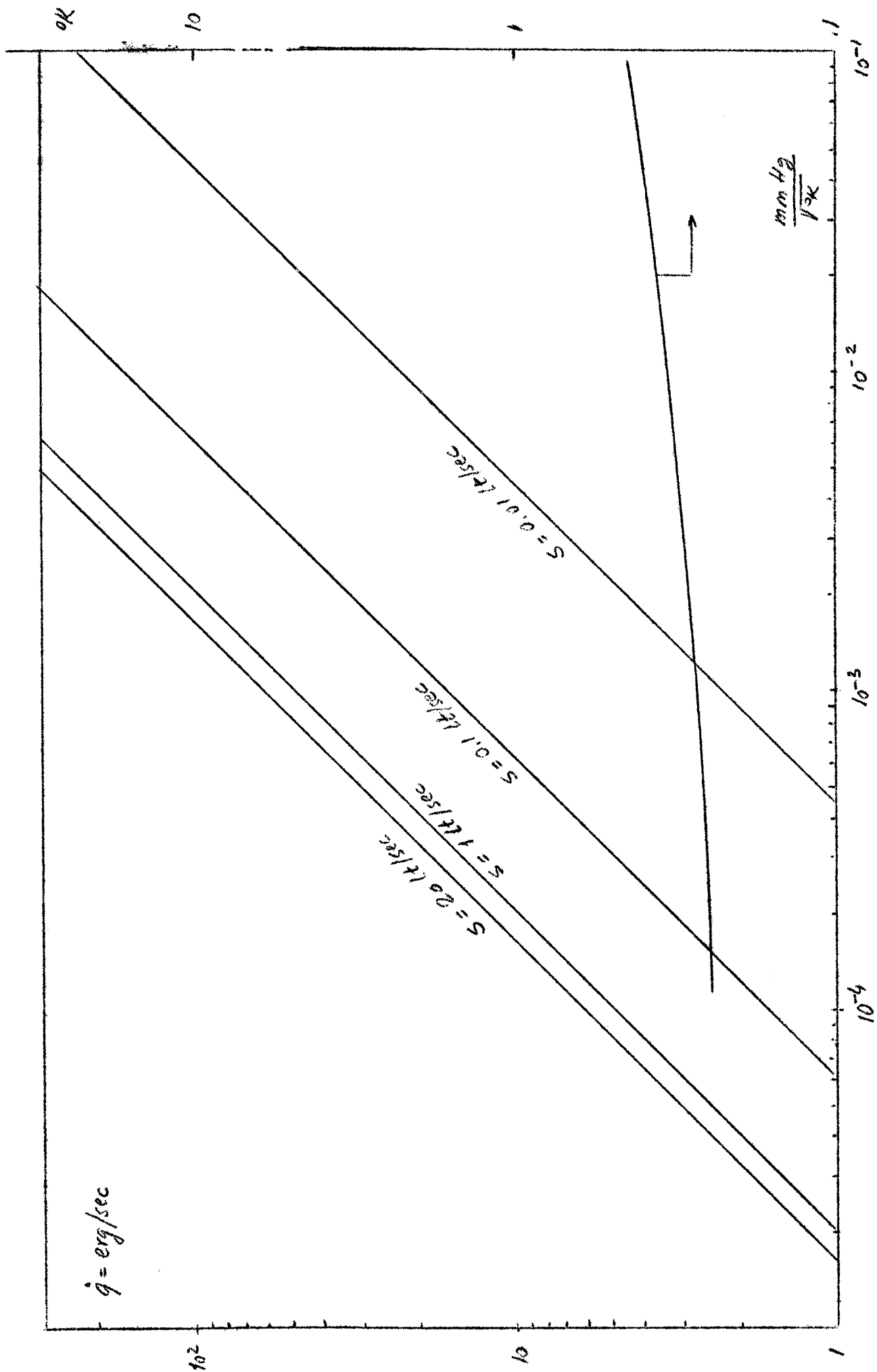


FIG. 10

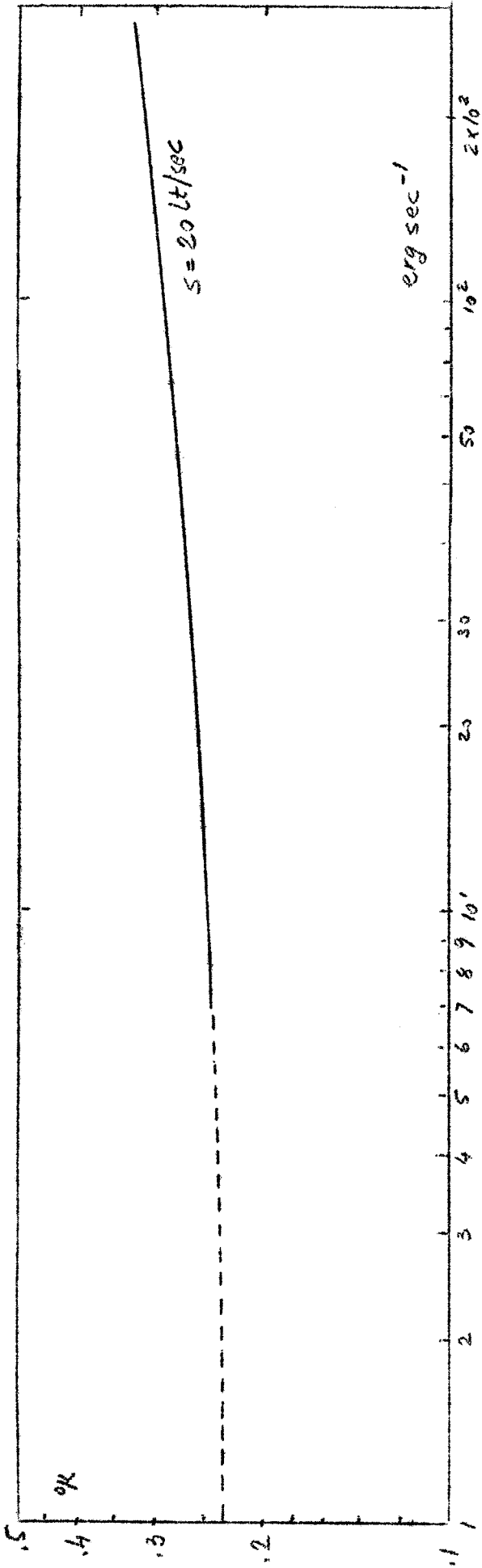


FIG. 11

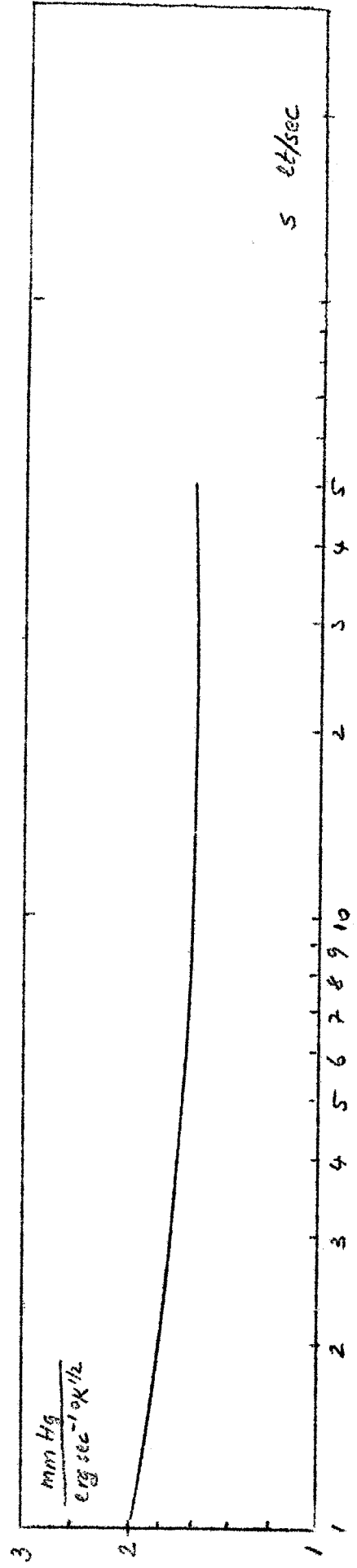


FIG. 12

e) Stima dell'ingresso di calore.

Tra la cella ad ^3He , apparecchio di misura, e il bagno di ^4He vi è una differenza di temperatura che varia da 0 a $0,7^\circ\text{K}$, quindi vi è un flusso di calore da questo a quelli dovuto a conduzione ed irraggiamento, mentre è sen z'altro trascurabile la convezione per la bassa pressione esistente nella camicia di vuoto e vi è favorevole nei tu bi di evaporazione.

Ora valuteremo la perdita fissa del criostato, cioè quella dovuta alla sua geometria e daremo poi il limite mas simo consentito per fare una esperienza a $0,3^\circ\text{K}$, ossia diremo qual'è il massimo calore che un apparato sperimentale può portare nel refrigeratore attraverso tubi, cavi elettri ci ecc.

Perdite dovute alla conduzione sono:

- a) attraverso il tubo di pompaggio nella cella ^3He .
- b) attraverso il capillare per ^4He (nel caso di una e sperienza con ^4He bisogna tener conto della conducibilità del superfluido che è molto grande).
- c) conduzione attraverso i gas residui nella interca-pedine di vuoto.

Eseguiamo allora un calcolo per conoscere la perdita quando il criostato si trova a $0,3^\circ\text{K}$ e cioè in condizione di regime alla temperatura minima.

Dato un solido omogeneo, isolato nella superficie laterale, agli estremi del quale vi sia la differenza di tem peratura ΔT l'energia che si trasferisce da una faccia all'altra è data da:

$$dW = \frac{k \, ds}{dl} \, dT$$

dove dW è l'energia entrante per unità di tempo, s la se-

zione del solido, l la sua lunghezza. Se:

$$ds/dl = \text{cost.} = s/l,$$

si ha:

$$W = \bar{k}s/l \cdot \Delta T;$$

\bar{k} è il valore medio della $k(T)$ nell'intervallo ΔT . Non esistono dati tecnologici che ci permettano di conoscere \bar{k} con precisione; i valori che abbiamo usato nei nostri calcoli sono ricavati estrapolando la funzione $k = k(T)$ nota per temperature più elevate di quelle alle quali operiamo. Noi useremo sempre dei valori verosimilmente maggiori di quelli reali; per il German-Silver assumiamo $\bar{k} = 5 \cdot 10^{-3}$ watt/cm $^{\circ}$ K.

Il tubo che unisce la cella alla flangia in contatto con il bagno a 1 $^{\circ}$ K è lungo 15 cm, ha uno spessore di 0,01 cm e un diametro di 0,5 cm, il calore che entra per conduzione attraverso di esso è quindi:

$$W = 0,73,14 \cdot 0,5 \cdot 0,01 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \text{ watt}/15 = 36 \text{ erg/sec};$$

Il capillare di Monel (Cu 80%, Ni 20%) che unisce lo spazio sperimentale all'esterno è lungo 20 cm, ha diametro interno di 0,1 cm ed esterno di 0,16 cm. La sua conduzione è data da:

$$W = \bar{k} \cdot 0,73,14 \cdot (0,16^2 - 0,1^2) / 20 = \bar{k} \cdot 4,28 \cdot 10^{-4} \text{ watt};$$

Se \bar{k} è circa $5 \cdot 10^{-3}$ watt/cm $^{\circ}$ K (non ci sono dati sicuri di questo materiale perciò abbiamo usato lo stesso valore del German-Silver),

$$W = 21,40 \cdot 10^{-7} \text{ watt} = 21,40 \text{ erg/sec.}$$

Mostriamo ora che le perdite per irraggiamento dovute all'affacciarsi dei due recipienti cilindrici (cella, contenitore), a temperatura diversa sono trascurabili, esse si calcolano secondo la formula approssimata

$$\dot{q} = \sigma F_e F_a A_1 (T_1^4 - T_2^4);$$

dove $\sigma = 5,6 \cdot 10^{-5} \text{ erg/cm}^2 \text{sec}^\circ\text{K}$, A_1 è l'area della superficie a $T = T_2$. F_e e F_a sono coefficienti che variano da 0 a 1 e dipendono dalle emissività delle superfici e dalla loro disposizione geometrica. Volendo fare una valutazione pessimistica poniamo $F_e = F_a = 1$ e calcoliamo la

$$\dot{q} = 5,6 \cdot 10^{-5} (1 - 0,3^4) 2\pi r (r+h);$$

dove $r \cong 0,7 \text{ cm}$ e $h \cong 2 \text{ cm}$ quindi l'entrata di calore \dot{q} è:

$$\dot{q} = 5,6 \cdot 6,28 \cdot 0,7 \cdot 2,7 \cdot 10^{-5} = 6,65 \cdot 10^{-6} \text{ erg/sec}$$

Confrontando questo dato con i precedenti ottenuti vediamo che è chiaramente trascurabile.

Il gas residuo nell'intercapedine di vuoto, anche se a bassa pressione, circa $10^{-5} \div 10^{-6} \text{ mm Hg}$, è fonte di perdita verso il bagno di ${}^4\text{He}$. Pure in questo caso valuteremo pessimisticamente la perdita, anche perchè non vi è modo di conoscere con precisione i coefficienti di accomodamento presenti nella formula di Knudsen:

$$\frac{\dot{q}}{S} = \frac{a_0}{4} \frac{\gamma+1}{\gamma-1} \sqrt{\frac{2R}{\pi M}} p \frac{T_2 - T_1}{\sqrt{T_0}}; \quad (13)$$

dove a_0 è un numero puro funzione dei coefficienti di accomodamento e della geometria del sistema, γ è l'esponente adiabatico, R la costante dei gas $8,31 \cdot 10^7$ erg/°K mole, S la superficie esterna della cella. Misurando la pressione in mm Hg e conglobando tutte le costanti in un sol numero la formula precedente diventa:

$$\frac{\dot{q}}{S} = 0.243 a_0 \frac{\gamma+1}{\gamma-1} \sqrt{\frac{1}{T^0 M}} \Delta T p_{\text{mm}} \frac{\text{watt}}{\text{cm}^2};$$

La temperatura T^0 è intermedia tra T_2 e T_1 e si fissa caso per caso come il coefficiente a_0 . Siccome questo al massimo può essere 1 per una prima stima pessimistica useremo la formula

$$\begin{aligned} \frac{\dot{q}}{S} &= 0,243 \frac{\gamma+1}{\gamma-1} \sqrt{\frac{1}{M \cdot 0,3}} \Delta T p_{\text{mm}} = & (14) \\ &= 0,444 \frac{\gamma+1}{\gamma-1} \frac{\Delta T}{\sqrt{M}} p_{\text{mm}} \frac{\text{watt}}{\text{cm}^2}; \end{aligned}$$

che per l' ^4He diventa, essendo $M = 4$ e $\gamma = 1,66$

$$\frac{\dot{q}}{S} = \frac{0,444}{2} 4,03 \Delta T p_{\text{mm}} = 0,894 \Delta T p_{\text{mm}} \frac{\text{watt}}{\text{cm}^2}; \quad (15)$$

Se $\Delta T = 0,7$;

il coefficiente di proporzionalità alla pressione è

$$\dot{q}/s = 0,625 p_{\text{mm}} \text{ watt/cm}^2$$

Le dimensioni del nostro recipiente sono all'incirca quelle di un cilindro di diametro 1,2 cm e altezza 2 cm e quindi la sua superficie totale è circa:

$$S \approx 10 \text{ cm}^2$$

quindi:

$$\dot{q} = 6,25 p_{\text{mm}} \text{ watt} \quad (16)$$

Come si vede l'entrata di calore dipende linearmente dalla pressione, a $0,5^\circ\text{K}$ la tensione di vapore dell' ^4He è circa 10^{-5} mm Hg, a $0,4^\circ\text{K}$ è 10^{-7} e a $0,3^\circ\text{K}$ è $10^{-9} \div 10^{-10}$ mm Hg. Questo vuol dire che, se si riesce a raggiungere una temperatura intorno ai $0,4^\circ\text{K}$ e non ci sono perdite nella linea di pompaggio sull'intercapedine anche questa perdita è ridotta a valori trascurabili, ma può essere notevole durante lo stadio di raffreddamento.

Possiamo riassumere questo fatto dicendo che l'entrata termica dal recipiente di vuoto alla cella migliora col diminuire della temperatura ed esiste un punto critico verso i $0,5^\circ\text{K}$, dove vi è il massimo salto di temperatura per una pressione dell'ordine di 10^{-5} mm Hg. Al progressivo raffreddarsi segue una progressiva e rapida diminuzione di pressione del gas residuo e quindi una caduta della perdita.

Un altro ingresso termico dovuto a conduzione del gas è quello dei vapori di ^3He nel tubo di evaporazione. Un calcolo preciso è anche qui praticamente impossibile, tanto più che il gas non è in regime molecolare, ma intermedio tra questo e il regime viscoso ed inoltre esso è in movimento dalla cella del criostato verso la pompa. Come è noto per poter applicare la formula di Knudsen (13), il libero cammino medio delle molecole nel gas deve essere maggiore della distanza delle superfici affacciate a diversa temperatura. Il nostro caso si può schematizzare qualitativamente nel seguente modo:

I vapori di ^3He vengono pompati attraverso il tubo T, in media quindi le molecole saliranno verso l'alto raffreddandolo (convezione forzata). In un gas a bassa pressione si parla di conduzione termica perchè la differenza di temperatura tra punti di un sistema non provoca moti convettivi. Il trasporto di calore è quindi affidato alle

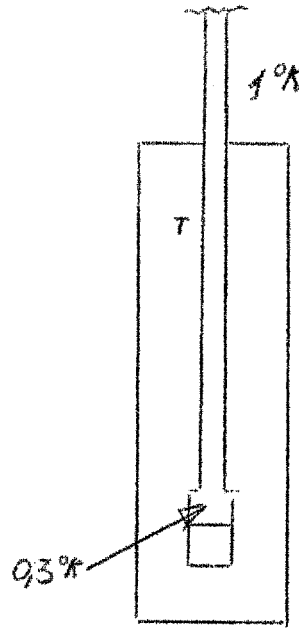


fig. 12

le singole molecole che si "scaldano" su una parete e si "raffreddano" sull'altra, senza incontrare altre molecole o altri ostacoli a diversa temperatura. Con l'aiuto della teoria cinetica si riesce in questo caso a dare una valutazione dell'energia cinetica acquistata e ceduta dalle molecole e quindi del calore totale trasportato.

Se analizziamo il nostro caso, vediamo che una singola molecola che passa dalla zona ad 1°K a quella a $0,3^\circ\text{K}$ può percorrere questo tragitto (data la pressione relativamente alta, $10^{-3} \div 10^{-4}$ mm Hg), cedendo parte della propria energia o alle pareti del tubo (di per sè conduttore e quindi non isolato) o alle molecole più "fredde" che vengono dal bagno. Possiamo concludere da queste considerazioni che le perdite dovute ai vapori di ^3He sono senz'altro trascurabili al confronto delle altre.

Se si usa il criostato al solo scopo di raggiungere basse temperature e non di utilizzarlo per raffreddare campioni o celle per esperienza, non si dovrà tener conto di altre perdite; l'effetto Joule e la conduzione termica di conduttori elettrici è trascurabile in confronto alle altre.

Diversamente bisognerà valutare l'eventuale entrata di calore, caso per caso, e limitarle secondo la temperatura che si vuol raggiungere. Abbiamo mostrato tra le caratteristiche del nostro criostato un grafico temperatura - calore entrante (fig. 11) da utilizzarsi per questo progetto.

Concludendo dobbiamo tener conto della perdita del tubo di pompaggio $W = 36$ erg/sec e quella del gas di scambio $\dot{q} = 6,25 p_{\text{mm}}$ watt. Trascuriamo le perdite dovute al capillare perchè questo non sarà utilizzato per le prime esperienze.

Al massimo quindi totalizziamo, con 10^{-5} mm hg nell'intercapedine:

$$\dot{q} = 36 + 625 = 661 \text{ erg/sec}$$

(con \dot{q} indicheremo d'ora in poi l'ingresso totale di calore nel nostro criostato.

Abbiamo ottenuto questi valori approssimando e il coefficiente di conduzione metallica del German-Silver e il coefficiente a_0 . Il primo, dalle estrapolazioni fatte potrebbe essere minore anche di un fattore 0,2 rispetto a quello usato e il secondo generalmente non è maggiore di 0,5. Un'altra grandezza che può essere abbastanza facilmente variata, per ottenere una diminuzione dell'ingresso termico, è la pressione del gas di scambio. Non è ottimistico pensare di ottenere una pressione di 10^{-6} mm Hg e ciò porterebbe ovviamente ad un sensibile miglioramento delle perdite.

Se teniamo conto di queste considerazioni, assunto una perdita probabilmente ancora pessimistica intorno ai 300 erg/sec vediamo, dalle caratteristiche citate temperatura - calore, che con questo valore si può raggiunge-

re la temperatura di circa $0,33^{\circ}\text{K}$, con una velocità di pompaggio $S = 20 \text{ lt/sec}$.

Oltre alle entrate termiche che avvengono a regime, calcoliamo ora quanto calore è necessario sottrarre all' ^3He perchè da circa $1,2^{\circ}\text{K}$ passi a $0,3^{\circ}\text{K}$.

Il calore specifico medio tra queste due temperature è $0,9 \text{ cal/mole}^{\circ}\text{K} = 3,76 \cdot 10^7 \text{ erg/mole}^{\circ}\text{K}$. Il calore latente del ^3He (a $0,3^{\circ}\text{K}$ e quindi il minimo utilizzabile) è circa $2,68 \cdot 10^8 \text{ erg/mole}$; per raffreddare una mole da 1°K a $0,3^{\circ}\text{K}$ bisogna sottrarre dal bagno $3,76 \times 0,7 \times 10^7 \text{ erg}$ cioè $10^7 \cdot 2,63 \text{ erg}$, ossia è necessario evaporarne un decimo di mole.

Per avere un'idea dell'efficienza del criostato diamo ora una serie di dati indicativi: gli ingressi termici tollerabili per ottenere $0,3^{\circ}\text{K}$ e le temperature raggiungibili con perdite termiche maggiori.

Ci riferiamo al grafico di fig. 10 dove è dato l'andamento di $P_0/\sqrt{T_0}$ in funzione di \dot{q} per quattro velocità di pompaggio della 2M4 e cioè per 20 lt/sec , 1 lt/sec , $0,1 \text{ lt/sec}$ e $0,01 \text{ lt/sec}$.

Da esso per $T_0 = 0,3^{\circ}\text{K}$ ricaviamo il valore di $P_0/\sqrt{T_0}$ e di qui i valori di \dot{q} . Abbiamo:

$$\dot{q} = 180 \text{ erg/sec per } S = 20 \text{ lt/sec}$$

$$\dot{q} = 140 \text{ erg/sec per } S = 1 \text{ lt/sec}$$

$$\dot{q} = 46 \text{ erg/sec per } S = 0,1 \text{ lt/sec}$$

$$\dot{q} = 6 \text{ erg/sec per } S = 0,01 \text{ lt/sec}$$

D'altra parte, fissate delle entrate termiche ragionevoli come 200 o 300 erg/sec , le temperature raggiunte alle varie velocità di pompaggio sono:

<u>S in lt/sec</u>	<u>T₀ in °K per 200 erg/sec</u>	<u>T₀ in °K per 300 erg/sec</u>
20	0,305	0,32
1	0,31	0,325
0,1	0,35	0,36
0,01	0,45	forse 0,5

E' necessario considerare diversi valori della velocità di pompaggio perchè non sappiamo come essa diminuisce e i dati forniti dalla casa (30 ÷ 35 lt/sec) sono quelli di optimum alla pressione di 10^{-4} mm Hg.

Possiamo concludere che è inutile usare il nostro crio stato per esperienze con perdite termiche maggiori di 300 erg/sec, se lo si vuol usare a temperature dell'ordine di 0,4°K.

3. Impianti ausiliari

Parleremo in questo paragrafo delle apparecchiature all'esterno del dewar riferendoci alle due fig. 13 e 14, dove nella prima è disegnato lo schema della linea che riguarda tutti i servizi del criostato ad ^3He e, nell'altra, lo schema della linea di pompaggio sul bagno preraffreddante di ^4He .

Illustriamo ora la fig. 13.

T_1 , T_2 , T_3 , sono trappole ad azoto liquido per bloccare i vapori di Hg delle diffusioni.

La D_1 è una pompa a diffusione Edwards 2M4 a 4 stadi da 35 lt/sec (dopo la trappola) che lavora sul bagno di ^3He (C in figura) in un intervallo di pressioni tra 10^{-5} mm Hg e 35 mm Hg, (la tensione di vapore dell' ^3He a $0,3^\circ\text{K}$ e $1,5 \cdot 10^{-3}$ mm Hg). Questa alta pressione d'innescò permette di lavorare senza rotativa ausiliaria, semplificando la costruzione di un circuito chiuso per l' ^3He . Il rubinetto 1 è opportunamente demoltiplicato per avere una regolazione fina del flusso di pompaggio.

Il pannello di strumenti U e M.L. è costituito da un manometro a mercurio ad U e da un McLeod che permettono una lettura della pressione tra circa 40 mm e 10^{-4} mm Hg cioè comprende il range delle tensioni di vapore del bagno tra le temperature $0,3^\circ\text{K}$ e $1,2^\circ\text{K}$.

Il McLeod è stato progettato e costruito appositamente perchè la lettura delle pressioni tra 10^{-3} e 5 mm Hg abbia la precisione $\approx 1\%$; esso è uno strumento fornito di due canne montate su volumi diversi; sull'una (canna dell'alto vuoto) si leggono pressioni tra 10^{-5} e 10^{-1} mm Hg, sull'altra (canna del basso vuoto) pressioni tra 10^{-2} e 15 mm Hg.

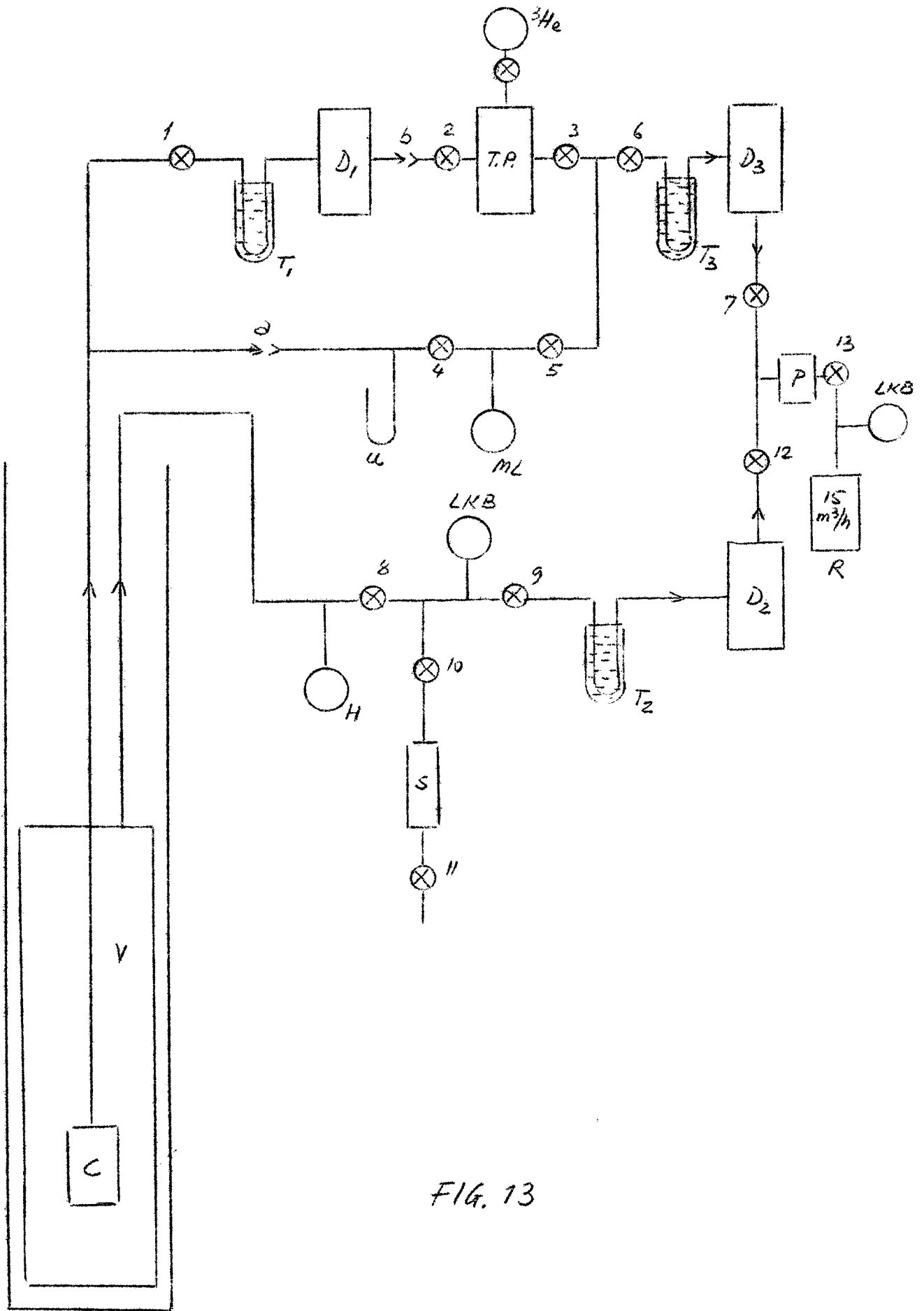


FIG. 13

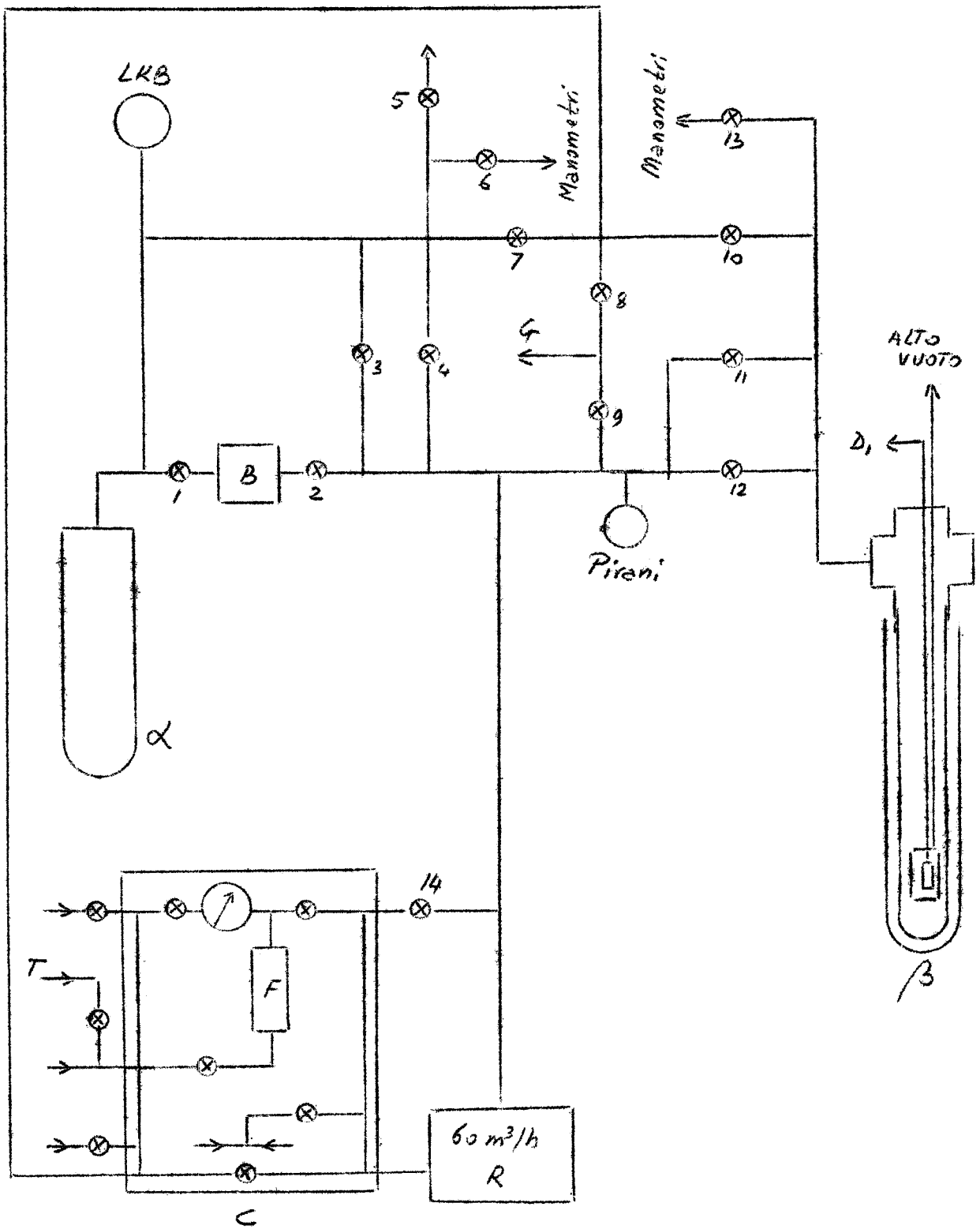


FIG. 14

I giunti a e b che collegano la parte in vetro (pompa Töpler, McLeod e pompa a diffusione P.D.) con la parte in metallo dell'impianto, sono stati saldati con cera W 40.

La pompa Töpler T.P. fornisce il prevuoto alla 2M4 durante il pompaggio, quando in essa la pressione supera i 35 mm Hg il gas di evaporazione viene recuperato nel palloncino in vetro ^3He . Durante il periodo di condensazione, invece, l' ^3He viene prelevato con la T.P. dal palloncino e attraverso i rubinetti 3, 5, 4 condensato in C.

La D_2 è una pompa a diffusione a mercurio a 3 stadi da 35 lt/sec, Edwards 2M3, e fornisce il vuoto d'isolamento nell'involucro V. La pressione in quest'ultimo viene misurata tra 10^{-6} e 10^{-2} mm Hg con un manometro a ionizzazione Heraeus la cui testa è segnata in figura con H.

La D_3 è una normale pompa a diffusione in vetro che fornisce il vuoto preparatorio e serve per gli eventuali lavaggi dell'impianto. Insieme con la D_2 utilizza il prevuoto di un'unica pompa rotativa Galileo da $15 \text{ m}^3/\text{h}$ (R in figura), dotata del polmone P. Lo strumento L K B è un Pirani con range tra 100 e 10^{-3} mm Hg. Il recipiente S è il rifornitore del gas di scambio, è riempito ad 1 atm di ^4He , quando si vuole contatto termico tra la cella e il bagno di ^4He si aprono i rubinetti 8 e 10 dopo aver chiuso il 9 e si porta la pressione all'interno di V a $\sim 10^{-2}$ mm Hg.

Questo impianto, come anche il criostato, è stato progettato secondo il criterio della intercambiabilità delle esperienze, in modo che sia facile procedere a misure ed esperienze successive e di diverso tipo, con le stesse apparecchiature, come abbiamo in seguito verificato durante il nostro lavoro.

La figura (14) illustra lo schema di pompaggio dell' ^4He .

Il nostro impianto è fornito di due dewars per elio, nei

quali si può operare con due diverse esperienze.

Il dewar utilizzato per il criostato ad ^3He è quello indicato in figura con β .

Una pompa Galileo da $60 \text{ m}^3/\text{h}$ aspira l'elio di evaporazione dal sistema β e permette di raggiungere una temperatura di $1,2^\circ\text{K}$, mentre per il dewar α essa funziona soltanto da preliminare di una Booster Edwards (800 lt/sec) che permette di raggiungere in questo dewar una temperatura di circa $0,9^\circ\text{K}$.

Un pannello di manometri, non indicato in figura, costituito da un McLeod identico a quello descritto precedentemente, un manometro differenziale ad olio e da una canna barometrica, permette di misurare pressioni da 1 atm fino a 10^{-5} mm Hg . Mediante i rubinetti 6 e 13 tale pannello può essere collegato con i dewars α o β .

Quando si lavora con elio è necessario recuperare tutto il gas adoperato durante le operazioni, per questa ragione l'uscita della pompa da $60 \text{ m}^3/\text{h}$ è collegata con i gasometri ai quali si arriva con il tubo indicato con G.

L'impianto è anche fornito del contatore, C, per misurare il flusso di evaporazione dei dewars.

I rubinetti 1, 2, 3, 12, 11 servono per regolare finemente il flusso di pompaggio rispettivamente nei dewars α o β .

4. Operazioni

Daremo qui una tipica "tabella di marcia" di un'operazione con il criostato ad ^3He , per illustrare il funzionamento del nostro apparecchio.

Un giorno prima dell' esperienza:

- 1) Montare i due dewars, quello per elio e quello per azoto liquido.
- 2) Pompate in tutti i sistemi e cioè:
 - a) sulla cella ^3He ;
 - b) sull'intercapedine di vuoto;
 - c) sul dewar per ^4He .
- 3) Prova di tenuta del dewar per ^4He ; è tollerata qualche piccola perdita, l'entrata dell'aria nel bagno non deve superare qualche cm^3/h .
- 4) Riempimento di azoto liquido nel dewar esterno.
- 5) Preparare il gas di scambio nel recipiente S.
- 6) Quando il dewar interno è freddo (4-5 ore), riempire il dewar di elio gassoso.

Nel giorno dell'esperienza:

- 1) Mettere in moto le pompe 2M3 e 2M4 e la diffusione P.D.
- 2) Trasferimento ^4He liquido nel dewar interno.
- 3) Inizio pompaggio sul bagno ^4He .
- 4) Immissione del gas di scambio nella camicia di vuoto del criostato.
- 5) Durante la discesa di temperatura: taratura del termometro e suscettività.
- 6) Condensazione dell' ^3He nella celletta del criostato. E' preferibile fare la condensazione ad una temperatura inferiore a $1,4^\circ\text{K}$ perchè a tale temperatura la tensione di vapore dell' ^3He è di circa 40 mm Hg e si può leggere sul manometro ad U.

- 7) Si segue la ulteriore diminuzione di T anche leggendo la pressione sul manometro a U.
- 8) Quando la cella ^3He è in equilibrio con il bagno ^4He si pompa via il gas di scambio (almeno un'ora).
- 9) Quando la pressione nella intercapedine di vuoto è soddisfacente per un buon isolamento termico (circa 10^{-6} mm Hg) si inizia il pompaggio con la 2M4 (D_1) aprendo lentamente il rubinetto di regolazione fina (1 in figura). Un operatore lavora in continuazione alla pompa Tpler per recuperare nel palloncino il gas di evaporazione.
- 10) Si registra il progressivo raffreddamento con il termometro χ e termometro a carbone seguendo la pressione sul McLeod.
- 11) Eventuali operazioni per un'esperienza di basse temperature.
- 12) Quando tutto l' ^3He è evaporato si può, se è necessario, ricondensare e quindi si ricomincia dal numero 6. Nel caso sia finito anche l' ^4He si riprendono le operazioni dal numero 2. Non è necessario questa volta ritardare il termometro come al numero 5.
- 13) Alla fine dell'esperienza si recupera l' ^3He con la T.P.

1. Termometri per basse temperature

Un metodo per la misura della temperatura assoluta è ricavato dalle proprietà dei gas perfetti e dalle relazioni fra la temperatura e gli altri parametri di stato. Esso è alla base del dispositivo chiamato termometro a gas perfetto. Tale apparecchio si giova, in realtà, di un gas reale ed è con opportuni artifici che si può trasformare in temperature assolute, quelle misurate con questo strumento.

Nella pratica però si usano dispositivi più semplici e più comodi, chiamati termometri secondari che vengono tarati con il termometro a gas e possono quindi essere usati in sua vece; per esempio, per misurare la temperatura dell' ^4He liquido si usa la misura della sua tensione di vapore, conoscendo la dipendenza di questa dalla temperatura.

Naturalmente la taratura di questi termometri secondari si può effettuare nei limiti di utilizzabilità di termometri a gas: alle temperature raggiungibili con un criostato ad ^3He , non esiste nessun gas reale il comportamento del quale possa essere approssimato a quello di un gas perfetto.

E' necessario quindi valersi di altri termometri la cui taratura può essere fatta, non più per confronto, ma con metodi che si basano sulla definizione termodinamica data da Kelvin.

Descriveremo in seguito un termometro di questo tipo, premettendo ora una breve descrizione di alcuni metodi in uso sotto i $4,2^\circ\text{K}$.

a) Misura della tensione di vapore dell' ^4He o dell' ^3He . Tra i $0,5^\circ\text{K}$ e $4,2^\circ\text{K}$ è noto l'andamento della pressione di

vapore dell' ^4He in funzione della temperatura. Quindi una misura di questa può essere effettuata indirettamente da una misura di pressione, debitamente corretta dall'effetto termomolecolare. Per l' ^3He il limite di utilizzazione scende a circa $0,25^\circ\text{K}$.

b) Variazione della resistenza ohmica.

La resistenza ohmica dei materiali è anch'essa funzione della temperatura, quando è nota questa dipendenza si possono abbastanza facilmente realizzare termometri di grandissima sensibilità (10^{-5}°K) e molto pratici all'uso. La massima sensibilità si ottiene al di sotto di λ mentre per temperature superiori, tali termometri sono meno sensibili e più imprecisi. Le cause dell'imprecisione sono generalmente dovute al non perfetto equilibrio termico tra sostanza e resistenza a causa dell'effetto Joule o altri secondati come per es., in un bagno di ^4He liquido, la presenza di bolle di vapore intorno alla superficie esterna del termometro. Di solito sono usate resistenze a carbone che hanno la derivata dR/dT minore di 0. Il modo usuale di impiego è quello di tararle confrontando la loro resistenza $R = R(T)$ con la tensione di vapore nota dell' ^4He . In certi casi sono lecite estrapolazioni sotto 1°K . Per temperature inferiori la taratura va fatta per confronto con quella data da un termometro a suscettività magnetica del quale ora parleremo in dettaglio.

2. Termometri a suscettività magnetica

Come è noto per un sale paramagnetico vale la legge di Curie:

$$M = C H/T; \quad (17)$$

dove M è l'intensità di magnetizzazione del campione, H il campo magnetico locale, T la temperatura e C la costante di Curie del sale.

Il campo magnetico nel sale si può scrivere:

$$H = H_{\text{ext}} - NM + \frac{4}{3} \pi M; \quad (18)$$

dove H_{ext} è il campo magnetico esterno, il termine $N M$ rappresenta il campo smagnetizzante di tutto il campione dove N è un fattore dipendente dalla sua forma. $\frac{4}{3} \pi M$ è il campo agente su un dipolo magnetico, (calcolato da Lorentz) dovuto alla presenza dei dipoli vicini, in un campione sferico.

Allora la (17) diventa:

$$M = \frac{C}{T} \left[H_{\text{ext}} + M \left(\frac{4}{3} \pi - N \right) \right]; \quad (18)$$

$$M \left(1 - \frac{C}{T} \left[\frac{4}{3} \pi - N \right] \right) = \frac{C}{T} H_{\text{ext}};$$

ponendo:

$$\Delta = C \left(\frac{4}{3} \pi - N \right); \quad (19)$$

abbiamo:

$$M(T-\Delta) = C H_{ext}$$

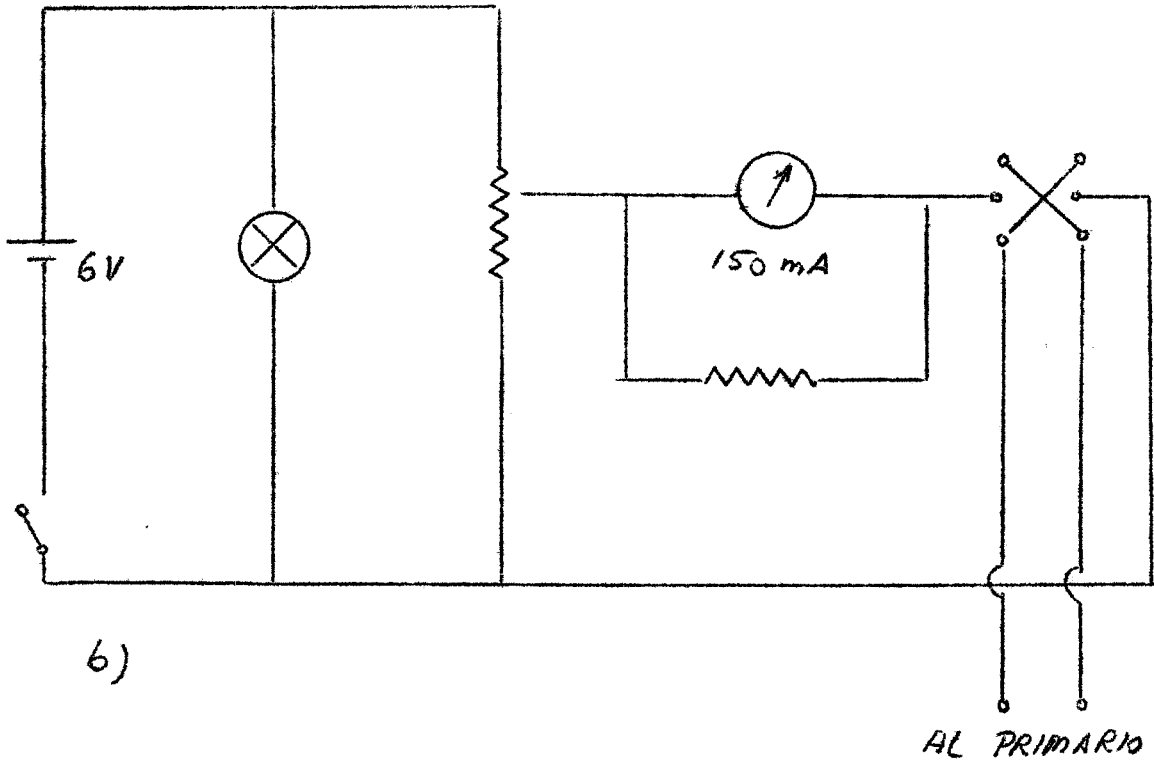
$$\frac{C}{T-\Delta} = \frac{M}{H_{ext}} = \chi; \quad (20)$$

Dove χ è la suscettività magnetica del sale.

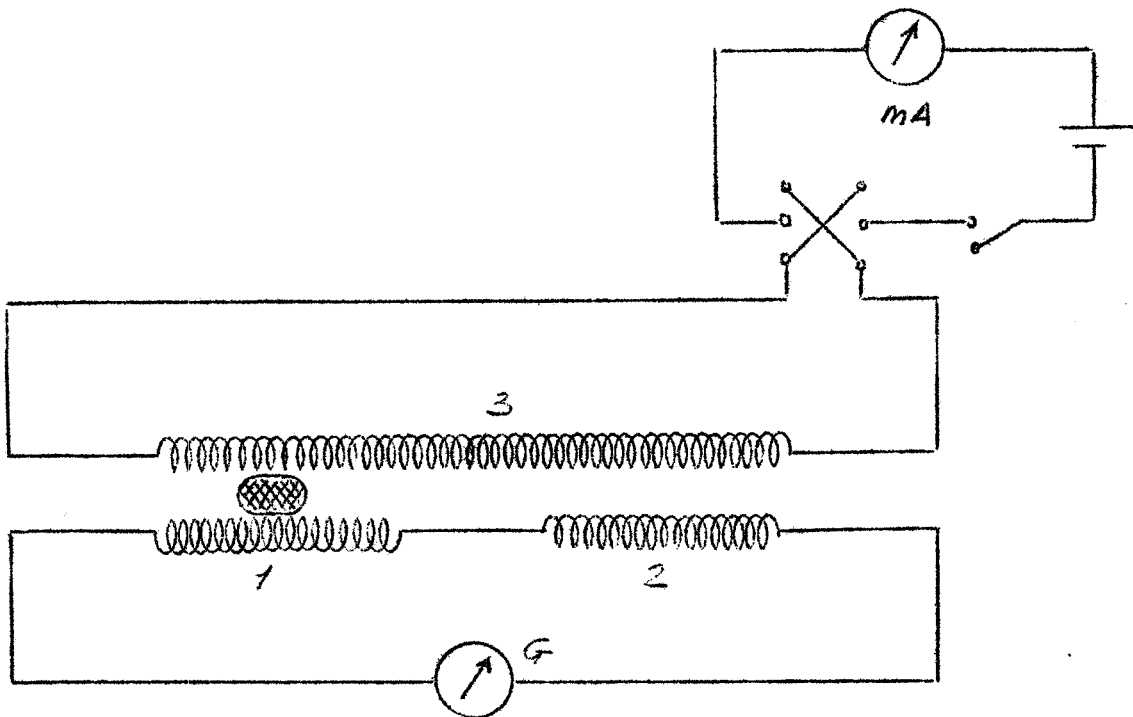
Data la dipendenza di χ dalla temperatura, si può usare un sale paramagnetico come termometro secondario effettuando una misura della sua suscettività. Il circuito mostrato in fig. 15a (ponte balistico a induzione) è formato dal primario 3, in esso fluisce la corrente fornita da un generatore in continua, il suo circuito di alimentazione è dotato di un invertitore fig. 15b.

All'interno del primario sono poste, coassialmente, le bobine 1 e 2 (secondario); nella prima è immersa una pillola di sale paramagnetico. Le due bobine sono tra loro antagoniste, nel senso che in assenza del paramagnete, la carica indotta da un'inversione di corrente nel primario sarebbe nulla.

Il secondario si chiude su un galvanometro balistico per misurare la carica totale che lo attraversa; fintantochè la suscettività del sale è molto piccola, e questo è vero fino a temperature dell'ordine di qualche °K, non si ha uno sbilanciamento sensibile del ponte, quindi è nulla o quasi la deflessione del galvanometro. Al crescere della suscettività il ponte si sbilancia e la deflessione del galvanometro è proporzionale alla carica indotta.



b)



a)

FIG. 15

Ricordiamo che

$$B = \mu_0 H_{\text{est}} + M$$

ma

$$H = Ki$$

dove i è la corrente che passa nel primario quindi:

$$B = Ki + M \quad (21)$$

D'altra parte la deflessione δ del galvanometro è proporzionale alla carica indotta e quindi alla variazione di flusso attraverso il secondario.

$$q = \int_0^t i dt = -\frac{1}{R} \int_0^t \frac{d\phi}{dt} dt = -\frac{\Delta\phi}{R} \quad (22)$$

quindi per la deflessione si ha:

$$\delta = \text{cost. } \Delta\phi$$

ma si ha pure che:

$$\Delta\phi = \int_{S_1} \vec{B}_1 \times \vec{n} d\sigma + \int_{S_2} \vec{B}_2 \times \vec{n} d\sigma; \quad (23)$$

dove S_1 e S_2 sono le aree medie delle spire della bobina 1 e della bobina 2 e B_1 e B_2 sono l'induzione magnetica, in prima approssimazione supposta uniforme, nelle due bobine. In particolare se N_1 è il numero delle spire:

$$B_1 = N_1 K i + M ; \quad (24)$$

$$B_2 = - N_2 K i ;$$

e perciò

$$\Delta \phi = \int_{S_1} \vec{M} \times \vec{n} d\sigma + K i (S_1 N_1 - S_2 N_2) ;$$

cioè:

$$\Delta \phi = \alpha M + \beta i \quad (25)$$

Abbiamo fatto l'ipotesi che il sale di intensità M riempra uniformemente l'interno della bobina 1. Ne segue

$$\delta = a' M + b i ; \quad (26)$$

Ricordando che:

$$\frac{M}{H_{ext}} = \frac{M}{K i} = \frac{c}{T - \Delta} ;$$

$$\delta = \frac{a' c K i}{T - \Delta} + b i ;$$

$$\frac{\delta}{i} = \frac{a}{T - \Delta} + b ; \quad (27)$$

Ora δ e i sono misurabili e l'andamento della:

$$\frac{\delta}{i} = f\left(\frac{1}{T-\Delta}\right);$$

è una retta, sicchè conoscendo Δ , si può, per punti, trovare a e b . La taratura di un tale termometro si fa fra 4°K e 1°K . Riportando i punti ricavati su un diagramma, (in ordinate $\frac{\delta}{i}$ e in ascisse $\frac{1}{T-\Delta}$) si ottiene una retta.

A temperature inferiori, i valori $\frac{\delta}{i}$ che si misurano vengono riportati su questa retta, ricavandone quindi i valori della temperatura. Però l'estrapolazione, che in tal modo si fa, non è lecita a temperature molto basse per i seguenti motivi.

La legge di Curie, da cui discende la (27) è valida fin tanto che il numero dei dipoli orientati non è preminente sul numero di quelli non orientati, e cioè il paramagnete non è ancora saturo. Con il diminuire della temperatura e quindi dell'agitazione termica, il sale tende a saturarsi più facilmente; il risultato di questo sarà che l'andamento della (27) non sarà più una retta, ma tenderà ad appiattirsi fino a che χ non sia del tutto indipendente da T . Per questa ragione la temperatura estrapolata dalla (27) si chiama temperatura magnetica e si indica con T^{ϕ}

Abbiamo visto come con un termometro a suscettività sia abbastanza semplice conoscere la temperatura magnetica T^{ϕ} , vediamo adesso come da questa si possa risalire alla temperatura assoluta T . Osserviamo che, per il secondo principio della termodinamica, per una trasformazione reversibile si ha:

$$T = dQ_{\text{rev}}/dS;$$

dove Q_{rev} è la quantità di calore scambiata e S l'entropia. Su può anche scrivere:

$$T = \frac{dQ_{\text{rev}}/dT^{\phi}}{dS/dT^{\phi}} \quad (29)$$

assumendo T^{ϕ} come variabile ausiliaria.

Nel diagramma di fig. 16 è disegnato l'andamento della funzione $S = S(T)$ di un sale paramagnetico per un fissato $H = H_0$. Immaginiamo di compiere ora una magnetizzazione isoterma partendo da A e giungendo in I_1 (1° stato iniziale) quindi con una smagnetizzazione adiabatica giungere in F_1 (1° stato finale); con un processo analogo, sempre partendo da A si può arrivare in F_2 (2° stato finale) passando per I_2 (2° stato iniziale). La variazione di entropia tra F_1 e F_2 è la stessa che tra I_1 e I_2 e cioè:

$$\begin{aligned} dS(F_1, F_2) &= dS(I_1, I_2) = \\ &= dQ_i/T_i; \end{aligned}$$

dove dQ_i è la differenza tra i calori di magnetizzazione tra A e I_2 e A e I_1 dovuti all'aumento di H alla temperatura iniziale T_i ; esso si può misurare dalla quantità di elio evaporata durante le magnetizzazioni.

Possiamo individuare i due stati F_1 e F_2 misurando la

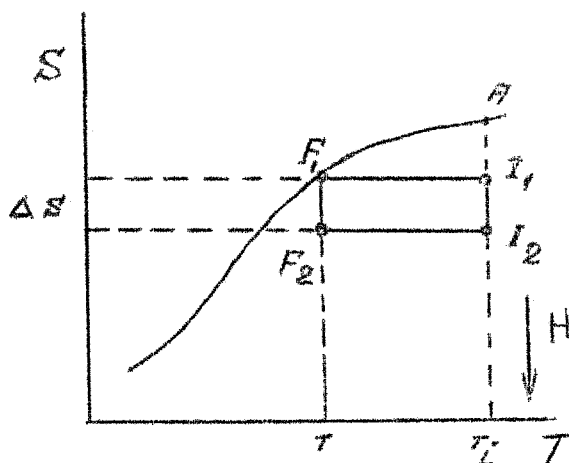


fig. 16

temperatura del sale T^{ϕ} e quindi compiere una trasformazione da F_1 a F_2 cedendo reversibilmente al sistema una quantità di calore nota dQ_{rev} .

Allora noti $T^{\phi}(F_1)$, $T^{\phi}(F_2)$, dS e dQ_{rev} si conosce, con l'aiuto della formula 29, la temperatura assoluta.

In pratica una misura di T è complicata perchè è difficile misurare con precisione il dQ_i , il dQ_{rev} , il dT^{ϕ} e comunque bisogna accontentarsi dei valori medi ΔQ_i , ΔQ_{rev} , ΔT^* . Una misura di \bar{T} (temperatura media tra i due stati F_1 e F_2) si ricava allora nel seguente modo:

$$\bar{T} = \frac{\Delta Q_{rev} / \Delta T^*}{\Delta S / \Delta T^*};$$

Dove ΔS si conosce come abbiamo visto, o dalla quantità di elio evaporato dalla temperatura iniziale nota (per esempio 1°K), e facilmente misurabile, o può essere calcolata schematizzando il sale come un paramagnete perfetto trascurando l'entropia del reticolo; ΔT^* è misurato dal termometro χ e ΔQ_{rev} è la quantità di calore, fornita da un riscaldatore di potenza nota, che viene assorbita dal sistema quando passa da T^{ϕ} a $T^{\phi} + \Delta T^{\phi}$.

Praticamente si procede in questo modo: si compiono numerose magnetizzazioni partendo sempre dalla temperatura T_i , con campi magnetici diversi, misurando ogni volta il calore di magnetizzazione corrispondente al valore di H e dopo la smagnetizzazione, la suscettività χ del sale, dalla quale si risale a T^{ϕ} . La quantità di calore ΔQ_{rev} , tale che il sale riscaldandosi si porti da F_2 a F_1 , viene fornita con un riscaldatore elettrico posto a contatto con il sale, oppure, come è più usato, irraggiando il sale con una sorgente di radiazioni γ di intensità nota. Si preferi-

sce quest'ultimo metodo perchè, essendo la conducibilità del sale molto piccola, un riscaldatore elettrico darebbe luogo ad un gradiente di temperatura che potrebbe durare molto tempo.

Ripetendo più volte queste operazioni si può trovare punto per punto la curva $O F_2 F_1$, cioè la $S = S(T)$ per $H = H_0 = 0$. Nota questa e noti i valori della suscettività nei punti F_1, F_2 etc. si può tracciare la curva $\chi = \chi(T)$ che è la taratura del termometro a suscettività.

3. Descrizione del termometro costruito

Nel disegno costruttivo del nostro criostato è mostrata la cella per esperienze di effetto termomolecolare, che contiene il termometro che abbiamo usato.

Nell'interno è posta una bobina di filo di rame da 0,03 mm di diametro avvolta su un cilindro cavo di plexiglas di diametro esterno 13,5 mm, spessore 0,5 mm e altezza 35 mm

(fig. 17). La bobina è composta di tre avvolgimenti, uno centrale di 7000 spire e due laterali, avvolti in senso opposto al primo, di 820 spire ciascuno per ottenere campo magnetico nullo entro il 10 % fuori del nucleo centrale. All'interno del cilindro è posto un contenitore cilindrico, sempre in plexiglas, nel quale è posto il sale, che ne occupa solamente la parte

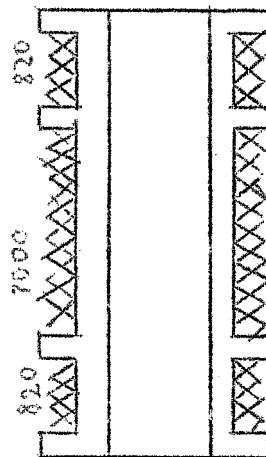


fig. 17

centrale, quella in cui $H \neq 0$. Il contatto termico fra sale e parete è assicurato chiudendo la celletta a temperatura ambiente con 5 atm di ^4He . Questa quantità di elio dà a bassa temperatura qualche mm^3 di liquido che mediante il film determina un ottimo scambio termico sale-rame.

Al di fuori della cella, intorno al tubo di pompaggio, è posta la bobina antagonista, anch'essa avvolta su un cilindretto di plexiglas, di 16 mm di diametro, con un avvolgimento di circa 3000 spire. I due circuiti sono collegati in serie e costituiscono il secondario che si chiude su un galvanometro balistico. (fig. 15)

Il primario è costituito da un avvolgimento su un cilindro di plexiglas, che è posto all'esterno dell'interca

pedine di vuoto; esso è alimentato da una batteria di 6 volt e dotato di un invertitore (v. fig. 15b).

Il sale adoperato, $\text{Ce}_2\text{Mg}(\text{NO}_3)_{12} \cdot 24\text{H}_2\text{O}$, è stato ricristallizzato perchè contenesse tutta la sua acqua di cristallizzazione, e per evitare effetti dell'anisotropia dei cristalli, è stato tritato in un mortaio e poi compresso nel suo involucro. Esso obbedisce alla legge di Curie fino almeno a $0,008^\circ\text{K}$ e quindi il nostro range di temperatura rientra largamente in quello di utilizzabilità del sale. Il suo calore specifico è molto piccolo e perciò può essere raffreddato con un consumo minimo di ^3He .

CAPITOLO IV RISULTATI SPERIMENTALI

L'apparecchio descritto nei precedenti capitoli è stato provato e con esso sono state fatte esperienze di funzionamento, delle quali ora tratteremo. Una prima prova è stata fatta usando come fluido refrigerante l' ^4He invece di ^3He , per verificare la perfetta tenuta e la resistenza meccanica allo shock termico durante il raffreddamento. Infatti sotto il punto λ , l' ^4He liquido superfluido, passa attraverso fori anche piccolissimi (superleak) e se la cella e l'involucro del vuoto sono a tenuta per questo fluido lo sono anche per l' ^3He liquido. Questa prova è oltrettutto raccomandabile se si vuole essere sicuri di non perdere ^3He durante le esperienze successive.

Durante questa prima esperienza, non eravamo ancora dotati del manometro a ionizzazione Haereus sull'intercapedine di vuoto per poter fare misure precise e ci si è dovuti accontentare di strumenti più grossolani. Abbiamo riempito la cella con ^4He a $1,2^\circ\text{K}$ e abbiamo pompato sul bagno con la 2M4. L'evaporazione è stata tale che con la pompa Töpler non si riusciva a recuperare il gas evaporato. Questo fenomeno si può attribuire alla superfluidità dell' ^4He poichè il film che sale lungo il tubo 3 cortocircuita termicamente la cassetta con il bagno.

Nella seconda prova abbiamo condensato nella cassetta circa 1 litro di ^3He S.T.P. La temperatura raggiunta, pompando con la velocità permessa dalla velocità di recupero della Töpler, è stata di circa $0,75^\circ\text{K}$. Tale valore è molto impreciso perchè l'apparecchio era sprovvisto della cassetta di esperienza e quindi dei termometri a χ e a carbone e la misura è stata compiuta chiudendo il rubinetto 1 di fig. 13 e leggendo la pressione con il McLeod.

In questa situazione, la risalita della pressione era molto rapida, quindi la determinazione della pressione iniziale piuttosto imprecisa; tale rapida risalita denunciava un ingresso termico al di fuori delle previsioni. La causa di questo inconveniente è stata riscontrata, chiudendo il rubinetto 8 di fig. 13, e notando che la pressione nell'intercapedine di vuoto era circa 10^{-4} mm Hg. Dalla formula (16) si vede che tale pressione comporta una perdita termica di 6200 erg/sec, che rende ragione della alta temperatura raggiunta.

Nei giorni seguenti una verifica dell'apparecchio ha mostrato una perdita di vuoto nel tubo di pompaggio sulla intercapedine. Tale perdita esisteva solo a temperature molto basse: infatti con il cercafughe ad elio la si è trovata solo raffreddando localmente il tubo con azoto liquido.

In una prova successiva l'apparecchio conteneva la cella di misura con i termometri a χ e a carbone. Purtroppo ad esperienza già iniziata si è rotto il filo (0,09 mm di diametro) della resistenza a carbone, rendendo inutilizzabile tale termometro. Anche per il termometro a χ si è verificato un inconveniente. Le deflessioni del galvanometro durante la taratura, cioè sotto i 4,2°K, aumentavano pochissimo e, quasi subito, cioè a temperatura ancora alta (circa 2,8°K), diventavano indipendenti da questa.

Tale fenomeno si è potuto imputare alla presenza, nei pressi della bobina intorno al sale, di una pesante saldatura con lega In-Sn, che sicuramente diventa superconduttrice a temperature di circa 3°K. Questo superconduttore altera sicuramente il campo magnetico nella regione occupata dal sale e quindi è plausibile attribuire a questo fatto l'inutilizzabilità del termometro a χ .

Ciononostante la prova ha dato risultati positivi per quel che riguarda il funzionamento globale del criostato, l'isolamento termico (anche se non completamente soddisfacente) ed al funzionamento di tutti gli impianti ausiliari.

La temperatura del bagno esterno è stata, per tutta la esperienza, $1,2^{\circ}\text{K}$. L'evaporazione dell' ^4He a regime è stata di $44 \text{ cm}^3/\text{h}$ di liquido e la durata dell'esperienza è stata, di 10 h determinata dall'esaurimento dell' ^4He .

L' ^3He condensato è stato 0,85 lt S.T.P. Di questo 0,35 lt sono stati pompati prima di raggiungere la temperatura di $0,34^{\circ}\text{K}$; questo sembrerebbe in contrasto con le nostre previsioni, che davano un consumo di circa un decimo della quantità di elio condensato per raffreddare il rimanente. In effetti la quantità da noi recuperata è stata molto maggiore per la presenza nel tubo a bassa temperatura di ^3He gassoso ad alta densità e per le perdite termiche che dovevano essere compensate anche in questa fase.

Per conoscere l'ingresso termico fisso del criostato e la sua capacità termica abbiamo fatto le seguenti prove: quando la pressione dinamica della pompa 2M4 misurata con il McLeod era minima, si chiudeva il rubinetto (1 di figura 13) e si seguiva la risalita della temperatura misurando la pressione, ora statica, dalla quale si ricavava la temperatura dalla curva della pressione di vapore (4). Questo è senz'altro valido perchè la risalita era abbastanza lenta da assicurare condizioni di equilibrio e perchè l'eventuale correzione per effetto termomolecolare è del tutto trascurabile date le dimensioni del tubo di pompaggio.

La cassetta era fornita anche di un riscaldatore elettrico con il quale abbiamo potuto variare, di quantità note, l'ingresso termico per poter ricavare le grandezze incognite. Nelle figg. 18 e 19 sono riportate sei risalite

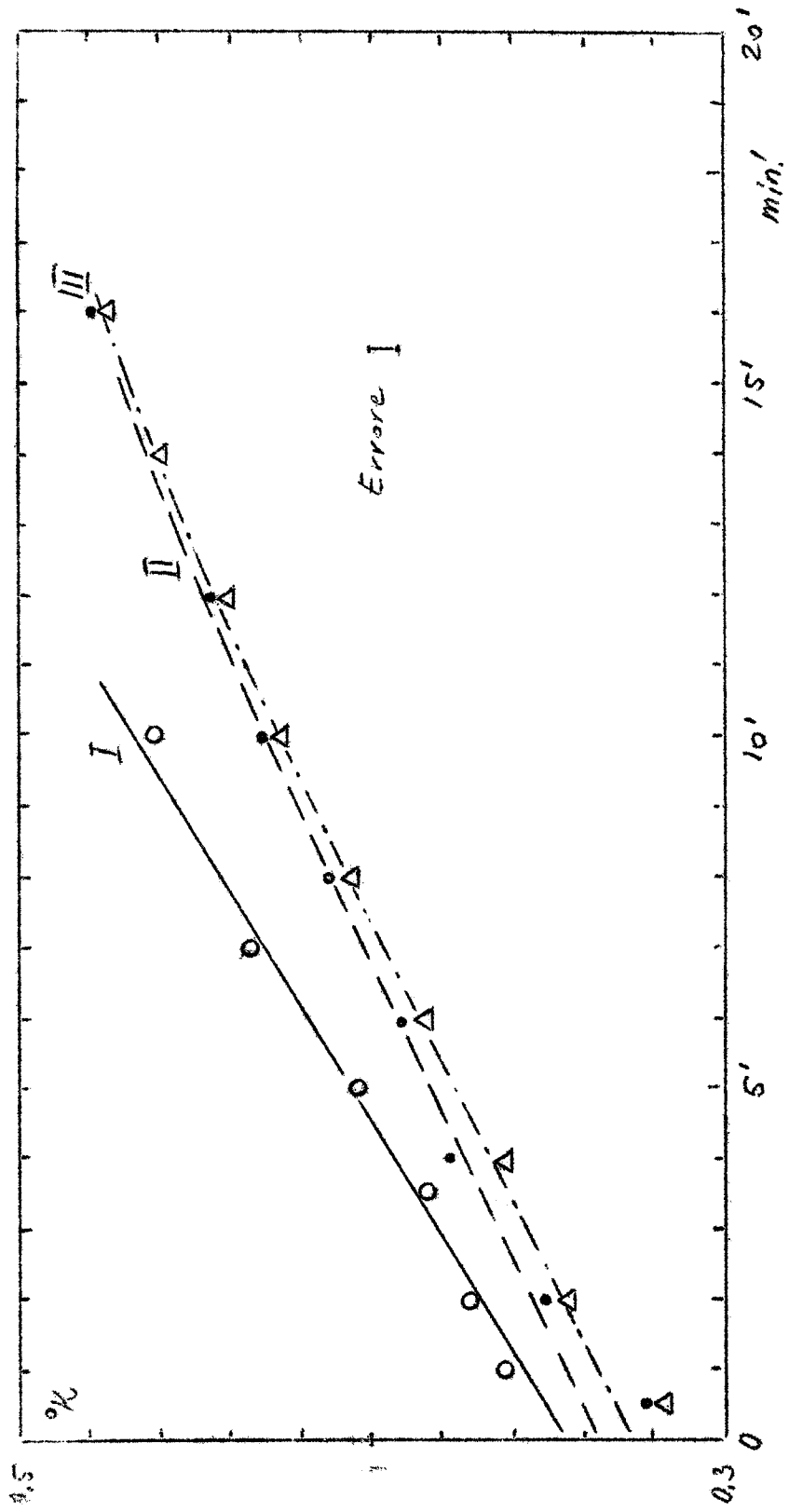


FIG. 18

di temperatura effettuate in queste condizioni:

I e II - Con l'entrata termica del solo apparecchio.

Poichè in questa regione di temperatura il calore specifico dell' ^3He è praticamente costante (4), si può estrapolare la temperatura minima tracciando una retta che passa per i punti allineati; da questa retta chiaramente rimane escluso il punto della prima lettura, perchè, data l'impedenza del tubicino che arriva al McLeod, non si è ancora stabilito l'equilibrio della pressione. Alle più alte temperature, invece, i punti deviano dalla retta, denunciando una capacità termica maggiore; anche questo è comprensibile, dato l'andamento del calore specifico che verso i $0,45^\circ\text{K}$ comincia ad aumentare.

III - Con l'entrata termica del solo apparecchio, ma con il rubinetto dell'alto vuoto d'isolamento chiuso (8 in fig. 13). Poichè la differenza fra questa curva e la I e II è minima si vede che il pompaggio esterno, durante questa esperienza, non è stato del tutto soddisfacente.

IV - Effettuata con ingresso di calore supplementare di 84 erg/sec.

V - Effettuata con un ingresso di calore supplementare di 165 erg/sec.

VI - Effettuata senza perdite supplementari. Poichè l' ^4He era prossimo all'esaurimento si è protratta tale misura per 38'. Nell'ultimo tratto è chiaramente visibile la curvatura dovuta all'aumento del calore specifico dell' ^3He .

Calcoliamo ora l'ingresso termico fisso e la capacità termica iniziale del criostato. Dalla:

$$\dot{q} \Delta t = K \Delta T;$$

Possiamo ricavare queste due grandezze, ponendo in essa i valori ricavati dalle risalite II, IV, V e VI (scartiamo la I perchè è stata eseguita con poca accuratezza e la III perchè fatta in condizioni diverse).

Abbiamo quattro equazioni con due incognite; per semplicità ne abbiamo fatti due sistemi e abbiamo confrontato i valori ricavati:

$$\begin{aligned} \text{a) } & \left\{ \begin{aligned} \dot{q} \times 480 &= K \times 0,075; \\ (\dot{q} + 84) \times 480 &= (K - K_{II,IV}) \times 0,112; \end{aligned} \right. \\ \text{b) } & \left\{ \begin{aligned} (\dot{q} + 164) \times 480 &= (K - K_{II,IV} - K_{IV,V}) \times 0,139; \\ \dot{q} \times 720 &= (K - K_{II,IV} - K_{IV,V} - K_{V,VI}) \times 0,112; \end{aligned} \right. \end{aligned}$$

i termini $K_{II,IV}$ etc. rappresentano le capacità termiche delle quantità di ^3He evaporate tra una curva di risalita e l'altra. I valori che da questi due sistemi si ottengono sono i seguenti:

$$\begin{aligned} \text{a) } & \dot{q} = 200 \text{ erg/sec}; K = 1,27 \cdot 10^6 \text{ erg/}^\circ\text{K} \\ \text{b) } & \dot{q} = 172 \text{ erg/sec}; K = 1,28 \cdot 10^6 \text{ erg/}^\circ\text{K}. \end{aligned}$$

Questi dati sono in buon accordo fra loro, ma dati gli inconvenienti suaccennati che ci hanno privato dei termometri posti direttamente a contatto con la cella, dovranno essere confermati da ulteriori misure. L'ingresso termico trovato di circa 200 erg/sec, pur essendo tollerabile, può essere senz'altro ulteriormente ridotto. Il si-

stema di alto vuoto che pompa sull'intercapedine ha dato una pressione minima di $2 \cdot 10^{-5}$ mm Hg, valore che può essere senz'altro migliorato. Dal grafico 10 si può inoltre dedurre quanto sia stata la velocità di pompaggio della 2M4 alla minima temperatura raggiunta. Tale grafico, dato l'estremo appiattimento della curva, fornisce solo dei dati grossolanamente approssimati; da questo si può comunque vedere che, se la temperatura minima effettivamente raggiunta è stata solo di $0,33^{\circ}\text{K}$, la velocità di pompaggio è stata senz'altro minore di 1 lt/sec, valore inspiegabilmente basso.

BIBLIOGRAFIA

1. K.R. ATKINS Liquid Helium - Cambridge (1959)
2. G.K. WHITE Experimental Techniques in
Low Temp. Physics - Oxford(1959)
3. E.H. KENNARD Kinetic Theory of Gases
4. PESHKOV e ZINOVIEVA Rep. Prog. Phys. XXII, 504(1959)
5. C.J. GORTER Progress in Low Temp. Physics,
Vol. I, cap. 14° (1955)
6. C.J. GORTER Progress in Low Temp. Physics,
Vol. III, cap.5° (1951)
7. G. SEIDEL e P.H. KEESOM R.S.I. 29, 606 (1958)
8. H.A. REICH e R.L. GARWIN R.S.I. 30, 7 (1959)
9. T.R. ROBERTS e J.G.SYDORIAK Phys. Rev. 98, 1672 (1955)
10. T.R. ROBERTS e J.G.SYDORIAK Phys. Rev. 109, 175 (1957)
11. T.R. ROBERTS e J.G.SYDORIAK Phys. Rev. 102, 304 (1956)
12. GARFUNKEL e WEXLER R.S.I. 25, 170 (1954)
13. HULL Phys. Soc. Cambridge Conference
Rep., pag. 72 (1947)
14. S. DUSHMAN Vacuum Technique.

I N D I C E

I - CENNI SUI CRIOSTATI PER BASSE TEMPERATURE	
1. Generalità	pag. 3
2. Criostati ad ^4He	" 5
3. Criostati ad ^3He	" 8
4. Criostati a smagnetizzazione adiabatica	" 17
5. Considerazioni conclusive	" 21
II - PROGETTAZIONE DI UN CRIOSTATO AD ^3He	
1. Descrizione del criostato	" 22
2. Progetto del criostato	" 25
a) Considerazioni preliminari	" 25
b) Schema del calcolo	" 27
c) Flusso attraverso un tubo	" 29
d) Calcoli numerici	" 32
e) Stima dell'ingresso di calore	" 35
3. Impianti ausiliari	" 44
4. Operazioni	" 47
III - MISURA DELLA TEMPERATURA	
1. Termometri per basse temperature	" 49
2. Termometri a suscettività magnetica	" 51
3. Descrizione del termometro costruito	" 59
IV - RISULTATI SPERIMENTALI	" 61
BIBLIOGRAFIA	" 67