

COMITATO NAZIONALE PER L'ENERGIA NUCLEARE
Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-62/20

V. Montelatici: UN BERSAGLIO AD IDROGENO O DEUTERIO LIQUIDI
PER LE ESPERIENZE CON L'ELETTROSINCROTRONE DI FRASCATI.

Nota interna: n° 124
20 Marzo 1962

LNF-62/20

V. Montelatici: UN BERSAGLIO AD IDROGENO O DEUTERIO LIQUIDI
PER LE ESPERIENZE CON L'ELETTROSINCROTRONE DI FRASCATI.

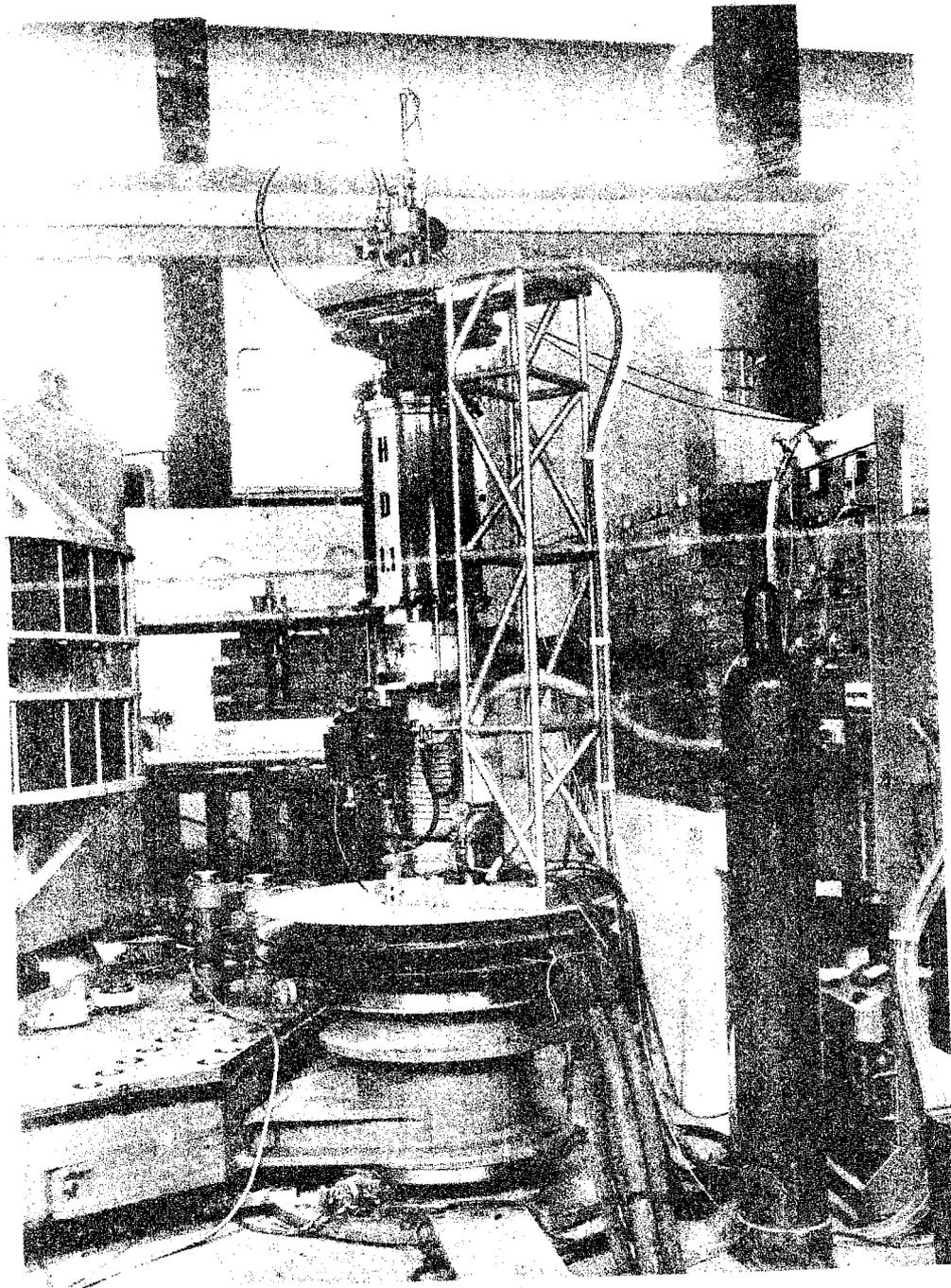
Nota interna: n° 124
20 Marzo 1962

Introduzione

Nello studio sperimentale delle interazioni di raggi X ad alta energia con i nuclei più semplici le migliori condizioni si realizzano quando il bersaglio da irradiare è il più denso possibile e con una geometria ben definita.

L'idrogeno ed il deuterio sono gli elementi più semplici da irradiare. La loro densità NTP è molto bassa: per l'idrogeno è $8,9 \times 10^{-2} \text{ g.lt}^{-1}$ e per il deuterio $7,5 \times 10^{-1} \text{ g.lt}^{-1}$; mentre allo stato liquido si ha rispettivamente $70,8 \text{ g.lt}^{-1}$ e 164 g.lt^{-1} . Il punto di ebollizione normale è $20,4^\circ\text{K}$ e $23,6^\circ\text{K}$ rispettivamente. E' evidente che conviene averli allo stato liquido. Questo comporta però la costruzione di particolari contenitori (criostati) che limitino l'ingresso di calore dall'esterno e quindi permettano di lavorare per un tempo abbastanza lungo.

Il criostato di cui si parla in questa relazione è



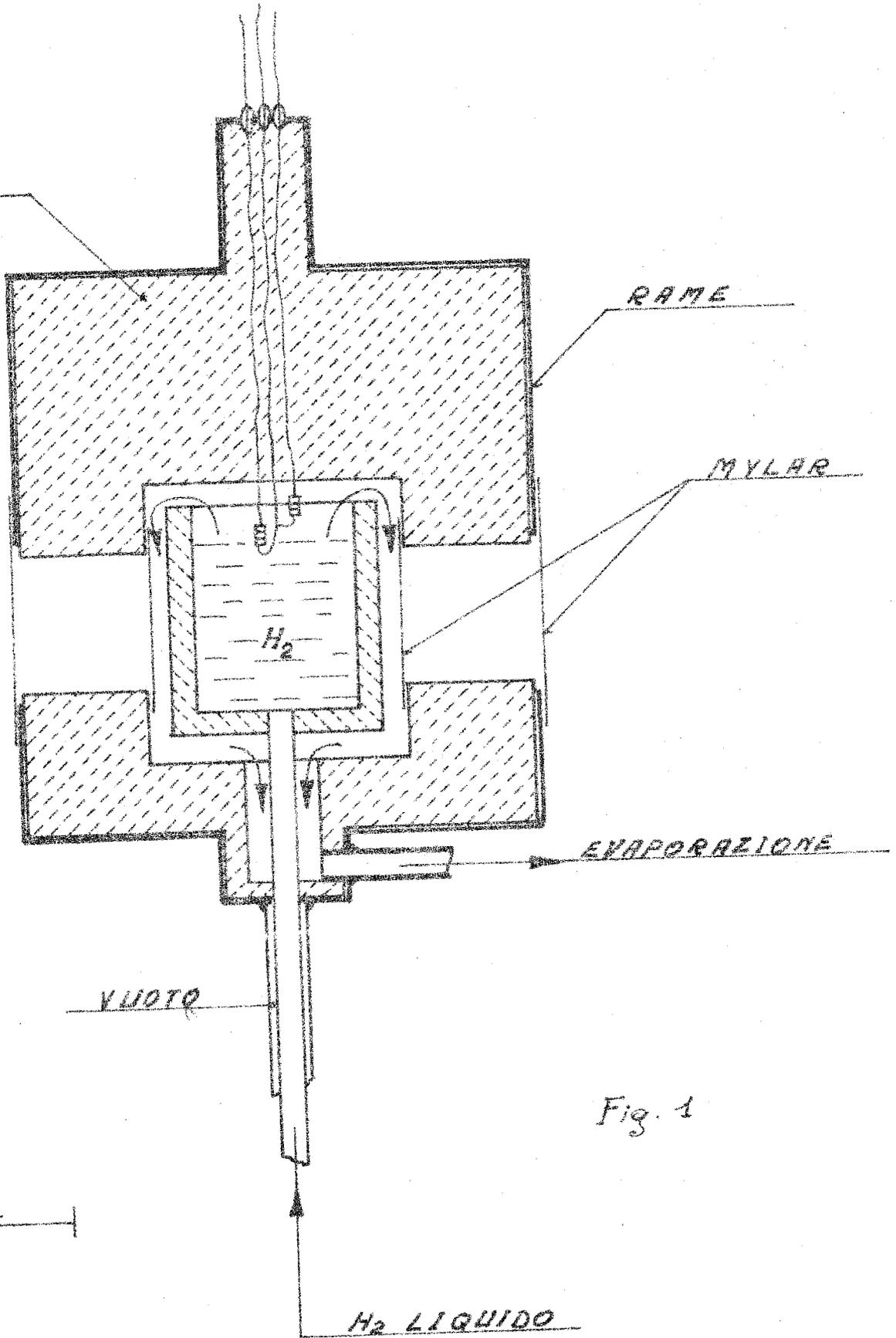
frutto dell'esperienza diretta compiuta negli ultimi anni nel Laboratorio Criogenico sulla progettazione e costruzione di vari tipi di criostati.

Inizialmente furono costruiti criostati isolati termicamente con materiali sintetici (styrofoam, cadomite, frigolit, perlite) su indicazione di altri già costruiti in laboratori stranieri. Non si dà qui una bibliografia completa, ci si limiterà a ricordare quello costruito da Littauer⁽¹⁾ al quale ci si ispirò per costruire il primo criostato di Frascati, di cui la fig. 1 mostra uno schema. Esso consisteva nella cella, scavata in un blocco di frigolit e circondata da uno spessore di circa 20 cm di isolante. Si realizzò inoltre un rudimentale scambiatore di calore, indicato nello schema. La velocità di evaporazione era molto alta, circa 1 lt.ora⁻¹ di idrogeno liquido.

Il passo successivo consistette nel sostituire il vuoto al frigolit come isolante^(x). La fig. 2 mostra lo schema di questo criostato; si noti la più accurata realizzazione dello scambiatore di calore. Si usava vuoto statico che a temperatura ambiente era di qualche μ Hg. La velocità di evaporazione era di circa 0.1 lt/ora. Due di questi criostati sono attualmente in funzione presso l'elettrosincrotrone. Una modifica di questi criostati che permette di irradiare deuterio invece di idrogeno è stata realizzata; in esso il deuterio viene liquefatto per contatto con un recipiente contenente idrogeno liquido⁽³⁾. Questi criostati, che furono denominati del tipo W (da Wilson), tuttavia non sono polyvalenti: il volume della cella esposto al fascio non può superare 100 cc circa, altrimenti l'insieme diventa poco ma-

(x) - Suggerimento fornito dal Prof. R. Wilson durante una sua visita ai Laboratori di Frascati nel 1958.

ISOLAMENTO



RAME

MYLAR

EVAPORAZIONE

VUOTO

30 cm.

H₂ LIQUIDO

Fig. 1

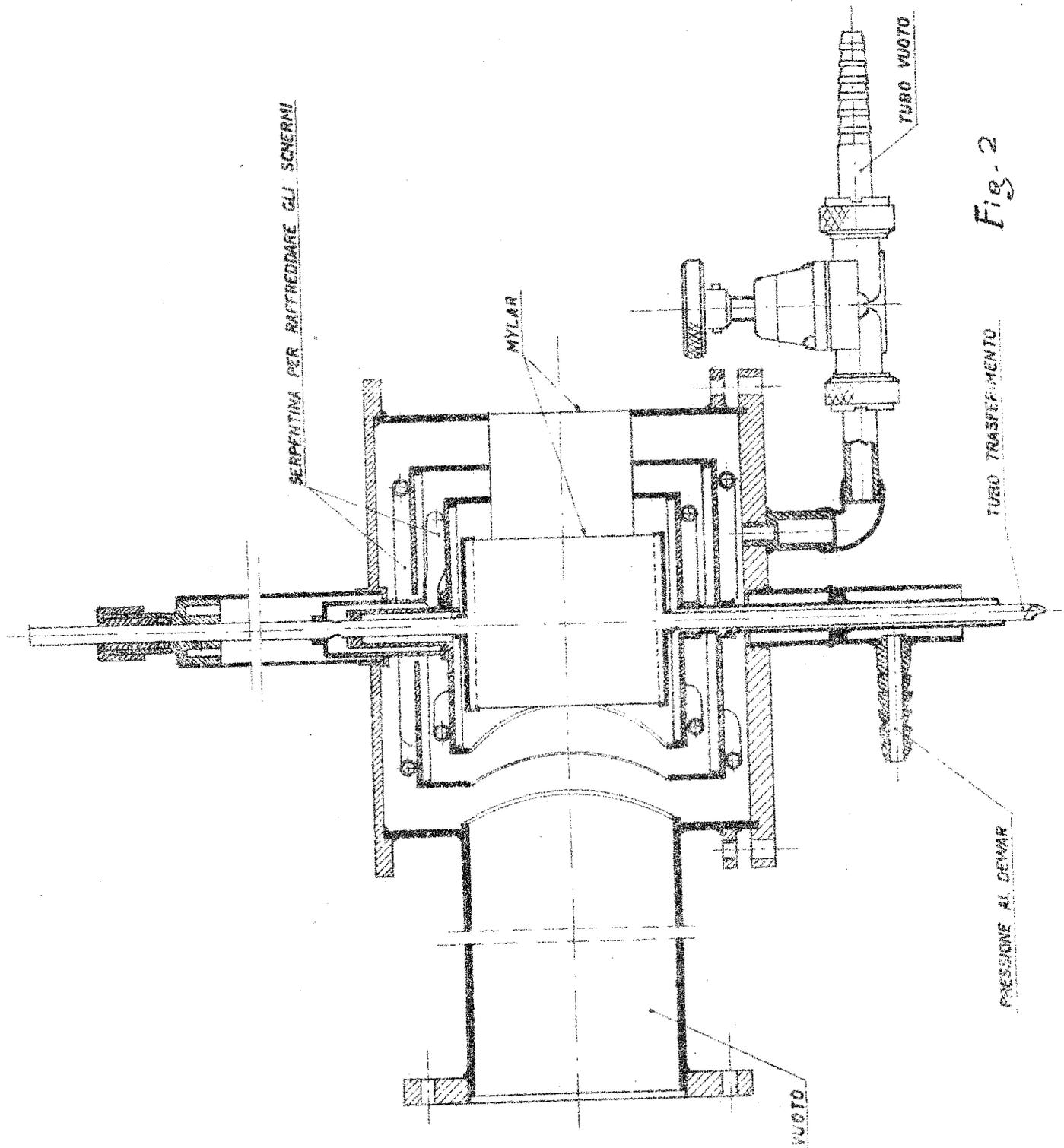


Fig. 2

neggevole; inoltre la cella non può essere cambiata senza disfare completamente il criostato.

Sia i criostati tipo Littauer che quelli tipo Wilson vengono montati su un dewar da trasporto contenente idrogeno liquido e da esso, con un sifone, si riforniscono di liquido. Questo comporta una notevole complessità di rifornimenti. Anche per questo inizialmente in alcuni laboratori stranieri^(4,5) poi a Frascati ci si orientò verso criostati che contenessero in se una riserva di idrogeno. Si decise pertanto di costruirne uno che avesse, oltre a questa caratteristica, le seguenti:

- possibilità di cambiare la cella rapidamente senza pregiudicare la struttura del criostato;
- volume della cella esposta alla radiazione molto maggiore;
- velocità di evaporazione molto bassa (intorno a 0.01 lt.ora^{-1} di idrogeno liquido);
- possibilità di essere usato indifferentemente con idrogeno o deuterio;
- assenza di corpi estranei (tubi di riempimento e svuotamento) nella cella da irradiare.

Questo criostato (HD) è stato realizzato ed è entrato in funzione col fascio dell'elettrosincrotrone di Frascati nel novembre 1961. Nel seguito di questa relazione se ne farà una descrizione dettagliata.

Descrizione

Per comodità di esposizione le varie parti del criostato saranno divise in:

- a) parti a temperatura ambiente (300°K)
- b) parti a bassa temperatura (77°K)
- c) parti a temperatura molto bassa (20°K)
- d) connessioni tra le varie parti.

La fig. 3 mostra il disegno di insieme del criosta

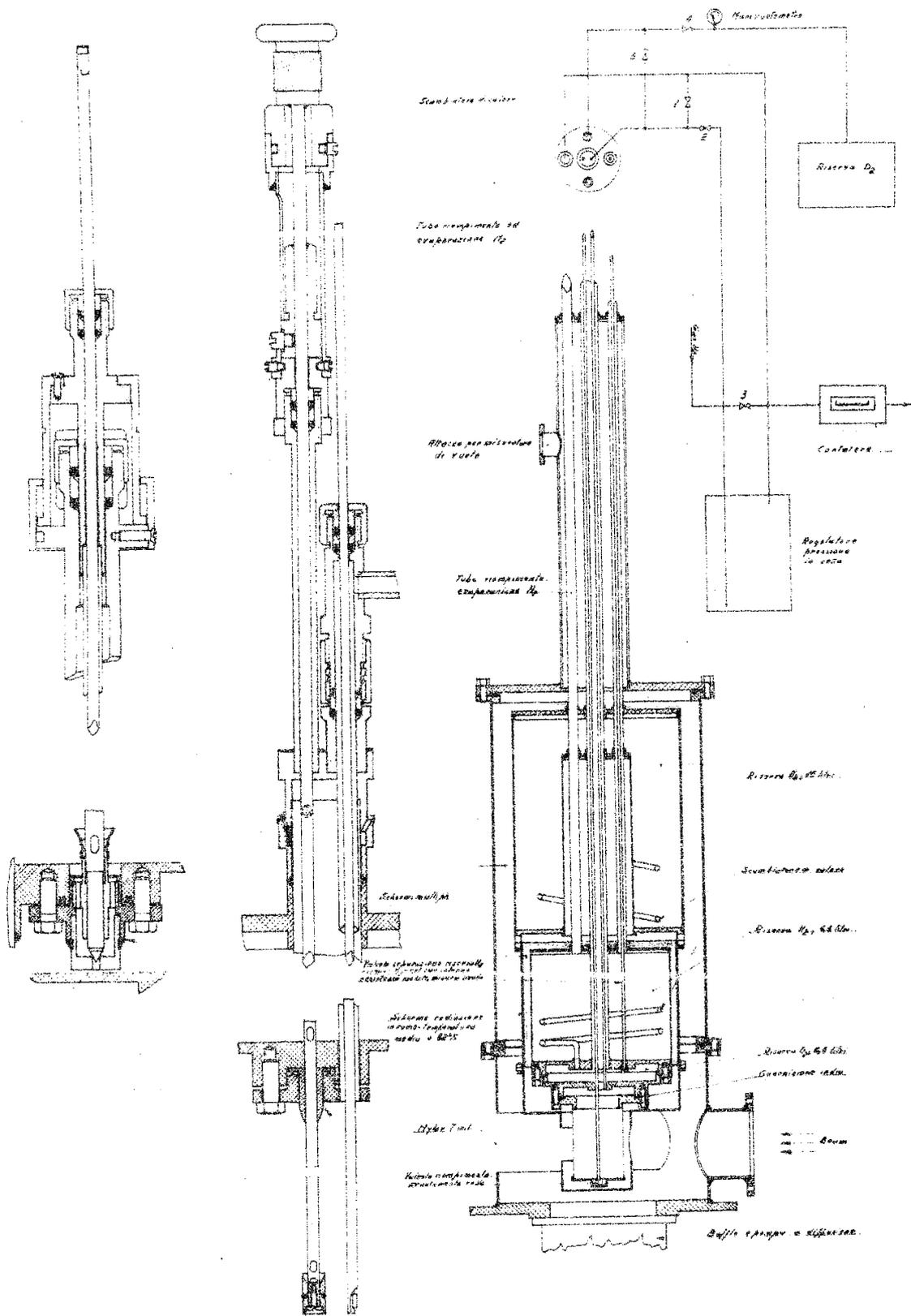


FIG. 3

to (scala 1:25) con alcuni particolari ingranditi (scala 2:1) e lo schema dei controlli; diciamo subito che tutti i recipienti ed i tubi, eccetto quelli esterni e le parti interne alle riserve sullo scambiatore di calore che sono in rame, sono in acciaio inossidabile.

a) Parti a temperatura ambiente.

Esse costituiscono l'involucro esterno; fanno parte di esso tre recipienti uniti mediante viti, e la tenuta è assicurata da due "O" rings; il recipiente inferiore porta una finestra di mylar (spessore 0.19 mm) incollata a caldo con araldite sulla parete laterale esterna.

Al di sotto dell'involucro esterno è posta una pompa a diffusione a vapori di olio della capacità di 300 lt/sec; essa comprende pure una trappola raffreddata a circa 250°K con un frigorifero a Freon.

Nella parte alta dell'involucro esterno sta un attacco per gli strumenti di misura del vuoto (termocroce e pennig) ed un rubinetto per il rientro di aria; immediatamente al di sopra stanno le valvole ed i terminali dei cinque tubi che dall'esterno vanno alle tre parti interne; queste ultime sono sostenute dai suddetti cinque tubi tramite l'unica saldatura in cima al recipiente esterno.

b) Parti a bassa temperatura.

Costituiscono la riserva di azoto della capacità di circa 15 lt di liquido (riserva N₂) e lo schermo di rame dorato che circonda completamente la parte a più bassa temperatura ed è fermato con viti alla riserva. Lo schermo nella parte inferiore è asolato opportunamente, e l'apertura è ricoperta con un foglio di alluminio dello spessore di 1/100 mm.

Tra questa riserva ed il recipiente esterno c'è un pacco di fogli di mylar alluminato (spessore 12/1000 mm) con una densità di 30 fogli/cm. Sullo schermo di rame sono fis-

sati quattro tiranti di nylon che si ancorano all'involucro esterno; essi impediscono gli inevitabili spostamenti della riserva dovuti ai gradienti di temperatura nei tubi.

c) Parti a temperatura molto bassa.

Queste sono:

- la riserva di idrogeno, della capacità di 6 lt (riserva H_2);
- la riserva di deuterio, della capacità di 0.6 lt (riserva D_2);
- il contenitore del liquido da irradiare (cella), di forma e capacità dipendenti dall'esperimento da fare.

La riserva D_2 è fissata alla riserva H_2 mediante una guarnizione in indio; la della è fissata allo stesso modo alla riserva D_2 .

Anche dalla flangia della cella partono quattro tiranti di nylon che impediscono i movimenti della stessa rispetto allo schermo di rame. Tra la riserva H_2 e lo schermo di rame sono sistemati altri fogli di mylar alluminato.

d) Connessioni tra le varie parti.

I cinque tubi che attraversano le riserve, saldati all'involucro esterno, sono:

- 1) tubo di riempimento ed evaporazione dell'azoto (diametro interno 1 cm, spessore .2 mm).

Esso dall'esterno giunge alla riserva N_2 ; una volta eseguito il riempimento, viene chiuso con una valvola di non ritorno per impedire l'ingresso di gas estranei e permette l'evaporazione.

- 2) Scambiatore di calore per la liquefazione del deuterio (diametro interno 6 mm, spessore .3).

E' costituito da una parte diritta (da temperatura ambiente alla riserva di azoto), da una serpentina immersa in azoto liquido, lunga 150 cm e da una serpentina immersa in idrogeno liquido (350 cm); sbocca infine nella

riserva di deuterio.

- 3) Tubo di riempimento ed evaporazione dell'idrogeno (diametro interno 15 mm, spessore .2 mm).

Esso, passando attraverso la riserva dell'azoto, giunge a quella dell'idrogeno. Il gas di evaporazione è convogliato all'esterno dall'edificio facendolo gorgogliare attraverso un piccolo battente di olio; questo impedisce l'ingresso di gas estranei anche in piccole quantità nella riserva di idrogeno.

- 4) Tubo centrale (diametro interno 20 mm, spessore .2 mm).

Esso attraversa le riserve N_2 e H_2 e sbocca nella riserva D_2 . Nel suo interno stanno la valvola (A) di riempimento e svuotamento della cella ed il tubo contenente il misuratore di livello nella cella.

La valvola (A) è un tubo di diametro interno 0,35 cm che può scorrere di un tratto fisso, in modo che l'estremo inferiore poggi sul fondo della cella oppure sia immerso nella stessa per pochi millimetri. Esso porta due asole distanziate in modo tale, che, con la valvola (A) nella posizione più bassa, quella inferiore viene a trovarsi presso il fondo della cella e quella superiore sta nella piccola riserva; il tubo, immediatamente al di sopra dell'asola, è chiuso.

All'estremità inferiore del tubo c'è un pezzo di acciaio, circondato da un piccolo anello di tantalio: questo permette, mediante una fotografia del fascio di raggi X, di conoscere la posizione del centro della cella rispetto al centro del fascio. Quando la valvola (A) è portata in sù, essa scorre in un pezzo di teflon sagomato in modo che possa alloggiarsi nel pezzo di acciaio descritto. Tenendo il pezzo di acciaio distante anche solo pochi millimetri dalla sagoma di teflon, il collegamento

tra riserva D_2 e cella è assicurato da alcune asolature fatte sul teflon.

Per poter eseguire la chiusura ermetica al liquido tra la cella e la riserva D_2 è necessario incastrare la lingua di teflon nella gola di acciaio; a questo scopo un pezzo a filettatura rapida si abbocca ad una ghiera filettata quando la valvola (A) è ritirata. Avvitando la ghiera si riesce a comprimere nella maniera desiderata il pezzo di acciaio contro il teflon.

La tenuta del tubo verso l'esterno è ottenuta con un premistoppa costituito da una coppia di "O" rings in neoprene.

Nel tubo centrale sta inoltre un tubicino di diametro interno 6 mm che mette in comunicazione la cella con l'esterno. Questo tubo è saldato sulla flangia a cui è avvitata la flangetta della valvola (A) mentre all'esterno del criostato la tenuta è fatta con una coppia di "O" rings.

Nel suo interno scorre, entro un'altra coppia di "O" rings, un tubicino (diametro esterno 3 mm) che porta in fondo una resistenza a coefficiente di temperatura negativo per la misura del livello del liquido nella cella.

5) Tubo per la separazione delle due riserve.

Esso attraversa la riserva N_2 provenendo dall'esterno e termina alla riserva H_2 .

Nel suo interno scorre un tubo del diametro di 6 mm, spessore della parete .35 mm che porta, saldato in fondo, un cilindro filettato di acciaio inossidabile con una punta conica rettificata; superiormente va all'esterno passando entro una coppia di "O" rings e termina in una ghiera. Girando la ghiera si avvita la filettatu

ra in un pezzo cilindrico di acciaio, fermato con viti al fondo della riserva di idrogeno sino a che la punta conica va a chiudere il sottostante foro praticato nel fondo di un cilindretto di ottone. Questa valvola (B) separa la riserva di idrogeno da quello di deuterio.

Il tubo della valvola (B) porta due asolature in modo che il liquido in esso sia allo stesso livello della riserva H_2 , entro il tubo scorre attraverso una ulteriore coppia di "O" rings, un tubicino con una resistenza per la misura di livello del liquido nella riserva di idrogeno.

In tutte le flange interne di acciaio inossidabile la tenuta al vuoto è fatta con guarnizioni di indio, eccetto quella della valvola (A) che è di teflon: nella sede a sezione rettangolare si alloggia un filo di indio il quale è schiacciato per mezzo di viti di ottone da un dente più lungo della profondità della gola e sagomato sulla flangia di accoppiamento.

Ciascuna delle due resistenze di livello, del valore nominale di 100 ohm a temperatura ambiente, fa parte di un ramo di un ponte di Wheanstone che viene equilibrato quando la resistenza è nel liquido; portandola nei vapori la sua variazione è sufficiente a mandare in fondo scala lo strumento.

Operazioni

Come è stato detto dianzi, questo criostato è fatto in modo che si può riempire la cella di idrogeno o di deuterio. Le operazioni connesse al suo uso si possono raggruppare come segue:

- 1) Messa a punto iniziale.
- 2) Rifornimenti di azoto ed idrogeno liquidi e controlli vari.
- 3) Svuotamento e riempimento della cella, misura del livello di liquido.

I primi due punti sono a cura del personale specializzato del Laboratorio Criogenico; le operazioni di cui al terzo punto possono essere effettuate da operatori addestrati anche se non specializzati.

Nel descrivere le operazioni faremo riferimento ancora alla fig. 3 ed in particolare allo schema di controlli (in alto a destra).

1) Messa a punto iniziale.

- Si mette in funzione il sistema da vuoto, dopo circa 5 giorni il vuoto dinamico raggiunto è di $\approx 8 \cdot 10^{-5}$ mm Hg, misurati nella parte alta.
- Si esegue un lavaggio con idrogeno gas facendolo fluire dalla cella alle due soprastanti riserve in modo da portare via tutta l'aria; a ciò si chiudono le valvole numero 1 e 3 e si aprono quelle 2, 5 e (B) e si tiene la valvola (A) completamente abbassata.
- La valvola 4 si tiene sempre chiusa fuorchè quando si usa deuterio.

2) Rifornimento di N_2 ed H_2 liquidi e controlli vari.

Si chiude la valvola n° 5 e si aprono le 1, 2 e 3 e si trasferisce azoto liquido nella sua riserva avendo cura di rifornire gas al sistema di idrogeno per compensare gli effetti del raffreddamento; trascorse 24 ore si rimbocca la riserva e si esegue il trasferimento di idrogeno; il gas di evaporazione è convogliato all'esterno attraverso un contatore. Quando si vuol lavorare con idrogeno, si tiene la valvola (B) aperta ed (A) abbassata, in questo modo la

cella, la riserva D_2 e la riserva H_2 si riempiranno di idrogeno liquido.

Quando si vuol lavorare con deuterio si chiudono le valvole (B), 1, 2, 3, 5 e si tiene la (A) abbassata, si fa il vuoto nel sistema di deuterio, costituito da cella, riserva D_2 e serpentina, si riempie la riserva H_2 di idrogeno liquido, indi si apre la valvola 4 (lentamente) ed il deuterio si condensa nella cella e nella riserva D_2 .

Si apre la valvola 5 e si ritira (non chiudendola) la valvola (A) e la cella è pronta per essere irradiata.

3) Svuotamento e riempimento della cella; misura del livello di liquido.

3 a) Uso del criostato con solo idrogeno.

Eseguite le operazioni 1) e 2) con la valvola (B) aperta, la (A) abbassata e la 5 chiusa, si ritira la (A) non chiudendola. In queste condizioni la cella è piena di liquido e pronta per essere irradiata. Per svuotare la cella: la (A) è spinta in basso, si chiudono le valvole 1 e 3, si spinge sul fondo della cella il tubo che porta la resistenza di livello e vi si fa passare una corrente dissipando circa 2 Watt; questo provoca un'evaporazione maggiore di idrogeno che, essendo le valvole 1 e 3 chiuse, fa aumentare la pressione nella cella forzando così il liquido a risalire nella riserva attraverso i fori nel tubicino della valvola (A); in non più di dieci minuti una cella della capacità di 400 cm^3 è svuotata. Si chiude ermeticamente la valvola (A), si interrompe la corrente e si aprono le valvole 1, 3 e 5. La sovrappressione necessaria per svuotare la cella può essere ottenuta, in alternativa al metodo precedente, pressurizzando la cella dall'esterno con idrogeno gas e regolando la pressione con un battente di olio, chiudendo le valvole 1, 3 e 5. Per riempire di nuovo la cella si abbassa

la (A); in pochi minuti la cella è piena.

3 b) Uso del criostato con deuterio.

In questo caso la cella e la riserva D_2 contengono deuterio liquido; la riserva H_2 idrogeno liquido. Per svuotare la cella, si chiude la valvola 5, si abbassa la (A) e si scalda, come nel caso dell'idrogeno; il deuterio risale dalla cella nella riserva D_2 , il tempo necessario per svuotare una cella di 400 cm^3 è di circa 6 minuti. Indi si ritira la valvola (A), chiudendola, e si interrompe il riscaldamento. Per riempire di nuovo la cella, si apre la valvola 5 e si abbassa la (A).

3 c) Misure di livello.

E' possibile, mediante due aste scorrevoli, misurare il livello di liquido nella cella e nella riserva H_2 .
Avvertenze: Le valvole di cui si è parlato, sul criostato portano delle diciture, esse sono:

| | | |
|--------------|------------|-----------------------------|
| Valvola n° 1 | equivale a | "By pass cella" |
| " " 2 | " | "Press. cella" |
| " " 3 | " | "By pass" (è sita sul Rack) |
| " " 4 | " | "Linea D_z " |
| " " 5 | " | "By pass evap. D_z " |

Progetto

Il fine perseguito nella progettazione del criosta-
to è stato, oltre a quelli menzionati nell'introduzione, di
ridurre al minimo indispensabile i trasferimenti di idroge-
no liquido alla riserva^(x) e permettere un'autonomia di qual-
che centinaia di ore.

Si scelse una capacità della riserva di idrogeno di
circa 6 lt ed una durata di funzionamento intorno alle 300
ore. Ne viene che la velocità di evaporazione massima deve
essere 2×10^{-2} lt/ora di liquido. Poichè il calore di vapo-
rizzazione dell'idrogeno è 108 cal/gr un ingresso di calore
di 1 watt evapora $1,12 \times 10^{-1}$ lt/ora di liquido, perciò il
calore totale trasmesso alla riserva non deve superare
 $1,79 \times 10^{-1}$ watt⁽⁺⁾. Questo valore è stabilito in regime sta-
zionario quando la riserva è alla temperatura di 20,4°K.
Nel seguito si considerano due casi, cioè che essa sia ini-
zialmente a temperatura ambiente o prossima a quella dello
azoto liquido.

Computiamo approssimativamente la quantità di idro-
geno liquido necessaria a portare, nei due casi, la riserva
a 20°K.

Prendendo come temperatura media della riserva 120°K

(x) - In merito ai trasferimenti di idrogeno liquido diremo
che debbono essere eseguiti con le debite precauzioni
in quanto involgono seri pericoli; non è questa la se-
de per una trattazione dell'argomento, ma si consi-
glierà la lettura dell'articolo: "Explosion Hazards of
Liquid Hydrogen"⁽⁶⁾.

(+) - In tutta questa trattazione si trascura il contributo
dei vapori freddi di evaporazione; questa approssima-
zione è giustificata dalla mancanza di uno scambiatore
di calore per il gas di evaporazione

ovvero 300°K, essendo essa costituita da 10 kg di acciaio inossidabile, il calore da sottrarre è rispettivamente: 168 cal/gr.atomo e 1004 cal/gr.atomo. Poichè il peso atomico dell'acciaio inossidabile è 56 gr si hanno rispettivamente 3×10^4 e $1,8 \times 10^5$ calorie, pari all'evaporazione di 3,95 e 23,5 litri di idrogeno. Questa considerazione giustifica la presenza di un bagno di azoto liquido che preraffreddi il criostato.

Raggiunto lo stato stazionario e riempita la riserva, il flusso di calore alla riserva involge tre meccanismi fondamentali: irraggiamento termico, conduzione metallica, conduzione gassosa (7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16).

Il primo dipende dalla differenza delle quarte potenze delle temperature, dalla emissività ed assorbività delle superficie e dalla geometria del sistema. Fu supposta una emissività ed assorbività uguali a 10^{-1} per tutte le superficie; essendo l'area della riserva in idrogeno $2,5 \times 10^3 \text{ cm}^2$, si ottiene $4,5 \times 10^{-3} \text{ watt/cm}^2$ quando la riserva vede superficie a 300°K e $1,5 \times 10^{-5} \text{ watt/cm}^2$ quando essa vede superficie a 80°K. Nel primo avremo un ingresso di calore pari a circa 11 watt, nel secondo $3,75 \times 10^{-2} \text{ watt}$. Questa considerazione ci orientò verso un criostato schermato con superficie raffreddata con azoto liquido. Il criostato fu dotato per ciò di due riserve, una di idrogeno e l'altra immediatamente superiore di azoto che raffredda uno schermo di rame circondante la prima.

L'ingresso di calore per conduzione è $8 \times 10^{-2} \text{ watt}$. Allo scopo di ridurle al minimo sono stati impiegati tubi di acciaio inossidabile a pareti sottili: la conducibilità termica di questo metallo è una delle più basse: nell'intervallo di temperatura 300 + 77°K è in media $1,23 \times 10^{-1} \text{ watt/cm}^{\circ\text{K}}$ e in quello 77 + 20°K, $5,5 \times 10^{-2} \text{ watt/cm}^{\circ\text{K}}$; negli stessi in

tervalli la conducibilità termica di un tipo di rame è rispettivamente:

$$1.91 \text{ watt/cm } ^\circ\text{K} \quad \text{e} \quad 9.5 \times 10^{-1} \text{ watt/cm } ^\circ\text{K}$$

Un'altra considerazione che ci ha spinto a scegliere l'acciaio inossidabile come materiale del criostato è che esso, insieme al nickel, rame ed alluminio, non presenta fragilità in alcun intervallo di temperatura (17,18). In molti metalli invece, come l'ottone povero di rame ad es., al diminuire della temperatura aumenta il carico di rottura, il carico allo snervamento, il modulo di elasticità e diminuisce la resistenza all'urto.

L'ingresso di calore per conduzione gassosa è calcolato pessimisticamente; esso dipende dalla pressione del gas oltre che dalla geometria e temperatura delle superficie tra le quali avviene la conduzione molecolare libera, infine dipende da un coefficiente che è sempre minore dell'unità e che nei nostri calcoli è stato preso uguale ad 1. Come risultato si ha 3×10^{-2} watt.

Infine l'ingresso di calore radiante attraverso i tubi è un dato molto incerto; non è possibile mettervi allo interno trappole di radiazione per cui non si sa quale radiazione è vista dalla riserva di idrogeno; solo valori massimi o minimi si possono calcolare. Il valore massimo si è trovato ammettendo la completa specularità della parete interna: in questo caso la radiazione proveniente dalle parti a 300°K dà luogo a $2,75 \times 10^{-1}$ watt; il valore minimo si trova ammettendo il completo assorbimento della radiazione nelle zone dei tubi che sono raffreddate dall'azoto liquido. In questo caso si ha 10^{-7} watt. Dato che l'interno dei tubi ha un alto valore del coefficiente di emissività si può ben dire che tale ingresso di calore è trascurabile.

In totale si ha $14,75 \times 10^{-2}$ watt entranti alla ri-

serva; questo dà luogo ad un'evaporazione di $1,66 \times 10^{-2}$ lit/ora di idrogeno liquido.

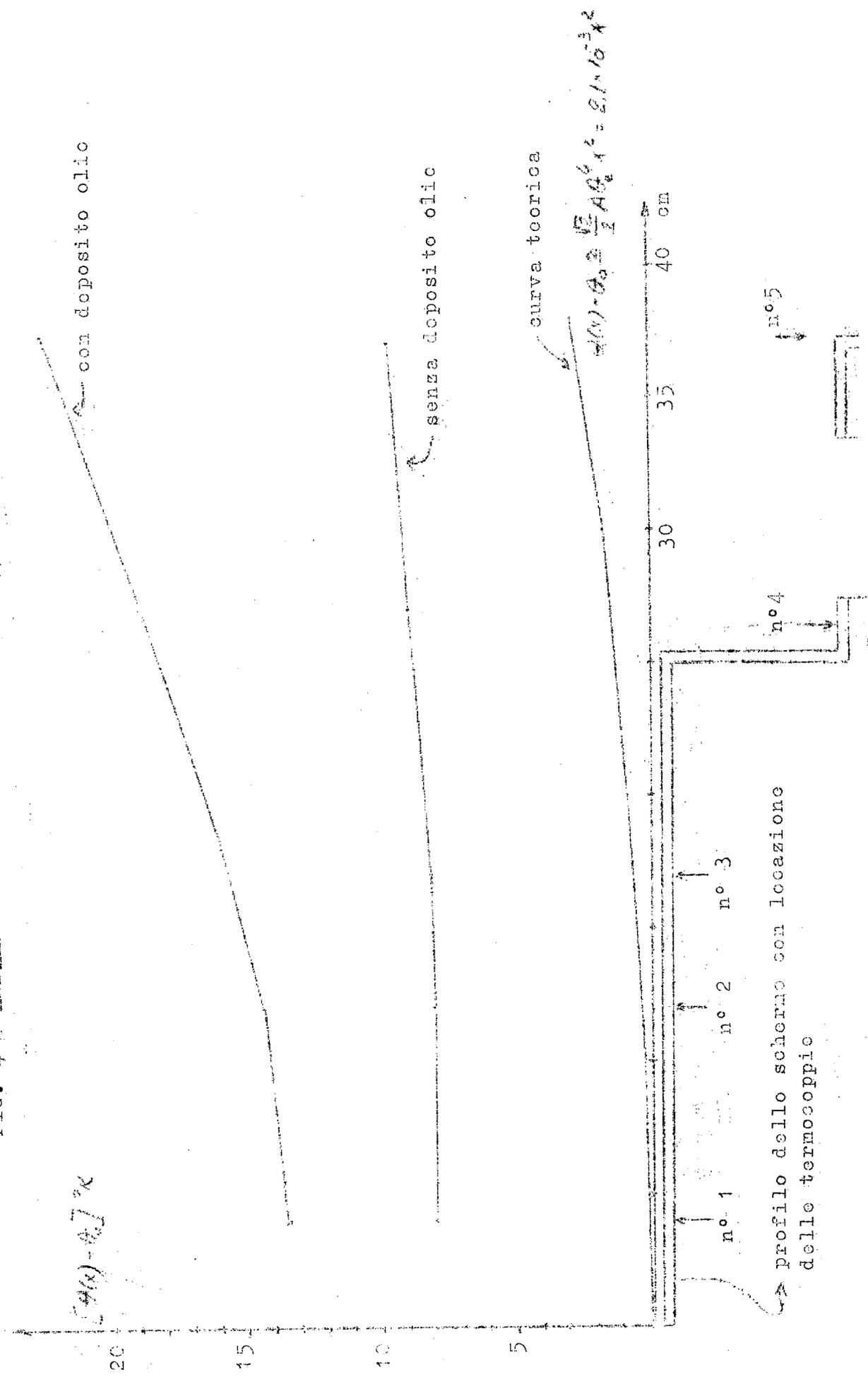
Prestazioni e considerazioni di carattere generale

Nelle varie fasi del montaggio del criostato si è avuta molta cura nel provare la tenuta delle saldature, sottoponendo di volta in volta le parti destinate a lavorare a bassa temperatura a cicli di raffreddamento e riscaldamento ($300 + 77^{\circ}\text{K}$). Le tenute al vuoto sono state controllate con l'aiuto di un cercafughe a spettrometro di massa. Una volta montato il criostato, è stata effettuata una misura della distribuzione delle temperature sullo schermo di rame dorato che circonda la cella e la riserva H_2 ; allo scopo sono state montate a diversa altezza, come mostrato in fig. 4, cinque termocoppie Fe - Cu e si è misurato con ciascuna la temperatura in funzione del tempo dopo aver riempito di azoto liquido sia la riserva N_2 che la riserva H_2 e la cella. Nella fig. 4 sono riportati i valori della temperatura raggiunta a regime (dopo circa 4 ore) in due casi:

- con lo schermo coperto di un sottile strato di olio, il che succede quando il vuoto è ottenuto con una pompa a diffusione a vapori di olio non munita di trappola refrigerante;
- con lo schermo ben pulito, cioè interponendo una trappola refrigerante ad azoto liquido tra la pompa a diffusione ed il criostato.

La figura mostra chiaramente la perdita di efficienza dello schermo quando esso ^{non} è ben pulito; si noti che la temperatura delle termocoppia n° 1 non è inferiore a 85°K , il che dimostra che c'è un notevole salto (maggiore di 8°K) alla giunzione dello schermo alla riserva N_2 dovuto al fatto che, per comodità costruttive, esso è unito alla riserva N_2 mediante viti. In fig. 5 si mostra, per due delle cinque termocoppie, l'andamento della temperatura in funzione del tem-

FIG. 4 - ANDAMENTO DEL GRADIENTE DI TEMPERATURA LUNGO LO SCHERMO



$$\theta(x) - \theta_0 \approx \frac{\sqrt{x}}{2} A G_0^2 \tau^2 = 2.1 \cdot 10^{-3} x^2$$

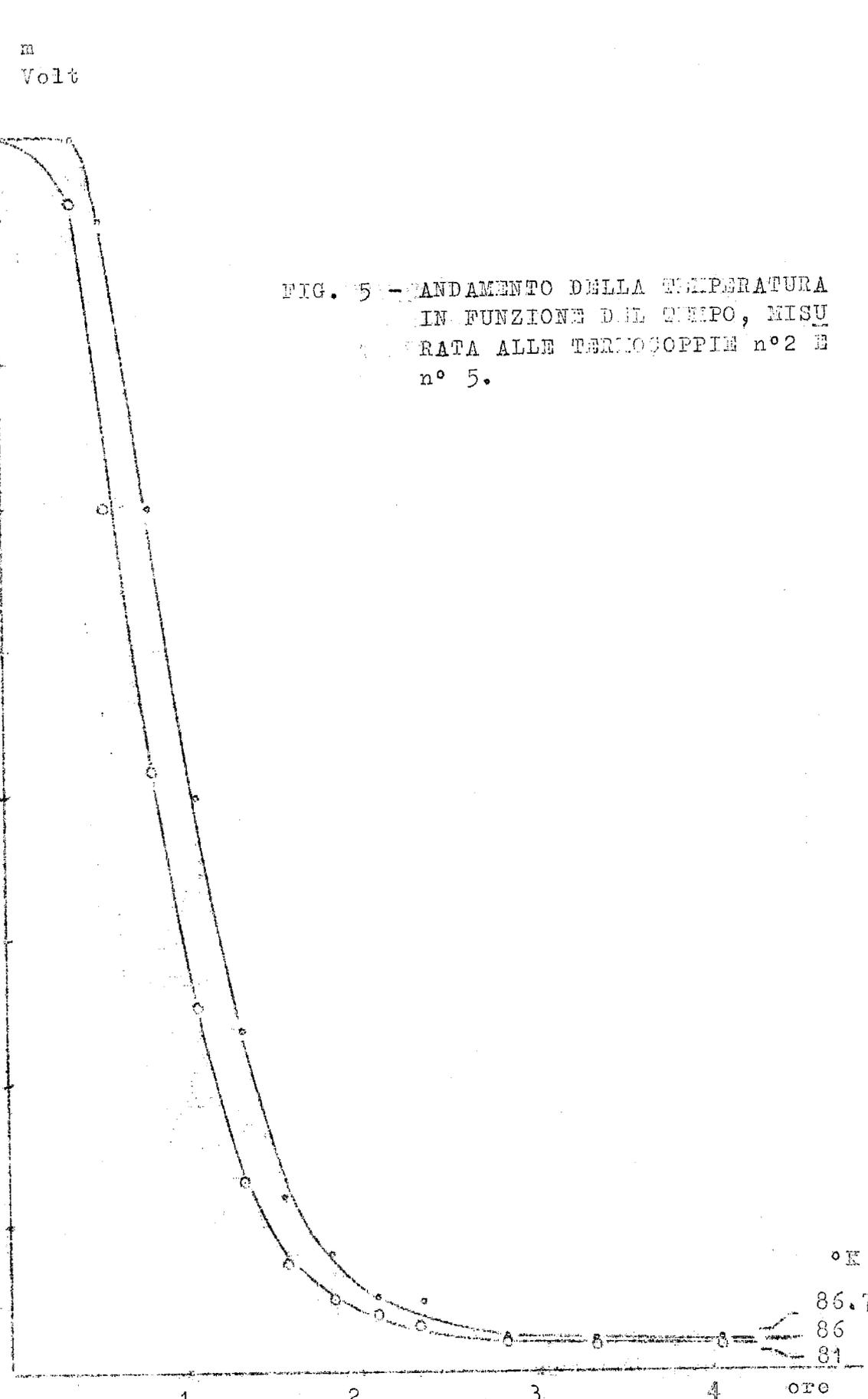
profilo dello schermo con locazione delle termocoppie

m
Volt

9
8
7
6
5
4
3
2
1
0

FIG. 5 - ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA
IN FUNZIONE DEL TEMPO, MISU-
RATA ALLE TERMOCOPIE n° 2 E
n° 5.

°K
86.7
86
81
0 1 2 3 4 ore

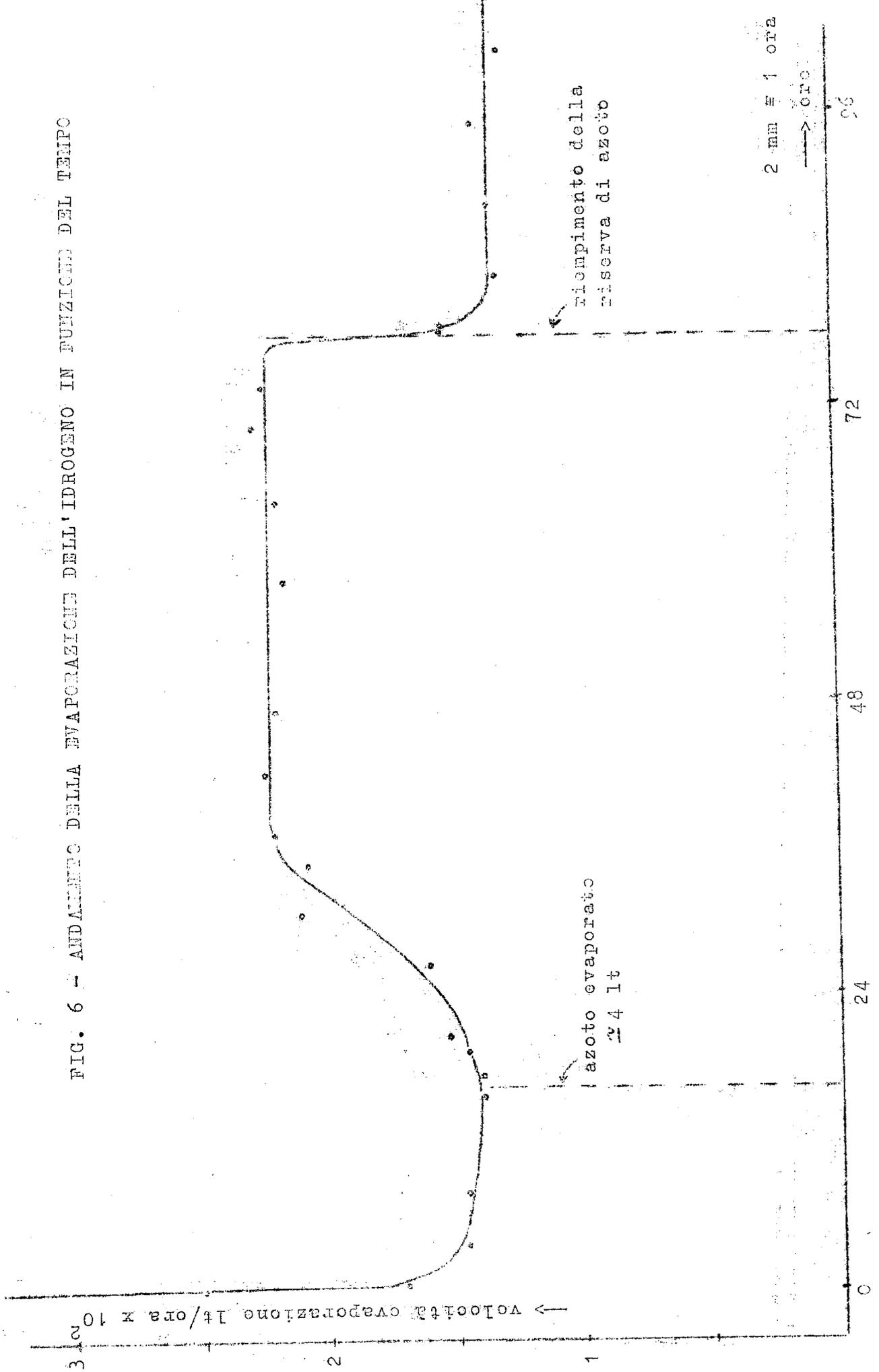


po a partire dal momento in cui si inizia il trasferimento di azoto liquido (durata del trasferimento circa 50 minuti). Questi dati, insieme a quelli di evaporazione dell'azoto, hanno fornito la possibilità di calcolare approssimativamente l'emissività totale delle superficie raffreddate; si è trovato per la parete di acciaio inossidabile un valore di circa 10^{-1} , per quella di rame dorato (schermo) 4×10^{-2} ; questi valori sono in buon accordo con il valore postulato (v. sopra).

Infine si è proceduto alla prova generale del criostato, riempiendo di idrogeno liquido la riserva H_2 e la cella. Si è misurata l'evaporazione dell'idrogeno e dell'azoto. Per l'idrogeno, l'evaporazione mediata nel tempo, è stata di $1,8 \times 10^{-2}$ lt/ora; in buon accordo con quella calcolata. La fig. 6 mostra l'andamento dell'evaporazione in funzione del tempo. La zona centrale di più alta evaporazione è dovuta al fatto che l'azoto, nella sua riserva, dopo circa 24 ore, è diminuito tanto da lasciare completamente fuori del bagno i tubi che reggono la riserva H_2 , i quali perciò salgono di temperatura. In seguito, eseguito il riempimento di azoto, l'evaporazione dell'idrogeno torna al valore iniziale. L'evaporazione dell'azoto è stata, a regime, di 0,35 lt/ora. In queste condizioni l'autonomia del criostato è di 2 settimane per quanto riguarda l'idrogeno e di due giorni per l'azoto. Per cercare di aumentare la durata dell'azoto si è usata la tecnica di isolamento con strati multipli di materiale isolante con superficie speculari^(19,20) interposti tra la parete esterna e la riserva N_2 . Si è usato del mylar alluminato da $1,25 \times 10^{-2}$ mm impaccato in 30 fogli/cm. Questo accorgimento ha portato la evaporazione dell'azoto a $1,9 \times 10^{-1}$ lt/ora, e l'autonomia a più di tre giorni.

Tutte queste prove sono state effettuate con vuoto

FIG. 6 - ANDAMENTO DELLA EVAPORAZIONE DELL'IDROGENO IN FUNZIONE DEL TEMPO



dinamico; per sicurezza si è misurata l'evaporazione in vuoto statico e dopo aver esaurita la riserva dell'azoto liquido. L'evaporazione di idrogeno è salita a 10^{-1} lt/ora in dodici ore. Si è infine provato il criostato con deuterio.

Per liquefare il deuterio si tiene conto che il punto normale di ebollizione del deuterio, $23,6^{\circ}\text{K}$, è superiore a quello dell'idrogeno. I due scambiatori di calore per raffreddare la temperatura di 77°K prima e 20°K poi ed indi liquefare il gas sono stati calcolati in modo da impiegare non più di dieci minuti a riempire la cella con una capacità di 400 cm^3 . Il rifornimento di deuterio gassoso è fatto da un recipiente di volume opportuno costante, nel quale sta il gas; vale la seguente relazione tra i volumi del liquido V_l e del recipiente di gas V_g , la pressione di vapore in equilibrio con il liquido P_l , e quella iniziale del gas P_g alla temperatura T_g :

$$V_l d_l = V_g \frac{M}{R T_g} (P_g - P_l)$$

ove d_l è la densità del liquido con il vapore a pressione P_l , T_g è la temperatura ambiente del recipiente contenente il gas, R è la costante dei gas, M il peso molecolare del deuterio.

Su P_g deve essere imposta la seguente condizione: esso non può superare i limiti di sicurezza per la resistenza meccanica della cella. Sono state eseguite delle prove con una cella capace di 400 cm^3 , la riserva di gas di 300 litri ad $1,5\text{ atm}$: il tempo impiegato nella liquefazione è stato 6 minuti.

Ringraziamenti

E' nostro gradito dovere ringraziare i Sigg. P. Cardoni e L. Siracusano per la cura e l'impegno espliciti nella realizzazione pratica del criostato; ringraziamo pure il Sig. A. Bellatreccia per il valido aiuto datoci nella messa a punto. Ringraziamo pure il Sig. E. Solinas per la sua opera. Un sentito ringraziamento va pure al Sig. E. Gazzellini.

Infine ringraziamo il Dott. F. Scaramuzzi per gli utili consigli dati durante la stesura di queste pagine.

Uso del criostato con D₂

Uso del criostato con H₂

| VALVOLE | messa a punto iniziale | | Riemp. N ₂ e H ₂ | | svuotamento cella | | riemp. cella | messa a punto iniziale | Riemp. N ₂ e H ₂ | Riemp. D ₂ | Svuotamento cella | | Riempimento cella |
|--|------------------------|--|--|-----------------------|-------------------|-----------|--------------|------------------------|--|---|--------------------------|-----------|-----------------------|
| | I fase | II fase | I fase | II fase | I fase | II fase | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | I fase | II fase | |
| 1 (By pass cella) | chiusa | aperta | chiusa | aperta | aperta | aperta | aperta | chiusa | chiusa | chiusa | chiusa | chiusa | chiusa |
| 2 (Press. cella) | aperta | aperta | aperta | aperta | aperta | aperta | aperta | chiusa | chiusa | chiusa | chiusa | chiusa | chiusa |
| 3 (By pass, sul rack) | chiusa | aperta | chiusa | aperta | aperta | aperta | aperta | chiusa | chiusa | chiusa | chiusa | chiusa | chiusa |
| 4 (Linea D ₂) | chiusa | chiusa | chiusa | chiusa | chiusa | chiusa | chiusa | chiusa | chiusa | aperta (lenta-mente) | aperta | aperta | aperta |
| 5 (By pass evap. D ₂) | aperta | chiusa | chiusa | aperta | aperta | aperta | aperta | chiusa | chiusa | chiusa dopo riemp. aperta | chiusa | chiusa | aperta |
| (A) (riemp. e svuot. cella) | abbassata | abbassata (dopo riemp. si ritira non chiudendo la) | abbassata | ritirata e chiusa | abbassata | abbassata | abbassata | abbassata | abbassata | abbassata (dopo riemp. si ritira non chiudendo) | abbassata | abbassata | ritirata e chiusa |
| (B) (Separ. riserva H ₂ e D ₂) | aperta | aperta | aperta | aperta | aperta | aperta | aperta | chiusa | chiusa | chiusa | chiusa | chiusa | chiusa |
| Resistenza mobile in cella | | | in basso e riscaldamento | interr. riscaldamento | | | | | | | in basso e riscaldamento | | interr. riscaldamento |

SCHEMA CRIOSTATO AD

