



*Corso di Laboratorio di Termodinamica  
per le lauree triennali in  
Fisica  
Fisica e Astrofisica  
Tecnologie Fisiche e dell'Informazione*

## ***Dispense di Fisica e Tecnologia del Vuoto***

*Parte III*

*Fulvio Ricci*

*Dipartimento di Fisica,  
Università di Roma La Sapienza, Roma, Italia*



## INDICE

### LE POMPE DA VUOTO

*Le pompe rotative*

*Le pompe a diffusione*

*Le pompe turbomolecolari*

*Le pompe a getter e ioniche*

*Le pompe criogeniche*

### BIBLIOGRAFIA

## LE POMPE DA VUOTO

Esistono diversi tipi di pompe di vuoto che coprono differenti intervalli di pressione. Ogni tipo di pompa è caratterizzato dal valore della portata volumetrica  $Q$  (indicata anche con il nome di velocità di pompaggio) e mediante il valore della minima pressione raggiunta (pressione limite).

La velocità di pompaggio dipende dalla pressione all'ingresso della pompa e presenta sempre un andamento decrescente al diminuire della pressione di lavoro. In alcuni casi si ha una diminuzione della velocità di pompaggio a pressioni elevate. La pressione limite è misurata nel punto d'ingresso della pompa. Poiché la pressione tenderà a diminuire progressivamente nel tempo, in quanto si ridurrà il flusso dei gas provenienti dal degasaggio delle pareti del recipiente a vuoto, si assume come valore della pressione limite quello misurato quando ogni ulteriore riduzione di pressione nel tempo risulta trascurabile.

Vogliamo sottolineare che la pressione finale  $p_f$  di un impianto a vuoto non coincide con la pressione limite della pompa  $p_l$ . La portata  $Q$  di un sistema a vuoto e la conduttanza dei tubi che connettono il sistema alla pompa a vuoto influenzano la pressione limite nel sistema secondo la relazione

$$Q = C(p_l - p_f)$$

La misura della pressione limite di una pompa, che è ottenuta mettendo in comunicazione diretta un piccolo volume con la bocca della pompa, non presenta particolari problemi. Al contrario la misura della velocità di pompaggio risulta più complessa e può essere influenzata da perdite nell'impianto a vuoto e/o dal processo di degasaggio.

La misura della velocità di pompaggio alle diverse pressioni è effettuata misurando il tempo di evacuazione di un recipiente di volume  $V$  noto e le pressioni iniziale e finale. Infatti, nell'ipotesi che il processo d'evacuazione è isoterma (ipotesi ragionevole dato che la massa dei gas è in genere piccola rispetto alla massa del recipiente e della pompa e gli scambi termici sono abbastanza rapidi), si può scrivere:

$$pV = \text{costante}$$

Questa equazione, derivata rispetto al tempo, porta alla seguente relazione

$$V ( dp/dt ) + p ( dV/dt ) = 0$$

che può essere riscritta nella forma:

$$- (V/p) dp = Q dt$$

essendo per definizione  $Q = dV/dt$  la velocità di pompaggio della pompa. Integrando l'equazione differenziale sopra scritta su un intervallo di tempo ( $t_2 - t_1$ ), sufficientemente breve in modo da poter considerare  $Q$  costante, si ottiene:

$$QV \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p} = \int_{t_1}^{t_2} Q dt$$

che, nell'ipotesi  $\dot{V} = \text{costante}$ , porta al risultato:

$$\dot{V} = \{V/(t_2 - t_1)\} \ln (p_1/p_2)$$

Effettuando la misura della pressione per una serie di intervalli di tempo consecutivi, si può ricavare l'andamento della velocità di pompaggio in funzione della pressione. Quando la pressione del recipiente si avvicina alla pressione ultima, la misura di  $\dot{V}$  con questo metodo può essere falsata dalla presenza di perdite nel sistema e dal degasaggio delle pareti.

Nel caso in cui nell'impianto vi sia una perdita con portata costante  $Q_f$ , si ha che il prodotto  $pV$  non è più costante. Quindi scriveremo che

$$d(pV) = Q_f = \text{costante}$$

L'equazione assume la forma:

$$-V(dp/dt) + Q_f = \dot{V}p$$

La soluzione di tale equazione è data da:

$$\dot{V} = \{V/(t_2 - t_1)\} \ln \{(p_1 - Q_f/\dot{V})/(p_2 - Q_f/\dot{V})\}$$

Per determinare la velocità di pompaggio è quindi necessario misurare anche la portata  $Q_f$  della perdita. Questa misura è ottenuta isolando il recipiente a vuoto dalla pompa, dopo averlo evacuato, e misurando la variazione della pressione nel tempo.

Nell'ipotesi che il processo di degasaggio sia trascurabile, dalla equazione precedente, avendo posto uguale a zero la portata della pompa, si ricava:

$$p(t) = (Q_f/V) t$$

da cui si ottiene il valore di  $Q_f$ .

Le equazioni precedenti permettono di ricavare, se si conosce la velocità di pompaggio  $\dot{V}$  della pompa, il tempo necessario per raggiungere la pressione di lavoro dell'impianto a vuoto.

### ***Le pompe rotative***

Tra i vari tipi di pompe meccaniche che producono il vuoto primario (basso e medio vuoto) noi ci soffermeremo su due tipi di pompe rotative comunemente usate: le pompe a palette e le pompe a pistone rotante.

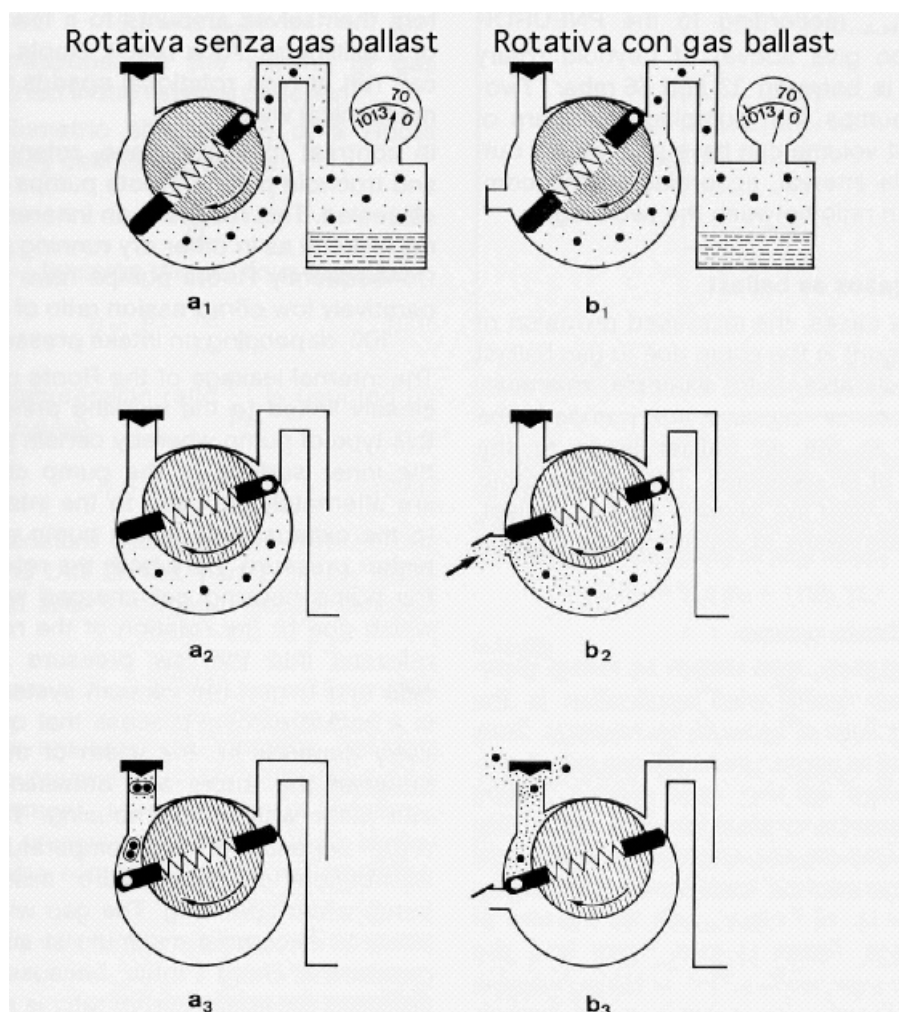
Iniziamo col discutere il principio di funzionamento delle rotative a palette. Nella figura che segue, sul suo lato sinistro, sono riportate le varie fasi di funzionamento di una pompa a palette; discuteremo più tardi la parte destra della figura.

Il corpo centrale di una pompa rotativa a palette è costituito da una cavità cilindrica entro la quale ruota, attorno ad un asse traslato rispetto all'asse della cavità

(eccentrico) , un rotore che ha una scanalatura lungo una direzione diametrale. In essa vi sono alloggiati due palette che aderiscono alla parete della cavità cilindrica in virtù dell'azione della molla compressa tra le due palette.

Qui abbiamo schematizzato l'azione della pompa dividendola in tre fasi successive:

- (a1) Il gas dell'impianto da vuotare è aspirato nella zona punteggiata.
- (a2) Il gas è quindi trascinato in rotazione e compresso.
- (a3) Esso è quindi espulso attraverso la valvola.

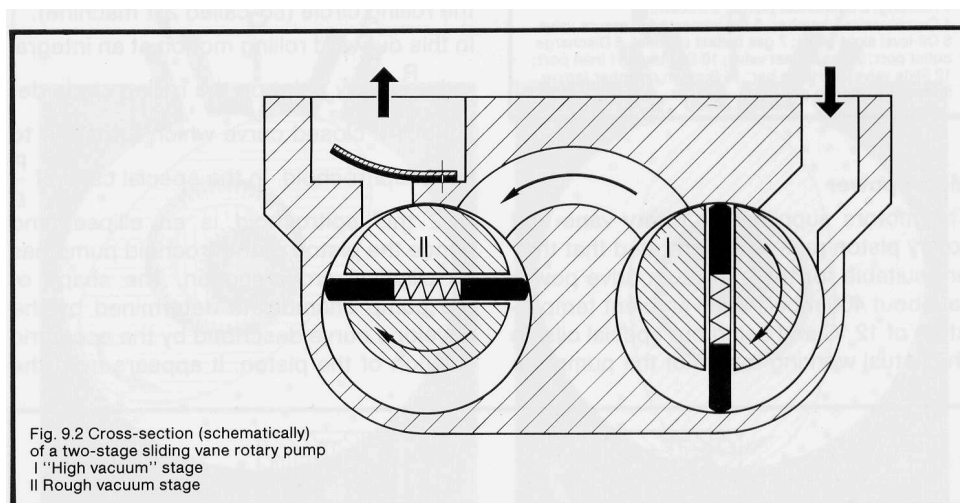


In generale nelle pompe meccaniche, la lubrificazione delle parti in moto e la tenuta da vuoto del sistema sono assicurate da oli speciali (a bassa tensione di vapore).

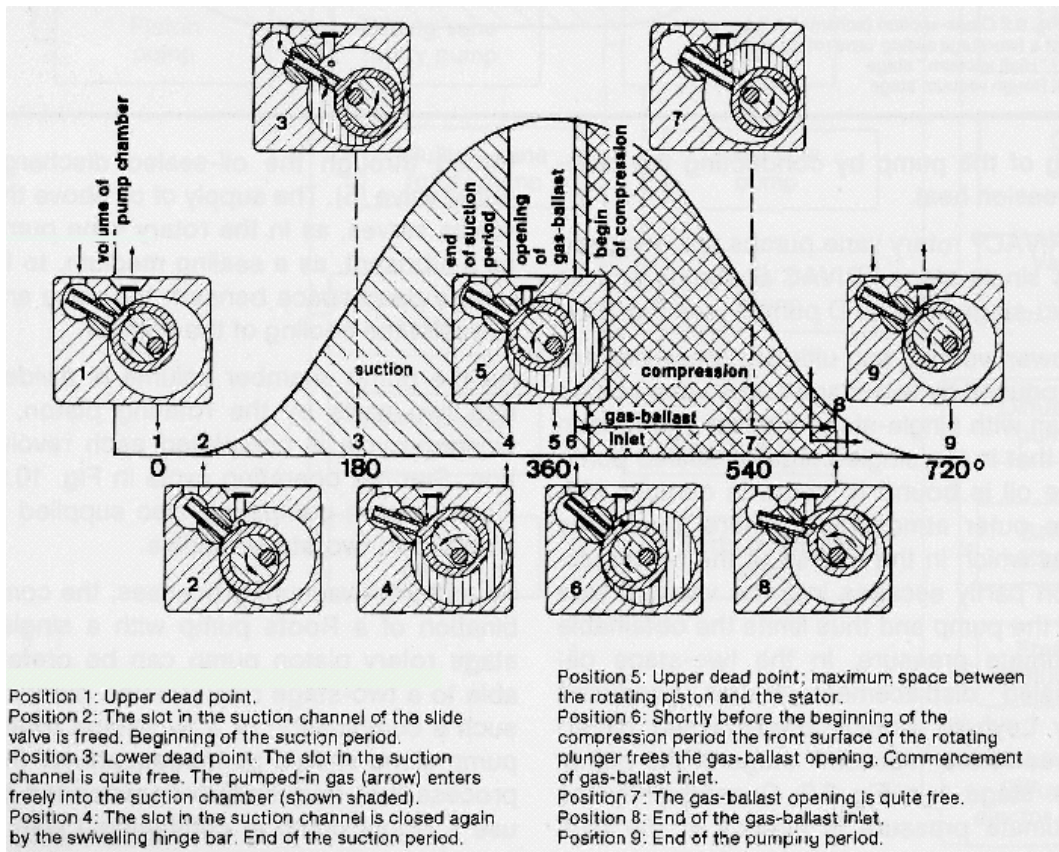
La pressione di scarico dei gas compressi deve essere più elevata della pressione atmosferica, per cui sono necessari rapporti di compressione molto grandi (dell'ordine di  $10^5$ ) per ottenere una pressione finale di 1 Pa all'ingresso della pompa. La pressione finale delle pompe rotative (ad un singolo stadio) ricade tipicamente nell'intervallo che si estende da 1 Pa (per le pompe di piccola portata volumetrica  $Q < 50 \text{ m}^3/\text{h}$ ) a  $10^{-1}$  Pa (per le pompe con velocità di pompaggio più elevata). Tale limite non è determinato dal meccanismo di pompaggio, ma è imposto dalla solubilità dei gas nell'olio lubrificante. Infatti l'olio espulso attraverso la valvola di scarico e

saturo dei gas o vapori che si sono in esso disciolti durante la fase di compressione, ritorna nel serbatoio dell'olio e successivamente è immesso di nuovo nella cavità cilindrica. Lì rilascia parte dei gas o vapori disciolti nell'olio ed in questo processo si possono determinare le condizioni per un sensibile peggioramento delle prestazioni della pompa. In particolare, quando i gas aspirati sono in prevalenza vapori che si condensano nella fase di compressione (ad esempio vapori di acqua), per evitare il verificarsi di questa circostanza si ricorre ad un particolare accorgimento: zavorrare la pompa con l'aria dell'ambiente (apertura del *gas ballast*). Questo è possibile perchè la pompa rotativa presenta un'entrata supplementare posta in comunicazione con l'ambiente: in pratica vi è una valvola manuale *V* ad apertura regolabile dall'operatore. Durante la rotazione del pistone, quando il recipiente da evacuare è isolato dal vano d'aspirazione e di compressione della pompa, si apre la valvola *V* ed il vano si riempie d'aria addizionale (la zavorra). In questo modo la pressione di scarico viene raggiunta molto prima che possa aver luogo la condensazione dei vapori e quindi la pompa espelle contemporaneamente i gas ed i vapori. Occorre però notare che in condizioni di *gas ballast* aperto la pompa perde d'efficienza. Il funzionamento della pompa dotata di *gas ballast* è riportato sul lato sinistro della figura.

Per aumentare la velocità di pompaggio e diminuire la pressione limite, sono state realizzate pompe rotative a doppio stadio. Riportiamo qui uno schema semplificato di tali pompe.



Per avere pompe meccaniche con velocità di pompaggio ancora più elevata in questi intervalli di pressione, è stato concepito un secondo metodo che illustriamo nella figura seguente.



Questa pompa è denominata a pistone rotante; in essa l'albero di rotazione del rotore è coassiale rispetto alla cavità cilindrica mentre il corpo del rotore (camma) è eccentrico rispetto all'albero.

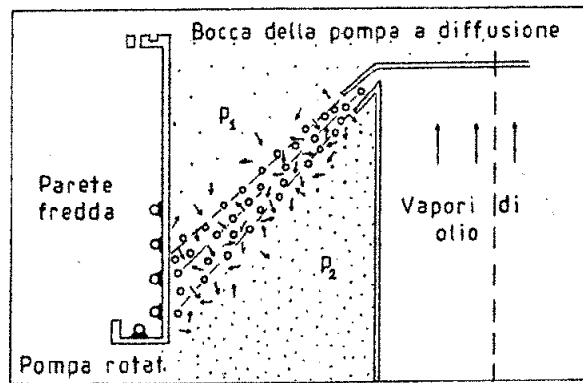
- (1) Un pistone cavo trascinato dalla camma eccentrica pone in comunicazione il recipiente da evacuare con la cavità cilindrica.
- (2) La camma nella sua rotazione fa sì che il pistone scorra con moto alternativo nella guida (oscillante nella sua sede) e metta alternativamente la camera di compressione in comunicazione con il recipiente da evacuare oppure la isoli.
- (3) Il rotore durante il suo moto comprime i gas fino ad espellerli nell'atmosfera attraverso la valvola di scarico.

Notiamo infine che le pompe a pistone rotante per le loro caratteristiche costruttive sono più adatte delle pompe a palette per le grandi portate volumiche ( $\dot{V} = 50 - 500 \text{ m}^3/\text{h}$ ).

### *Le pompe a diffusione*

Le pompe a diffusione non possono immettere i gas aspirati direttamente nell'atmosfera come nel caso delle pompe rotative, perchè la loro pressione di lavoro si estende da qualche  $10^{-1}$  a  $10^{-8}$  Pa per tutti i gas. Occorre prevedere allora che il recipiente da vuotare sia inizialmente connesso ad una pompa meccanica (pompa primaria) che porti il vuoto a valori tali da cadere nell'intervallo operativo della pompa a diffusione.

Nelle pompe a diffusione si utilizza un getto di molecole ad alta velocità, di un vapore che ha la funzione di trasferire per urti la quantità di moto alle molecole del gas da evacuare in direzione della bocca di pompaggio. Nelle prime pompe si utilizzavano vapori di mercurio, nelle pompe attuali si utilizzano oli speciali con tensioni di vapore a temperatura ambiente di  $5 \cdot 10^{-7} - 10^{-8}$  Pa). In figura è mostrato lo schema di funzionamento del getto molecolare.



Le molecole di vapore, provenienti dal liquido in ebollizione localizzato alla base della pompa, passando attraverso una strozzatura anulare (a forma di becco), acquistano velocità di alcune centinaia di m/s dirette verso il basso, dove si trova la bocca di aspirazione connessa alla pompa meccanica che assicura il pre-vuoto, e verso la parete fredda della pompa. Le molecole del gas che arrivano alla bocca della pompa a diffusione vengono trascinate nel getto di vapore ed acquistano una quantità di moto diretta verso il basso. Quando le molecole di vapore del getto incidono sulla parete fredda vengono condensate e ritornano sotto forma di liquido nel bagno che sta alla base della pompa, assicurando la continuità del meccanismo di pompaggio.

Il trasferimento di una quantità di moto netta alle molecole dei gas che attraversano il getto si traduce in una differenza di densità molecolare e quindi di pressione tra le due regioni separate dal getto di vapore. Il rapporto tra i valori di pressione nelle due regioni è espresso approssimativamente dalla seguente relazione:

$$p_2/p_1 = e^{-\rho v L D}$$

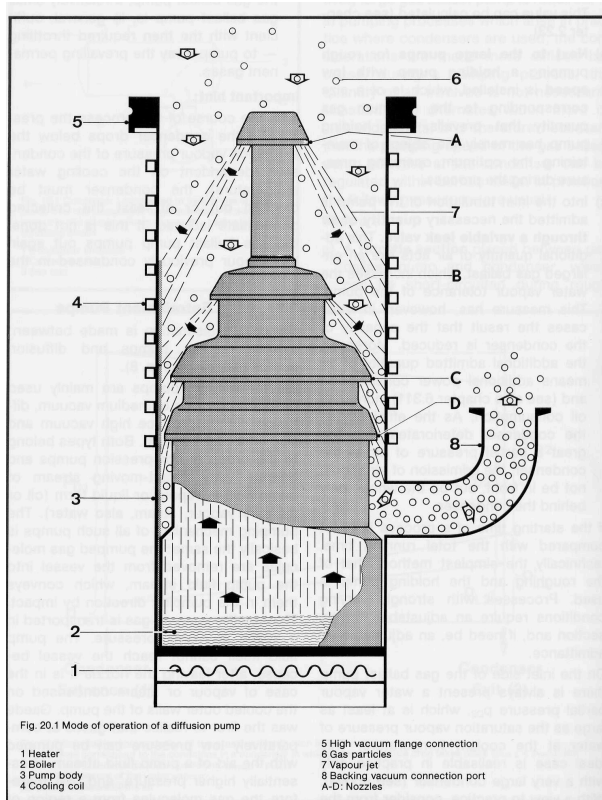
dove  $\rho$  è la densità del vapore,  $v$  la sua velocità,  $L$  lo spessore del getto.  $D$  è un coefficiente che dipende dai pesi molecolari delle molecole di gas e delle molecole di vapore secondo una relazione del tipo:

$$D = k \left\{ (M_1 + M_2) / (M_1 M_2) \right\}^{1/2}$$

Poiché il peso molecolare degli oli impiegati è notevolmente superiore al peso molecolare dei gas residui ( $M_1 = 400 - 500$  masse atomiche), da queste formule si vede immediatamente che il rapporto  $p_2/p_1$  è tanto più piccolo quanto è più basso  $M_2$ , quindi questo tipo di pompa è meno efficiente per i gas leggeri come l'idrogeno e l'elio.

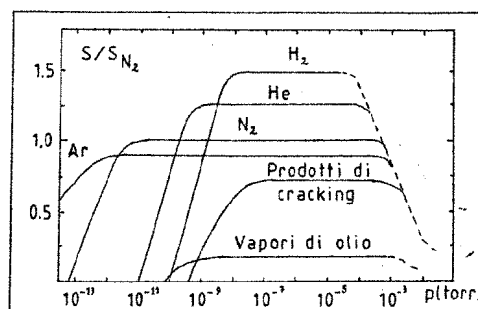
Mostriamo ora un tipico schema di pompa a diffusione a più stadi.





Essa consiste di un cilindro con una flangia superiore per il collegamento al recipiente da evacuare e con un fondo contenente una resistenza da fornello elettrico per produrre i vapori del fluido di pompaggio (negli attuali sistemi commerciali più diffusi si tratta di olio minerale particolare). La camicia esterna della pompa è raffreddata per circa due terzi della sua altezza con una serpentina in cui circola acqua. Una bocca d'uscita posta in prossimità del fondo permette di scaricare i gas a pressione più elevata verso la pompa rotativa.

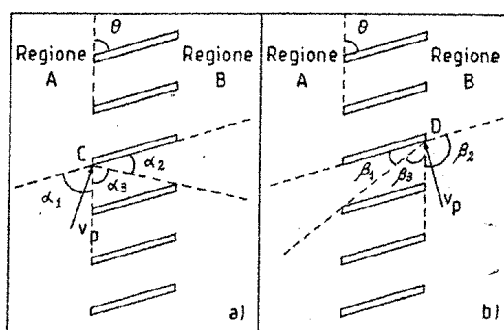
Sulla bocca di connessione al recipiente sul condotto sul condotto con la pompa meccanica sono poste trappole ben raffreddate (ad acqua o con freon o con azoto liquido) per evitare sia la diffusione del vapor d'olio nel recipiente da evacuare sia la diffusione del fluido nella pompa meccanica. La velocità di pompaggio in una pompa a diffusione varia con il tipo di gas: nel grafico seguente sull'asse verticale riportiamo le velocità di pompaggio per vari gas relative al caso dell'azoto. Notiamo che la pressione finale è determinata principalmente dalla tensione di vapore del fluido di pompaggio e più specificatamente dai prodotti che si formano attraverso il processo di rottura delle molecole del fluido stesso ("cracking").



## Le pompe turbomolecolari

In questi tipi di pompe le molecole dei gas sono trascinate verso la bocca di evacuazione da un sistema di palette (pompa turbomolecolare) posti in rapida rotazione. Nelle pompe turbomolecolari, disponibili commercialmente solo verso la fine degli anni 50, l'azione di trascinamento sulle molecole dei gas è esercitata da un sistema di palette opportunamente distanziate ed inclinate (rispetto alla direzione di moto) e poste in rapida rotazione all'interno di uno statore cilindrico. Per il loro funzionamento è necessario disporre di una pompa meccanica primaria che mantenga una pressione di  $10^{-1}$  Pa nella regione a pressione più elevata. Si ottengono così pressioni finali dell'ordine di  $10^{-7}$  Pa e la velocità di pompaggio presenta un andamento praticamente costante in tutto l'intervallo operativo.

Le molecole che si trovano nelle due regioni del volume della pompa turbomolecolare separate dal sistema di palette in moto, hanno probabilità diverse di diffondere nei due sensi, ciò provoca densità molecolari differenti nelle due regioni e quindi un gradiente di pressione. Ci si può rendere facilmente conto di questo se si considera il caso limite in cui la velocità  $v_p$  delle palette è notevolmente superiore alla velocità  $v_m$  delle molecole. In tale ipotesi, si possono studiare i processi di diffusione delle molecole considerando le palette ferme e le molecole in moto relativo rispetto alle palette. Per renderci meglio conto di ciò, facciamo riferimento alla figura.



Osserviamo lo schema di sinistra (a). Le molecole provenienti dalla regione A incidono sulla superficie delle palette in prossimità dello spigolo C ( $v_p > v_m$ ).

Le molecole, dopo l'urto con la parete delle palette sono diffuse in maniera omogenea in tutte le direzioni senza subire cioè una riflessione speculare. Quelle rimesse nell'angolo  $\alpha_1$  ritornano nella regione A di provenienza, quelle rimesse nell'angolo  $\alpha_2$  passano nella regione B, mentre quelle rimesse nell'angolo  $\alpha_3$  si ripartiscono tra le due regioni A e B in maniera simmetrica. Nella parte di sinistra della figura (b) osserviamo come le molecole che provengono dalla regione B incidono sulla superficie delle palette in prossimità dello spigolo D, cosicché quelle rimesse nell'angolo  $\beta_2$  ritornano nella regione di provenienza, quelle rimesse nell'angolo  $\beta_1$  passano nella regione A e quelle rimesse nell'angolo  $\beta_3$  si ripartiscono simmetricamente nelle due regioni. Da un confronto degli angoli si ricava che il processo, in cui le molecole provenienti dalla regione A passano nella regione B, ha una probabilità più elevata del processo inverso.

Proviamo a ricavare in che relazione siano le pressioni nelle due regioni ed il flusso di molecole con le probabilità di diffusione da un lato all'altro del sistema di palette in moto. Si indichi con  $f_{AB}$  la probabilità che una molecola proveniente dalla regione A giunga nella regione B ed analogamente con  $f_{BA}$  la probabilità del processo inverso e siano  $N_A$  ed  $N_B$  i flussi di molecole incidenti sulle palette dalle due regioni A e B.

Sia inoltre  $W$  il rapporto tra il flusso netto di molecole dalla regione A alla regione B ed il flusso incidente  $N_A$ . Si potrà scrivere:

$$N_A W = N_A f_{AB} - N_B f_{BA}$$

da cui si ricava:

$$N_B / N_A = (f_{AB} / f_{BA}) - (W / f_{BA})$$

Il rapporto ( $N_B / N_A$ ) è uguale al rapporto tra le densità molecolari nelle due regioni e quindi uguale al rapporto tra le pressioni  $p_B$  e  $p_A$  nelle due regioni. Questa relazione assume allora la forma:

$$p_B / p_A = (f_{AB} / f_{BA}) - (W / f_{BA})$$

Notiamo che il rapporto tra le pressioni decresce linearmente al crescere del flusso molecolare  $W$ . Per un flusso nullo ( $W = 0$ ) il rapporto tra le pressioni è dato da

$$p_B / p_A = (f_{AB} / f_{BA})$$

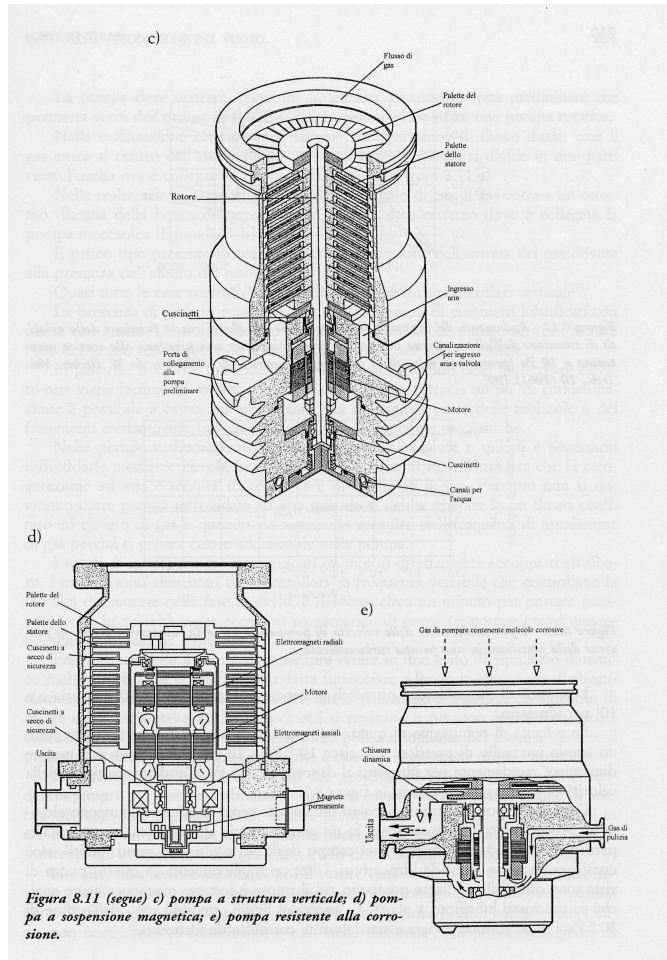
e per una differenza di pressione nulla ( $p_B = p_A$ ) il flusso di molecole è dato da:

$$W = f_{AB} - f_{BA}$$

Per avere un rapporto di pressione elevato ed un flusso netto elevato (requisiti base per una pompa da vuoto) è necessario massimizzare  $f_{AB}$  e minimizzare  $f_{BA}$ . Ciò è ottenibile agendo sull'angolo d'inclinazione delle palette e sul rapporto tra la distanza tra due palette successive  $h$  e la loro larghezza  $d$ . È facile rendersi conto che  $f_{AB}$  (proporzionale al rapporto  $\frac{\sin^2 \alpha}{\cos \alpha}$ ) aumenta al crescere di  $\alpha$ , angolo d'inclinazione delle palette, e del rapporto  $h/d$  mentre  $f_{BA}$  (proporzionale a  $\frac{\sin \alpha}{\cos^2 \alpha}$ ) diminuisce al diminuire dell'angolo  $\alpha$  e del rapporto  $h/d$ . Le due condizioni sono tra loro discordanti ed è quindi necessario trovare un compromesso sulla geometria delle palette.

Nelle pompe turbomolecolari moderne la velocità di rotazione delle palette è di decine di migliaia di giri al minuto e la velocità periferica raggiunge le centinaia di metri al secondo (tipicamente 300 - 400 m/s); disponendo più sistemi di palette in cascata si ottengono rapporti di pressione sino a  $10^6$ .

Concludiamo riportando in figura lo spaccato di una pompa turbo. Si tratta di un modello di pompa per applicazioni ove occorre assicurare l'assoluta assenza di agenti inquinanti del vuoto. Questo è ottenuto sospendendo l'asse di rotazione della pompa con cuscinetti magnetici che limitano l'attrito eliminando allo stesso tempo la necessità di lubrificare i cuscinetti utilizzati abitualmente.



### *Le pompe a getter e ioniche*

Queste pompe sono state sviluppate e commercializzate agli inizi degli anni 60. Esse sfruttano due processi distinti per evacuare le varie specie di gas presenti in un impianto a vuoto: l'adsorbimento chimico per i gas reattivi (ad esempio H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, CO<sub>2</sub>) e l'assorbimento per i gas nobili o poco reattivi (He, Ne, Ar, CH<sub>4</sub>... ).

Noi abbiamo già parlato nei paragrafi precedenti di “*Adsorbimento chimico*” dei gas reattivi (*gettering*). Qui ricordiamo come alcuni materiali come il titanio, lo zirconio ed il tantalio posseggono notevoli capacità di adsorbimento chimico a temperatura ambiente nei confronti del gas reattivi presenti nell'atmosfera. Il titanio è stato preferito per le applicazioni del vuoto a causa della relativamente alta tensione di vapore e della sua reattività chimica a largo spettro.

Nella pompa ionica una sorgente di titanio è riscaldata sino alla temperatura di sublimazione (1500 °C) in maniera che produca un deposito (film) di titanio altamente reattivo sulle pareti che circondano la sorgente. Le molecole dei gas attivi che incidono sul film di titanio reagiscono chimicamente formando composti stabili quali ossidi, idruri e nitruri di titanio: si ha così una efficace azione di pompaggio nei confronti di tali gas. Riportiamo in Tabella le reazioni chimiche per i vari gas di maggiore interesse per il vuoto.

<i>Reazioni chimiche di gas con il Titanio</i>
$H_2 + Ti \leftrightarrow TiH_2$
$N_2 + 2Ti \rightarrow 2 TiN$
$O_2 + Ti \rightarrow TiO_2$
$H_2O + 2Ti \rightarrow TiO + H_2O + Ti \rightarrow TiO + TiH_2$
$CO + Ti \rightarrow TiCO$
$CO_2 + Ti \rightarrow TiCO_2$

Come risulta dalla Tabella 3-VII la reazione dell'idrogeno con il titanio è indicata come reversibile ( $\leftrightarrow$ ) in quanto il composto TiH<sub>2</sub> è termicamente instabile. Gli idruri di titanio devono trovarsi a temperatura ambiente o a temperatura inferiore per limitare a valori accettabili le pressioni di equilibrio per il processo di dissociazione.

Negli impianti a vuoto il film di titanio è in grado di pompare i gas attivi per un tempo limitato (sino a quando la superficie del film non è saturata) e quindi si rendono necessarie frequenti deposizioni e, se la portata dei gas è elevata, è richiesta una deposizione continua di titanio.

Una stima della velocità di pompaggio, nel caso di film di titanio depositato con continuità, è data dalla relazione:

$$Q = s A C [1 + (s A C B G p / R)]^{-1}$$

dove  $s$  è il coefficiente di cattura per il gas in esame,  $A$  l'area coperta dal film di titanio (in cm<sup>2</sup>),  $B$  il numero di atomi di titanio consumati per adsorbire la molecola in esame,  $p$  la pressione parziale dei gas,  $R$  il numero di atomi di titanio depositati per secondo sulla superficie,  $C$  e  $G$  sono rispettivamente dati da:

$$C = 3.64 (T/M)^{1/2}$$

$$G = 9.63 \cdot 10^{21} (1/T)$$

essendo  $M$  il peso molecolare dei gas adsorbito e  $T$  la temperatura assoluta dei film di titanio. Ad esempio per  $H_2$  avremo valori di

$$M=2 \quad B=1 \quad s=0,04 \quad a \quad 77 \text{ K} \quad s=0.06 \quad a \quad 300 \text{ K},$$

mentre per il CO

$$M=28 \quad B=1 \quad s = 0.95 \quad a \quad 77 \text{ K} \quad s=0.7 \quad a \quad 300 \text{ K}.$$

A pressioni sufficientemente alte ( $p > 10^{-3}$  Pa), il secondo termine nel denominatore della precedente espressione di  $\square$  è molto più grande di 1, quindi si ha

$$\square \sim R / (B G p)$$

da cui risulta evidente che la velocità di pompaggio cresce al diminuire della pressione.

Al contrario, a pressioni sufficientemente basse ( $p < 10^{-5}$  Pa) si può trascurare il secondo termine rispetto all'unità, per cui la velocità di pompaggio tende al valore limite  $\square_l$ , indipendente dalla pressione,

$$\square_l = s A C$$

In alcuni tipi di pompe ioniche il pompaggio dei gas nobili e dei gas meno reattivi (ad esempio il metano) è attuato mediante ionizzazione delle molecole con un fascio di elettroni. Gli ioni del gas nobile, prodotti per ionizzazione, sono indirizzati da intensi campi elettrici sul film di titanio dove vengono intrappolati e successivamente ricoperti dal deposito di nuovi strati di titanio. Il fascio d'elettroni, prodotto con un procedimento analogo a quello utilizzato nei triodi di potenza e nelle valvole ad ionizzazione, ha un'efficienza di ionizzazione piuttosto limitata. Per questa ragione, come per i vacuometri a ionizzazione, si è preferito adottare il procedimento della scarica di tipo *Penning*, che risulta molto più efficiente dal punto di vista della ionizzazione dei gas.

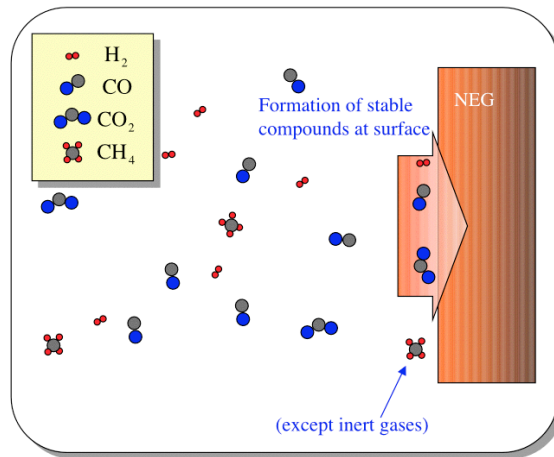
La pompa ionica in questo caso è costituita da un sistema di celle Penning adiacenti ed immerse in un campo magnetico diretto assialmente d'intensità 0.1 - 0.2 T. Le differenze di potenziale tra la struttura anodica e quella catodica possono variare tra 2 e 10 kV. La scarica si auto-sostiene attraverso la ionizzazione multipla dei gas residuo e attraverso l'estrazione d'elettroni dal catodo freddo che viene bombardato dagli ioni prodotti nella scarica stessa.

Gli ioni che incidono sul catodo con energie di parecchie decine di eV possono liberare, oltre agli elettroni, anche gli atomi superficiali del materiale (effetto "sputtering") e penetrare in profondità rimanendo intrappolati nel reticolo cristallino del catodo. Costruendo il catodo in titanio si ottiene, oltre all'assorbimento dei gas nobili ionizzati, la formazione continua di un film di titanio che provvede all'adsorbimento chimico dei gas reattivi.

Il processo di assorbimento dei gas nobili è in realtà più complesso in quanto, a causa dello *sputtering* che erode progressivamente il catodo, gli atomi imprigionati nel

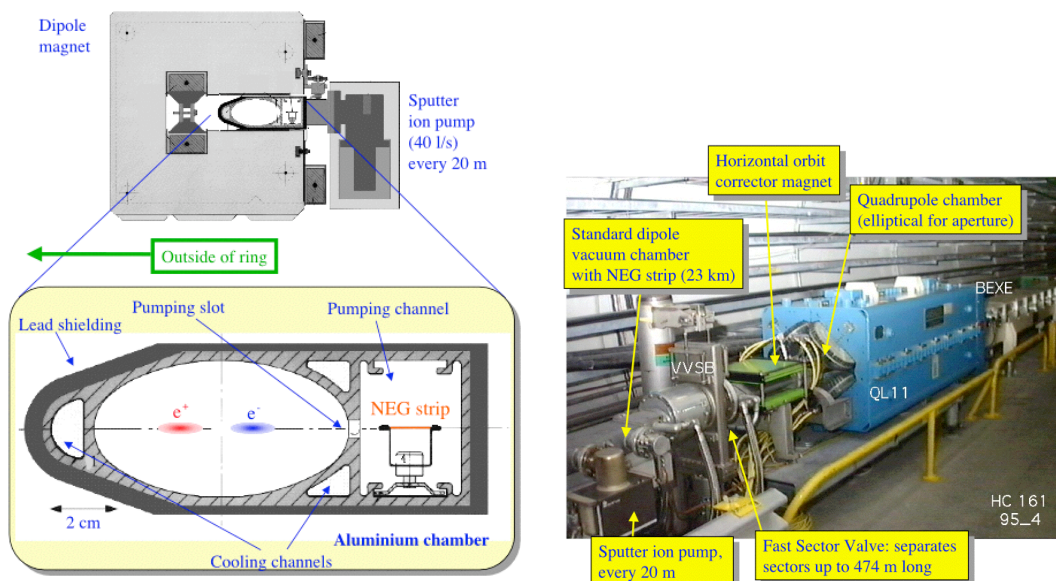
reticolo possono essere rimessi in circolazione. In pratica si studiano forme degli elettrodi e del catodo tali da ottimizzare il processo di assorbimento degli ioni. Prima di concludere dobbiamo sottolineare che anche le pompe ioniche hanno bisogno di una pompa ausiliaria che produca un vuoto primario compreso tra 1 e  $10^{-1}$  Pa, così da consentire alle pompe ioniche di arrivare a vuoti dell'ordine di  $10^{-7}$  Pa.

Uno dei successi più spettacolari delle pompe a getter è rappresentata dal raggiungimento delle condizioni di vuoto estremo nella ciambella di 27 km di lunghezza della macchina acceleratrice di particelle LEP (acronimo di Large Electron Positron collider) sita presso il CERN di Ginevra. In questo caso sono state usate delle pompe *getter* denominate NEG (Non Evaporated Getter). Si tratta di strisce di ZrAl (zirconio-alluminio) che formano composti stabili con i prodotti desorbiti dalle pareti d'alluminio della lunga camera da vuoto di LEP.



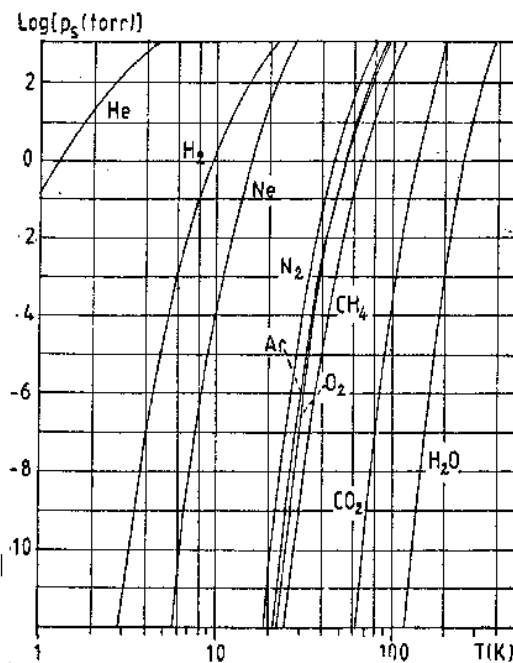
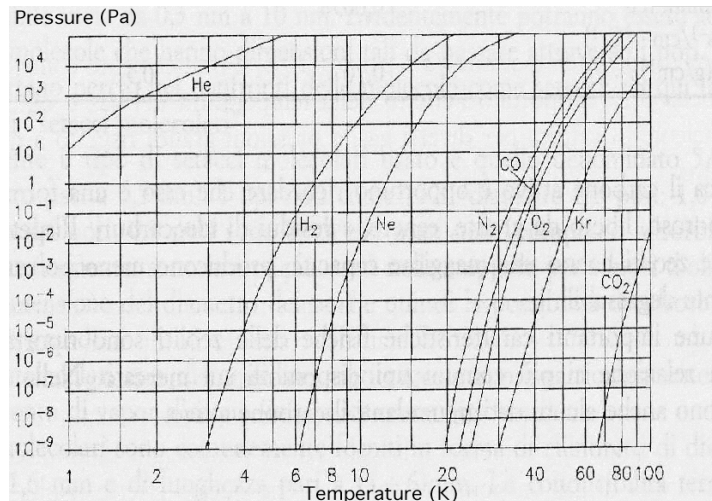
Quando la superficie del *getter* è saturata, può essere rigenerata scaldando il materiale così da consentire la diffusione del composto stabile all'interno della matrice solida del *getter*.

Per dare un'idea delle modalità di utilizzo di tali pompe, mostriamo infine lo schema in sezione della camera da vuoto di LEP (la ciambella di 27 km) e la foto di un settore della macchina acceleratrice completamente equipaggiata.



## Le pompe criogeniche

Come abbiamo già discusso nei paragrafi iniziali, una parete fredda esplica un'azione di pompaggio nei confronti di quei vapori o gas che hanno un'elevata temperatura d'ebollizione e presentano quindi una piccola tensione di vapore alla temperatura della parete fredda. Osserviamo i grafici in cui sono riportate le tensioni di vapore di vari elementi in funzione della temperatura  $T$ .



L'acqua ed il CO<sub>2</sub> raggiungono valori inferiori a  $10^{-9}$  torr ( $10^{-7}$  Pa) a 77 K, mentre per il metano (CH<sub>4</sub>), l'argon (Ar), l'azoto (N<sub>2</sub>) e l'ossido di carbonio (CO) occorre arrivare sino a 20 K per avere simili valori della tensione di vapore. Per il Neon (Ne) ciò è ottenuto a  $T \sim 7$  K, mentre l'idrogeno (H<sub>2</sub>) e l'elio (He) rappresentano il maggior problema.



Infatti l'idrogeno solidifica a temperature inferiori a quella d'ebollizione dell'elio liquido e quindi il suo crio-assorbimento viene ottenuto abbassando la temperatura della parete fredda sotto 4 K o sfruttando particolari meccanismi quali l'intrappolamento criogenico (*cryotrapping*) e l'assorbimento criogenico (*cryosorption*).

La solidificazione dell'elio non è osservabile scendendo semplicemente in temperatura e quindi la percentuale d'elio negli impianti deve essere abbassata utilizzando altri metodi.

È importante osservare che con le pompe criogeniche la pressione ultima di un gas è sempre superiore alla tensione di vapore saturo dei gas alla temperatura della parete fredda. Infatti, indicato con  $\square_C$  il coefficiente di condensazione delle molecole sulla parete fredda (tale coefficiente rappresenta la percentuale di molecole incidenti che rimane vincolata per condensazione alla parete fredda), con  $T_r$  la temperatura assoluta delle pareti del recipiente, il flusso delle molecole catturate sull'area  $A$  della parete fredda è dato da

$$\square_C = dN_C/dt = (1/4) \square_C A n v_m = (\square_C A p_r / 4kT_r) (8kT_r / \square M)^{1/2}$$

essendo  $n = p_r/kT_r$  la densità numerica delle molecole,  $v_m$  la velocità media delle molecole del gas,  $p_r$  la pressione del gas nel recipiente,  $M$  il suo peso molecolare e  $k$  la costante di Boltzmann. Si può dimostrare che, in condizioni stazionarie, il flusso di molecole del gas che vengono evaporate da una area  $A$  della parete fredda è dato da una espressione analoga

$$\square_e = dN_e/dt = (\square_e A p_s / 4kT_p) (8kT_p / \square M)^{1/2}$$

essendo  $T_p$  la temperatura assoluta della parete fredda,  $p_s$  la tensione di vapore saturo alla temperatura  $T_p$ . È ovvio che la pressione ultima  $p_f$  del gas in esame è raggiunta quando il flusso delle molecole catturate  $\square_C$  è pari al flusso di quelle evaporate,  $\square_e$ . Allora, ponendo  $\square_C = \square_e$ , si ricava dalle relazioni precedenti la pressione finale

$$p_f = p_s (T_r / T_p)^{1/2}$$

Poiché le pareti della camera a vuoto si trovano ad una temperatura  $T_r$  più elevata della temperatura  $T_p$  della parete fredda, la pressione ultima è sempre più elevata della tensione di vapore saturo del gas condensato. Si trova così che (assumendo  $T_r = 300$  K) la pressione, per le diverse temperature della parete fredda, ultima è data da:

$$p_f \sim 2 p_s (77 K)$$

$$p_f \sim 4 p_s (20 K)$$

$$p_f \sim 8.5 p_s (4.2 K)$$

Per determinare la velocità di pompaggio di una pompa criogenica è sufficiente tener presente che il flusso di molecole catturate effettivamente dalla parete fredda è dato da:

$$\dot{V} = \dot{V}_f (1 - \dot{V}_f / \dot{V}_p) = (1/4) \dot{V}_C A n v_m [1 - (p_s / p_f) (T_r / T_p)^{1/2}]$$

La velocità di pompaggio ( $\dot{V} = dV/dt = \dot{V}_f/n$ ) risulta quindi espressa da:

$$\dot{V} = (\dot{V}_C A / 4) (8kT_r / \pi M)^{1/2} [1 - (p_s / p_f) (T_r / T_p)^{1/2}]$$

La velocità di pompaggio tende a zero quando la pressione nella camera a vuoto si avvicina alla pressione ultima. Riportiamo qui alcuni valori di velocità di pompaggio massima per unità di superficie fredda a 77 K, ottenibili aspirando vari gas.

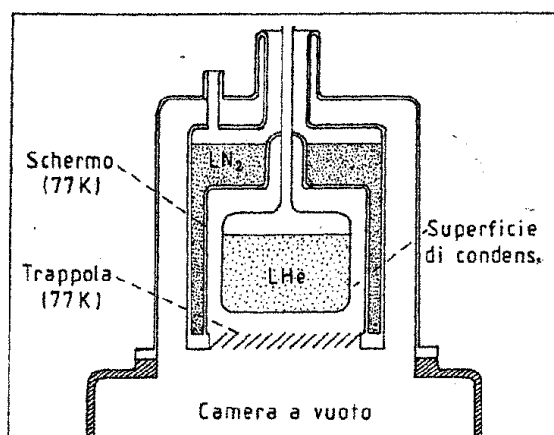
<i>Gas</i>	$\dot{V}/A [l s^{-1} m^{-2}]$
$H_2$	$2.3 \cdot 10^5$
$N_2$	$6.0 \cdot 10^4$
$Ar$	$5.1 \cdot 10^4$
$O_2$	$5.6 \cdot 10^4$
$H_2O$	$7.5 \cdot 10^4$
$CO_2$	$4.8 \cdot 10^4$
$CH_4$	$8.0 \cdot 10^4$
$Hg$	$2.3 \cdot 10^4$

In realtà, per valutare la velocità effettiva di pompaggio nel caso di pompe operanti alla temperatura dell'elio liquido, bisogna tener conto della presenza di uno schermo termico. Quest'ultimo è normalmente raffreddato con azoto liquido ed ha la funzione di ridurre la potenza d'irraggiamento termico incidente sulla parete fredda e di ridurre quindi il consumo di elio liquido. Tale schermo riduce la velocità effettiva di pompaggio sia attraverso una diminuzione della conduttanza sia attraverso una riduzione della velocità media delle molecole e quindi del loro flusso.

La quantità di gas che può essere pompata da una parete fredda è limitata dal fatto che lo spessore di solido depositato sulla parete riduce progressivamente l'efficacia di pompaggio. Per comprendere come ciò si produca è sufficiente tener presente che la temperatura della superficie libera del solido si discosta sempre di più da quella della parete fredda al crescere dello spessore della sostanza condensata. Questo è dovuto al fatto che la potenza depositata sulla superficie libera del solido (irraggiamento da parte delle pareti del recipiente o dello schermo ed energia termica delle molecole catturate) deve essere evacuata attraverso lo strato solido che possiede una conducibilità termica generalmente abbastanza piccola.

Per questa ragione la pompa criogenica deve essere attivata soltanto dopo aver effettuato un pre-vuoto nel recipiente (tipicamente  $10^{-1}$  Pa) con un'altra pompa e deve essere periodicamente rigenerata. La rigenerazione consiste nell'isolare la pompa dal recipiente da evacuare e nel portare la superficie fredda a temperatura ambiente in maniera che lo strato solido evapori ed i vapori che ne risultano vengano evacuati da una pompa meccanica.

La pompa criogenica può essere realizzata utilizzando come elemento refrigerante un bagno di liquido ( $N_2$ ,  $H_2$ ,  $He$ ) oppure un gas freddo (in genere  $He$ ) che viene fatto circolare in maniera continua. Mostriamo uno schema di pompa a bagno che è più semplice da realizzare e molto meno costosa.



La parete del recipiente più interno, riempito con elio liquido serve come superficie di condensazione. Per limitare il consumo di elio liquido il recipiente è circondato da uno schermo raffreddato con azoto liquido che riduce, come si è detto precedentemente, la velocità di pompaggio ma agisce come pompa criogenica dei gas o vapori che hanno una elevata temperatura di ebollizione (ad esempio CO<sub>2</sub>).

I vantaggi offerti da una pompa criogenica sono rappresentati da elevate velocità di pompaggio (alcune migliaia di l/s) ottenute con dimensioni della pompa abbastanza contenute, dalla possibilità di sagomare la superficie di condensazione secondo le esigenze sperimentali, dall'assenza di vibrazioni (nel caso delle pompe criogeniche a bagno). Gli svantaggi sono rappresentati dalla ridotta autonomia (necessità di rabboccare i liquidi criogenici evaporati e necessità di rigenerare la superficie fredda in maniera periodica), dalla scarsa attitudine a pompare l'idrogeno, dall'impossibilità di pompare l'elio.

Nelle pompe a flusso continuo di gas, la superficie fredda è uno scambiatore di calore in cui evapora tipicamente dell'elio liquido pompato continuamente in esso.

In anni recenti si sono diffuse attualmente criopompe in cui la parete fredda è realizzata sfruttando la potenza refrigerante prodotta da criogeneratori. Si tratta di macchine termiche che funzionano generalmente secondo un ciclo di Stirling semplificato che viene chiamato Gifford-McMahon. Hanno bisogno di un robusto compressore di elio che arriva a pressioni dell'ordine di un centinaio di atmosfere, connesso alla macchina termica tramite conduttanze flessibili di acciaio inox.

Per talune applicazioni il limite principale di questa soluzione è rappresentato dalle vibrazioni associate al compressore.

## BIBLIOGRAFIA

- 1) M. W. Zemansky, *Calore e Termodinamica*, Zanichelli (1970)
- 2) E. Fermi, *Termodinamica*, Boringhieri (1972)
- 3) P. Fleury, J. P. Mathieu *Calore, Termodinamica Stati della Materia*, Zanichelli (1968)
- 4) C. Mencuccini, V. Silvestrini, *Fisica I - Meccanica e Termodinamica*, Liguori Editore – Napoli (1987)
- 5) A. Roth, *Vacuum technology*, Elsevier North Holland Inc. (1978)
- 6) A. Guthrie, *Vacuum Technology*, John Wiley & Sons (1963)
- 7) M. Bertolotti, T. Papa, D. Sette, *Metodi d'Osservazione e Misure*, Virgilio Veschi Editore - Roma (1968)
- 8) E. Acerbi, *Metodi e Strumenti di Misura*, CittàStudi Edizioni s.r.l. – Milano (1999)
- 9) B. Ferrario, *Introduzione alla Tecnologia del Vuoto*, edizione riveduta da A. Calcatelli, Patron Editore – Bologna (1999)