



*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 II*

*Fulvio Ricci*

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



## INDICE

### LA MISURA DELLA PRESSIONE NEGLI IMPIANTI DA VUOTO

*Barometri*

*Misuratori di basse pressioni*

*Manometri a diaframma*

*Manometri differenziali*

*Vacuometri di McLeod*

*I vacuometri a conducibilità termica*

*Vacuometro a scarica*

*Vacuometri a ionizzazione*

### BIBLIOGRAFIA

## LA MISURA DELLA PRESSIONE NEGLI IMPIANTI DA VUOTO.

Esistono decine di metodi e di dispositivi atti a misurare la pressione residua ma soltanto pochi di questi sono largamente utilizzati. Gli strumenti che misurano direttamente la pressione, sono detti genericamente *manometri*. Essi possono distinguersi in strumenti atti a misurare il valore assoluto della pressione, *manometri assoluti*, o la differenza di pressione tra due punti o due ambienti specifici, *manometri differenziali*.

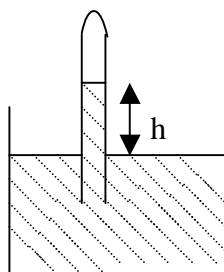
Vediamo innanzitutto di presentare quei *manometri assoluti* che misurano la pressione nell'intorno di quella tipica dell'atmosfera terrestre: tali strumenti sono detti *barometri*.

### *Barometri*

Il barometro più semplice è mostrato in figura. In linea di principio è sufficiente rovesciare un tubo pieno di liquido in modo che la sua apertura risulti immersa nel liquido del contenitore a più grande sezione. L'altezza del liquido nel tubo rovesciato da una misura della pressione  $p$  esercitata dal gas sulla superficie del contenitore più grande. Infatti per la legge di Stevino avremo

$$p = \rho gh$$

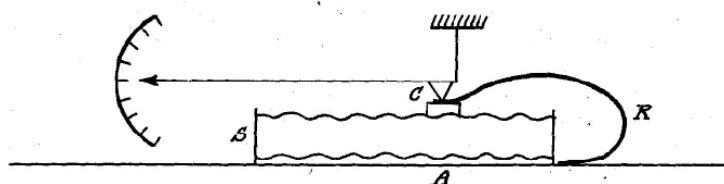
dove  $\rho$  è la densità del liquido  $h$  la sua altezza e  $g$  l'accelerazione di gravità.



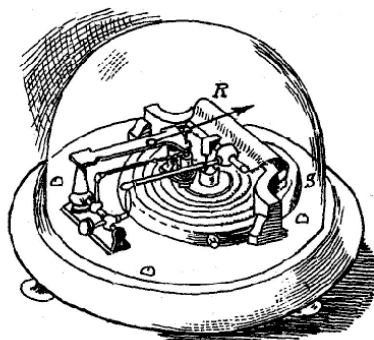
Affinché si possa dedurre  $p$  dalla misura di  $h$  occorre conoscere  $g$  e  $\rho$ . Si noti che queste quantità non sono costanti: la prima varia con la latitudine mentre la seconda è funzione della temperatura. Inoltre in linea di principio occorre correggere le misure per l'effetto della pressione residua di gas intrappolato nella parte alta del tubo rovesciato.

Il manometro assoluto meccanico più comune è il *barometro aneroide*: il principio su cui si basa è quello di contrapporre una forza elastica alle forze di pressione. Nella sua versione più semplice (vedi figura) è una scatola d'acciaio (S) sottile in cui si è praticato il vuoto. Si tratta di un cilindro basso a base larga ed a pareti ondulate onde aumentare la superficie esposta. Una robusta molla (R) connessa al cilindro evita che quest'ultimo si schiacci per effetto della forza dovuta alla pressione atmosferica. Una base della scatola è fissata al supporto dello strumento (A), così che ad ogni variazione della pressione atmosferica la scatola si espande o si

contrae. Un sistema di leve (C) amplifica tali variazioni dimensionali e le trasforma in rotazioni di un indice su una scala graduata.



Lo strumento va tarato mediante confronto con un barometro assoluto a liquido di mercurio ponendo ambedue i barometri sotto una campana da vuoto in cui si varia la pressione con l'ausilio di una pompa. La sensibilità può raggiungere 10 Pa ( $\sim 0.1$  mmHg), la precisione raramente raggiunge 100 Pa ( $\sim 1$  mmHg). I barometri possono anche servire per misurare l'altezza sul livello del mare (altimetri) poiché la pressione atmosferica varia con l'altezza. Riportiamo anche un disegno artistico che raffigura un barometro assoluto basato su questo principio: si tratta di un misuratore particolarmente diffuso in commercio reperibile nei negozi che vendono articoli inerenti alla meteorologia.



### *Misuratori di basse pressioni*

Gli strumenti che misurano pressioni inferiori a quella atmosferica sono denominati vacuometri. Poiché si tratta di coprire un vastissimo intervallo di pressioni che va da  $10^5$  a  $10^{-9}$  Pa, occorre concepire strumenti di natura diversa, basati cioè su differenti proprietà dei gas rarefatti, per coprire questo intervallo di pressione di quattordici ordini di grandezza. Generalmente possiamo affermare che lo strumento di misura risulta tanto più complesso quanto più il gas è rarefatto e, tipicamente esso viene utilizzato in un definito intervallo di pressione caratteristico dello specifico vacuometro, al di fuori del quale lo strumento non fornisce valori significativi.

I vari tipi di vacuometri possono essere raggruppati sia sulla base dell'intervallo di pressione in cui operano, sia secondo il criterio del principio fisico su cui si basa lo strumento. Noi abbiamo già presentato i barometri, misuratori di pressione basati sulla misura diretta della forza di pressione. Esistono in effetti analoghi vacuometri basati sullo stesso principio. Altri determinano la pressione mediante la misura di alcune proprietà fisiche dei gas residui nel recipiente in cui è praticato il vuoto, come la viscosità, la conducibilità elettrica, o mediante l'applicazione della equazione caratteristica dei gas. Infine, per intervalli di pressione

particolarmente bassi, esistono strumenti basati sulla misura delle corrente elettrica associata al gas residuo ionizzato.

Vediamo allora una tabella riassunta di vacuometri, classificati secondo il principio fisico alla base del loro funzionamento.

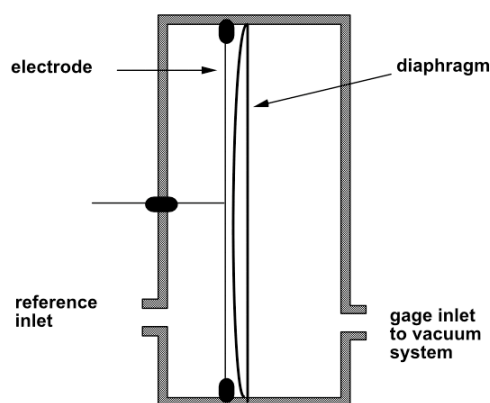
<i>Vacuometri basati sulla misura di una forza</i>	<i>Vacuometri a conducibilità termica</i>	<i>Vacuometri a ionizzazione</i>
Manometro a tubo ad U Vacuometro McLeod Vacuometro Bourbon Manometro capacitivo Manometro piezo-resistivo	Pirani Termocoppia	Vacuometri a scarica Vacuometri a catodo caldo Vacuometri a catodo freddo

Questa tabella è ben lontana dall'essere esaustiva dei tipi di vacuometri esistenti, tuttavia cerca di racchiudere quelli più comunemente utilizzati. Vediamo di descrivere nel seguito il principio di funzionamento della maggior parte di essi.

### *Vacuometri a diaframma*

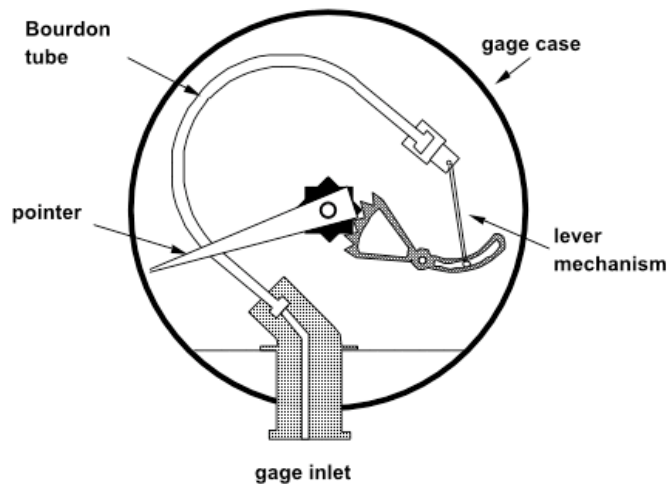
I misuratori di pressione, basati sull'effetto di deformazione meccanica della parete sottile di un recipiente a tenuta d'aria, hanno subito una evoluzione legata allo sviluppo della tecnologia. Il *vacuometro capacitivo a diaframma* è basato sullo stesso principio del *barometro aneroid*e ed in aggiunta sfrutta la variazione di capacità elettrica di un condensatore per misurare gli spostamenti della parete sottile della scatola (diaframma) che si deforma quando la pressione esterna alla scatola a tenuta è diversa da quella interna.

**Capacitance Diaphragm Gauge**



Il manometro Bourbon è costituito da un involucro a tenuta di vuoto con una parete costruita di materiale trasparente che consente di trapiandare una scala graduata ed un indice. L'elemento fondamentale dello strumento è un tubicino di materiale metallico che si deforma elasticamente sotto l'azione della differenza di pressione che si viene a creare tra l'interno del tubo e il recipiente a tenuta che lo contiene. Il tubetto è curvo ed uno dei suoi estremi è connesso, tramite un sistema di leve, all'indice che scorre sulla scala graduata. Sotto l'effetto della differenza di

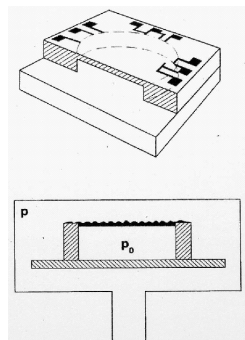
pressione tra l'esterno e l'interno del tubo, il tubo si deforma e la deflessione della sua parte terminale è trasformata in moto di rotazione dell'indice dall'apposito sistema di leve. I manometri Bourbon sono molto utilizzati in ragione del loro basso costo.



Una variante del manometro Bourbon è quello di Blondelle dove il tubicino è corrugato per aumentare l'elasticità e la superficie che risente della differenza di pressione, e quindi la sensibilità dello strumento.

Esistono dei Bourbon piccoli, con il diametro della scatola cilindrica esterna dell'ordine di 5 cm, che possono funzionare da pressione atmosferica ( $10^5$  Pa) sino a 10 mbar ( $10^3$  Pa). Quelli più grandi e più costosi, con un diametro dell'ordine dei 25 cm, arrivano a coprire sino ad 1 mbar ( $10^2$  Pa).

Infine dobbiamo necessariamente ricordare che con l'avvento della miniaturizzazione sono stati sviluppati dei sensori piezo-resistivi robusti ed a basso costo. Un piccolo volume pressurizzato a bassa pressione è chiuso a tenuta da un diaframma; su di esso è depositato il materiale piezo-resistivo in modo da formare un ponte di Wheatstone di resistenze (vedi oltre quando parleremo dei vacuometri Pirani).



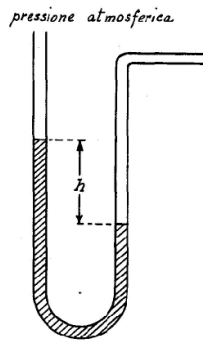
Il materiale piezo-resistivo ha la proprietà che, se sottoposto a sforzo meccanico, cambia la sua resistività elettrica. Con le tecniche di costruzione dei componenti elettronici si riesce allora ad integrare in un solo chip questo piccolo sensore di pressione con l'elettronica di rivelazione, ottenendo uno strumento robusto ed a basso costo.

### ***Manometri differenziali a tubo ad U.***

Un esempio di manometro differenziale è il manometro ad aria libera. Esso misura la differenza di pressione fra un determinato ambiente e l'atmosfera, e

schematicamente si rappresenta come un tubo ad U riempito di un liquido di densità nota (ad es. mercurio), i cui estremi sono uno in comunicazione con l'ambiente a pressione incognita e l'altro con l'aria. La differenza di pressione è proporzionale al dislivello  $h$  del liquido fra i due rami.

$$\Delta p = \Delta \rho gh$$



### Vacuometri di McLeod

Nella figura I riportiamo lo schema generale del vacuometro di McLeod; nella figura accanto (II) vi è un doppio ingrandimento della parte dello strumento cruciale ai fini della misura. Questo vacuometro viene in genere adoperato per la misura assoluta di basse pressioni. Il principio di funzionamento dello strumento è molto semplice: esso si basa sulla compressione isoterma di un dato volume di gas che da una pressione  $p_1$ , ed un volume  $V_1$  iniziali passa ad una pressione  $p_2$  ed un volume  $V_2$  finali. Dalla conoscenza della pressione finale e dei volumi in gioco è possibile ricavare, mediante la legge di Boyle, la pressione incognita.

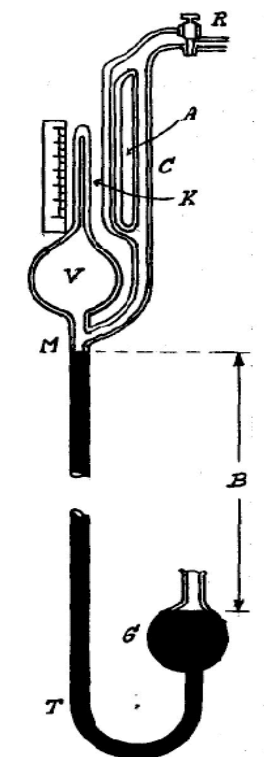


Fig. I

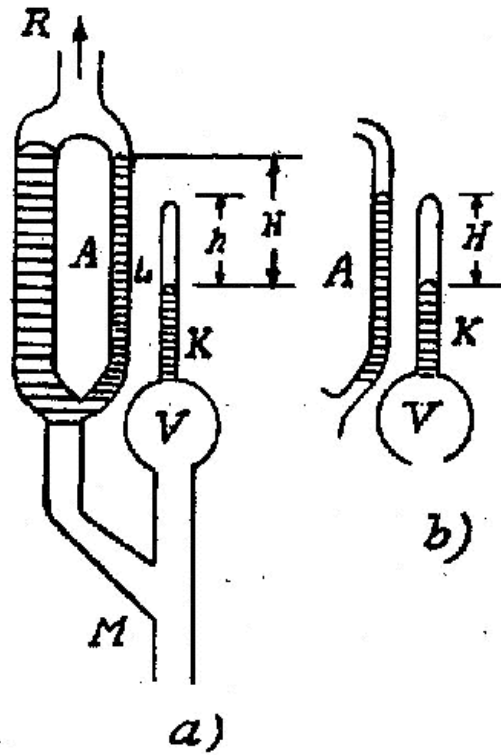


Fig. II

Il sistema è costruito in vetro e si biforca nel punto M (vedi figura I) in due rami. Uno di questi porta ad un bulbo V, di volume noto, a cui è saldato un capillare K di sezione costante chiuso alla sommità. L'altro ramo è costituito da un tubo C che comunica attraverso R col recipiente nel quale si vuole misurare la pressione. Al tubo C è saldato in parallelo un capillare A affiancato al primo (K) di uguale diametro per compensare nella lettura (vedi oltre) gli effetti di differenza di pressione che insorgono alla superficie di un liquido per effetto della capillarità. La parte al di sotto di M e collegata, per mezzo di un tubo flessibile T ad un recipiente G contenente mercurio.

Per eseguire una misura di pressione si procede come segue:

- a) Inizialmente il recipiente G è abbassato in modo che il mercurio sia ai di sotto di M. L'altezza B del mercurio è circa 760 mm. Il gas in V è alla stessa pressione del recipiente in cui si vuole misurare la pressione.
- b) Il livello del recipiente G viene poi alzato. In tal modo il mercurio sale, supera il punto M e invade i due rami isolando il gas che si trovava in V.
- c) Continuiamo ad alzare G finché il mercurio non abbia invaso tutto il volume V e non sia salito parzialmente anche nel capillare K comprimendo in esso il gas. A questo punto la pressione dei gas nel capillare K è sufficientemente elevata per produrre una sensibile differenza di altezza fra i due menischi di mercurio nei due capillari A e K. Il rapporto tra il volume del gas che occupava inizialmente il bulbo V e quando è confinato nel capillare è in genere dell'ordine di  $10^5$ ; questo corrisponde ad un pari aumento di pressione nel capillare.

Si può ora procedere alla misura in due modi diversi.

1) Vediamo ora il primo metodo.

Si alza G fino a che il mercurio salga in K fino ad un livello L prestabilito (vedi figura II a). Applicando la legge di Boyle se  $p_1$  e  $V_1$  sono rispettivamente la pressione iniziale del gas in V (che è anche la pressione che si vuol misurare) ed il volume di questo e del capillare e  $p_2$  e  $V_2$  sono la pressione ed il volume finali si ha

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

La pressione  $p_2$  è

$$p_2 = p_1 + \rho g H$$

dove  $H$  è il dislivello fra le altezze del mercurio nei capillari A e K,  $\rho$  è la densità del mercurio e  $g$  l'accelerazione di gravità. Notiamo come alla quantità  $(\rho g H)$  si aggiunga  $p_1$  perché questa è la pressione sopra il mercurio in A. Se  $h$  è l'altezza del capillare K non invasa dal mercurio e  $\sigma$  la sua sezione, il volume  $V_2$  è

$$V_2 = h \sigma$$

Essendo  $p_1 \ll \rho g H$ , si può inoltre porre:

$$p_2 \sim \rho g H$$

Risulta quindi

$$p_1 = \rho g H h [\sigma / V_1]$$



2) Il secondo metodo per eseguire la misura consiste nell'alzare G fino a che il mercurio salga in A al livello che corrisponde all'estremo superiore del capillare K (vedi figura II b). Si misura quindi il valore  $H$  della differenza di altezza fra i due menischi. Applicando ancora la legge di Boyle

$$p_1 V_1 = H \rho (p_1 + \rho g H)$$

se  $p_1 \ll \rho g H$  si ottiene:

$$p_1 = \rho g H^2 [\rho / V_1]$$

Se il vacuometro viene usato nel primo modo la pressione, come si vede facilmente dalla relazione ricavata precedentemente ha un andamento lineare in  $H$ . Nel secondo modo la pressione ha un andamento quadratico in  $H$ ; ne risulta una scala notevolmente dilatata al decrescere della pressione. Quindi è certamente più conveniente applicare il secondo metodo quando si debbano misurare basse pressioni. In entrambi i casi il fattore da cui dipende l'intervallo di pressioni entro cui il dispositivo può eseguire misure è  $(\rho / V_1)$ . (Valori tipici per  $V$  e per i diametri dei capillari A e K sono  $\sim 500 \text{ cm}^3$  e  $\sim 0.5 \text{ mm}$ ).

Il vacuometro di McLeod è uno strumento assoluto. Il suo uso è particolarmente delicato e si possono introdurre errori sistematici nella misura. Vediamo di elencare alcuni di questi problemi:

- 1) Nel recipiente in cui si vuoi misurare la pressione sono immessi vapori di mercurio la cui pressione può falsare la misura
- 2) Il vacuometro non misura correttamente la pressione dei vapori che non obbediscono alla legge di Boyle.
- 3) Nell'uso di questo vacuometro occorre prestare particolare attenzione a non alzare G troppo in fretta alterando così la condizione di isotermità della trasformazione del gas. (Si tenga conto anche che un'operazione troppo rapida può causare anche la rottura del bulbo contenente il mercurio).
- 4) Si deve evitare di introdurre aria nel sistema da vuoto se il mercurio non è completamente uscito da V: l'introduzione di aria avrebbe lo stesso risultato di un troppo brusco innalzamento del serbatoio.

### ***I vacuometri a conducibilità termica.***

I risultati ottenuti mediante la applicazione della teoria cinetica dei gas mostrano che la conducibilità termica  $K$  dei gas (tipicamente espressa in  $\text{W cm}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) a pressioni superiori di 100 Pa ( $\sim 1 \text{ mmHg}$ ), è indipendente dalla pressione del gas. Essa è

$$K = \frac{1}{3} \bar{c} C_V$$

in cui  $\bar{c}$  è un coefficiente compreso tra 1 e 1,25 caratteristico del gas,  $C_V$  è il calore specifico a volume costante ed  $\frac{1}{3}$  è il coefficiente di viscosità.

Quando la pressione dei gas è inferiore ad 100 Pa, o per meglio dire compresa in un intervallo da  $10^2$  a  $10^{-2}$  Pa, si trova che la conducibilità termica diminuisce linearmente con la pressione. In queste condizioni Knudsen ha ricavato la quantità di calore per unità di superficie  $W$  ( $\text{W/cm}^2$ ) che passa per conduzione molecolare

attraverso un gas a pressione  $p$  posto tra due superfici unitarie a temperatura  $T_2$  e  $T_1$ , con  $T_2 > T_1$  :

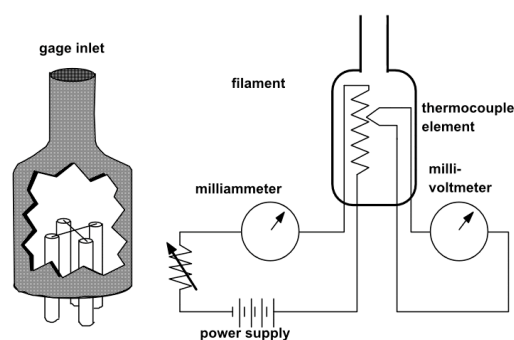
$$W = (\pi/4) (2R/\pi M)^{1/2} [(\gamma+1)/(\gamma-1)] \{ (T_2-T_1) / T_1^{1/2} \} p$$

dove  $\gamma = C_p / C_v$  è il rapporto tra i calori specifici a pressione costante  $C_p$  ed a volume costante  $C_v$  del gas,  $R$  è la costante dei gas,  $M$  il peso molecolare del gas ed  $\pi$  una costante che dipende dalla geometria del sistema.

Dalla relazione precedente si rileva come le perdite di calore per conduzione molecolare nei gas dipendano dalla loro natura ( $M$ ) e dalla pressione  $p$ . Questa circostanza permette di costruire vacuometri in cui la variazione di una grandezza misurabile direttamente, legata alla conducibilità termica del gas, può essere correlata alla variazione di pressione.

Il vacuometro a conducibilità termica è costituito da un contenitore foggato in modo che possa essere collegato al sistema in cui si vuole misurare la pressione. In esso è posto un filamento di metallo avente un elevato coefficiente di temperatura per la resistenza elettrica (in genere si usa platino o tungsteno). Il filamento è attraversato da una corrente opportuna e si scalda per effetto Joule, ma non è portato all'incandescenza per mantenere trascurabili le perdite di calore per irraggiamento. Per questa ragione occorre mantenere bassa la temperatura del filamento ( $\sim 100^\circ\text{C}$ ). Trascurato l'irraggiamento, il calore si può trasmettere attraverso i conduttori necessari al collegamento elettrico ed attraverso il gas. Per minimizzare la prima causa citata di trasmissione del calore si utilizzano conduttori sottili; in tal modo la temperatura del filamento dipende essenzialmente dalla quantità di calore che viene scambiata con il gas. La temperatura di regime del filamento, e quindi anche la sua resistenza elettrica, dipendono dalle perdite di calore del filamento stesso. In questo modo la misura della pressione è ottenibile sia da una misura diretta della temperatura del filamento che dalla misura della variazione della sua resistenza elettrica.

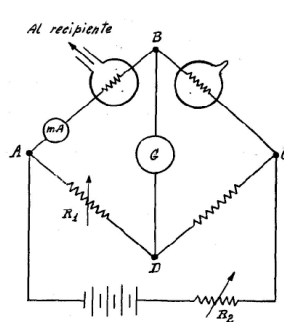
Lo strumento concettualmente più semplice basato sulla misura della conducibilità termica del gas è il vacuometro *a termocoppia*. Un filamento elettrico è posto in un recipiente da vuoto ed in esso viene fatta scorrere una corrente elettrica mantenuta costante nel tempo. Una termocoppia, oggetto atto a misurare la temperatura, viene saldata in un punto del filamento. Non appena la pressione del gas nel recipiente cambia, cambia anche il numero di molecole che urta contro il filamento e ne consegue un cambiamento di temperatura direttamente misurato dalla termocoppia. Poiché l'efficienza dello scambio termico tra molecole del gas e filamento dipende dalla natura del gas, la risposta che da questo tipo di strumento cambia a seconda del tipo di gas considerato.



In figura è riportato un disegno artistico di una vacuometro a termocoppia e lo schema che riassume il principio di funzionamento con il relativo circuito di controllo. Questo vacuometro funziona correttamente nell'intervallo di pressioni che va da 1 sino a  $10^{-3}$  mbar (  $100 - 10^{-1}$  Pa). Si tratta di strumenti largamente usati in ambito industriale, grazie al loro basso costo, alle piccole dimensioni e alla facilità di installazione. Il loro limite è rappresentato dal lento tempo di risposta del sensore alle variazioni di pressione. Che li rende inadatti ad essere utilizzati nei sistemi di controllo in linea dei recipienti da vuoto.

Nel caso del vacuometro *Pirani* il filamento viene inserito in un ponte di Wheatstone, che può essere configurato nei seguenti due modi:

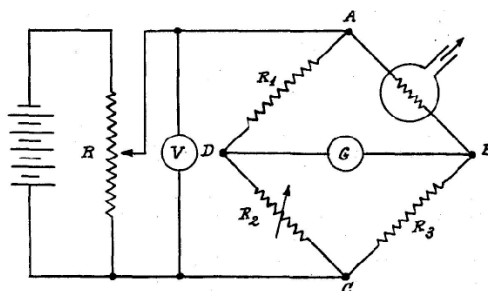
- 1) si fa passare nel filamento una corrente costante,
- 2) si mantiene costante la resistenza del filamento.



La figura mostra lo schema di montaggio del Pirani nel primo modo come ramo AB di un ponte di Wheatstone. Nel ramo adiacente BC viene montata un contenitore identico chiuso in precedenza a pressione bassissima (  $10^{-4}$  Pa).

Lo scopo di questo secondo filamento è quello di ottenere a basse pressioni, resistenze approssimativamente uguali nei rami adiacenti AB e BC del ponte in modo che questo lavori in condizioni di massima sensibilità. La resistenza variabile nel ramo AD serve all'azzeramento del ponte. Una volta che il ponte è stato azzerato ad una certa pressione, per esempio  $10^{-4}$  Pa, con l'aumentare della pressione, la resistenza del filamento diminuisce. In queste condizioni il galvanometro segnerà una certa corrente di sbilanciamento. Avendo cura di mantenere costante la corrente che circola nel filamento dei Pirani mediante la resistenza variabile  $R_2$ , la deviazione del galvanometro risulterà univocamente legata alla variazione di resistenza del filamento per effetto della variazione di pressione. Con questo procedimento si può tarare direttamente la scala del galvanometro adoperando per confronto il vacuometro di McLeod.

Il modo d'impiego nel caso 2) è illustrato nella figura successiva.



$R_1, R_2, R_3$  sono tre resistenze il cui valore non varia sensibilmente al variare della corrente che le attraversa, la quale peraltro è sempre dell'ordine di alcune decine di milliamperes. Una di esse, per esempio  $R_2$ , consente di azzerare il ponte in corrispondenza ad una opportuna condizione di riferimento e in seguito non va più variata. Mediante il potenziometro B si può variare la differenza di potenziale elettrico (d.d.p.) applicata al ponte in modo che la temperatura del filamento del Pirani e quindi la sua resistenza, si mantenga sempre costante. Se l'equilibrio del ponte si verifica in corrispondenza ad una certa pressione  $p$  del gas e ad un certo valore della d.d.p. letta sul voltmetro  $V$ , la potenza  $P$  dissipata nel filamento del Pirani è data da

$$P = a V^2 = b T + c p$$

in cui  $a, b, c$  sono costanti opportune. Il termine  $bT$  tiene conto dell'energia dissipata nell'unità di tempo dal filamento a temperatura  $T$  attraverso i collegamenti elettrici.

Supponendo ora di azzerare il ponte agendo su R, a pressione estremamente bassa per cui il termine  $cp$  sia trascurabile, l'energia dissipata risulta:

$$P_o = a V_o^2 = b T$$

Combinando le due equazioni precedenti otteniamo

$$(V^2 - V_o^2)/V_o^2 = c p / b T$$

Cioè il rapporto  $(V^2 - V_o^2)/V_o^2$ , nei limiti di pressione indicati precedentemente, risulta una funzione lineare di  $p$ .

Anche in questo caso il Pirani va calibrato con un McLeod. Il vacuometro di Pirani presenta molti vantaggi tra cui la leggerezza e la praticità d'impiego; però va tarato per ogni gas e la sua precisione in genere non è superiore al 5%.

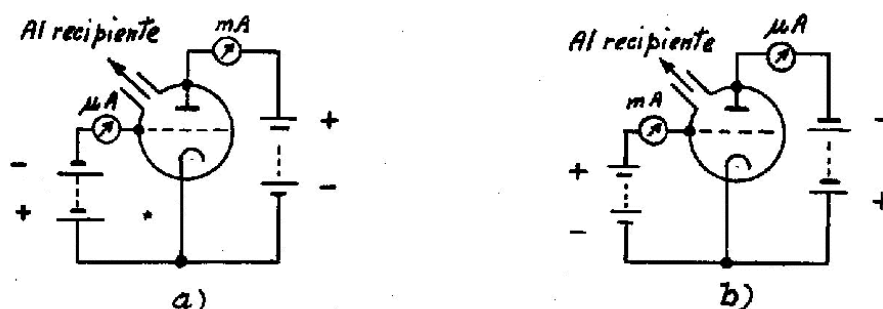
### ***Vacuometro a scarica***

Un metodo molto approssimativo per stimare la pressione di un gas è quello di esaminare la forma ed il colore di una scarica prodotta attraverso il gas nel recipiente in misura nelle vicinanze di una parete trasparente. A tale scopo si usa una bobina di Tesla: si tratta di un trasformatore avente un secondario formato da una bobina con un numero notevole di spire. Il primario è accoppiata ad una bobina nella quale la corrente fornita da un generatore viene ritmicamente interrotta. In maniera analoga a quanto accade in un rocchetto di Ruhm-korff, ai capi della bobina di Tesla si hanno delle tensioni impulsive di valore elevato (10.000 Volt) e di alta frequenza. Uno dei capi è messo a massa, l'altro è connesso con una punta P che viene disposta vicino alla parete *non elettricamente conduttrice* del recipiente. Il campo elettrico nel gas rarefatto produce una scarica nel recipiente con differenti tipologie a seconda del valore della pressione. Questo è riassunto nella tabella seguente.

Aspetto della scarica	Pressione (Pa)
Non si ha scarica	> 2000
Scarica a forma di sottili filamenti luminosi che si allargano al diminuire della pressione	100 - 2000
La scarica riempie la sezione del tubo	<100
La scarica diventa sempre piu' debole e si ha fluorescenza alle pareti del tubo	10
Non si ha scarica	< 10 <sup>-1</sup>

### I vacuometri a ionizzazione

I vacuometri a ionizzazione sono costruiti basandosi sul fatto che se un gas viene opportunamente ionizzato, il numero di ioni positivi prodotti nel gas dipende dal numero di molecole presenti e quindi dalla pressione del gas considerato. In figura riportiamo un vecchio tipo di vacuometro a ionizzazione il cui funzionamento è di più immediata comprensione. Esso è costituito da un'ampolla di vetro (la versione moderna prevede l'uso di contenitori metallici) che si può collegare opportunamente al recipiente in cui si deve misurare la pressione. Nell'ampolla vi sono tre elettrodi: un filamento, il collettore di ioni ed il collettore d'elettroni.



Gli elettroni sono emessi dal filamento incandescente e sono accelerati verso il corrispondente elettrodo collettore (anodo) sotto l'azione di una differenza di potenziale opportuna. Alcuni elettroni urtano le molecole dei gas e, se hanno energia sufficiente, le ionizzano: così è possibile raccogliere gli ioni positivi prodotti per ionizzazione del gas sul collettore polarizzato negativamente. La corrente raccolta da quest'ultimo elettrodo è proporzionale al numero di molecole presenti per unità di volume, cioè alla pressione nel recipiente.

Anche qui riportiamo due metodi per eseguire la misura della pressione schematizzati nelle parti a) e b).

Nel primo (a) la griglia è resa negativa rispetto al catodo e l'anodo è ad un potenziale positivo. Nel secondo (b) le polarità della griglia e dell'anodo sono invertite. Nel primo caso la pressione  $p$  risulta data dalla seguente formula empirica:

$$p = K c (i_g/i_a)$$

dove  $K$  è una costante che dipende dalla forma dell'ampolla,  $c$  è una costante che dipende dalla probabilità di ionizzazione del gas ed  $i_g$ ,  $i_a$  sono la corrente di griglia e la corrente anodica rispettivamente.

L'energia degli elettroni viene regolata scegliendo opportunamente la differenza di potenziale fra catodo emettitore ed elettrodo acceleratore.

Nel secondo caso

$$p = K c (i_a/i_g)$$

Misurando le correnti  $i_a$  e  $i_g$  si deduce la pressione  $p$ . Si definisce sensibilità del vacuometro la quantità

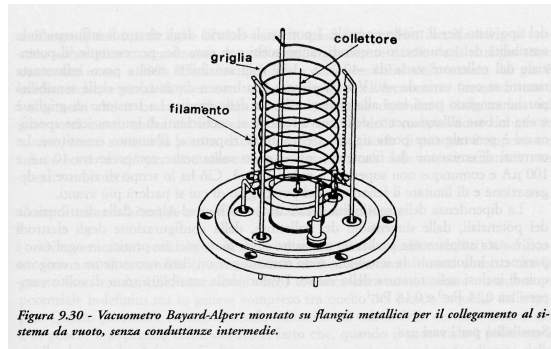
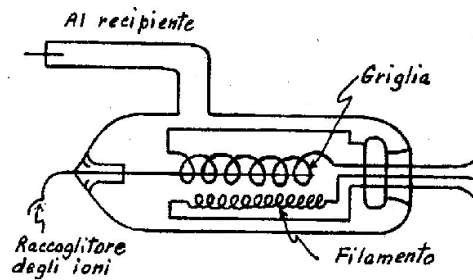
$$S = (1/p) (i_g/i_a) \quad (\text{nel primo caso})$$

$$S = (1/p) (i_a/i_g) \quad (\text{nel secondo caso})$$

dove  $S$  ha le dimensioni del reciproco di una pressione.

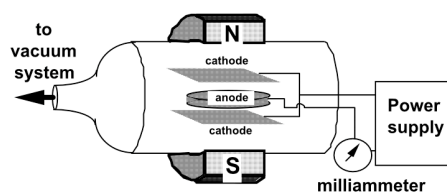
I vacuometri a ionizzazione non possono essere usati tutte le volte che i gas di cui si vuole misurare la pressione, attaccano chimicamente il catodo. L'intervallo normale di funzionamento è fra  $10^{-1}$  e  $10^{-4}$  Pa. A pressioni superiori a  $10^{-1}$  Pa, la corrente ionica praticamente non varia più con la pressione. Questo comportamento è dovuto a diversi effetti. In particolare a pressioni elevate (maggiori di  $10^{-1}$  Pa) il numero degli elettroni che prende parte alla ionizzazione aumenta: un elettrone può ionizzare più volte così che la corrente aumenta sensibilmente e non è più proporzionale alla pressione. Il limite inferiore di impiego di un vacuometro a ionizzazione è posto dalle difficoltà di misurare con precisione basse correnti ioniche: infatti al diminuire della pressione sotto  $10^{-4}$  Pa, la probabilità di collisione atomo del gas - elettrone emesso dal filamento durante il suo percorso dal filamento all'anodo, diventa molto bassa e quindi la corrente diviene sempre più piccola. A pressioni inferiori a  $10^{-6}$  Pa, si nota una corrente residua al collettore degli ioni che è completamente indipendente dalla pressione. Questa corrente è causata dai fotoelettroni emessi dal collettore degli ioni per effetto dell'arrivo di raggi X molli prodotti dagli elettroni del catodo che colpiscono l'anodo. La corrente prodotta dai fotoelettroni emessi dal collettore degli ioni ha lo stesso segno di quella prodotta dalla raccolta degli ioni positivi. Esiste quindi un limite inferiore per la corrente al di sotto del quale essa è principalmente dovuta ai raggi X.

Questo inconveniente è evitato nel vacuometro Bayard-Alpert mostrato nella figura.



Come si vede, in questo vacuometro il filamento è posto all'esterno di una griglia cilindrica (la spirale disegnata in figura) che costituisce il collettore d'elettroni; il collettore degli ioni, consistente in un filo molto sottile, è sistemato all'interno della griglia. Gli elettroni emessi dal filamento sono accelerati dalla griglia (positiva) e ionizzano nello spazio da essa delimitato. Una larga frazione degli ioni così formati sono raccolti dal filo centrale (negativo). Con questa disposizione il collettore degli ioni intercetta solo una piccola frazione dei raggi X prodotti alla griglia. La piccola superficie del filo presenta un angolo solido ai raggi X che è diverse centinaia di volte più piccolo che nel caso dei vacuometri a ionizzazione convenzionali.

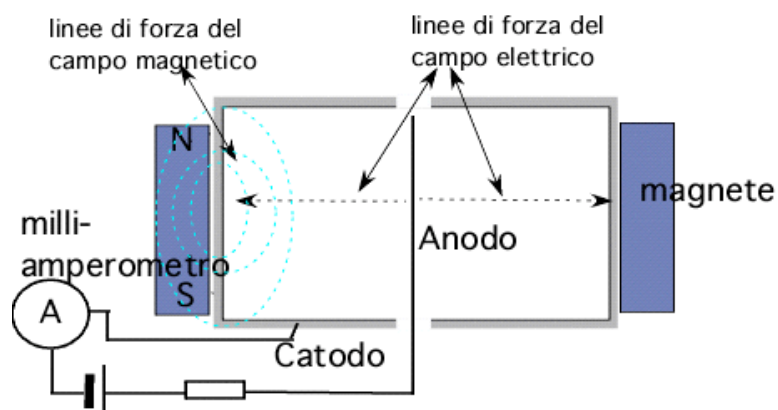
Il vacuometro più diffuso per misure di pressione nell'intervallo  $10^{-3} - 10^{-6}$  Pa è senza dubbio il *Penning*, detto anche vacuometro a catodo freddo (*cold-cathode gauge*). Esso è molto più semplice rispetto ai vacuometri a ionizzazione già descritti e non presenta gli inconvenienti dovuti alle eventuali reazioni dei gas col filamento incandescente. Il vacuometro *Penning* va tarato con un McLeod. Di nuovo per ragioni di semplicità nella presentazione, riportiamo in figura lo schema di un *Penning* ad ampolla di vetro ormai desueto. Il principio di funzionamento dei *Penning* moderni, di cui mostreremo uno schema alla fine del paragrafo, è però assolutamente identico.



Nell'ampolla sono sistemati due elettrodi (anodo e catodo) di materiale a basso potenziale di estrazione (zirconio, torio, etc...) che vengono alimentati con una differenza di potenziale di alcune migliaia di volt. Il catodo è costituito da due piastre connesse elettricamente, mentre l'anodo è costituito da un piccolo telaio opportunamente sagomato. L'ampolla è collegata al recipiente sotto vuoto.

Se il vuoto è tale che il libero cammino medio delle molecole del gas è uguale all'incirca alle dimensioni lineari dell'ampolla, gli ioni presenti in esso (prodotti ad

esempio dall'azione ionizzante dei raggi cosmici, di radiazioni elettromagnetiche od altri agenti ionizzanti naturali) migrano verso gli elettrodi ed ivi strappano degli elettroni, che, accelerati dal campo, possono produrre altri ioni e quindi determinare una corrente circa proporzionale al numero delle molecole presenti nel vacuometro. Tale corrente è misurata mediante un microamperometro inserito nel circuito. Per aumentare l'intensità di corrente in modo che la misura possa essere eseguita più facilmente e con più elevata sensibilità, si utilizza un magnete permanente che produce un campo di alcune centinaia di Oersted e le cui espansioni polari sono mostrate in figura. In virtù della particolare configurazione degli elettrodi e della disposizione del magnete, il campo elettrico ha in ogni punto una componente ortogonale al campo magnetico. In pratica le linee di forza del campo elettrico e di quello magnetico si intersecano e quindi le forze di natura elettrica e magnetica applicate agli elettroni determinano la traiettoria a forma di una spirale degli elettroni. Il percorso che essi compiono, aumenta di un centinaio di volte rispetto a ciò che avverrebbe in assenza di campo magnetico (come nel caso del vacuometro a filamento incandescente). Aumenta così la probabilità di collisione tra gli elettroni e le molecole del gas ed è prodotto un numero maggiore di ioni a parità di pressione. I grandi vantaggi del *Penning* sono una maggiore robustezza rispetto agli strumenti a "catodo caldo", visto che questo tipo di vacuometri possono anche sopportare le brusche variazioni di pressione che al contrario provocano la rottura dei filamenti prossimi all'incandescenza degli altri tipi di vacuometri. Riportiamo infine in figura lo schema di un *Penning* moderno detto a magnetron inverso, in cui gli elettrodi sono a simmetria cilindrica ed il magnete toriodale li circonda.



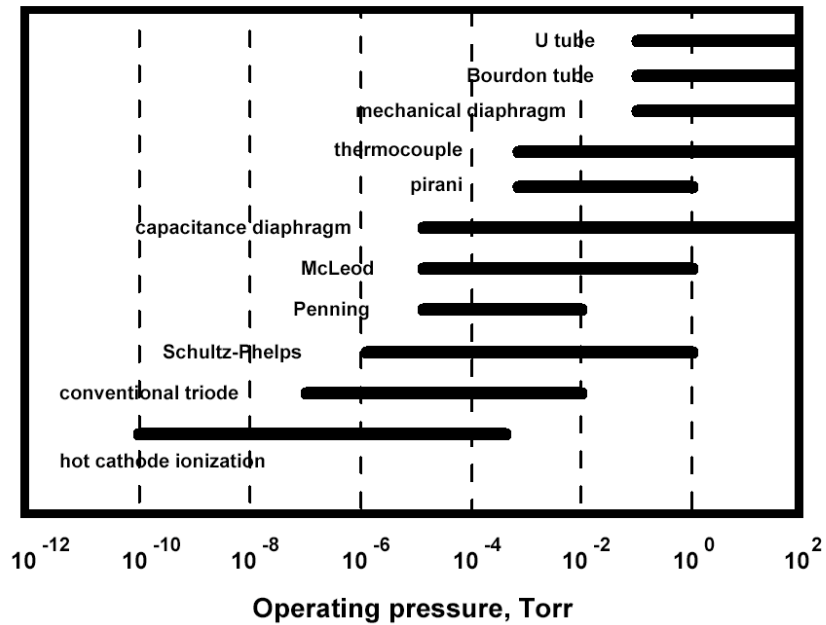
*Vacuometro a catodo freddo-Penning :  
geometria denominata a Magnetron inverso*

Infine mostriamo la foto di un moderno sensore della ALCATEL: nello stesso contenitore metallico sono stati integrati un *Pirani* ed un *Penning* a magnetron inverso.





Nella tabella conclusiva sono riportati gli intervalli di funzionamento dei vari tipi di vacuometri, di cui pero soltanto per alcuni abbiamo illustrato il principio di funzionamento..



## 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)