



PFN 2025
Corso di criogenia
e cenni di vuoto
II edizione

29 Settembre -
1 ottobre 2025
MILANO

Pompe e tecniche di misura

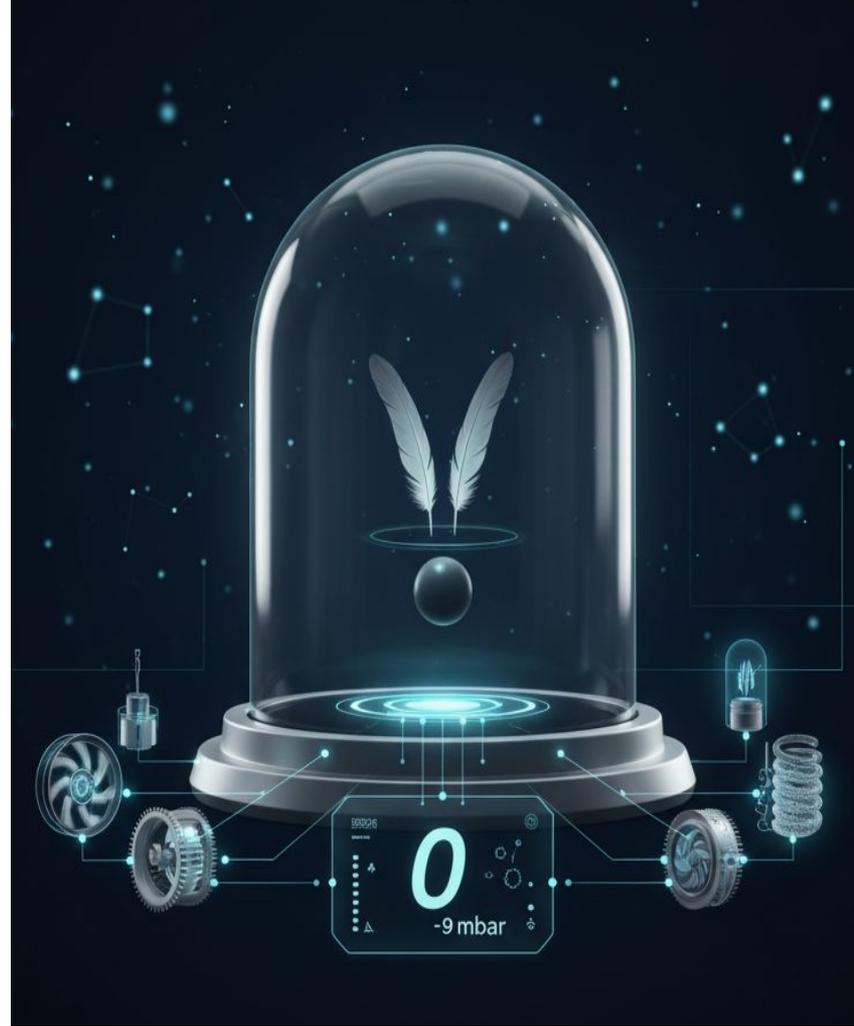
Matteo Biassoni
INFN Milano-Bicocca

Outline

- Concetti base e tipi di vuoto
- Pompe
- Misura del vuoto



Concetti base e tipi di vuoto



Concetti base

Quantità rilevanti (1/5):

- **V** = volume della camera da evacuare [l]
- **p** = pressione nella camera NB: per le prestazioni della pompa è rilevante p all'ingresso della pompa che può dipendere dalla conduttanza della connessione [mbar]
- **S** = velocità di pompaggio (anche flusso volumetrico all'ingresso della pompa), volume per unità di tempo [l/s]. NB: non rappresenta una quantità di gas, ha le dimensioni di una conduttanza. In prima approx dipende dalle proprietà “geometriche” della pompa

$$S = V_{\text{pompa}} * n \text{ [l/ciclo * cicli/s = l/s]}$$

con V_{pompa} = volume interno della pompa mosso durante un ciclo, n = numero di cicli per unità di tempo

Concetti base

Quantità rilevanti (2/5):

- **S** = velocità di pompaggio (anche flusso volumetrico all'ingresso della pompa), volume per unità di tempo [l/s]. NB: non rappresenta una quantità di gas, ha le dimensioni di una conduttanza. In prima approx dipende dalle proprietà “geometriche” della pompa

$$S = V_{\text{pompa}} * n \text{ [l/ciclo * cicli/s = l/s]}$$

con V_{pompa} = volume interno della pompa mosso durante un ciclo, n = numero di cicli per unità di tempo.

A seconda del tipo di pompa ci possono essere meccanismi per cui parte del gas che entra nella pompa non può essere completamente evacuato, o parte del gas all'uscita può tornare verso l'ingresso. Dipendono anche dalla pressione in uscita (p_{back}). Determinano una velocità di pompaggio effettiva $S_{\text{eff}} < S$

Concetti base

Quantità rilevanti (3/5):

- q_{pV} = portata, capacità di pompaggio. E' una quantità di gas (numero di molecole, massa) per unità di tempo [mbar*l/s]

$$q_{pV} = p * S = p * V_{pompa} * n$$

Dalla legge dei gas perfetti

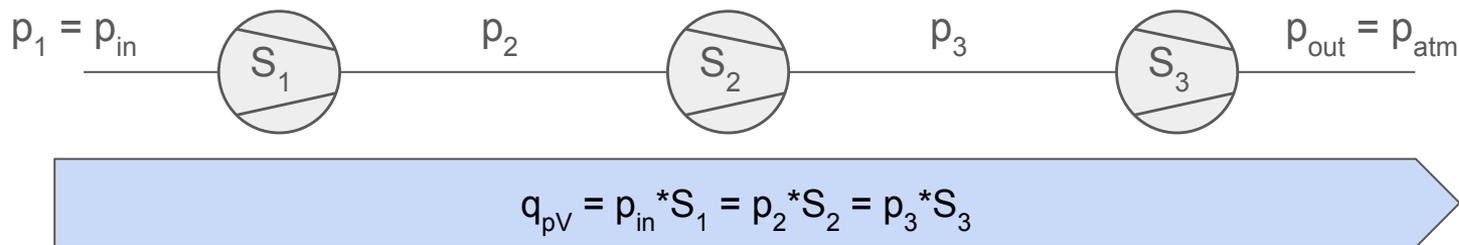
$$pV = m/M * R * T = n_{moli} * R * T$$

ne consegue che al variare del gas non cambia il numero di molecole ma cambia la massa di gas spostato e quindi può cambiare la capacità di pompaggio e/o la potenza assorbita dal motore

Concetti base

Quantità rilevanti (4/5):

- q_{pV} = portata, capacità di pompaggio. E' una quantità di gas (numero di molecole, massa) per unità di tempo [mbar*l/s]



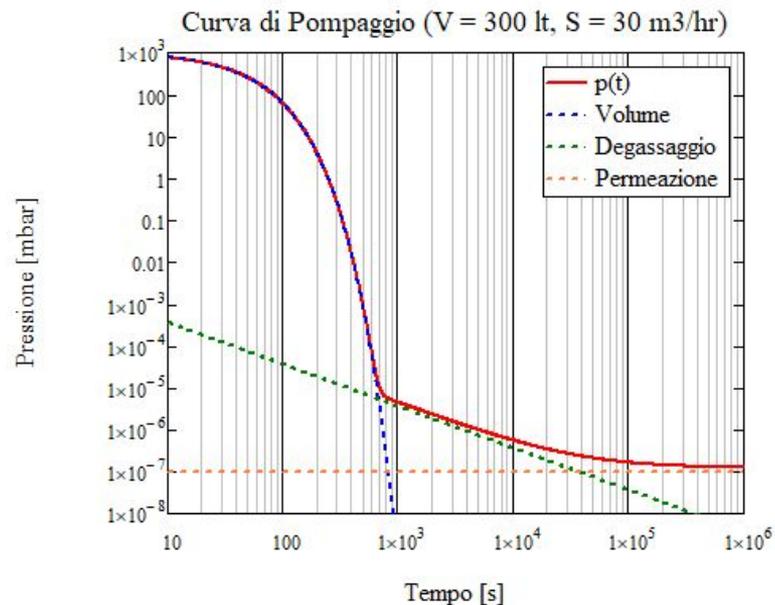
Quando si collegano più pompe in cascata (backing) la quantità rilevante è q_{pV} , non S , perché ogni pompa ha in ingresso una pressione diversa. Quello che si deve conservare da una pompa alla successiva è il flusso di molecole (equazione di continuità).

Concetti base

Quantità rilevanti (5/5):

- q_L = leak rate, quantità di gas che entra nel volume da pompare mentre la pompa è in azione:
 - fuga reale, permeazione
 - fuga virtuale (volume isolato con piccola conduttanza verso il volume principale)
 - outgassing dei materiali e delle superfici

A seconda della sorgente → diverse dipendenze dal tempo della pressione → curva di pompaggio



Tipi di vuoto e regimi di flusso

Classificazione convenzionale del tipo di vuoto in base al range di pressioni (in parte arbitraria, ma ci sono ragioni legate alla cinetica dei gas):

- Rough vacuum (RV): 1000 - 1 mbar

Regime viscoso

- Medium vacuum (MV): 1 - 10^{-3} mbar

- High vacuum (HV): 10^{-3} - 10^{-7} mbar

- Ultra-high vacuum (UHV): $< 10^{-7}$ mbar

Regime molecolare



Tipi di vuoto e regimi di flusso

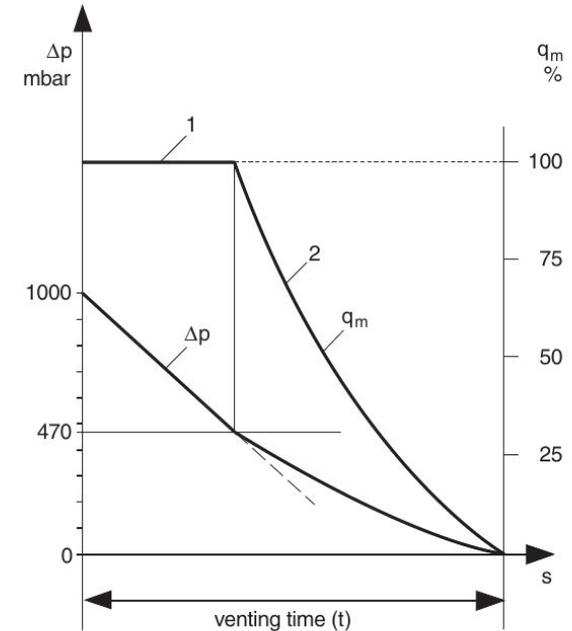
RV - Regime viscoso:

- libero cammino medio delle molecole \ll diametro della condotta
- domina l'interazione tra le molecole, urti tra molecole molto più frequenti di urti con pareti
- ha senso pensare a un moto collettivo delle molecole con velocità del flusso
- viscosità (attrito interno) del fluido parametro rilevante, insieme al numero di Reynolds Re (diametro*velocità*densità/viscosità)
 - flusso laminare: $Re < 2200$
 - flusso turbolento: $Re > 2200$
- la pompa agisce su un fluido viscoso che “trascina se stesso”

Tipi di vuoto e regimi di flusso

RV - Regime viscoso:

- il flusso attraverso un condotto/orifizio è proporzionale a Δp fino a quando la velocità del flusso è $<$ velocità del suono
- se $v_{\text{flusso}} > v_{\text{suono}}$ flusso diventa \sim costante \rightarrow **flusso strozzato**
- $\Delta p_{\text{critica}} \sim 470$ mbar in aria @20°C
- rilevante per valvole di sicurezza, velocità di venting, creazione di fughe calibrate, etc...



- 1 – Gas flow rate q_m choked = constant (maximum value)
 2 – Gas flow not impeded, q_m drops to $\Delta p = 0$

Tipi di vuoto e regimi di flusso

HV e UHV - Regime molecolare:

- libero cammino medio delle molecole \gg diametro della condotta
- interazione tra molecole trascurabile, riflessioni e adsorbimento/desorbimento sulle pareti determinano velocità e direzione delle molecole \rightarrow NO moto collettivo, la pompa deve agire direttamente sulle singole molecole
- molecole sulle pareti \gg molecole libere nel volume!

Tipi di vuoto e regimi di flusso

Conduttanza:

- per linee di pompaggio in serie si sommano come conduttanze elettriche

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

- in generale dipende dalla pressione
 - limite per flusso laminare - forte dipendenza dal diametro della condotta:

$$C = 135 \cdot \frac{d^4}{l} \cdot \bar{p} \quad \ell/s$$

- limite per flusso molecolare - non dipende più dalla pressione:

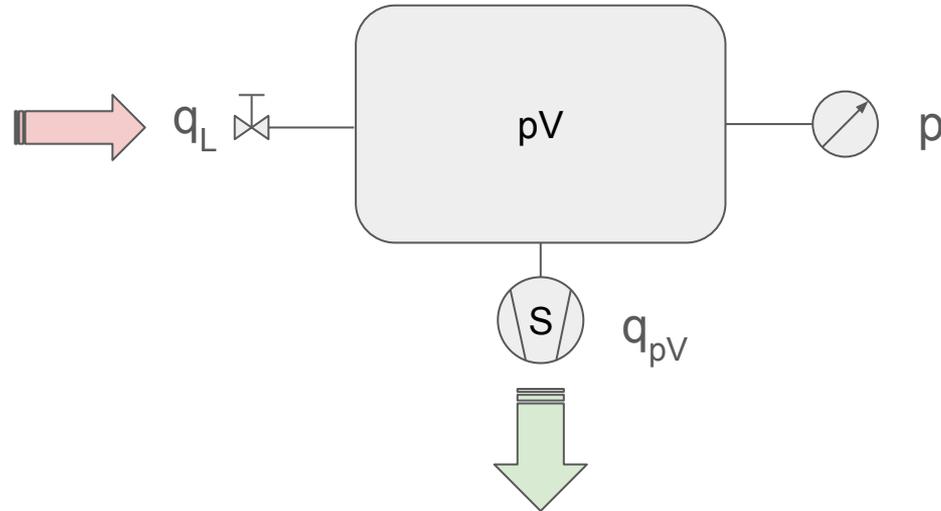
$$C = 12.1 \cdot \frac{d^3}{l} \quad \ell/s$$

Pompe



Concetti base

Definizione: dispositivo che riduce la pressione p (e quindi la densità) del gas in un certo volume V rimuovendo le molecole di gas dal volume stesso.



Tipi di pompe

Definizione: dispositivo che riduce la pressione p (e quindi la densità) del gas in un certo volume V rimuovendo le molecole di gas dal volume stesso. Il gas può essere rimosso dal volume:

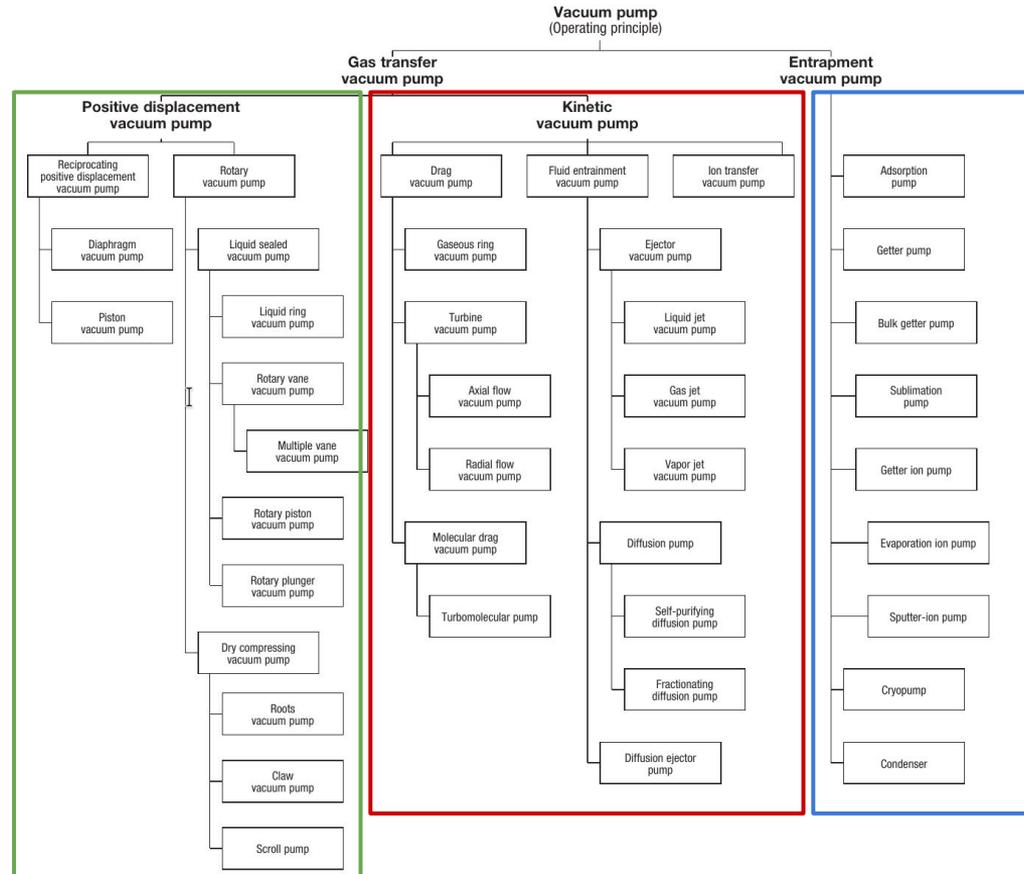
“trasferendolo” in un altro volume o in atmosfera
(Gas transfer vacuum pumps)

spostamento del gas con volumi sigillati
(Positive displacement pumps)

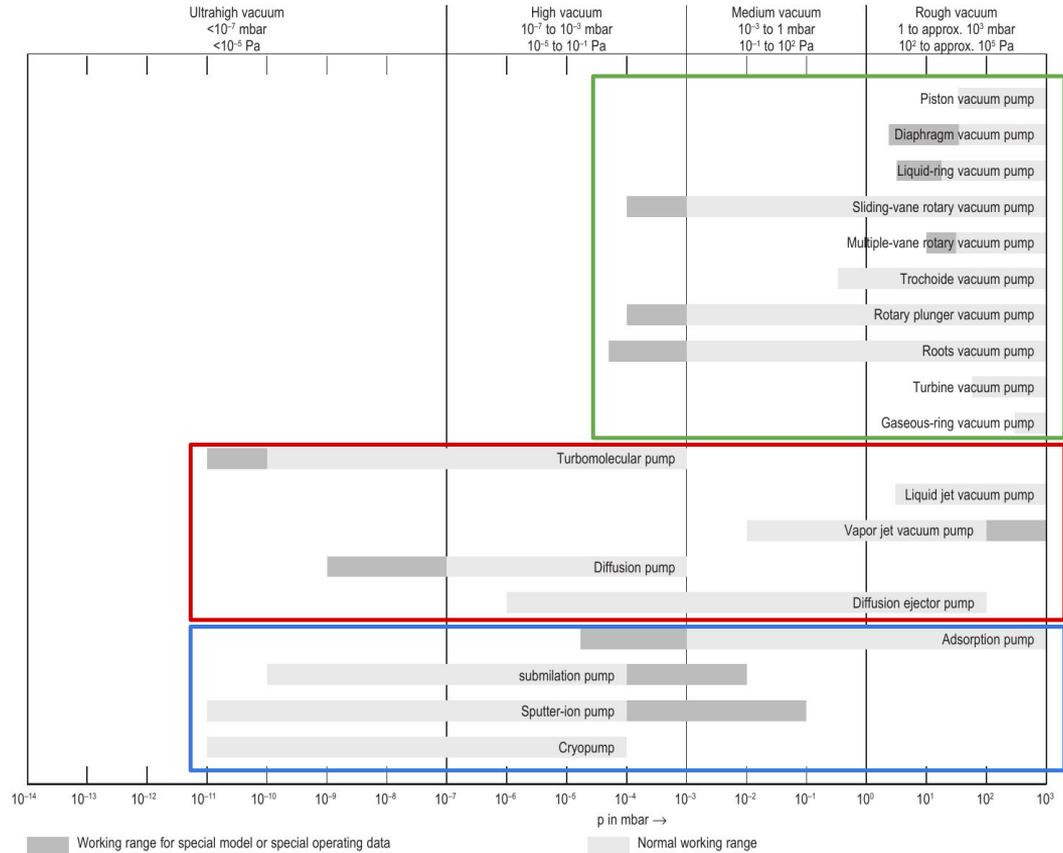
trasmissione di quantità di moto al gas
(Kinetic pumps)

“intrappolandolo” (con processo fisico o chimico) su un elemento che è parte delle superfici che delimitano il volume (Entrapment vacuum pumps)

Tipi di pompe



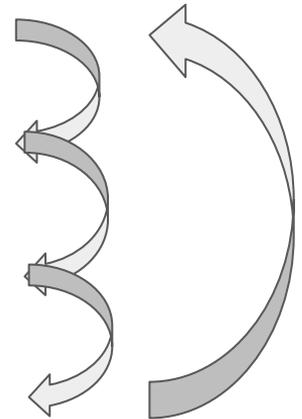
Scelta



Positive displacement pumps

Caratteristiche generali:

- la geometria delle parti in movimento determina dei volumi variabili
 1. inizialmente un volume grande viene messo in collegamento con il lato a bassa pressione
 2. il movimento di elementi meccanici fa sì che il volume venga isolato dall'ingresso
 3. il volume si riduce → aumenta la pressione
 4. il volume, ridotto, viene messo in collegamento con l'uscita



Positive displacement pumps

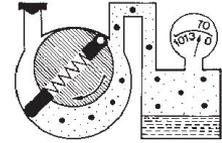
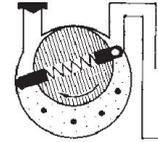
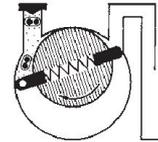
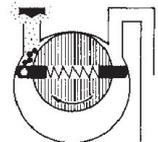
Due categorie:

- DRY
 - nessun lubrificante in contatto con il gas da pompare
 - tenuta (internal leaks e backflow) garantita da tolleranze e guarnizioni meccaniche
 - nessuna contaminazione del gas
 - p_{\min} maggiore
- OIL (o in generale fluid) SEALED
 - la tenuta ingresso/uscita è garantita dal fluido lubrificante (principalmente olio)
 - minori requisiti sulle tolleranze
 - meno sensibili al surriscaldamento, più adatti a frequenti evacuazioni
 - possibile contaminazione del gas
 - p_{\min} migliore (limitata da pressione di vapore del fluido)
 - più sensibili a condensazione se si pompa su vapori condensabili

Positive displacement pumps

Gas ballast:

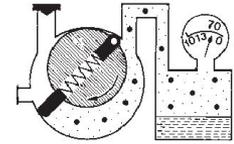
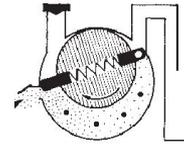
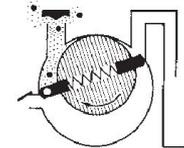
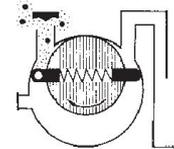
- necessario quando si pompa su una miscela che contiene vapori condensabili, ovvero sostanze che alla temperatura della pompa hanno pressione di vapore $<$ pressione di uscita p_{out}
- nella fase di compressione queste sostanze possono condensare
 - limite sulla pressione p_{min} dato dalla incomprimibilità del condensato (al limite potrebbe non raggiungere nemmeno la pressione minima per apertura valvola di scarico)
 - reflusso nel volume da pompare \rightarrow contaminazione e ulteriore riduzione di p_{min}
 - contaminazione del fluido lubrificante \rightarrow perdita di potere lubrificante, corrosione e usura delle componenti meccaniche
- caso più diffuso in criogenia: vapore acqueo, tipicamente quando si evacuano grandi volumi che sono stati aperti all'aria per molto tempo

a₁a₂a₃a₄

Positive displacement pumps

Gas ballast:

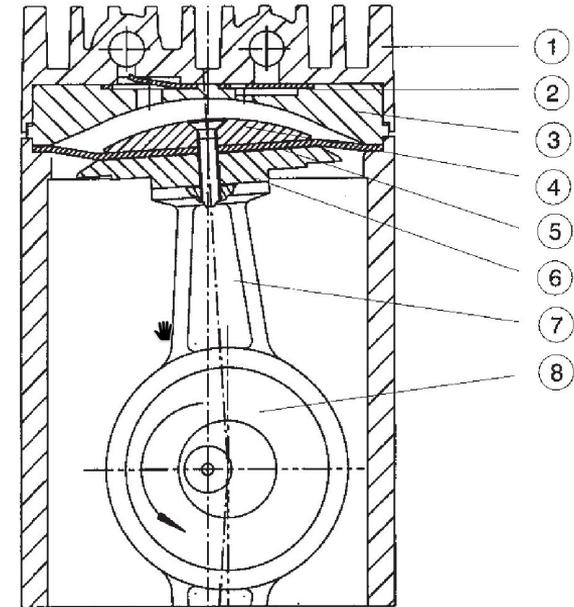
- si introduce una quantità di gas controllata prima che inizi la fase di compressione ma dopo aver terminato la fase di “aspirazione”
- durante la compressione il gas aggiuntivo e il vapore vengono compressi insieme
- si raggiunge la pressione di apertura della valvola di scarico (o in generale la pressione di scarico) quando la pressione parziale del vapore è ancora più bassa di come sarebbe senza gas ballast
- si può quindi tollerare una pressione iniziale del vapore maggiore senza che si crei condensa
- questo a scapito della pressione p_{\min}

b₁b₂b₃b₄

Positive displacement pumps

Pompe a secco reciprocanti - POMPA A MEMBRANA

- volume di pompaggio completamente sigillato dalla meccanica
- nessuna contaminazione di olio possibile (finché la membrana è integra)
- nessun contatto del gas (e vapori) con la meccanica
- funzionamento semplice e affidabile, bassi costi di manutenzione
- bassa velocità di pompaggio a causa della limitata deformabilità della membrana
- rapporto di compressione limitato dallo spazio morto (volume residuo nel punto morto superiore) → $p_{\min} < 1$ mbar solo con soluzioni multi-stadio

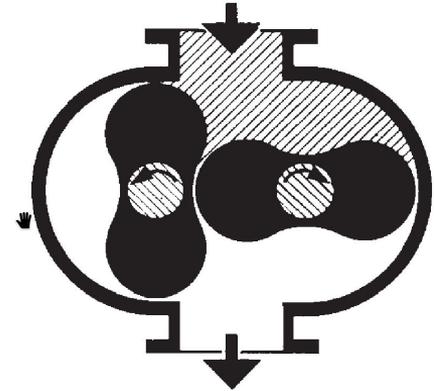


- | | |
|--------------------|----------------------------|
| (1) Casing lid | (5) Diaphragm |
| (2) Valves | (6) Diaphragm support disk |
| (3) Lid | (7) Connecting rod |
| (4) Diaphragm disk | (8) Eccentric disk |

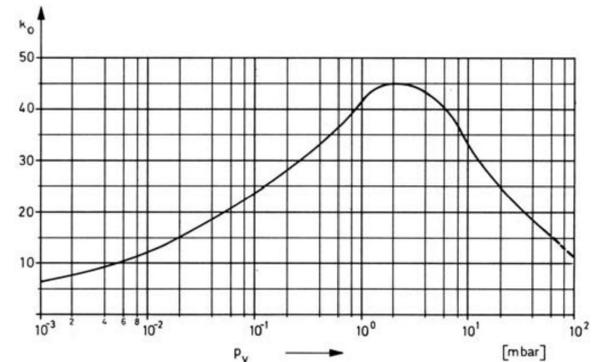
Positive displacement pumps

Pompe a secco rotative - ROOTS

- MV con backing pump (tipicamente rotative)
- HV con doppio stadio
- alta velocità di pompaggio → grande portata ($>1000\text{m}^3/\text{h}$)
- tolleranze meccaniche di pochi decimi
- mancanza di lubrificante → gas aderisce alle superfici in movimento, backflow → rapporti di compressione bassi (10-100), con massimo a ~ 1 mbar
- MV → HV con multi-roots o pompa di backing (rotativa o a stantuffo)



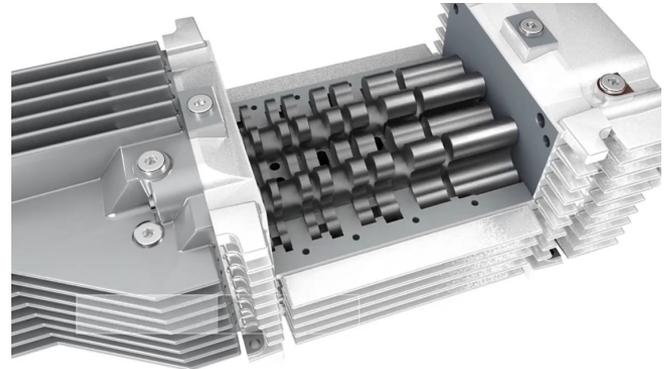
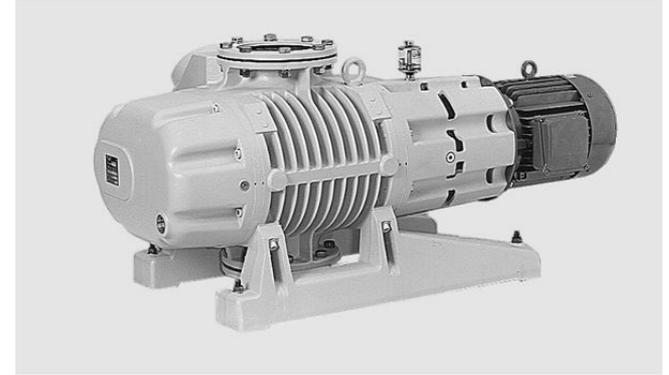
- | | |
|-----------------|------------------|
| 1 Intake flange | 4 Exhaust flange |
| 2 Rotors | 5 Casing |
| 3 Chamber | |



Positive displacement pumps

Pompe a secco rotative - ROOTS

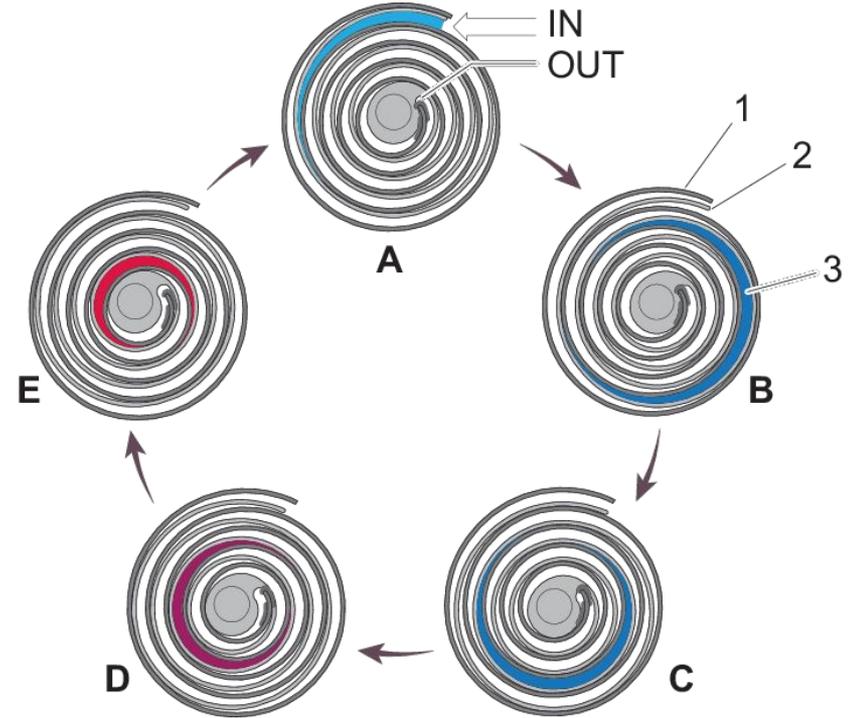
- assorbimento (e quindi temperatura) dipende da Δp → necessità di proteggere la pompa con sistemi “attivi” (pressure switch) o “passivi” (bypass con valvola pressostatica) → possibilità di operare partendo da p_{amb}
- nessuna contaminazione del gas pompato
- poca dipendenza dal tipo di gas
- applicazione tipica in criogenia: pompe di circolazione (in serie) per unità a diluizione (alta portata a pressioni $1-10^{-2}$ mbar)



Positive displacement pumps

Pompe a secco rotative - SCROLL

- meccanica molto semplice, pochissime parti in movimento, costo iniziale contenuto, manutenzione semplice e poco costosa
- tolleranze non spinte, tenuta tra volumi garantita da un'unica guarnizione continua
- portata limitata (qualche m^3/h), pompa ausiliaria per vuoto iniziale ($p_{\text{min}} \sim 10^{-2}$ mbar)
- possibilità di gas ballast



Positive displacement pumps

Pompe a secco rotative - SCROLL

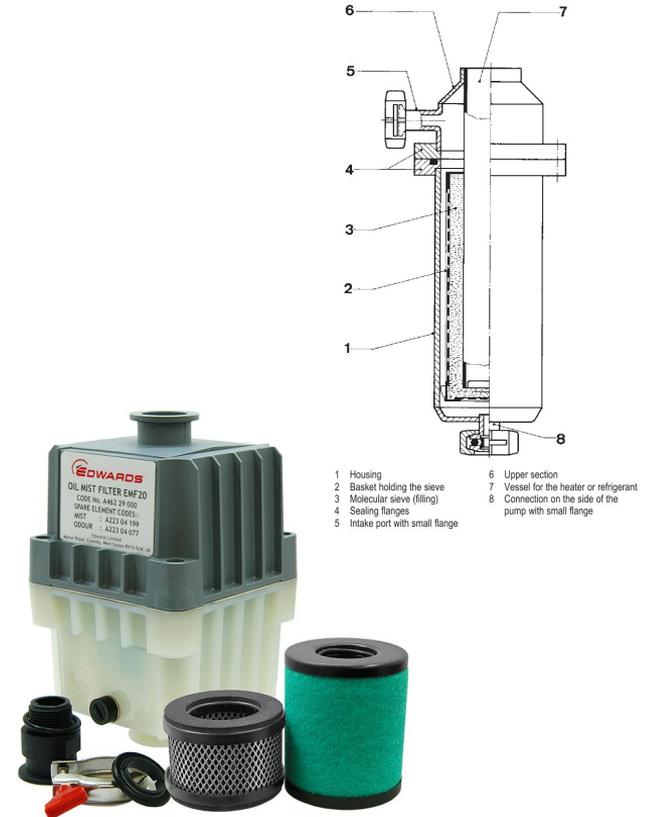
- particelle prodotte dal consumo della guarnizione possono contaminare i volumi
- usura accelerata in caso di pompaggio frequente da p_{amb}



Positive displacement pumps

Pompe sigillate a olio - concetti generali

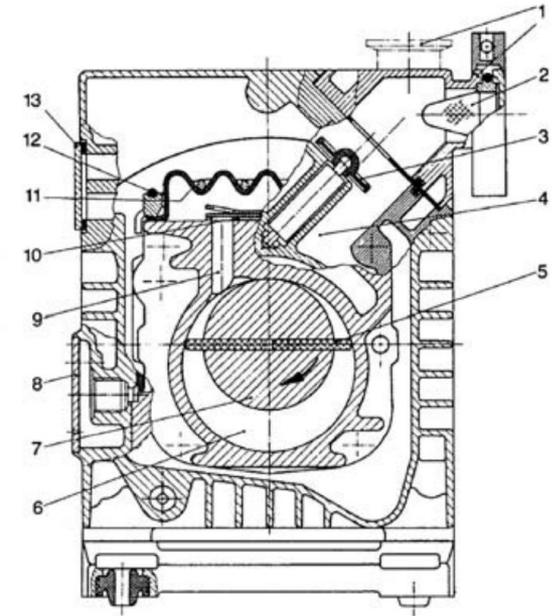
- tenuta tra elementi meccanici garantita da film di olio
- l'olio agisce anche da lubrificante e da fluido termovettore per il raffreddamento
- pressione di vapore dell'olio è uno dei fattori limitanti per p_{\min}
- potenziale rischio di contaminazione del vuoto (e dello scarico)
- fondamentale che l'olio sia corretto per il tipo di gas/range di pressione
- rischio di contaminazione dell'olio con vapori condensabili → specialmente con frequenti cicli di pompaggio
- manutenzione e cambio olio fondamentali per il buon funzionamento



Positive displacement pumps

Pompe sigillate a olio - ROTATIVA

- corpo rotante con asse spostato rispetto all'asse della camera
- volumi delimitati da lamelle radiali (in genere 2) o tangenziali, spinte contro le pareti da molle o forza centrifuga
- tenuta tra lamelle e pareti (e tutte le altre parti meccaniche) garantita da olio
- alto fattore di compressione (anche 10^5)
- olio agisce anche da lubrificante
- olio garantisce anche tenuta della valvola di scarico
- olio circolato passivamente o con apposita pompa

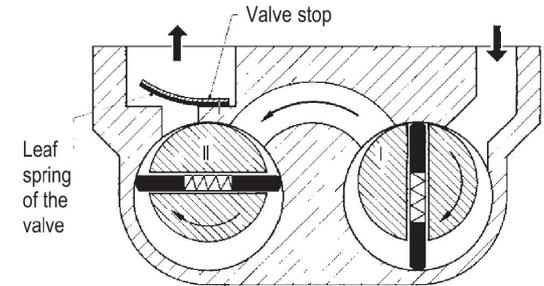


- | | |
|-----------------------|---|
| 1 Intake port | 8 Orifice, connection for inert gas ballast |
| 2 Dirt trap | 9 Exhaust duct |
| 3 Anti-suckback valve | 10 Exhaust valve |
| 4 Intake duct | 11 Demister |
| 5 Vane | 12 Spring |
| 6 Pumping chamber | 13 Orifice; connection for oil filter |
| 7 Rotor | |

Positive displacement pumps

Pompe sigillate a olio - ROTATIVA

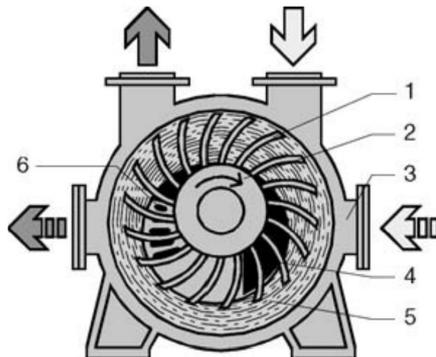
- opzioni multi stadio:
 - p_{\min} inferiore (maggiore rapporto di compressione totale e minore degasaggio dell'olio verso il vuoto)
 - minore reflusso di olio verso il vuoto
- ampio range di operazione, da p_{amb} a HV
- ampio range di portate, da 10 a 1000 m³/h
- portata tende a zero avvicinandosi a p_{\min} → se usata come pompa di backing il circuito va dimensionato in modo che non lavori vicino a p_{\min}
- affidabile per operazione long-term



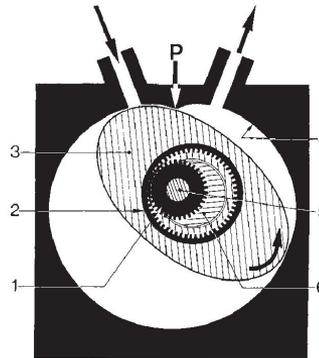
Positive displacement pumps

Pompe sigillate a olio - ALTRI TIPI

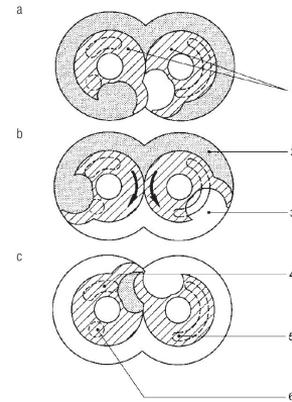
- Claw pumps
- Pompa a stantuffo (rotary plunger)
- Liquid ring pump
- Trochoid



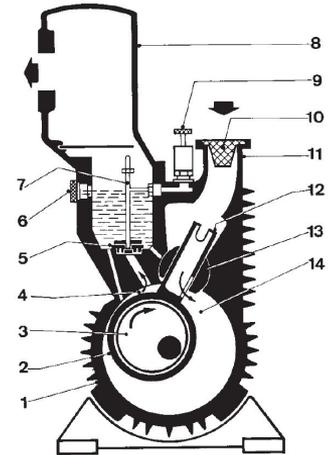
- | | | |
|---------------|------------------|---------------------------|
| 1 Rotor | 3 Casing | 5 Liquid ring |
| 2 Rotor shaft | 4 Intake channel | 6 Flex. discharge channel |



- | |
|--|
| 1 Toothed wheel fixed to the driving shaft |
| 2 Toothed wheel fixed to the piston |
| 3 Intake space |
| 4 Inner surface of the pump |
| 5 Driving shaft |
| 6 Eccentric |



- | | |
|-----------------------|--------------------------------|
| 1 Rotors | 5 Intake slot |
| 2 Compression chamber | 6 Intermediate stage purge gas |
| 3 Intake space | |
| 4 Exhaust slot | |



- | | |
|-----------------------------|---|
| 1 Casing | 9 Gas ballast valve |
| 2 Cylindrical piston | 10 Dirt trap |
| 3 Eccentric | 11 Intake port |
| 4 Compression chamber valve | 12 Slide valve |
| 5 Oil sealed pressure valve | 13 Hinge bar |
| 6 Oil-level sight glass | 14 Pumping chamber (air is flowing in.) |
| 7 Gas ballast chamber | |
| 8 Exhaust pot | |

Kinetic pumps

Caratteristiche generali

- la pompa agisce sulle singole molecole/atomi, l'interazione tra molecole non è rilevante
- trasferendo momento alle singole particelle si crea una direzione di moto privilegiata ingresso → uscita
- no volumi chiusi interni alla pompa
- no isolamento tra ingresso e uscita → bassa impedenza a pompa spenta → attenzione al riflusso se pompa di backing è a olio (esempio turbo+rotativa)
- l'impulso trasferito deve essere confrontabile con la quantità di moto “termica” del gas → servono elementi (meccanici e non...) in moto ad alta velocità
- ideali per HV e UHV:
 - alti rapporti di compressione
 - velocità di pompaggio altissima ($> 100\text{l/s}$) che decresce rapidamente con la pressione di ingresso
 - necessarie pompe di backing e/o prevuoto
- velocità di pompaggio può dipendere (fortemente) dal tipo di gas non essendo determinata (solo) da fattori geometrici

Kinetic pumps

Pompe turbomolecolari - funzionamento

- sostanzialmente il design di un compressore assiale
- molecole ricevono impulso per urti con la superficie dei rotori/statori (nel sistema di riferimento delle molecole si muovono entrambi)
- velocità lineare delle palette ~ velocità termica delle molecole → altissime velocità di rotazione (36000-72000 rpm)
- tolleranze molto stringenti sulle componenti in rotazione e sul bilanciamento

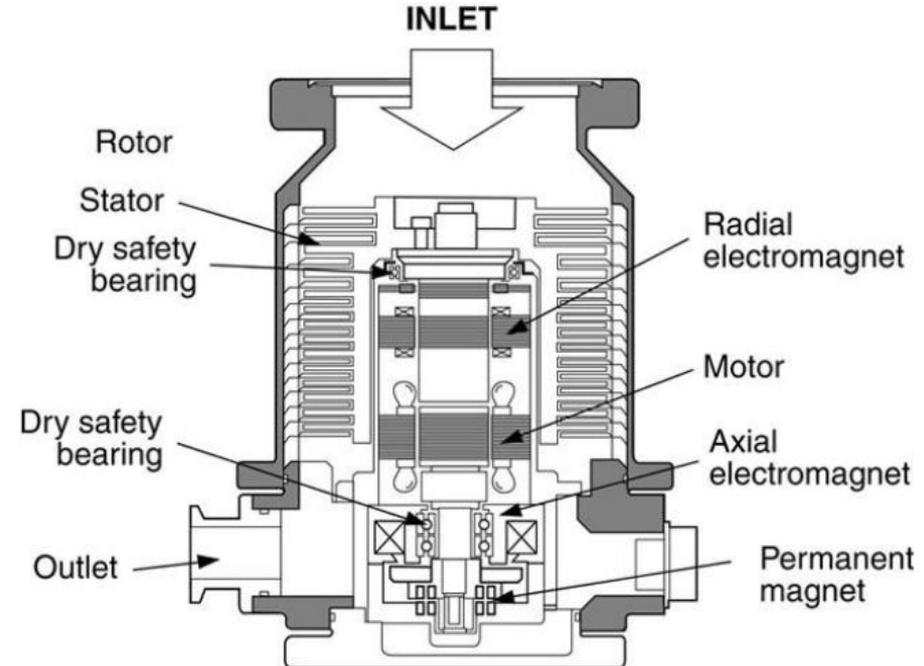
Gas	Molar Mass M	Mean thermal velocity (m/s)
H ₂	2	1761
He	4	1245
H ₂ O	18	587
Ne	20	557
CO	28	471
N ₂	28	471
Air	28.96	463
O ₂	32	440
Ar	40	394
CO ₂	44	375
CCl ₄ (F11)	134.78	68



Kinetic pumps

Pompe turbomolecolari - cuscinetti

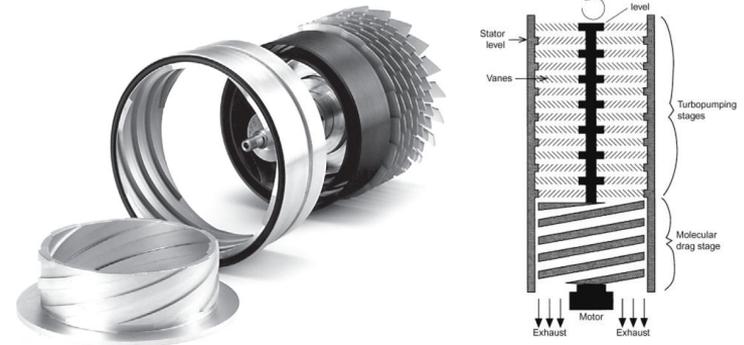
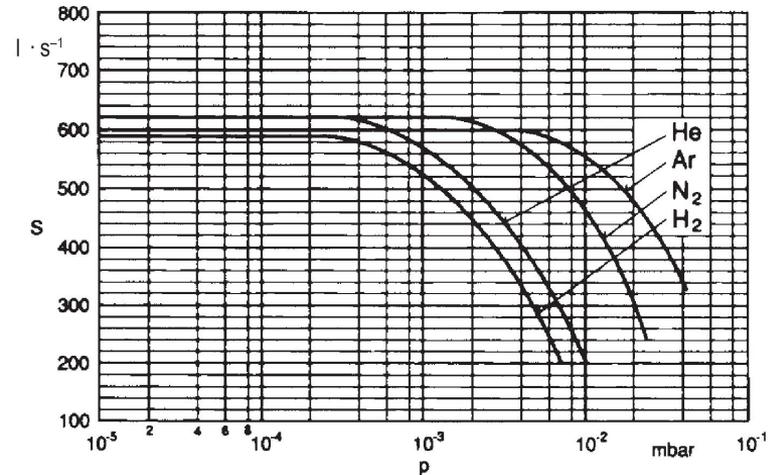
- diverse tipologie di cuscinetti
 - acciaio, lubrificati ad olio
 - buona tolleranza al particolato
 - bassa manutenzione
 - installazione solo verticale
 - ibridi, lubrificati a grasso
 - qualunque orientamento
 - sigillati, non possono essere mantenuti
 - magnetico
 - nessun attrito e consumo
 - qualunque orientamento
 - basso rumore e vibrazioni
 - nessun degasaggio



Kinetic pumps

Pompe turbomolecolari - velocità di pompaggio

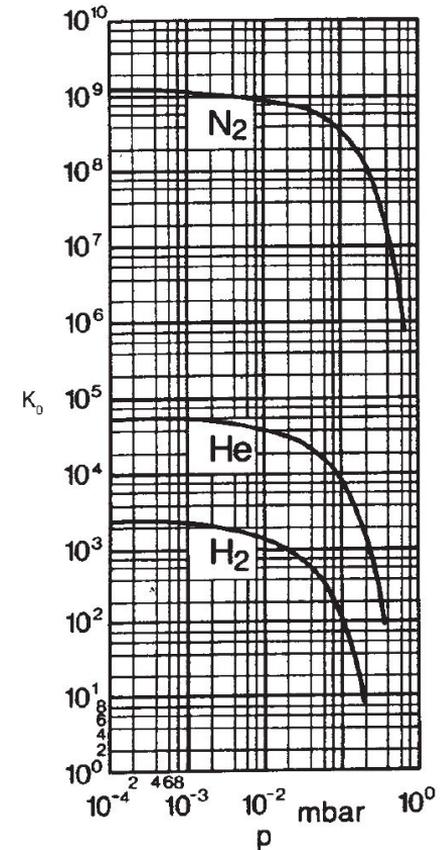
- velocità di pompaggio:
 - costante per $p_{in} < 10^{-3}$ mbar
 - diminuisce rapidamente quando si passa da regime molecolare a regime viscoso
 - in regime molecolare, dipendenza abbastanza piccola dal tipo di gas
- per compensare la carenza in regime viscoso → pompe ibride con stadio ad alta pressione “drag pump”, funzionano con p_{back} maggiori



Kinetic pumps

Pompe turbomolecolari

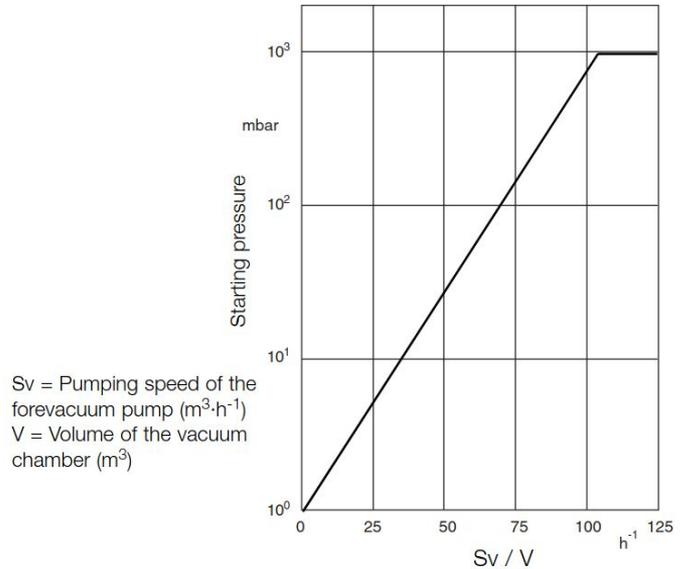
- scelta tipica per HV e UHV grazie alla semplicità e di operazione e flessibilità
- nessun rischio di contaminazione del vuoto da idrocarburi (ma attenzione a reflusso della pompa di backing!)
- rapporto di compressione dipende molto dal gas $\rightarrow k_0(\text{N}_2)$
 $\sim 10^4 k_0(\text{He})$ - possibilità di ottimizzare il design per gas leggeri
- a regime il gas residuo è quasi solo H_2 e He, rimozione molto efficace si componenti pesanti (azoto, idrocarburi)



Kinetic pumps

Pompe turbomolecolari - procedure di utilizzo

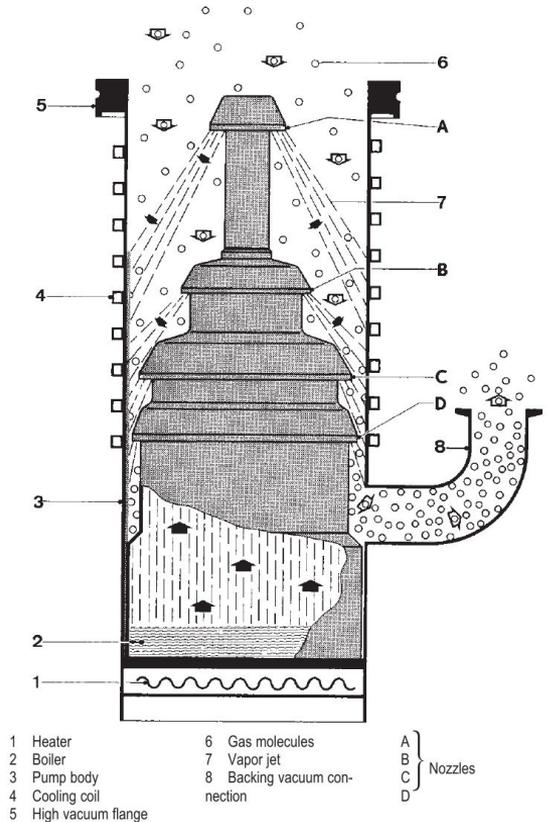
- avvio della turbo minimizza il reflusso di olio dalla pompa di backing:
 - avviare insieme a pompa di backing se $S_{\text{backing}}/V > 40\text{h}^{-1}$
 - avvio ritardato se $S_{\text{backing}}/V < 40\text{h}^{-1}$
- allo spegnimento:
 - interrompere raffreddamento ad acqua per evitare condensazione
 - venting per prevenire riflusso dalla pompa di backing → usare valvola di venting con filtro per evitare aspirazione di contaminazioni o particolato
 - venting può essere usato per rallentare la pompa una volta spenta (in vuoto può impiegare anche un'ora!), ma seguendo curve di venting del produttore
- durante operazione:
 - evitare qualunque movimento e/o vibrazione esterna → sforzo sui cuscinetti



Kinetic pumps

Pompe a diffusione

1. olio viene scaldato nel bollitore
2. vapore generato (qualche mbar) espande attraverso ugelli generando flusso ad alta velocità
3. il gas da pompare diffonde e si scioglie nel vapore e viene accelerato verso il lato ad alta pressione
4. il vapore ri-condensa sulle pareti raffreddate (ad aria o a liquido) e il ciclo si chiude
5. il gas disciolto nel vapore ora condensato viene pompato dalla pompa di backing



Kinetic pumps

Pompe a diffusione

- pressione p_{\min} estremamente bassa (UHV), determinata dalla pressione di vapore dell'olio
- design speciali consentono di mandare all'ultimo stadio le componenti meno volatili in modo da minimizzare p_{\min}
- esiste una pressione di backing massima (~ 1 mbar) \rightarrow pompa di backing deve essere adeguata
- riflusso di vapore di olio verso il volume pompato può essere ridotto ulteriormente con baffles o cold traps (anche LN_2)

Kinetic pumps

Pompe a diffusione

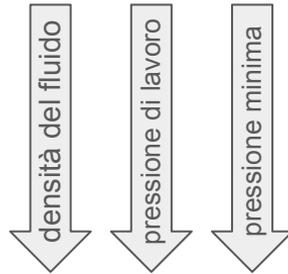
- a bassa pressione ($<10^{-2}$ mbar) **velocità di pompaggio** > 100 l/s **indipendente dalla pressione:**
 - il gas da pompare satura il vapore molto più rapidamente del tempo di permanenza del vapore nella pompa
 - quindi la quantità di molecole che possono essere asportate nell'unità di tempo dipende dal flusso di vapore e non dalla pressione del gas
 - diventa falso se la pressione è troppo alta e l'interazione gas-vapore modifica il flusso di vapore
- gas leggeri vengono pompati più efficacemente
 - maggiore solubilità
 - trasferimento di impulso da vapore a gas più efficace
 - **ideale per pompare He**

Kinetic pumps

Varianti delle pompe a diffusione:

- principio di funzionamento simile, ma aumentando la densità del fluido si può adattare a pressioni in ingresso più alte:

- diffusion pump
- vapor jet pump
- water jet pumps



Entrapment/sorption pumps

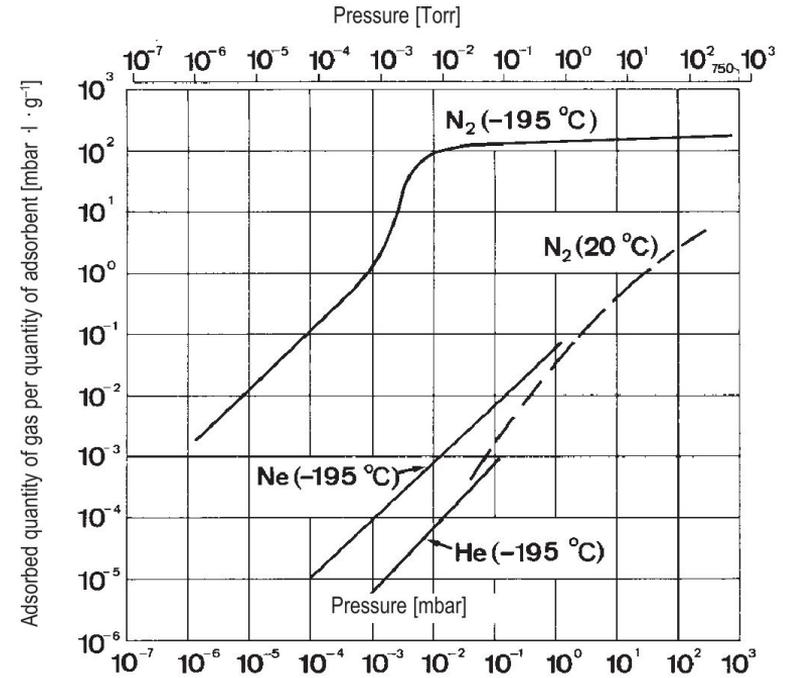
Caratteristiche generali:

- il **gas** non viene trasportato al di fuori del volume da evacuare, ma **assorbito e intrappolato** sulla superficie o nel volume di un elemento pompante
- si possono basare su legami chimici o processi fisici
- **ampio range di pressioni di lavoro**, a seconda del tipo (da roughing a UHV)
- adatte a rimuovere gas che va conservato
 - una sottocategoria sono le criopompe particolarmente adatte ad applicazioni criogeniche
- alcuni tipi raggiungono saturazione e necessitano di **rigenerazione**
- semplici, **nessuna parte in movimento, nessuna manutenzione** (a meno di criopompe con refrigeratori dedicati)

Entrapment/sorption pumps

Pompe ad adsorbimento:

- molecole si legano alla superficie di un materiale per forze di Van der Waals
- legame efficace solo a bassa temperatura → LN₂
- capacità di pompaggio dipende dalla superficie → materiali porosi (carboni attivi, ziolite, anche 1000m²/g di materiale!)
- pompaggio continua fino alla formazione di uno strato monoatomico (~100 mbar/l/g per N₂), poi perde efficacia
- la capacità di pompaggio dipende dalla pressione (processo statistico, equilibrio dinamico)
- molto efficaci per molecole grandi, inefficaci per He e gas nobili → pressioni limite per aria ~10⁻³ mbar (1ppm di gas nobili)



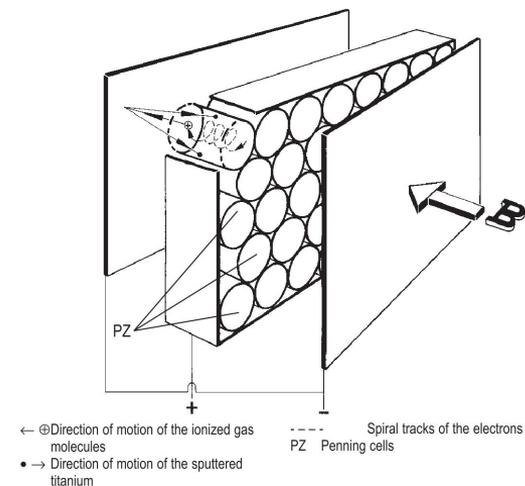
Entrapment/sorption pumps

Pompa a sublimazione

- un metallo (tipicamente Ti) viene continuamente depositato su una superficie fredda
- il gas si lega chimicamente e viene ricoperto da nuovi strati
- velocità di pompaggio altissima per gas reattivi, spesso usate come pompe ausiliarie per asportare velocemente improvvisi ingressi di gas
- HV-UHV

Pompa sputter-ion

- viene mantenuta una scarica elettrica tra un catodo e degli anodi
- il gas viene ionizzato per collisione con gli elettroni e quindi accelerato verso gli elettrodi dove si impianta, anche se non reattivo
- efficace anche per gas nobili
- UHV



Entrapment/sorption pumps

Getter non-evaporabili

- leghe (eg. zirconio-alluminio) molto reattive in formato poroso
- particolarmente efficace per idrogeno:
 - rapida diffusione nel volume
 - la superficie si libera per assorbire nuove molecole
- velocità di pompaggio costante per lunghi periodi in HV e UHV, $> 1000\text{l/s}$
- completamente passiva, nessuna alimentazione, nessuna parte in movimento, nessun reflusso
- elemento riscaldante per rigenerazione periodica
- tipicamente utilizzata in combinazione con turbo (inefficaci per H_2) per raggiungere UHV, o come trappola per H_2 in circuiti chiusi

Entrapment/sorption pumps

Criopompa

- elemento che assorbe il gas viene raffreddato a temperature criogeniche ($<77\text{K}$)
- il raffreddamento dell'elemento assorbente/scambiatore di calore può avvenire tramite immersione in liquido criogenico (LN_2 o LHe), evaporazione di un liquido criogenico o refrigeratore
- tre meccanismi:
 - condensazione
 - adsorbimento
 - intrappolamento

Entrapment/sorption pumps

Criopompa

- elemento che assorbe il gas viene raffreddato a temperature criogeniche (<77K)
- il raffreddamento dell'elemento assorbente/scambiatore di calore può avvenire tramite immersione in liquido criogenico (LN₂ o LHe), evaporazione di un liquido criogenico o refrigeratore
- tre meccanismi:
 - condensazione
 - adsorbimento
 - intrappolamento
- $T < T_{\text{evaporazione}} \text{ a } T_{\text{amb}}$
- potere refrigerante per asportare il calore latente di condensazione
- all'aumentare dello spessore dello strato condensato peggiora la conduttanza termica → capacità di pompaggio decresce nel tempo
- He non può essere criopompato per condensazione per semplice immersione in LHe

Entrapment/sorption pumps

Criopompa

- elemento che assorbe il gas viene raffreddato a temperature criogeniche (<77K)
 - il raffreddamento dell'elemento assorbente/scambiatore di calore può avvenire tramite immersione in liquido criogenico (LN₂ o LHe), evaporazione di un liquido criogenico o refrigeratore
 - tre meccanismi:
 - condensazione
 - adsorbimento
 - intrappolamento
- legami Van der Waals gas-superficie più intenso di gas-gas →
 $Q_{\text{adsorbimento}} > Q_{\text{evaporazione}}$
 - velocità di pompaggio diminuisce quando si passa da adsorbimento a condensazione
 - anche He può essere criopompato per immersione in LHe fino alla formazione di layer monoatomico
 - necessaria molta superficie → carbone attivato, silica gel, setacci molecolari

Entrapment/sorption pumps

Criopompa

- elemento che assorbe il gas viene raffreddato a temperature criogeniche ($<77\text{K}$)
 - il raffreddamento dell'elemento assorbente/scambiatore di calore può avvenire tramite immersione in liquido criogenico (LN_2 o LHe), evaporazione di un liquido criogenico o refrigeratore
 - tre meccanismi:
 - condensazione
 - adsorbimento
 - intrappolamento
- utile per pompare gas con basso punto di ebollizione (eg. H_2)
 - inclusione degli atomi di gas nello strato formato da un altro gas per cui $T_{\text{criopompa}} < T_{\text{fusione}}$ (eg N_2 , Ar , CO_2 , CH_4)
 - la pressione della miscela gassosa a $T_{\text{criopompa}}$ è \ll pressione del gas da solo

Entrapment/sorption pumps

Criopompa - parametri rilevanti

- $T_{\text{criopompa}}$ → determina quali gas possono essere pompati a quale p_{min}
- cooling power del sistema usato per raggiungere la $T_{\text{criopompa}}$ → determina la velocità di pompaggio e la pressione massima di funzionamento
- il calore latente di condensazione (o l'energia di legame di adsorbimento) determinano il riscaldamento di una pompa già fredda quando si inizia a pompare
- si definisce la $p_{\text{cross-over}}$ come la pressione della camera di volume V che fa scaldare la pompa a > 20 K
- p_{min} e capacità (pV) dipendono dal tipo di meccanismo, e quindi dal tipo di gas

Utilizzo

Criteri di scelta:

- livello di vuoto e portata
- pressione di scarico (ambiente vs pompa di backing)
- necessità di operazione a secco per evitare contaminazioni (della camera o dello scarico in circuiti chiusi)
- operazione a regime costante vs roughing frequente
- downtime dovuto a manutenzioni
- costo di operazione e manutenzione
- raffreddamento ad aria vs acqua

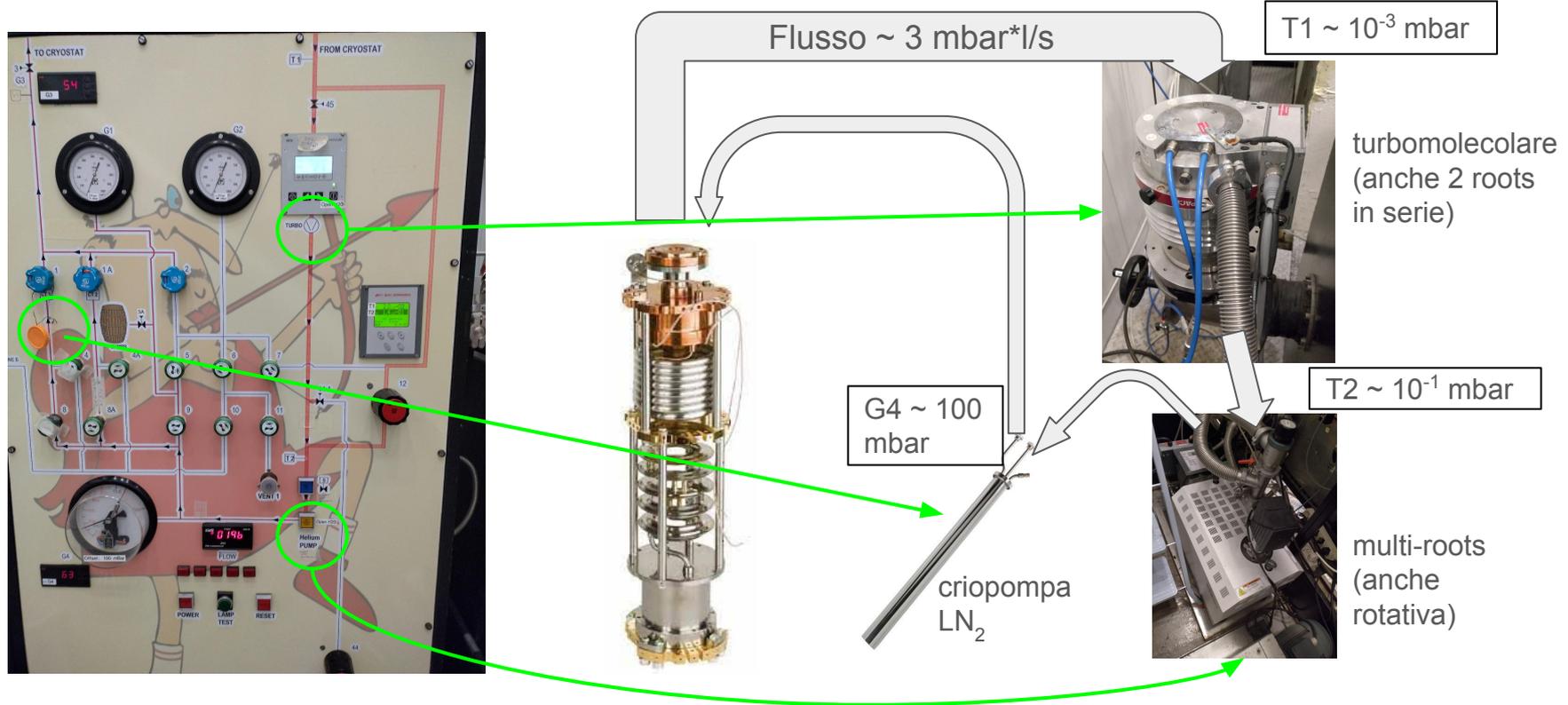
Utilizzo

Esempi di utilizzo di pompe in criogenia:

- evacuazione di volumi per ottenere isolamento termico (camere a vuoto di dewar e criostati, linee di trasferimento per liquidi criogenici) - high vacuum, ultra-high vacuum → basse pressioni limite
- pompaggio della superficie di liquidi criogenici per sfruttare calore latente di evaporazione (1Kpot, criostati a elio pompato) - rough vacuum → grande portata
- circolazione di miscele gassose in circuiti chiusi (unità a diluizione) - high vacuum + medium vacuum → grande portata a bassa pressione, pompe in cascata
- criopompe per manutenzioni a unità a diluizione e thermal switches
- ricerca di fughe - cercafughe

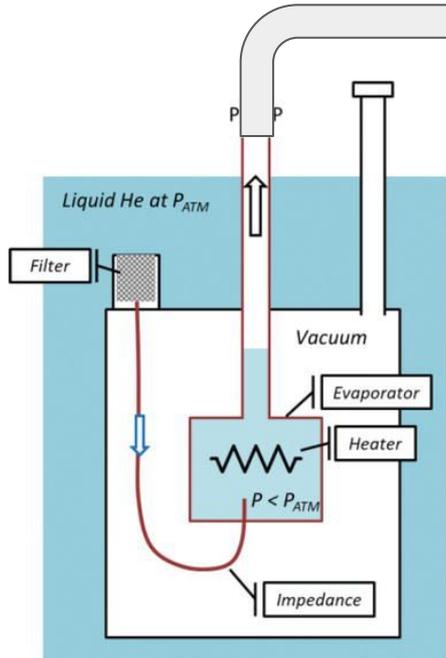
Esempi di utilizzo

Unità a diluizione, pompe di circolazione



Esempi di utilizzo

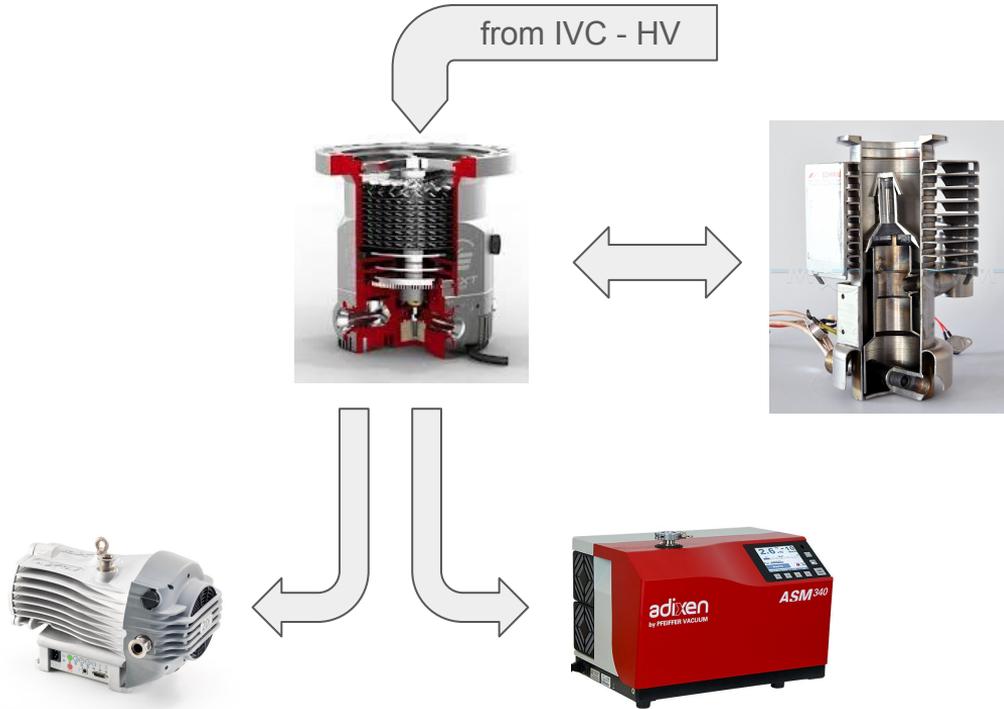
1K-pot



- $p_{in} \sim 2$ mbar determina la temperatura
- portata della pompa determina il cooling power
- rotativa sigillata a olio con filtro sull'uscita (per non contaminare linea di recupero)
- $p_{out} = p_{ATM}$
- se usata anche durante operazioni preliminari di "pulizia" dall'aria di 1K-pot e MB \rightarrow gas ballast

Esempi di utilizzo

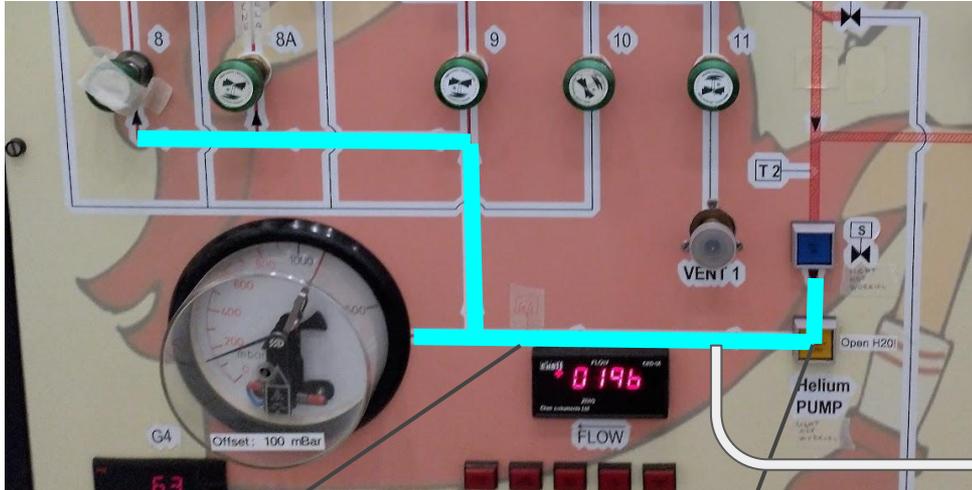
Rimozione gas di scambio IVC (OVC)



- rimozione di He usato come gas di scambio a ~ 10 K
- competizione con criopompa
- turbomolecolare + backing
- applicazione classica per una pompa a diffusione, molto più efficace su He, ma operazione e manutenzione molto più complesse
- LD per valutare raggiungimento del vuoto desiderato, misura di pressione poco significativa a causa della criopompa

Esempi di utilizzo

Criopompa circuito miscela



miscela $^3\text{He}/^4\text{He}$ \$\$\$

come rimuovo la pompa di circolazione dal circuito senza mandare all'aria la miscela?

Criopompa in LHe



Misura del vuoto



Misura del vuoto

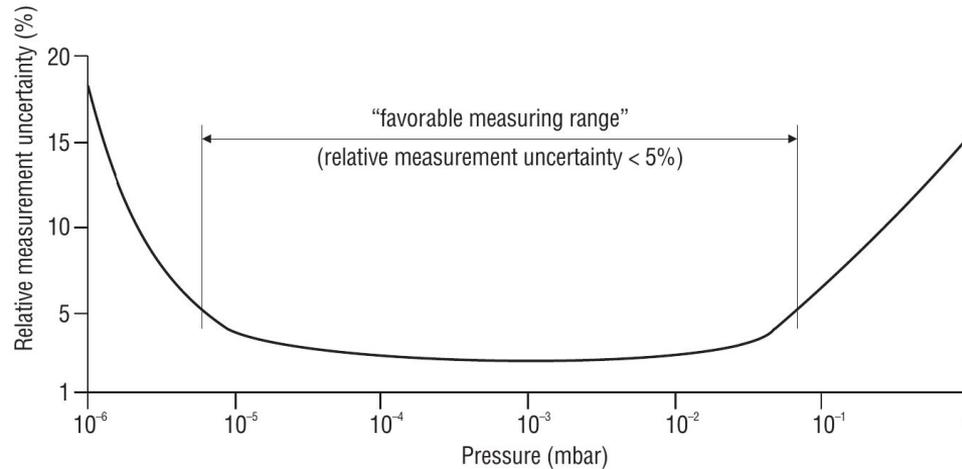
Perché misurare il vuoto

- valutare che il livello di vuoto raggiunto sia compatibile con l'applicazione per cui è richiesto
- implementare sistemi di controllo automatici (accensione/spegnimento di pompe, apertura/chiusura di valvole, etc) in circuiti di pompaggio
- diagnosticare problemi di tenuta del sistema (presenza di fughe, outgassing, etc)
- misurare/verificare impedenze tramite curve di pompaggio e differenze di pressione in condizioni statiche

Misura del vuoto

Difficoltà:

- ampissimo range dinamico: 1000 mbar \rightarrow 10^{-12}
- 15 ordini di grandezza: per confronto, è come da 1 m al diametro del protone!
- impossibile coprire con unica tecnica tutto il range
- molto difficile avere una calibrazione accurata a meglio di qualche %, molto peggio al limite del range



Misura del vuoto

Difficoltà:

- **RV → flusso laminare:**
 - la posizione del misuratore nel circuito è molto rilevante
 - in regime di flusso laminare le cadute di pressione dovute all'impedenza delle condutture è rilevante
 - se la connessione tra il misuratore e il resto della linea di pompaggio è troppo piccola → ritardo nell'evacuazione
- **HV, UHV → regime molecolare**
 - il misuratore stesso può influire sulla misura (eg: catodo caldo può scomporre le molecole modificando la composizione del gas nelle vicinanze del misuratore, pompa ionica)
 - una linea di connessione con troppo/troppo poco outgassing rispetto al volume genera una misura non accurata → montaggio del misuratore direttamente nella camera

Misura del vuoto

Misura diretta - gas independent

- $p = F/\text{superficie}$
- misuro la forza nota la superficie
- dipende solo dal numero di particelle e dalla temperatura
- indipendente dal gas: misuro la pressione totale come somma delle pressioni parziali dei singoli gas (e vapori)
- funziona in RV, MV

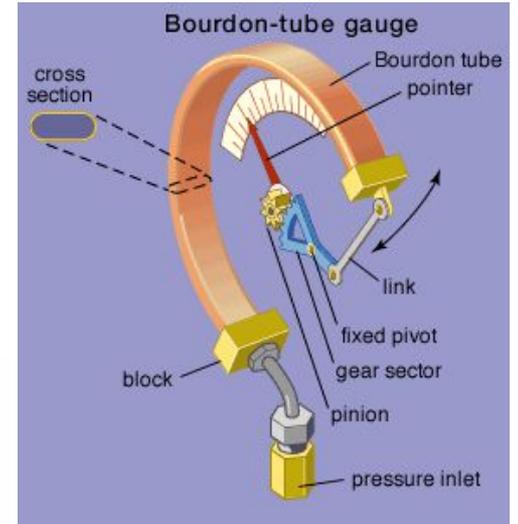
Misura indiretta - gas dependent

- misuro una proprietà del gas che dipende dalla densità
- la pressione dipende dalla densità (per una data T)
- la proprietà che misuro generalmente dipende dal tipo di gas
- calibrazione tipicamente per N_2 → fattori correttivi per gli altri gas
- la correzione può dipendere da p
- unico modo per HV e UHV, ma misura più sensibile a effetti sistematici e più difficile → minore accuratezza

Misura del vuoto - misure dirette

Misuratori Bourdon

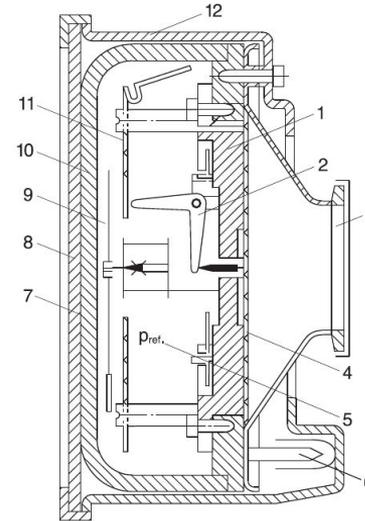
- dipende dalla pressione atmosferica
- accurato a ~ 10 mbar
- pressione fuori dal range \rightarrow deformazione permanente del tubo \rightarrow scalibrazione
- estremamente semplice e robusto



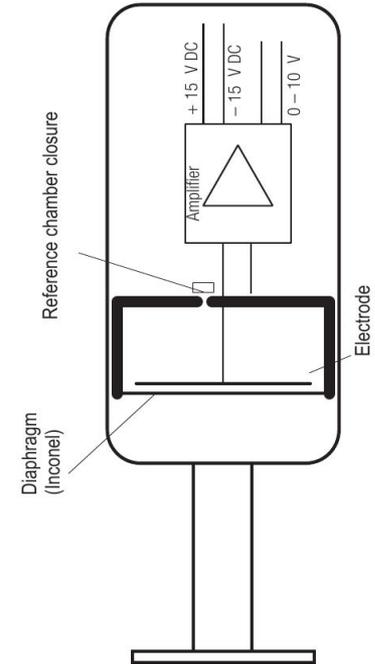
Misura del vuoto - misure dirette

Misuratori a membrana

- **principio generale:** sottile membrana divide il volume di misura da un volume sigillato con pressione di riferimento
- si misura la **deflessione della membrana**
- misura meccanica, elettrica (capacitiva, piezoelettrica con componenti discreti o circuito integrato su membrana in silicio)
- lettura con scala graduata o segnale elettrico per acquisizione/digitalizzazione
- **range di utilizzo tra p_{amb} e 10^{-3} mbar** ma con membrane di diverso spessore
- range dinamico: 3 ordini di grandezza



- | | |
|---------------------------|--------------------|
| 1 Base plate | 7 Mirror sheet |
| 2 Lever system | 8 Plexiglass sheet |
| 3 Connecting flange | 9 Pointer |
| 4 Diaphragm | 10 Glass bett |
| 5 Reference pressure pref | 11 Mounting plate |
| 6 Pinch-off end | 12 Housing |



Misura del vuoto - misure dirette



Misuratori a liquido

- versione più sofisticata della colonna di mercurio
- tubo sigillato con vuoto ($p_{\text{vap-Hg}} \sim 10^{-3}$ mbar) da un lato, aperto verso la camera dall'altro
- differenza di livello \rightarrow **pressione assoluta fino a mbar**
- delicati, scomodi, ma misura molto precisa e indipendente da condizioni al contorno

Misuratori a compressione (McLeod)

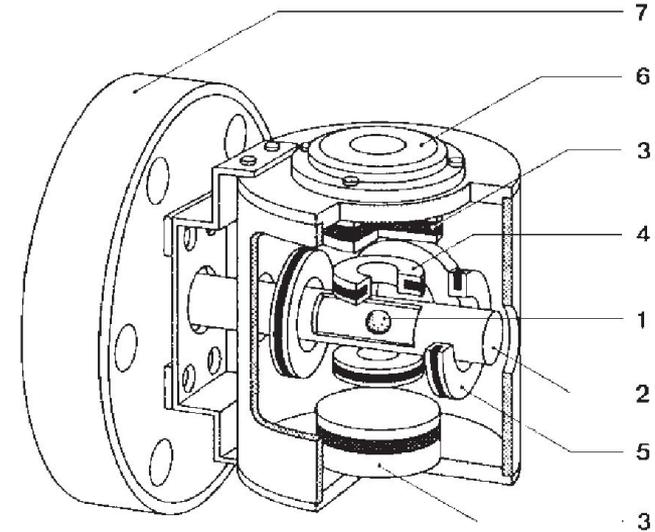
- non pratico per misure “sul campo”
- fornisce **misura assoluta** precisa **fino a 10^{-5} mbar** per calibrazione di altri strumenti
- raramente utilizzato oggi
- si comprime di un rapporto noto un volume noto di gas a bassa pressione \rightarrow aumenta la pressione fino a valori misurabili con precisione
- solo pressioni parziali di gas non condensabili



Misura del vuoto - misure indirette

Misuratori a rotore sospeso

- **sfera sospesa magneticamente** viene messa in rapida rotazione
- velocità letta per induzione magnetica
- cicli di accelerazione e decelerazione automatici
- **rallenta per attrito con il gas**
- decelerazione → densità del gas → pressione
- dipendenza relativamente piccola dal tipo di gas
- molto preciso $10^{-2} < p < 10^{-7}$ mbar, molto stabile nel tempo
- poco adatto a utilizzo sul campo → usato per calibrazione di altri strumenti



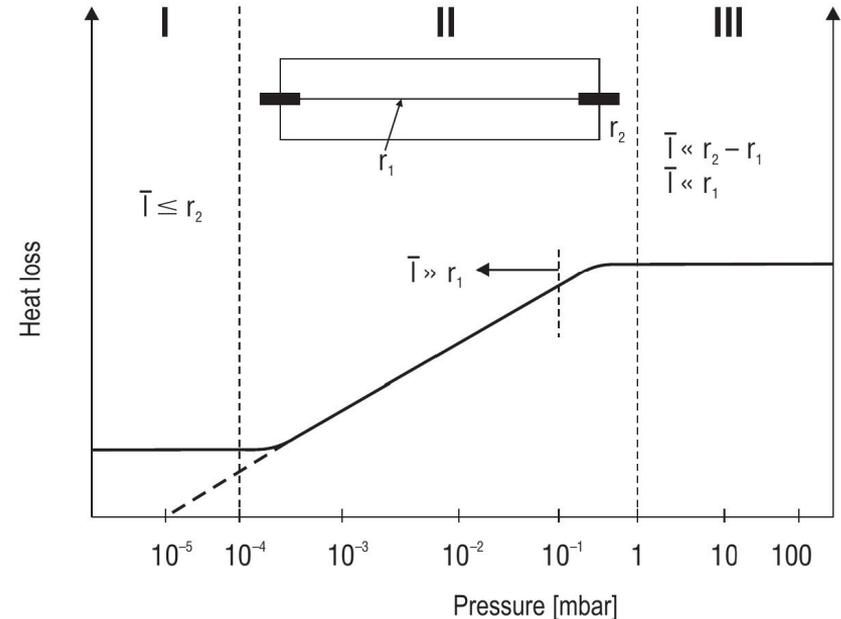
1 Ball
2 Measuring tube,
closed at one end, welded
into
connection flange 7

3 Permanent magnets
4 Stabilization coils
5 4 drive coils
6 Bubble level
7 Connection flange

Misura del vuoto - misure indirette

Misuratori a conducibilità termica - Pirani

- **filamento** conduttivo dentro a una **camera con gas da misurare**
- regolatore di corrente per mantenere resistenza costante $\rightarrow W_{\text{joule}} = I \cdot V = W_{\text{dissipata}}$
- nota la geometria del sistema **$W_{\text{dissipata}}$ proporzionale a densità del gas**
- valido quando dissipazione supporti (I) e convezione (III)
- accuratezza $\sim 10\%$ **tra 10^{-3} e 1 mbar**
- variazioni anche di un fattore 2 al variare del gas \rightarrow curve di correzione



I Thermal dissipation due to radiation and conduction in the metallic ends
 II Thermal dissipation

due to the gas, pressure-dependent
 III Thermal dissipation due to radiation and convection

Misura del vuoto - misure indirette

Misuratori a ionizzazione a catodo freddo - Penning

- catodo emette **elettroni per effetto di campo** (~ 2 kV), campo magnetico li fa spiraleggiare
- elettroni ionizzano il gas
- **ioni raccolti su anodo di lettura**
- corrente \propto densità
- forte dipendenza dal gas (diverso potenziale di ionizzazione) \rightarrow fattore 7 tra N_2 e He
- limite di utilizzo **$10^{-11} > p > 10^{-2}$ mbar**: la corrente non dipende più dalla pressione
- la raccolta di ioni influisce sulla misura (pompa spotter-ion) \rightarrow sottostima sistematica della pressione

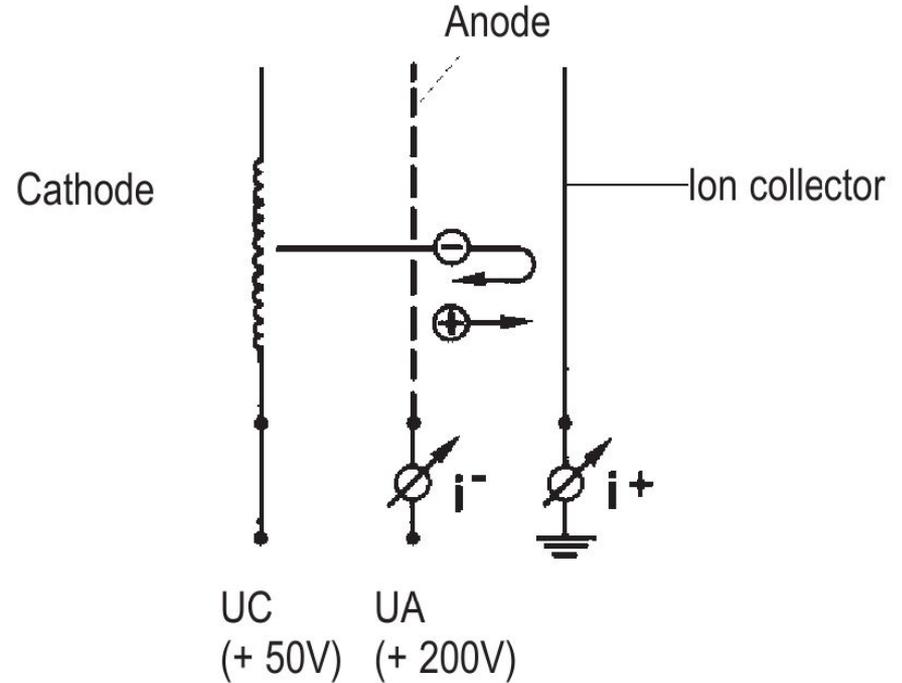


- \rightarrow semplice e affidabile
- \rightarrow relativamente economico
- \rightarrow insensibile alle vibrazioni
- \rightarrow insensibile a improvvisi aumenti di pressione

Misura del vuoto - misure indirette

Misuratori a ionizzazione a catodo caldo

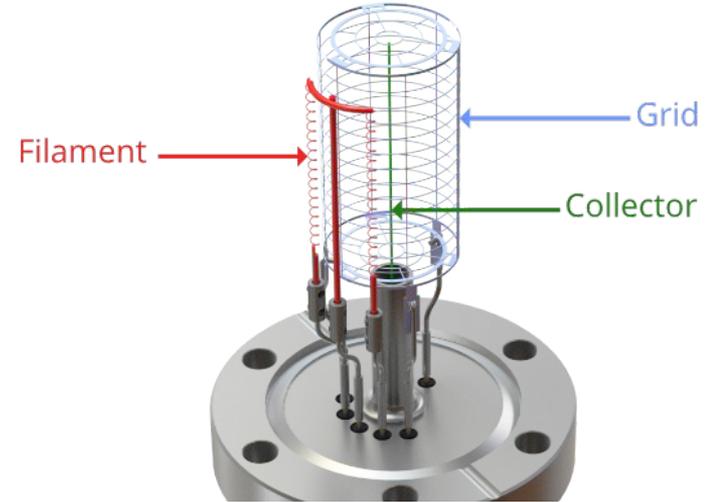
- catodo caldo sorgente intensa di elettroni
- tensioni di lavoro molto più basse (~ 100 V)
- ioni raccolti su un elettrodo di lettura dedicato
- effetto di pompaggio per sputtering molto ridotto rispetto a penning ($E_{\text{ioni}} \ll$)
- range **$10^{-12} > p > 10^{-3}$ mbar**
- $p > 10^{-3}$ mbar: instabilità del plasma, neutralizzazione degli ioni e ossidazione
- per misure in UHV range \rightarrow installazione nuda per minimizzare effetto raggi X



Misura del vuoto - misure indirette

Misuratori a ionizzazione a catodo caldo

- catodo caldo sorgente intensa di elettroni
- tensioni di lavoro molto più basse (~100 V)
- ioni raccolti su un elettrodo di lettura dedicato
- effetto di pompaggio per sputtering molto ridotto rispetto a penning ($E_{\text{ioni}} \ll$)
- range **$10^{-12} > p > 10^{-3}$ mbar**
- $p > 10^{-3}$ mbar: instabilità del plasma, neutralizzazione degli ioni e ossidazione
- per misure in UHV range → installazione nuda per minimizzare effetto raggi X



- emissione di raggi X → assorbimento su ion collector e pareti → emissione di elettroni → corrente che si somma/sottrarre - si può correggere con geometria
- desorbimento di gas dall'anodo - si può correggere effettuando misure a diverse correnti di scarica

Misura del vuoto - calibrazione

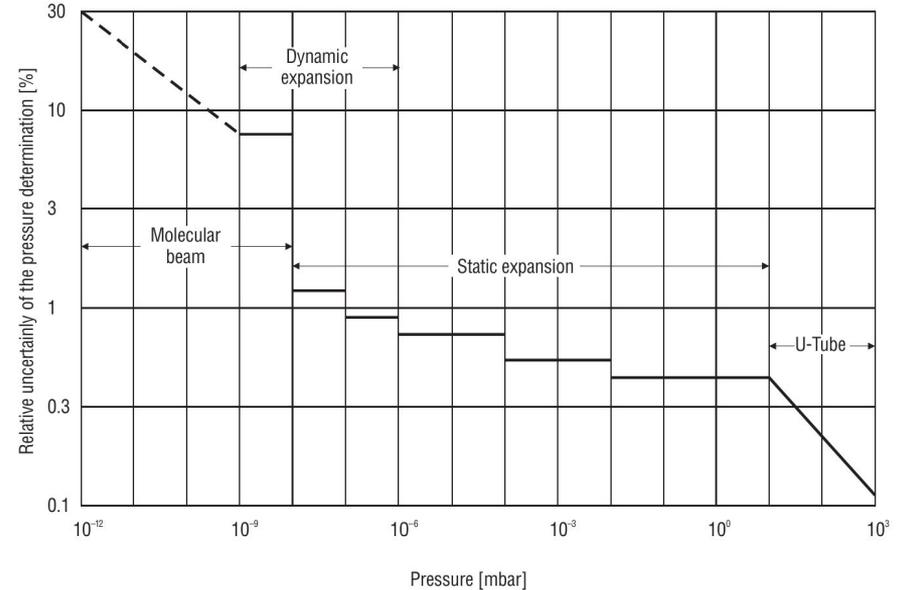
3 metodi di calibrazione principali

Confronto con misuratore di riferimento

- di solito misuratori diretti, tubo a U o McLeod
- accurate fino a $p \sim 10^{-4}$ mbar

Espansione statica

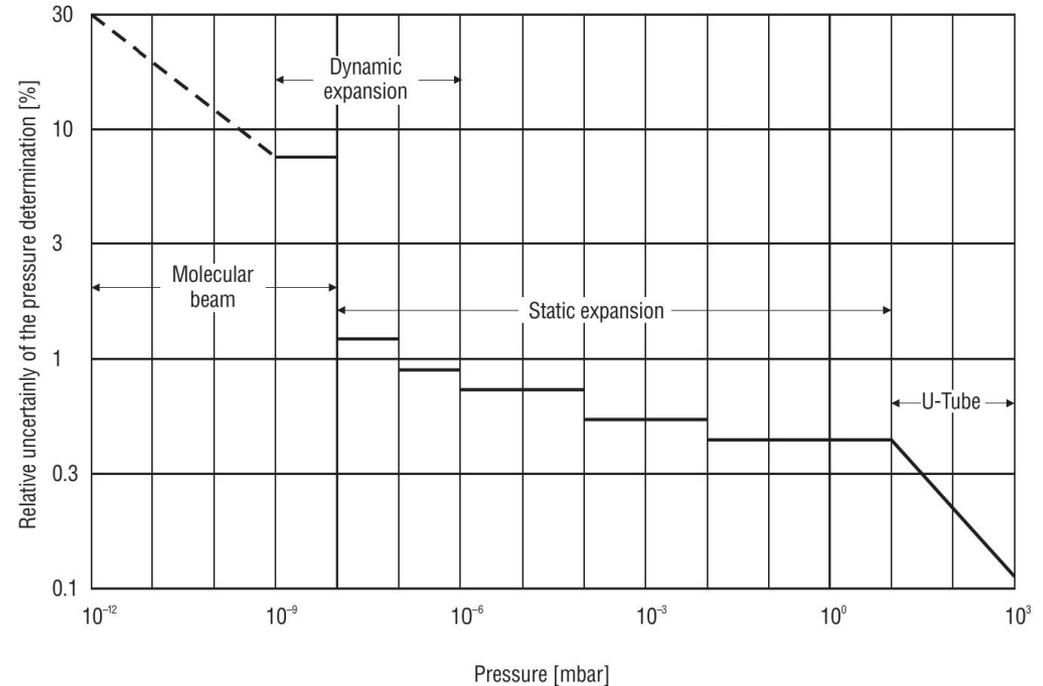
- volume di gas a pressione nota e misurabile con metodo diretto
- espansioni successive in volumi crescenti, isoterme
- limite: precisione misura volume, temperatura e adsorbimento/desorbimento
- accurate fino a $p \sim 10^{-6}$ mbar



Misura del vuoto - calibrazione

Espansione dinamica

- fuga calibrata Q (gas ad alta pressione attraverso orifizio in **regime molecolare**)
- pompaggio calibrato S attraverso orifizio in regime molecolare
- eq. continuità $\rightarrow p = Q/S$
- adsorbimento/desorbimento irrilevanti a regime
- precisione determinata dalla conoscenza delle conduttanze
- accurato fino a UHV



Grazie
dell'attenzione