

Tecnologia del vuoto

prof. Emilio Martines

Dipartimento di Fisica “G. Occhialini”
Università degli Studi di Milano-Bicocca

emilio.martines@unimib.it

Il termine “vuoto” (in inglese, *vacuum*, dal latino *vacua*) viene usato in ambito scientifico con due accezioni.

Una, più astratta, per cui esso indica lo spazio totalmente privo di materia, condizione impossibile realizzare nella pratica.

La seconda, di cui ci occuperemo oggi, preminente nell’uso tecnico, si riferisce ad una regione di spazio (ovviamente libera da materiali allo stato solido o liquido) occupata da aeriformi (gas o vapori) la cui pressione totale sia sostanzialmente inferiore a quella atmosferica.

In pratica, in questo secondo significato, il vuoto è uno stato gassoso in cui $p < p_{\text{atm}}$.

La pompa da vuoto di Otto von Guericke (~1650)



OTTONIS DE GUERICKE
EXPERIMENTA
NOVA (ut vocantur) MAGDEBURGICA
D E
VACUO SPATIO

Primùm à R. P. *Gaspares Schotto*, è Societate
Jesu, & Herbilopolitanæ Academiae Matheseos
Professore :

Nunc verò ab ipso Auctore

*Perfectiùs edita, variisque aliis Experimentis
aucta.*

Quibus accesserunt simul certa quedam

*De Aeris Pondere circa Terram ; de Virtutibus Mundanis, & Syll-
mate Mundi Planetario ; sicut & de Stellis Fixis, ac Spatio illo Immenso, quod iam
intra quam extra eas sumitur.*



Famosa dimostrazione pubblica delle
«sfere di Magdeburgo», che 4 cavalli non
riuscirono a separare.



Luftpumpe: Experiment mit Guericke's Magdeburger Halbkugeln.
Nachmilde aus: Otto von Guericke's Experimenta. Amsterdam 1672.

alamy - G37NWW

Esperimenti di Robert Boyle (1660)



Un sistema da vuoto è costituito in generale da quattro tipi di componenti: una **camera da vuoto**, un **sistema di pompaggio**, un **apparato di misura del vuoto** (composto da uno o più **vacuometri**), e infine un complesso di **giunti, valvole, condotti e trappole** che richiede l'uso di particolari guarnizioni e materiali per vuoto.

Si distinguono i sistemi sottoposti a **pompaggio continuo** da quelli che vengono **sigillati dopo l'evacuazione**; i primi si chiamano a **vuoto dinamico** mentre i secondi si indicano a **vuoto statico**.

Infatti, in ogni sistema da vuoto si ha una serie di processi che comportano il rilascio di un certo flusso di gas all'interno della camera a vuoto (**degasaggio**) e questi gas devono venire in qualche modo eliminati se si vuole che il vuoto si mantenga al grado iniziale.

La quantità fondamentale per valutare l'efficacia di un sistema da vuoto è la **pressione**.

Pressione = forza / area

Unità di misura SI: Pascal (N/m²)

Altre unità spesso utilizzate:

- 1 mbar = 100 Pa
- 1 torr (o mm Hg) = 133 Pa

To	Pa	mbar	torr
From Pa	1	0.01	7.5/1000
mbar	100	1	0.75
torr	133	1.33	1

$$x \cdot [\text{unit 1}] = x \cdot \text{factor} \cdot [\text{unit 2}]$$

Pressione atmosferica: 1 atm = 101325 Pa = 1000 mbar = 760 torr

Tabella 2 – Variazione della pressione atmosferica e della densità di particelle in funzione delle diverse altezze rispetto al livello del mare

<i>h</i> (km)	<i>p</i> (Pa)	<i>T</i> (K)	<i>N</i> (cm ⁻³)
0	1,01 325 × 10 ⁵	288	2,58 × 10 ¹⁹
10	3,6 × 10 ⁴	217	4,10 × 10 ¹⁸
50	85,3	276	2,20 × 10 ¹⁶
100	0,33 × 10 ⁻¹	207	8,9 × 10 ¹²
500	1,3 × 10 ⁻⁵	1550	5 × 10 ⁷
1000	0,99 × 10 ⁻⁸	1600	5 × 10 ⁵

Per convertire in (m⁻³),
moltiplicare per 10⁶.

Basso vuoto	$10^5 \div 10^2$ Pa	$10^3 \div 1$ mbar
Medio vuoto	$10^2 \div 10^{-1}$ Pa	$1 \div 10^{-3}$ mbar
Alto vuoto	$10^{-1} \div 10^{-5}$ Pa	$10^{-3} \div 10^{-7}$ mbar
UHV	$< 10^{-5}$ Pa	$< 10^{-7}$ mbar

Livello di vuoto	pressione (mbar)	n (m^{-3})	λ (m)
Basso e medio vuoto	1013	$2.48 \cdot 10^{25}$	$6.5 \cdot 10^{-8}$
	1	$2.45 \cdot 10^{22}$	$6.6 \cdot 10^{-5}$
	10^{-3}	$2.45 \cdot 10^{19}$	$6.6 \cdot 10^{-2}$
Alto Vuoto	10^{-5}	$2.45 \cdot 10^{17}$	6.6
	10^{-7}	$2.45 \cdot 10^{15}$	$6.6 \cdot 10^2$
UHV	10^{-9}	$2.45 \cdot 10^{13}$	$6.6 \cdot 10^4$

Basso e medio vuoto: regime viscoso ($\lambda < L$), fase gassosa dominante

Alto vuoto: regime molecolare ($\lambda > L$), rilascio dalle pareti dominante

Ultra alto vuoto (UHV): estrazione dal reticolo cristallino

Densità e cammino libero medio

Cammino libero medio: distanza media percorsa da una particella tra due collisioni.

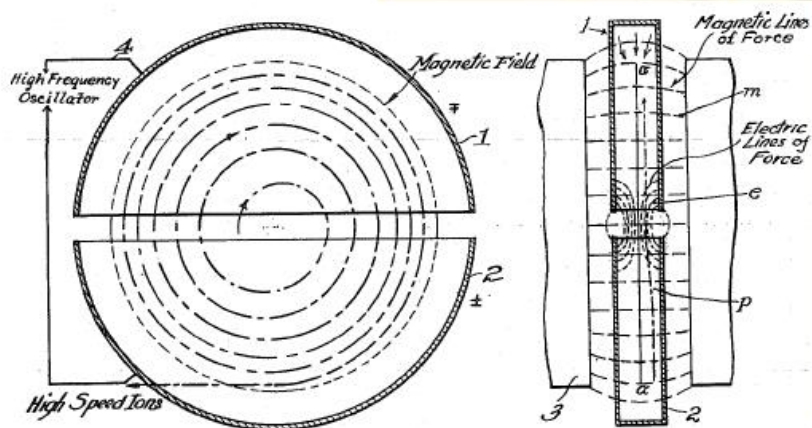
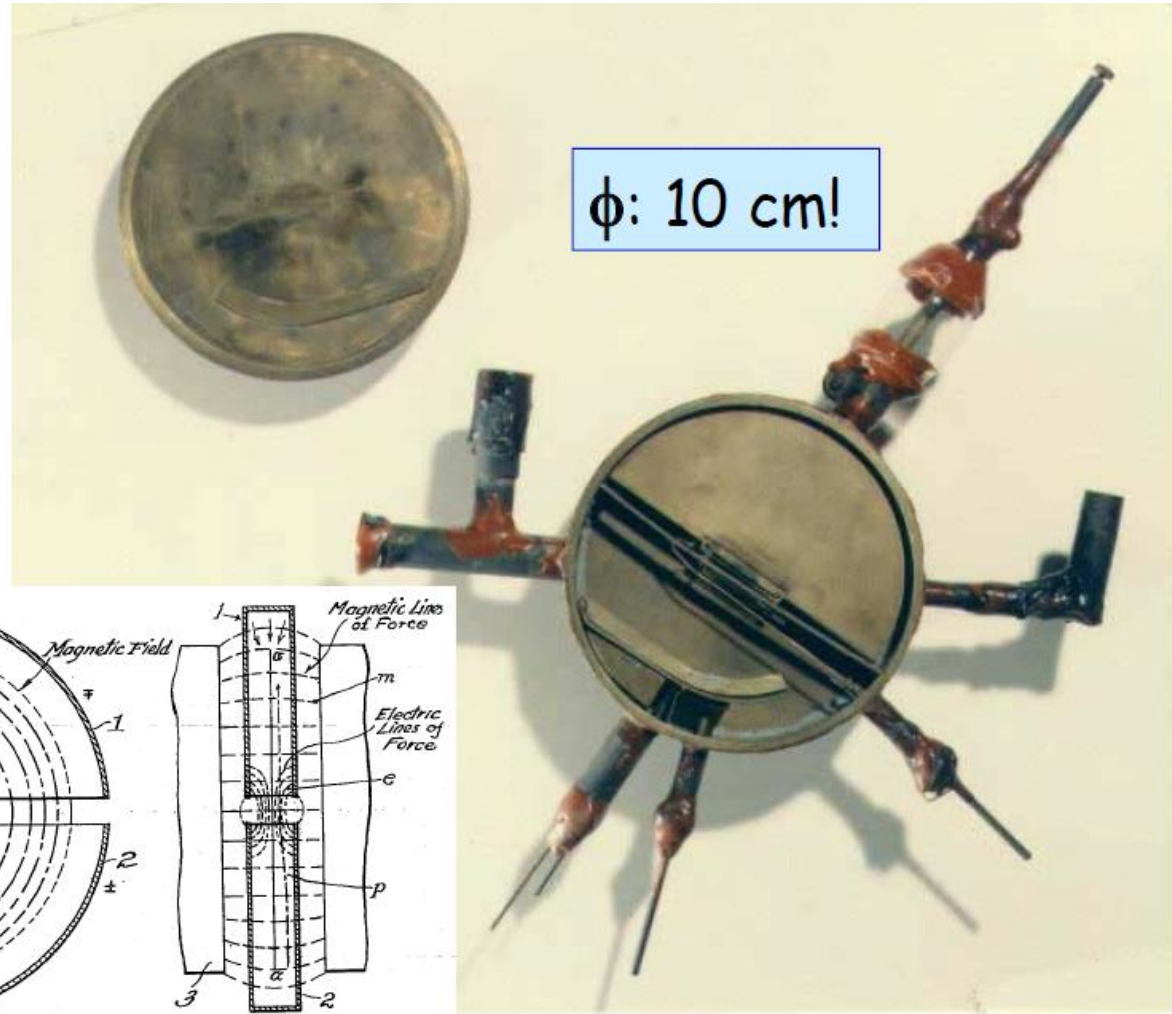
Vacuum range	Pressure [mbar]	n [molecules/cm ³]	Mean free path
Ambient pressure	1013	2.5×10^{19}	68 nm
Low vacuum	300 – 1	$10^{19} - 10^{16}$	0.1 – 100 μ m
Medium vacuum	$1 - 10^{-3}$	$10^{16} - 10^{13}$	0.1 – 100 mm
High vacuum	$10^{-3} - 10^{-7}$	$10^{13} - 10^9$	10 cm – 1 km
Ultra high vacuum	$10^{-7} - 10^{-12}$	$10^9 - 10^4$	1 km – 10^5 km
Extremely high vacuum	$<10^{-12}$	$<10^4$	$>10^5$ km

rarefaction

At 296K=23C

Applicazioni	Pressione (Pa)
Simulazione spaziale	$10^5 \div 10^{-4}$
Crescita di film sottili	$10^{-1} \div 10^{-8}$
Tubi elettronici (cinescopi, valvole termoioniche, etc.)	$10^{-1} \div 10^{-6}$
Metallurgia (fusioni e leghe sotto vuoto, metallizzazione, ecc.)	$10^5 \div 10^{-1}$
Macchine acceleratrici di particelle	$10^{-4} \div 10^{-11}$
Fisica dei plasmi e macchine per fusione nucleare	$10^{-5} \div 10^{-8}$
Studi di proprietà microscopiche di superfici	$10^{-4} \div 10^{-9}$
Liofilizzazione	$10^1 \div 10^{-1}$
Isolamento termico	$10^{-1} \div 10^{-3}$

Il primo ciclotrone (Ernest O. Lawrence, 1931)



Paolo Michelato

The ideal gas law

$$pV = n_m RT$$

p = pressure

V = volume

n_m = amount of gas (number of moles)

T = temperature

R = general gas constant [8,314 J/(mol K)]

An **ideal gas** is composed of randomly-moving, non-interacting point particles.

1 dozen =



1 mole =



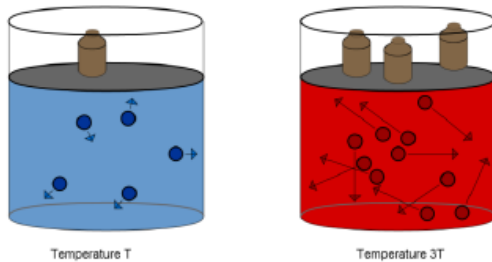
$$pV = nk_B T$$

n = amount of gas (number of atoms or molecules)

k_B = Boltzmann constant = $R/6.022 \times 10^{23}$

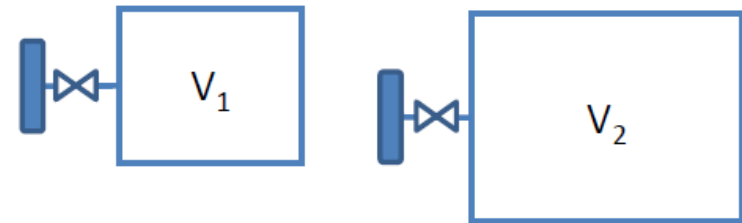
Useful forms of the ideal gas law

In a closed volume, increasing temperature from T_1 to T_2 , pressure increases proportionally from p_1 to p_2

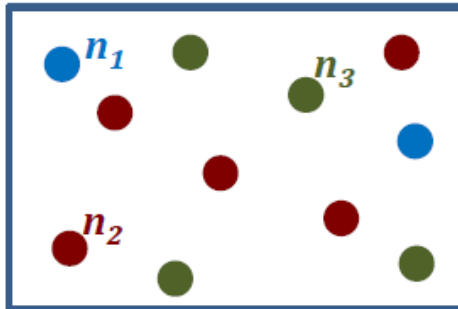


$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

At constant temperature, the same number of molecules distribute in 2 volumes V_1 and V_2 at pressures p_1 and p_2 such that:



$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$



DEFINITION

Partial pressure is the pressure which a gas would exert if it occupied the volume of the mixture on its own

$$p_1 = \frac{n_1 RT}{V}$$

$$p_2 = \frac{n_2 RT}{V}$$

$$p_3 = \frac{n_3 RT}{V}$$

Dalton law

The total pressure exerted by a mixture of (non-reactive) gases is equal to the sum of the partial pressures of individual gases

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots$$



$$p = \frac{RT}{V} (n_1 + n_2 + n_3 + \dots)$$

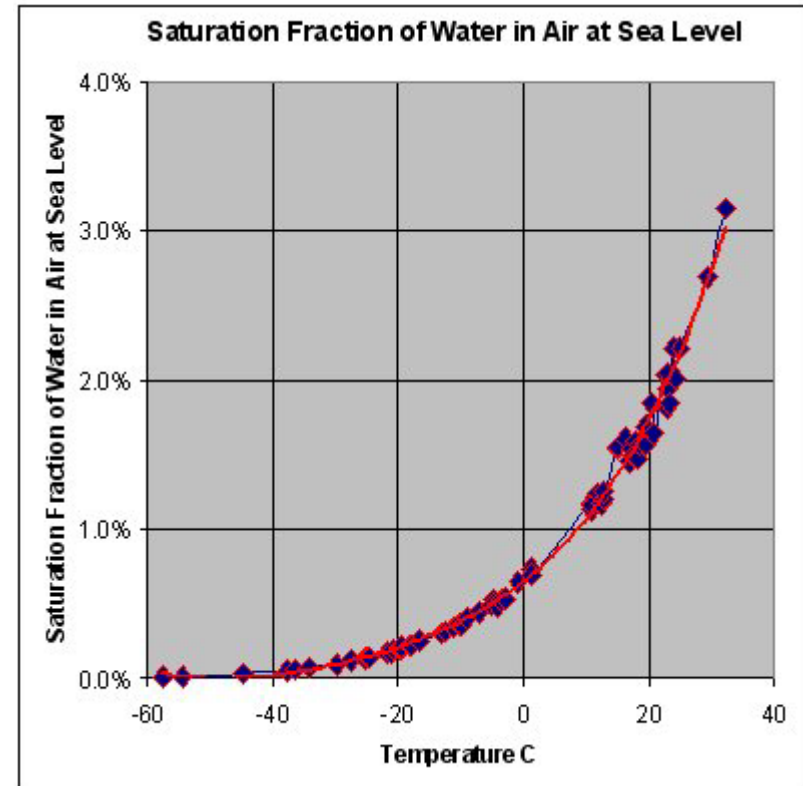
Composizione dell'aria secca

Constituent	Volume Content		Molecular Mass	Molecular Mass in Air
	Percent	ppm		
N ₂	78.08		28.02	21.88
O ₂	20.95		32.00	6.704
Ar	0.934		39.94	0.373
CO ₂	0.037		44.01	0.013
H ₂		0.5	2.02	---
Ne		18.2	20.18	---
He		5.24	4.00	---
Kr		1.14	83.8	---
Xe		0.087	131.3	---
CH ₄		2.0	16.04	---
N ₂ O		0.5	44.01	---
Total				28.97

L'acqua risulta particolarmente fastidiosa nei sistemi da vuoto: infatti, essendo una molecola **fortemente polare**, ha una forte tendenza delle molecole d'acqua di aderire sulle superfici metalliche o su quelle di materiali in grado di dare legami secondari o legami idrogeno. La sua massa molecolare è di 18,08 kg/mole (l'aria umida è meno densa di quella secca). Il contenuto di acqua nell'aria è variabile, e viene di solito espresso attraverso **l'umidità relativa**:

$$\phi = \frac{PP_w}{PP_{w_sat}} \times 100\%$$

dove pp_w è la pressione parziale dell'acqua, e pp_{w_sat} è la sua pressione di vapore saturo, che dipende dalla temperatura.



N: numero di particelle all'interno di un volume dato (es.: camera da vuoto)

Invece di lavorare con N, definiamo come quantità di gas NkT . Questa sarà uguale a pV .

Il **flusso** (volumetrico) F è la quantità di gas che passa per unità di tempo attraverso un piano isotermico. Esso è dunque definito come $F = kT \, dN/dt$, proporzionale al numero di molecole che per unità di tempo attraversano il piano

Si ha ovviamente che $F = p \, dV/dt$, dove p è la pressione sul piano e dV/dt il volume di gas che passa per il piano nell'unità di tempo.

Con questa definizione, F ha come unità $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$. Altre possibili unità di misura sono riportate nella tabella.

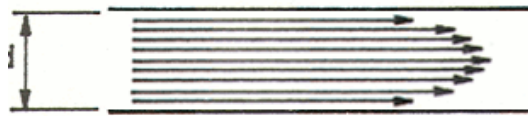
To	Pa m ³ /s	mbar l/s	torr l/s
From			
Pa m ³ /s	1	10	7.5
mbar l/s	0.1	1	0.75
torr l/s	0.133	1.33	1

$$x \cdot [\text{unit 1}] = x \cdot \text{factor} \cdot [\text{unit 2}]$$

È possibile distinguere 3 regimi di flusso, in base al **numero di Knudsen**, definito come il rapporto tra il libero cammino medio delle particelle e la lunghezza caratteristica del sistema: regime **viscoso** (laminare o turbolento), regime **transitorio**, regime **molecolare**.

$$K_n = \frac{\lambda}{L}$$

$K_n < 0.1$
Regime
laminare o
turbolento



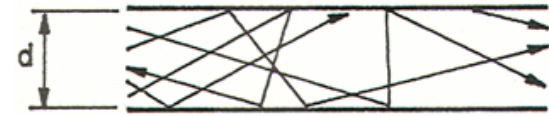
Il gas si trova in uno stato viscoso e collisionale. Il numero di Reynolds R_e dice se il regime è turbolento.

$0.1 > K_n > 1$
Regime
Transitorio



Il gas si trova in uno stato intermedio.

$K_n > 1$
Regime
Molecolare



Il gas è rarefatto e le collisioni non influenzano più il moto delle molecole.

Regime laminare e regime turbolento



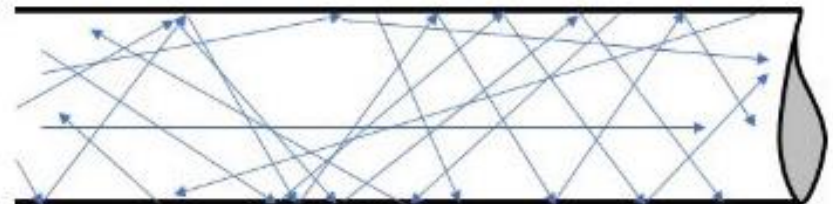
Viscoso Laminar Flow

Viscoso



Turbulent Flow

Molecolare



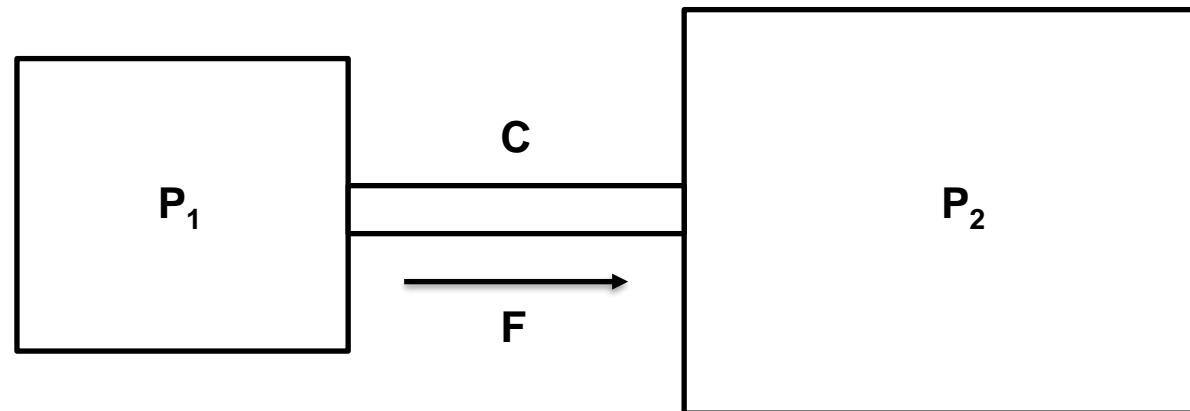
Molecular Flow

Attraverso una canalizzazione si verifica un flusso di gas se ai suoi estremi è presente una differenza di pressione.

La capacità della canalizzazione a lasciar passare il flusso di gas è legata, oltre a tale differenza di pressione, alla sua geometria.

Per descrivere tale capacità, si introduce la **conduttanza** C della canalizzazione, definita dalla relazione:

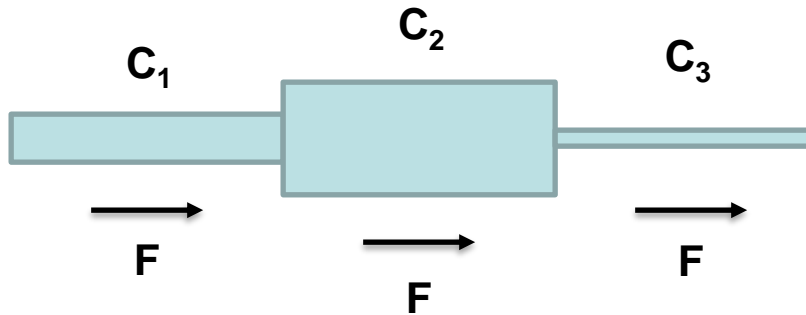
$$C = \frac{F}{p_1 - p_2} \quad \text{Unità di misura: } \mathbf{m^3/s} \text{ (o L/s).}$$



Analogia elettrica (legge di Ohm):

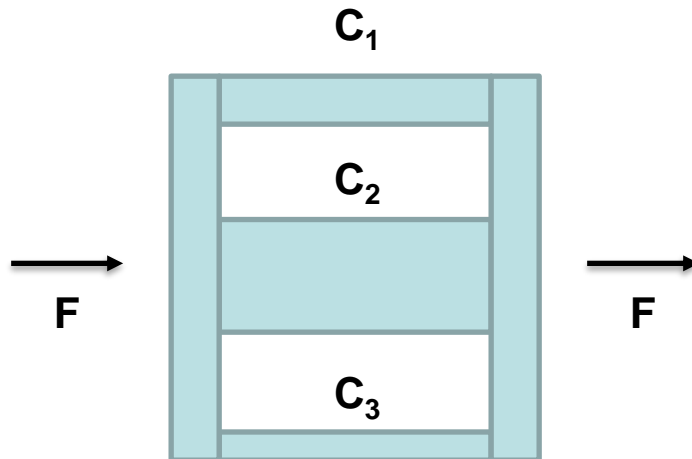
$p \rightarrow$ potenziale, $F \rightarrow$ corrente, $C \rightarrow$ conduttanza (1/resistenza)

Conduttanze in serie e parallelo



F è costante:

$$1/C_{eq} = 1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3$$

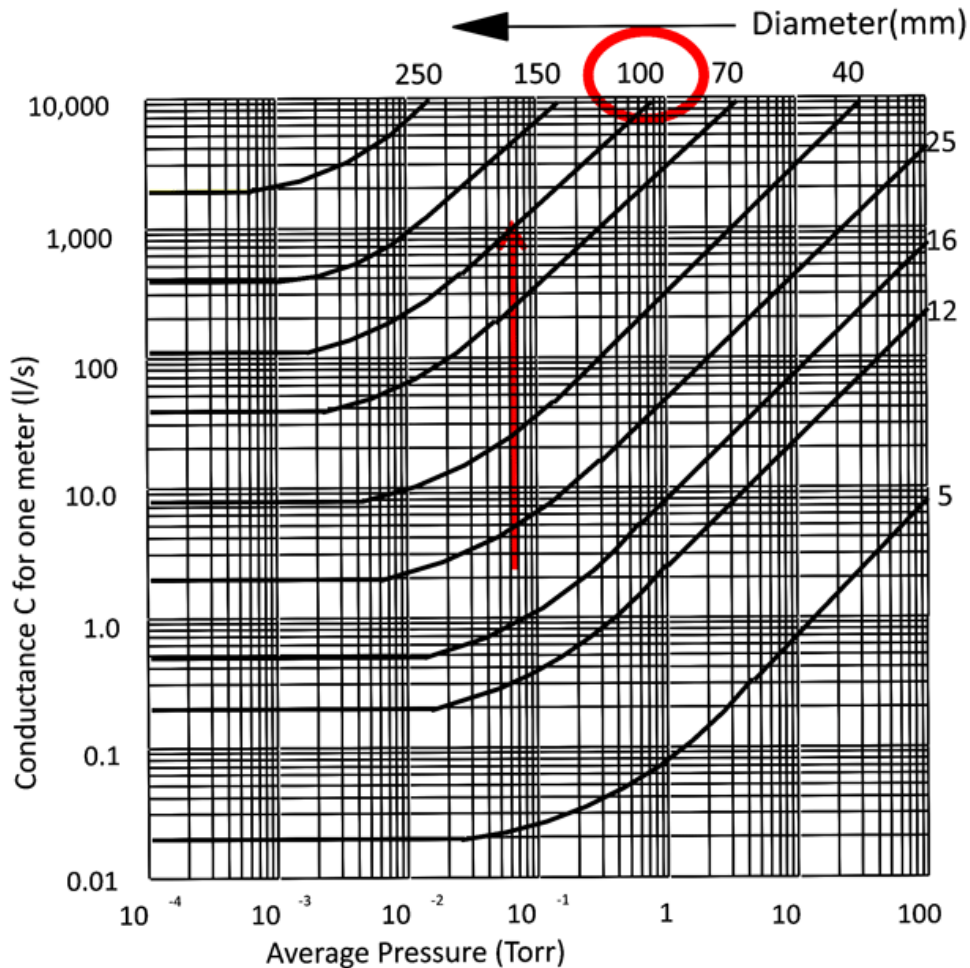


Δp è costante:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3$$

Dipendenza della conduttanza dalla pressione

In regime viscoso, la conduttanza sarà in realtà proporzionale alla pressione.
Diventa indipendente dalla pressione solo in regime molecolare.



Conductanza di un tubo lungo un metro, per vari valori del diametro, in funzione della pressione.

La regione dove la curva si appiattisce corrisponde al regime molecolare.

da N. Harris, "Modern Vacuum Practice", p.320.

Equazione generale del pompaggio

Data una camera di volume V , la variazione della quantità di gas pV al suo interno sarà data da Vdp/dt .

Se la camera è collegata ad una pompa, si definisce **velocità di pompaggio** S della pompa il volume di gas aspirato per unità di tempo alla pressione p' :

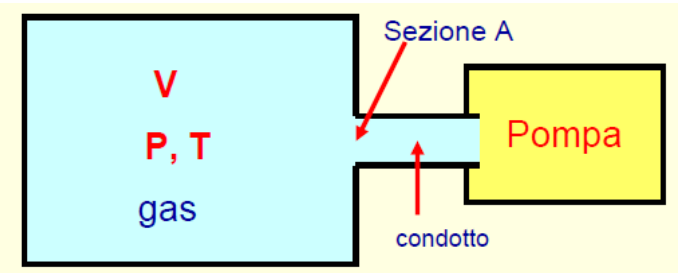
$$S = \frac{F}{p'} \quad \text{Unità di misura: } \mathbf{m^3/s} \text{ o } \mathbf{L/s}.$$

Questo non è però l'unico contributo alla variazione della quantità di gas: si avrà anche una tendenza ad aumentare a causa di piccole perdite e di un insieme di fenomeni complessivamente definiti con il termine **degasaggio**.

Questi effetti saranno individuati da un flusso entrante F_0 .

Mettendo insieme questi contributi, si ottiene l'**equazione generale del pompaggio**:

$$-V \frac{dp}{dt} = Sp - F_0$$



$$-V \frac{dp}{dt} = Sp - F_0$$

In assenza del termine F_0 , la soluzione sarebbe un decadimento esponenziale verso la pressione nulla. In pratica, si ha una decrescita verso una **pressione limite** p_0 :

$$p(t) = (p_i - p_0) \exp\left(-\frac{S}{V}t\right) + p_0$$

La pressione limite è data da: $p_0 = \frac{F_0}{S}$

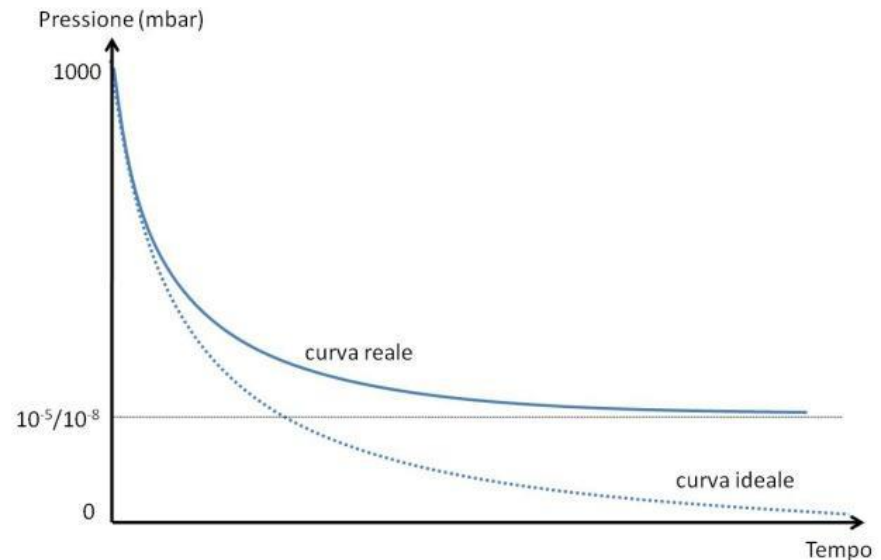
La costante tempo della decrescita è $\tau = V/S$.

Ricrescita a camera isolata dalle pompe:

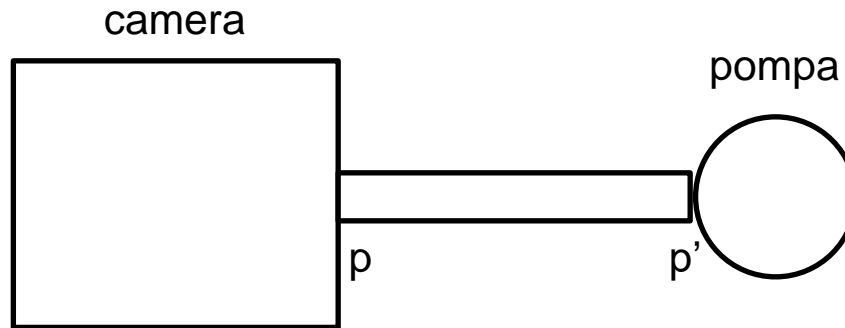
$$p(t) = p_0 + \frac{F_0}{V}t$$

Per ridurre la pressione limite, le opzioni sono:

- aumentare la velocità di pompaggio;
- ridurre perdite e degasaggio.



La pompa sarà tipicamente collegata alla camera attraverso delle canalizzazioni.



dove si è introdotta la **velocità di pompaggio efficace**:

$$\frac{1}{S_e} = \frac{1}{S} + \frac{1}{C}$$

Notare che $S_e < S$.

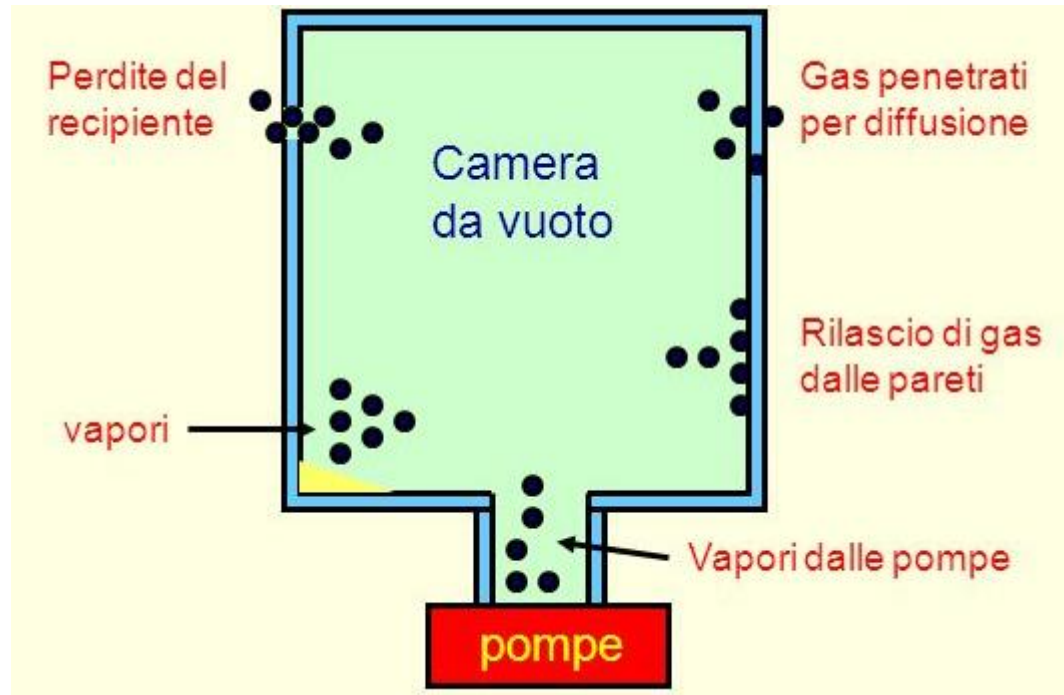
Nell'equazione del pompaggio andrà dunque utilizzata la velocità di pompaggio efficace.

Osservazione: è inutile usare una pompa con elevata velocità di pompaggio, se poi la si “strozza” collegandola ad un insieme di canalizzazioni con piccolo conduttanza.

In ogni sistema da vuoto si ha una serie di processi che comportano il rilascio di un certo flusso di gas all'interno della camera a vuoto, genericamente detto degasaggio.

Le principali sorgenti di tale flusso di gas sono: perdite del recipiente o (più probabilmente) dei giunti, gas penetrati per diffusione, rilascio di molecole di gas dalle pareti, vapori di materiali presenti nella camera, vapori dalle pompe.

Per minimizzare il degasaggio requisiti cruciali sono la **pulizia** (non toccare a mani nude il contenuto o le pareti interne della camera da vuoto) e il controllo delle **proprietà dei materiali** che vengono inseriti nella camera.



Tra tutte le molecole di gas che urtano la superficie di una camera da vuoto, una certa frazione vi aderisce, concorrendo a formare un monostrato di ricopertura. Diremo allora che le molecole che vi aderiscono sono **adsorbite**. In generale non tutta la superficie è soggetta all'adsorbimento. Nel caso di adsorbimento le molecole del gas sono intrappolate in una buca di potenziale prodotta da molecole di natura diversa (quelle della parete).

Se poi le molecole del gas si legano debolmente con le molecole della stessa specie già adsorbite, allora concorrono a creare altri strati depositati sulla parete: parleremo in tal caso di fenomeno di **condensazione**. In pratica si ha un cambiamento di fase dallo stato gassoso a quello liquido o solido ed ovviamente in tale processo gioca un ruolo fondamentale la temperatura della superficie.

Infine, se le molecole del gas diffondono all'interno della matrice cristallina della parete o penetrano nelle sue porosità a tal punto da essere occluse, allora parleremo di fenomeno di **assorbimento** (o più semplicemente assorbimento). La quantità di gas che può essere assorbita da una parete dipende dal coefficiente di solubilità e dalla costante di diffusione del gas nel solido. In realtà pochi gas diffondono significativamente nei materiali solidi, fatta eccezione per l'idrogeno e l'elio.

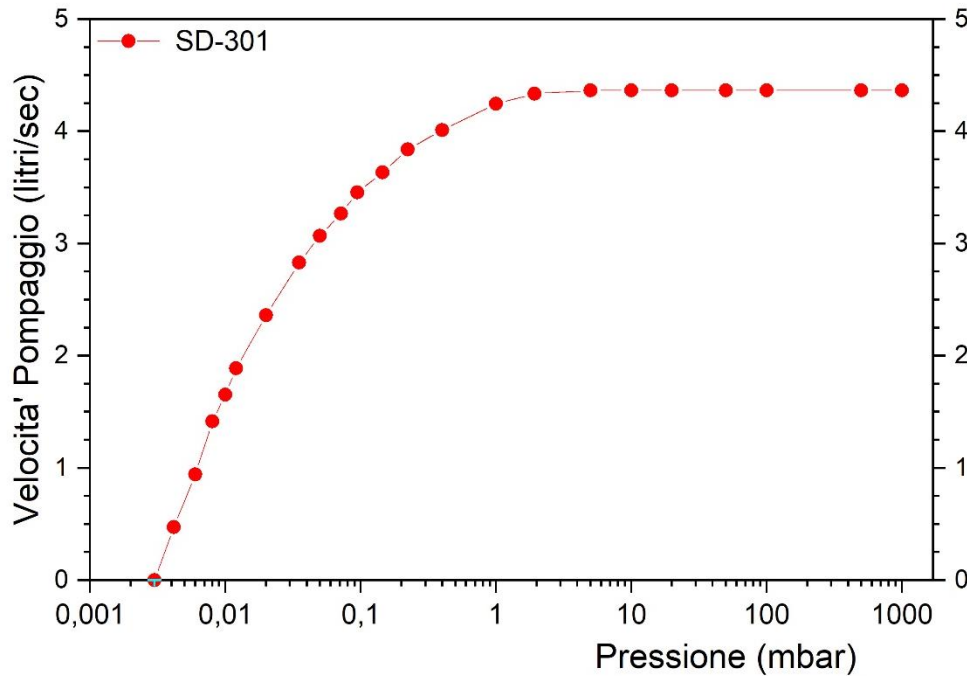
The outgassing rates may vary in order of magnitudes depending on factors: choice of material, cleaning procedure, history of material, pumping time, etc...

Not all materials are compatible with UHV and XHV system!

The example of the outgassing rates after one hour pumping:

Material	η_t [mbar · l / (s · cm ²)]
Aluminium (fresh)	$9 \cdot 10^{-9}$
Aluminium (20h at 150°C)	$5 \cdot 10^{-13}$
Copper (24h at 150°C)	$6 \cdot 10^{-12}$
Stainless steel (304)	$2 \cdot 10^{-8}$
Stainless steel (304, electropolished)	$6 \cdot 10^{-9}$
Stainless steel (304, mechanically polished)	$2 \cdot 10^{-9}$
Stainless steel (304, electropolished, 30h at 250°C)	$4 \cdot 10^{-12}$
Perbunan	$5 \cdot 10^{-6}$
Pyrex	$1 \cdot 10^{-8}$
Teflon	$8 \cdot 10^{-8}$
Viton A (fresh)	$2 \cdot 10^{-6}$

Le pompe da vuoto sono caratterizzate dalla velocità di pompaggio, che sarà funzione della pressione, e dall'intervallo di pressioni in cui la pompa può operare.



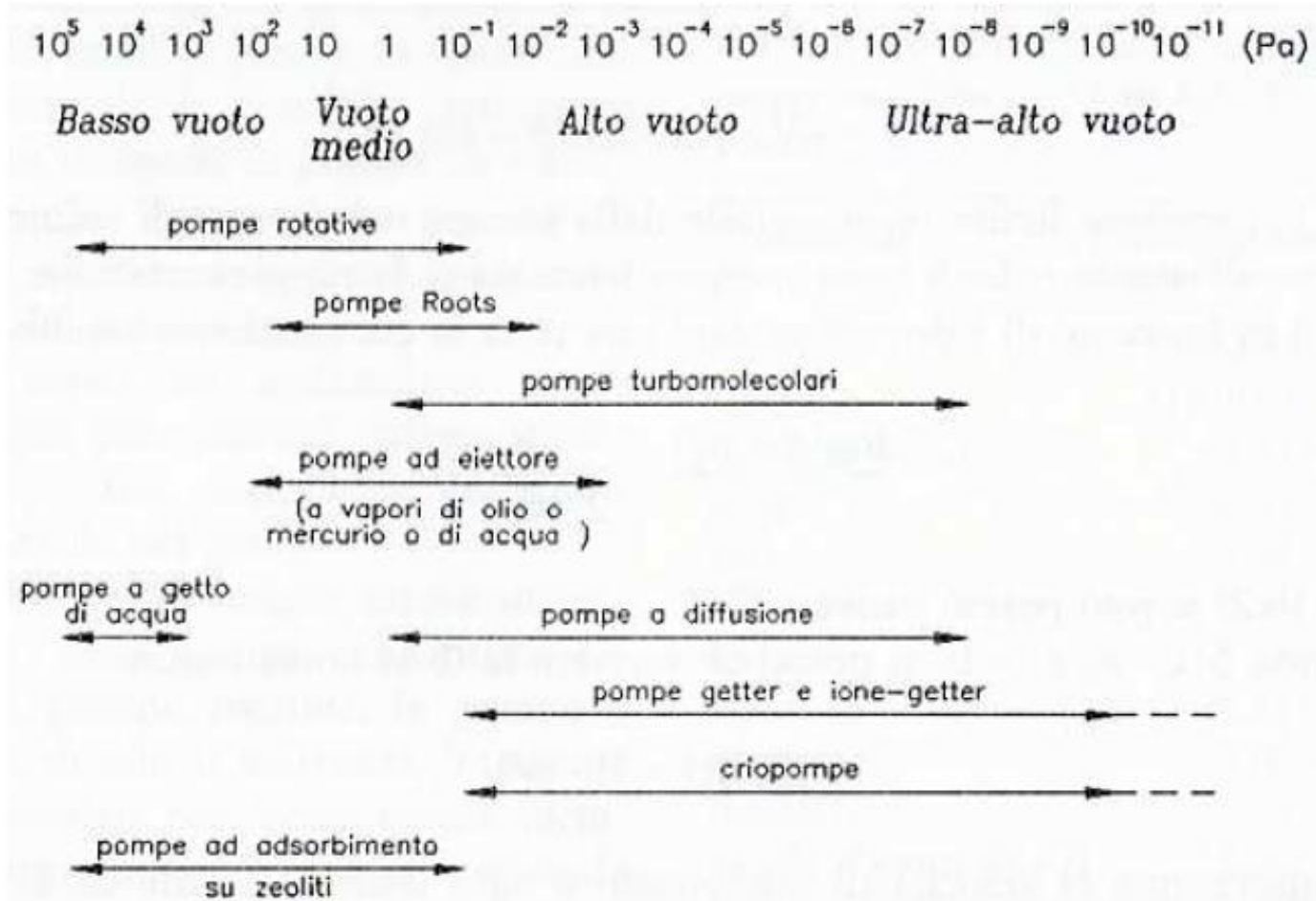
From	To	l/s	cm ³ /s	m ³ /h
l/s		1	1000	3.60
cm ³ /s		0.001	1	0.0036
m ³ /h		0.278	278	1

$$x \cdot [\text{unit 1}] = x \cdot \text{factor} \cdot [\text{unit 2}]$$

Esempio della dipendenza della velocità di pompaggio dalla pressione per la pompa rotativa Varian SD-301 utilizzata in laboratorio.



Intervalli di pressione delle pompe da vuoto



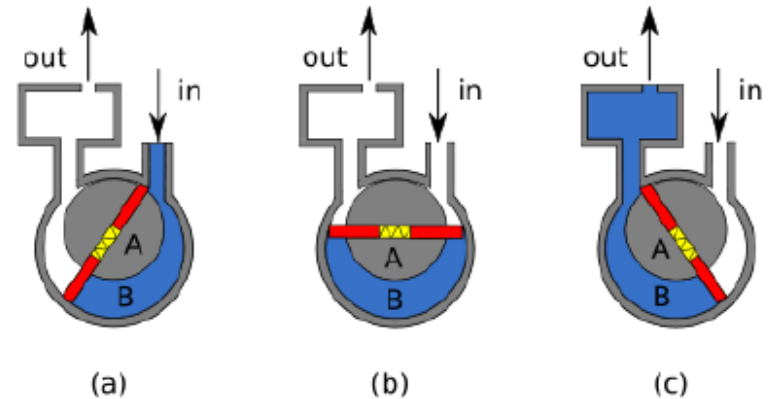
La pompa rotativa costituisce tipicamente il primo stadio di un gruppo di pompaggio, e lavora contro la pressione atmosferica. Può essere l'unica se ci si accontenta di un basso vuoto. I vapori di olio possono condurre ad un inquinamento del sistema.

Pompa rotativa:

Usata per condizioni di vuoto viscoso, basata sullo spostamento del gas all'interno di un sistema composto da un rotore e uno statore, immerso in una vasca ad olio.

- Il gas entra nella pompa
- La paletta sposta il gas
- Il gas compresso apre la valvola di uscita

Con questi gruppi di pompaggio si può arrivare fino a 10^{-2} mbar di pressione.



A: eccentrico
B: camera con volume variabile

La pompa turbomolecolare è il tipico secondo stadio di un gruppo di pompaggio da alto vuoto. Non può lavorare contro la pressione atmosferica, per cui richiede un pre-vuoto all'ingresso. Gira a velocità molto elevate (fino a 70.000 giri/minuto) → manutenzione!

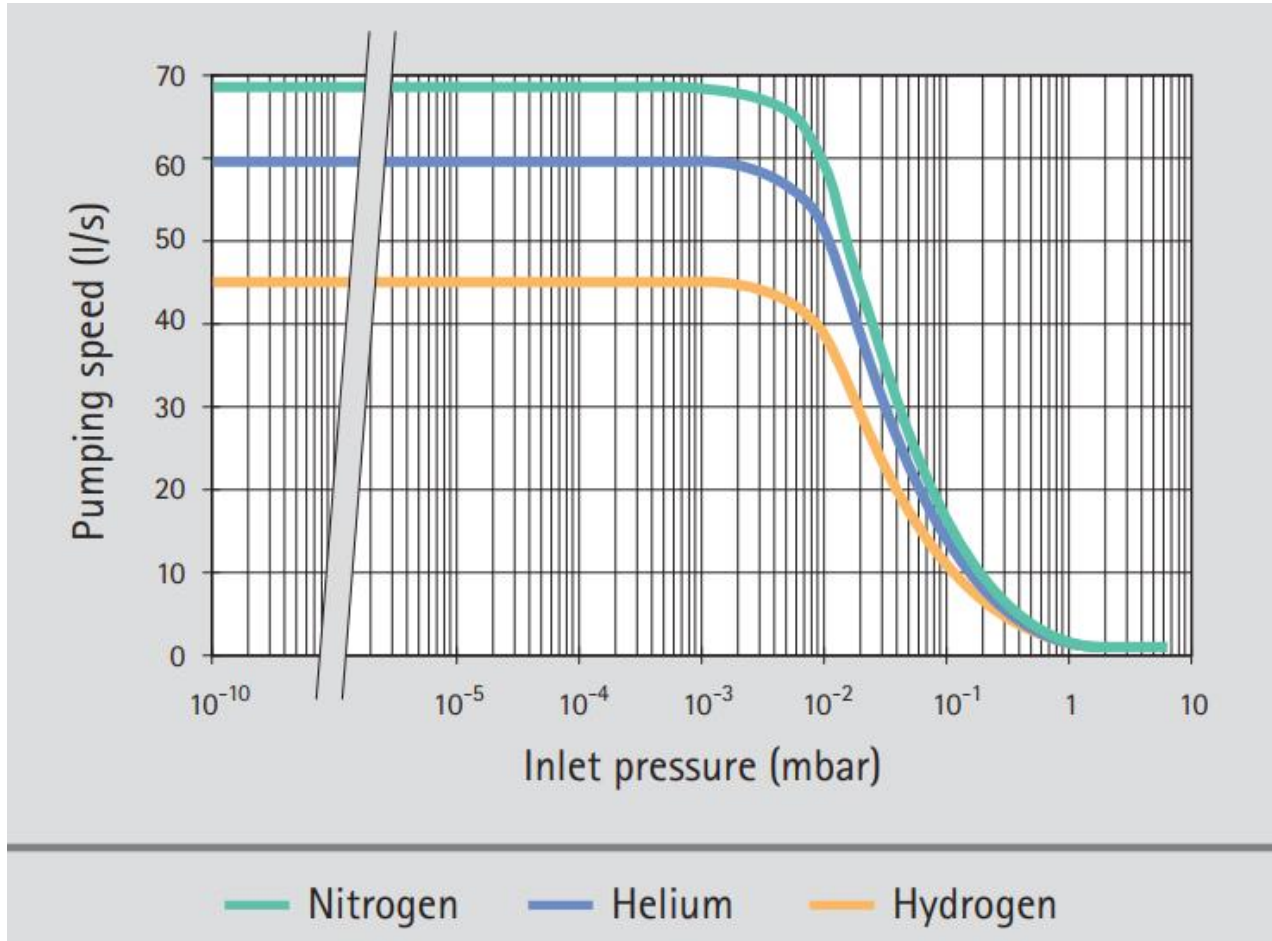
Pompa turbomolecolare:

Usata per condizioni di vuoto molecolare o di transizione, basata sulla rotazione di un sistema composto da rotore e statore, muniti di palette a diverse inclinazioni. Le lamelle trasferiscono al gas la loro quantità di moto, portandolo fuori dalla camera.

Con questi gruppi di pompaggio si può arrivare fino a 10^{-7} mbar di pressione.

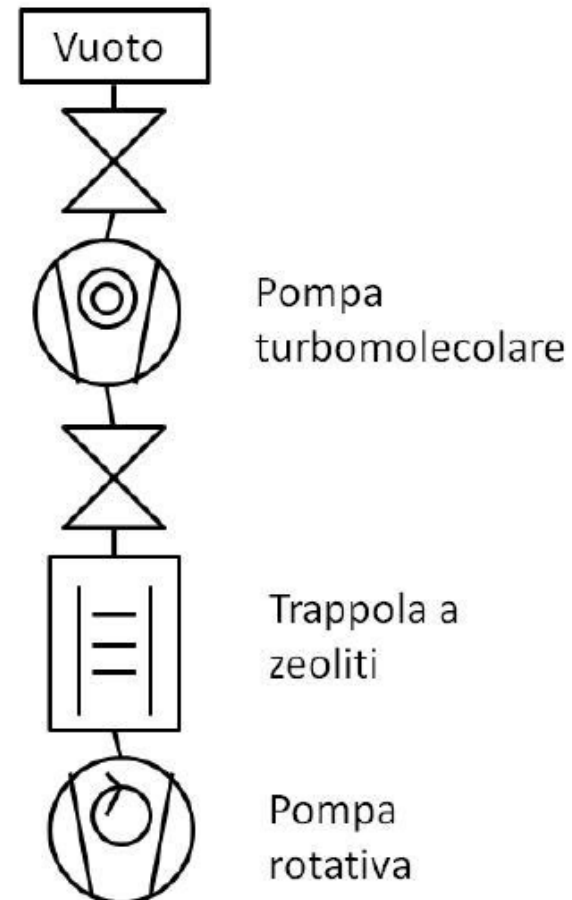


Esempio di velocità di pompaggio di una turbo



Un gruppo di pompaggio è costituito da una combinazione di più pompe e dispositivi accessori (valvole, trappole per l'olio, ecc.)

Quando la pompa turbomolecolare è ferma, si può abbassare la pressione con la pompa rotativa, quando questa raggiunge pressioni dell'ordine dei 10^{-2} mbar, si può azionare la pompa turbomolecolare. La pompa rotativa è importante per mantenere una condizione di medio vuoto prima della turbomolecolare.



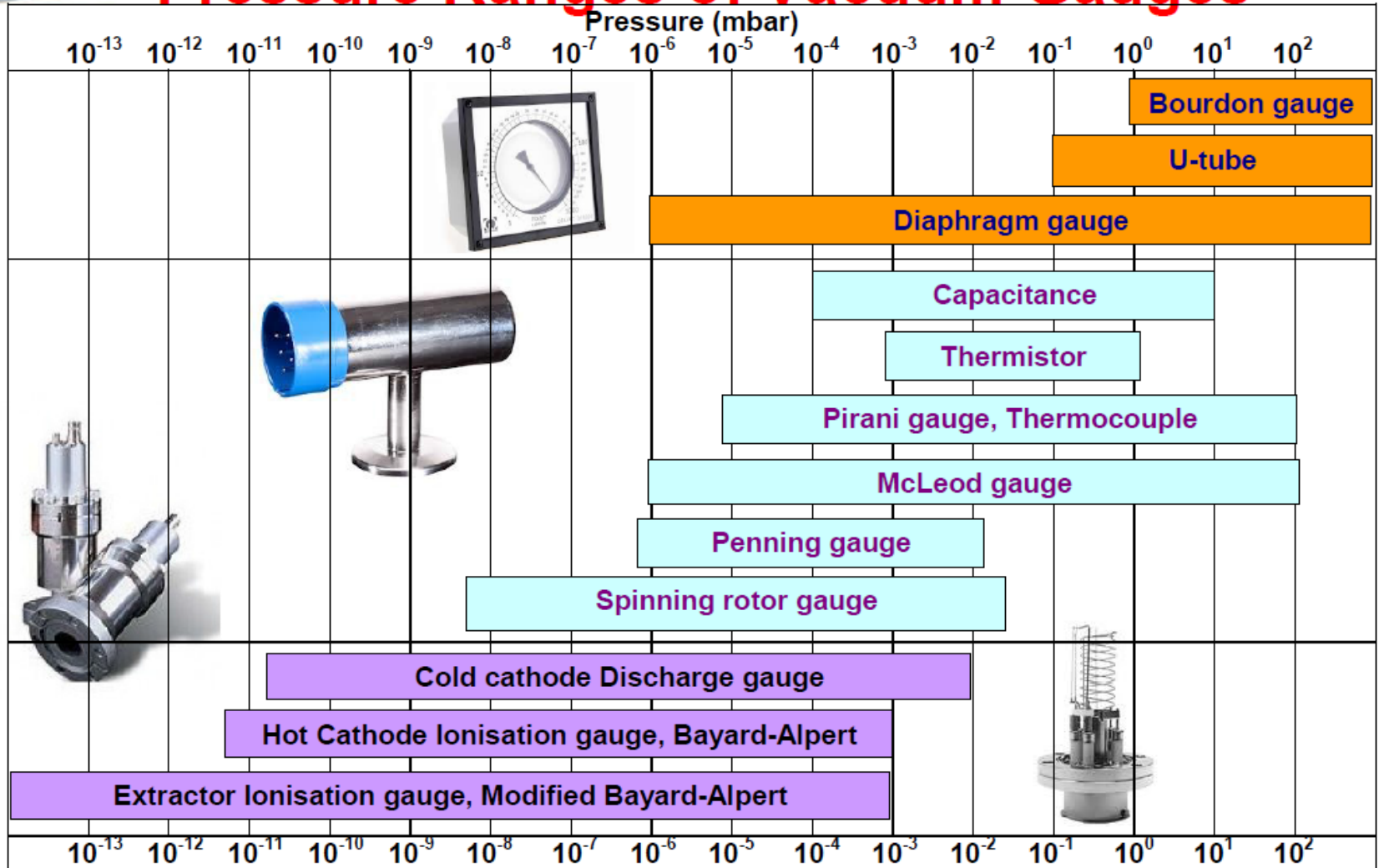
Un sistema da vuoto sarà dotato di una o più misure di pressione, dislocate in varie parti di esso. Esistono svariati tipi di misuratori di basse pressioni (anche detti vacuometri), ognuno dei quali ha un diverso intervallo di funzionamento.

Fra i più diffusi ricordiamo:

- **Strumento capacitivo:** basato sulla misura di una capacità elettrica, ottenuta da una cavità ed una membrana che si deforma in seguito alla differenza di pressione. Molto preciso, adatto per medio e basso vuoto.
- **Pirani:** Filamento di tungsteno, inserito all'interno di un ponte di Wheastone, riscaldato tramite il passaggio di una corrente: la sua temperatura corrisponde al punto di equilibrio tra il riscaldamento dovuto all'effetto Joule e la potenza dissipata per effetto della conducibilità termica del gas. Adatto per basso e medio vuoto.
- **Penning:** Strumento basato sulla ionizzazione del gas per effetto di campo (catodo freddo). La corrente misurata dipende dalla pressione. Adatto per alto vuoto. Robusto ma impreciso.
- **Strumento a ionizzazione Bayard-Alpert:** : Strumento a catodo caldo basato sulla ionizzazione del gas. Adatto per alto vuoto. Preciso ma più delicato del Penning.

Oggi esistono sensori combinati “full range”, che combinano Penning+Pirani oppure B.A.+Pirani, effettuando da soli lo switching tra i due strumenti.

Pressure Ranges of Vacuum Gauges

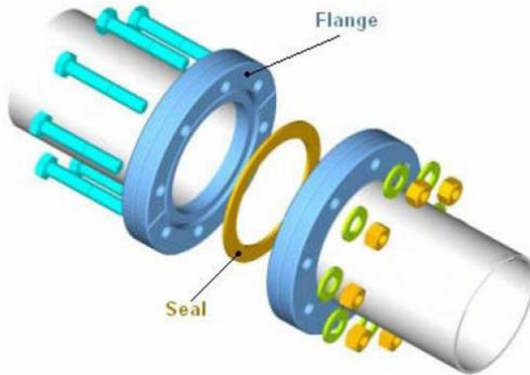


Un sistema da vuoto si compone di varie parti (camera, condotti, pompe, strumenti di misura) che vanno connessi assieme in modo da assicurare una tenuta migliore possibile.

Per fare questo, essi sono tipicamente equipaggiati con **flange**, che vanno unite interponendo una **guarnizione** (o-ring) che, deformandosi, assicura la tenuta.

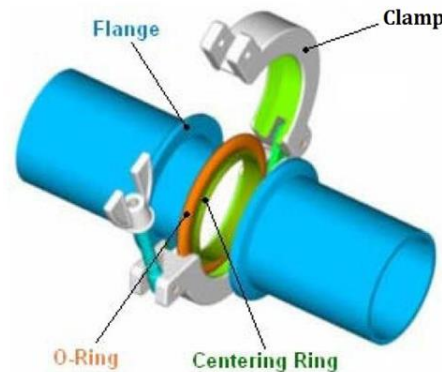
Esistono diversi standard di connessione:

CF (Conflat)



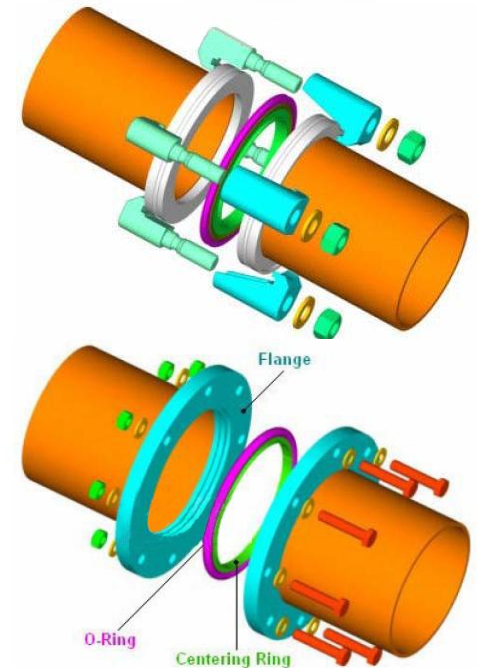
Utilizzo: UHV
Diametri: da 16 a 250 mm
Limite: fino a 10^{-12} mbar

KF



Utilizzo: alto vuoto
Diametri: da 10 a 50 mm
Limite: fino a 10^{-8} mbar

ISO-K e ISO-F



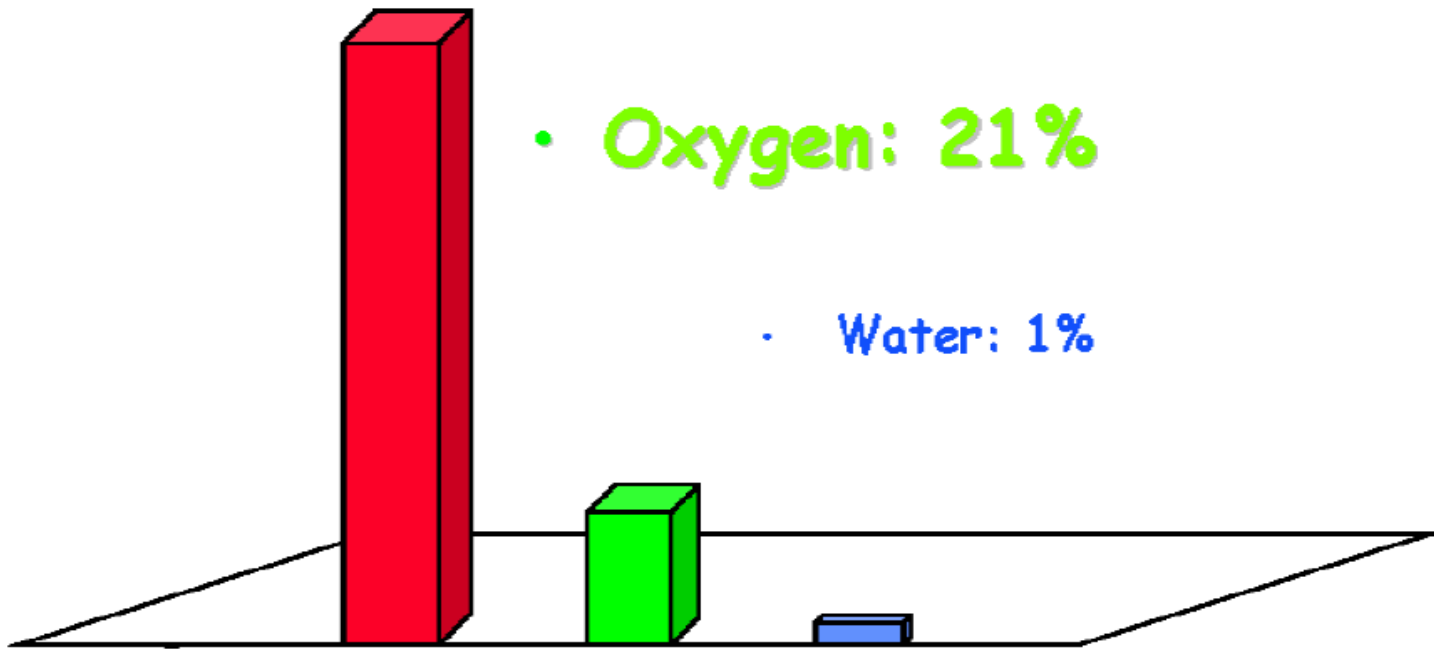
Utilizzo: alto vuoto
Diametri: da 63 a 630 mm
Limite: fino a 10^{-8} mbar

Il gas residuo nella prima parte del pompaggio
($p > 10^{-3}$ mbar)

- Nitrogen: 78%

- Oxygen: 21%

- Water: 1%

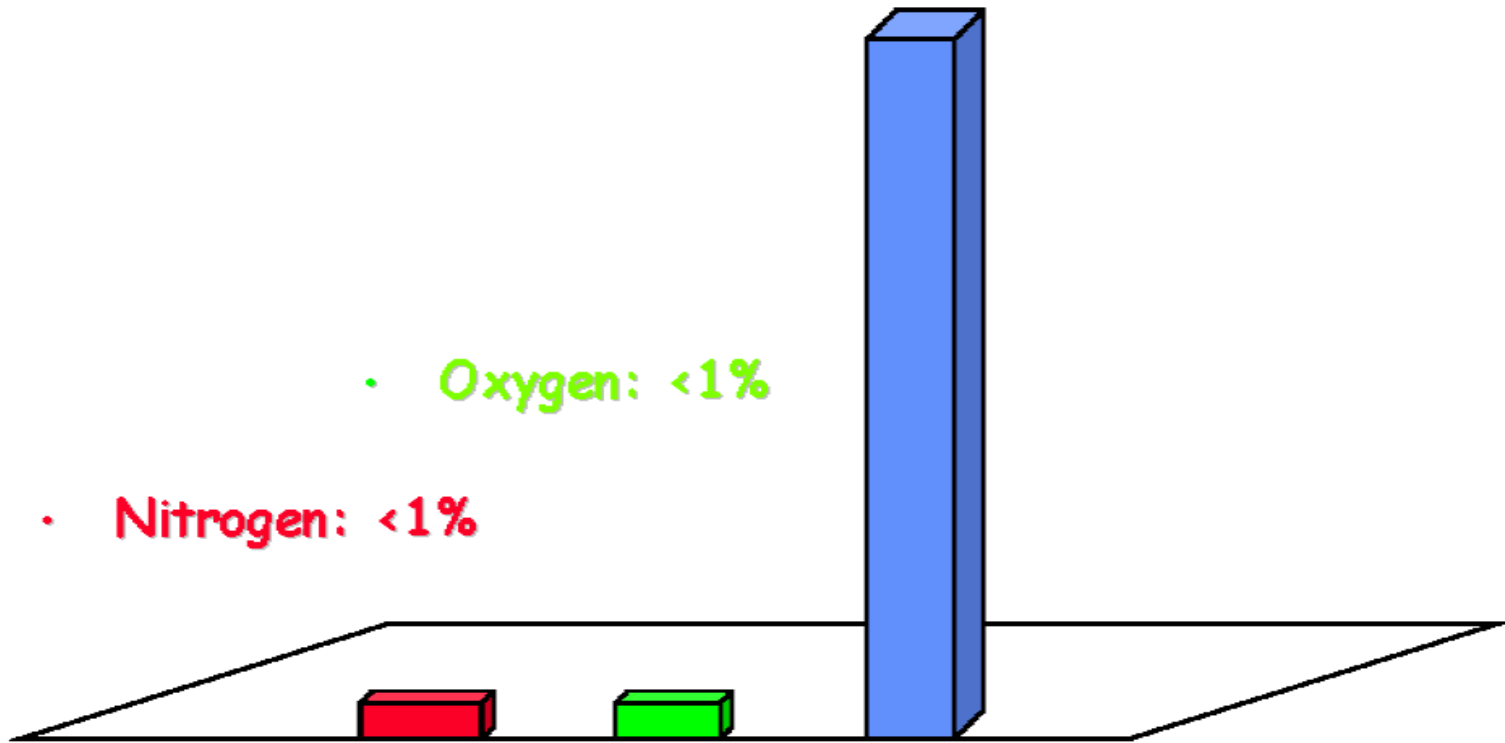


Il gas residuo per pressioni p
 $10^{-6} \text{ mbar} < p < 10^{-3} \text{ mbar}$

- **Water: 98%**

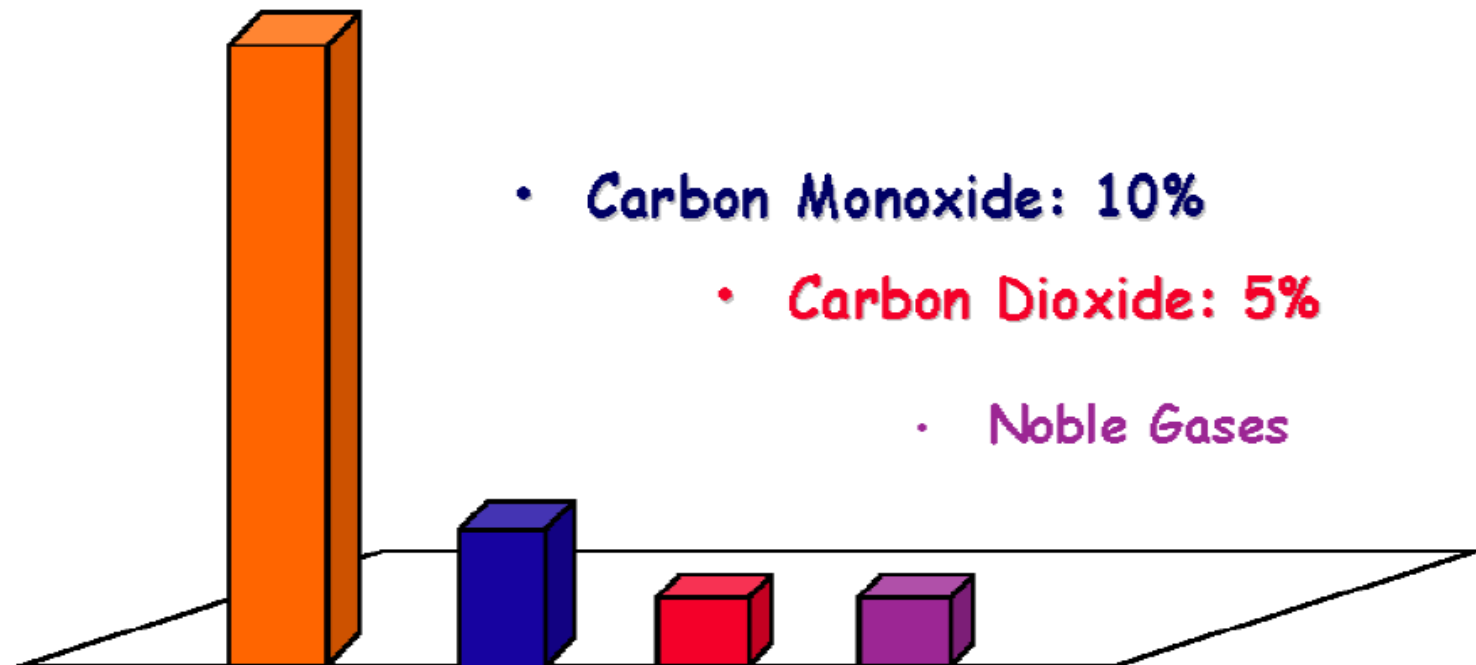
- **Oxygen: <1%**

- **Nitrogen: <1%**



Il gas residuo per pressioni $p \ll 10^{-6}$ mbar

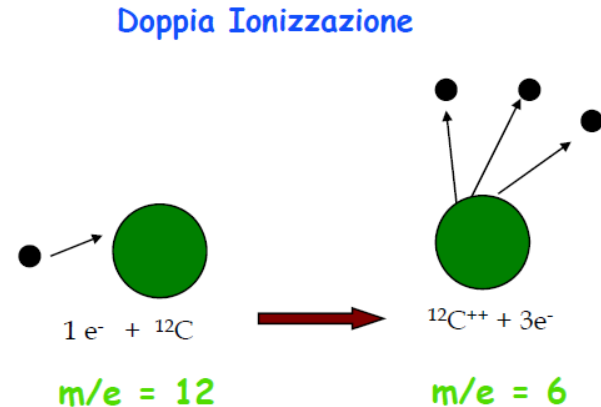
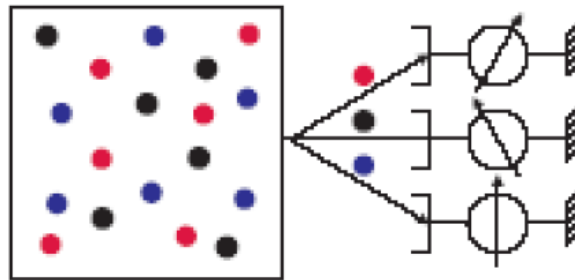
- **Hydrogen: 80%**



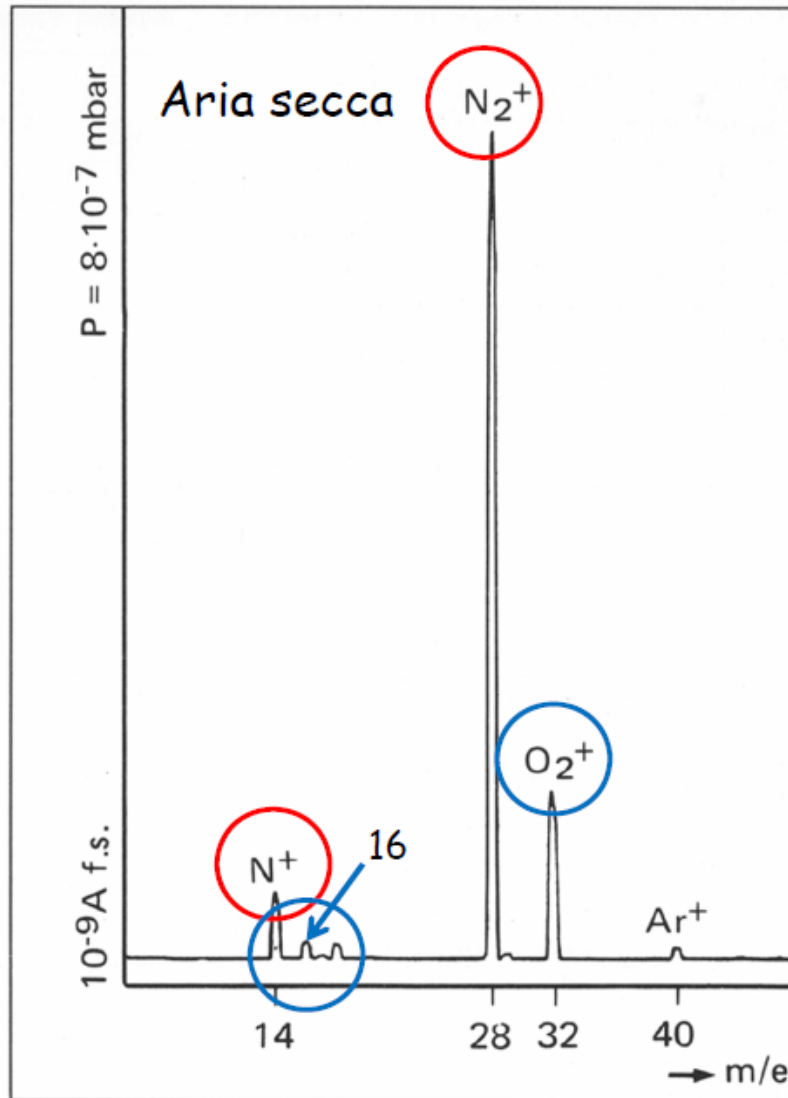
Residual Gas Analyzer (RGA): spettrometro di massa per l'analisi dei gas residui

- Lo spettrometro di massa:
 - Ionizza il gas presente nel sistema
 - Analizza gli ioni prodotti in base al loro rapporto massa/carica (m/e)
 - Raccoglie gli ioni con selezionati rapporti m/e

La corrente "ionica" raccolta è legata alla densità del gas e quindi alla pressione parziale



Esempio di spettro di massa: aria secca



Gli effetti della doppia ionizzazione

	m/e
N^+	14
N_2^+	28
O^+	16
O_2^+	32
Ar^+	40

- Studio dell'equazione del pompaggio.
- Misura della conduttanza di vari condotti.
- Analisi dei gas residui.
- Ricerca fughe.