

Tecnologia del Vuoto

- *Principi della fisica del vuoto*
- *Sistemi da vuoto*
- *Contributi alla portata*
- *Dimensionamento ed esempi*
- *Esperienza di laboratorio*

Bibliografia:

- J.F. O'Hanlon "A User's Guide to Vacuum Technology": **pratico.**
- A.Roth "Vacuum Technology": **più approfondito.**
- CERN School "Vacuum Technology" ([WEB link](#))
- Leybold – "Vacuum Technology" ([WEB link](#))

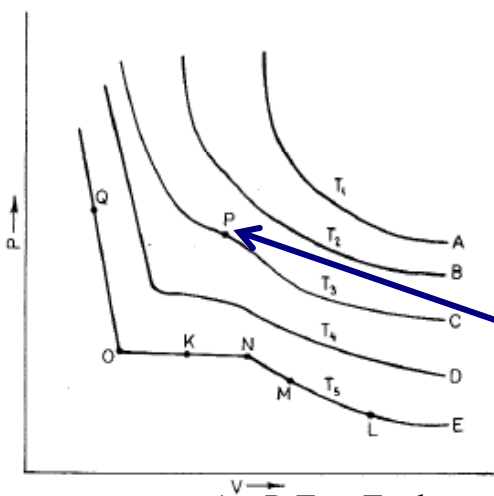
AA 2009/2010

Tecnologia del Vuoto (PhD)

Gas perfetti e ... reali

Gas perfetto – modello teorico: sfere rigide, piccole, no forze intermolecolari, caos molecolare, collisioni elastiche.

Gas reale : forze intermolecolari, a P e T in cui sono vicine interagiscono formando strutture nuove (liquefazione).



Variazione di pressione e volume a varie temperatura per una gas reale.

$$T_1 > T_2 > \dots > T_5$$

punto critico

Sostanze pure

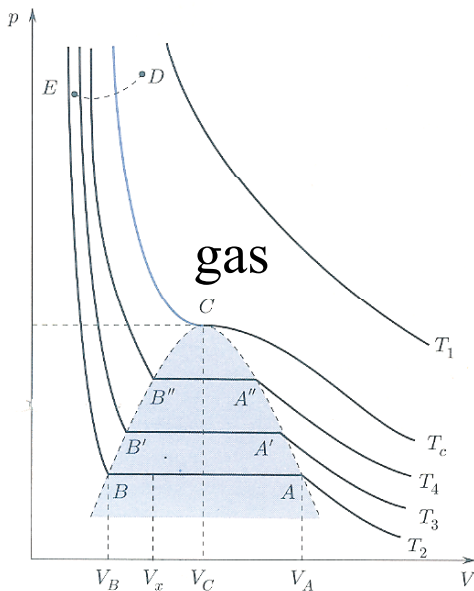
- A e B T_1 e T_2 elevate (iperbole- Boyle) ~ gas ideali.
- C non più iperbole. Fino ad E aumento del plateau.
- Data una T esiste una sola pressione di liquefazione.
- T superiori alla curva C non si ha liquefazione. Il punto P della curva C è detto **punto critico**.

AA 2009/2010

Tecnologia del Vuoto (PhD)

Alcune deff.

Sopra l'isoterma critica solo gas



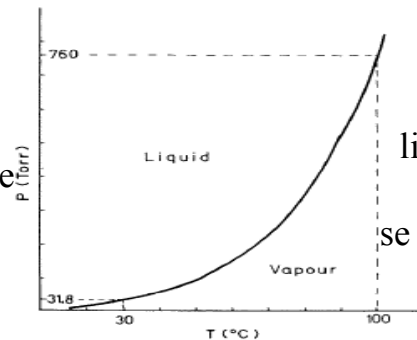
Variazione di pressione e volume a varie temperatura per una gas reale.

$$T_1 > T_2 > \dots > T_5.$$

Temperatura alla quale un gas liquefa:
punto di ebollizione e $f(P)$.

Per bollire a 20 °C l'acqua richiede 17.54 Torr.

La pressione esercitata dalle molecole
sull'ambiente circostante:
pressione di vapore $f(T)$.



Nel caso di altri gas sopra il
liquido: - all'equilibrio: vapore
saturato,
se non è limitato evapora (vuoto)

Fig. 2.2 Vapour pressure curve (water).

*punto di ebollizione: temperatura alla quale
pressione di vapore = pressione dell'ambiente.*

AA 2009/2010

Tecnologia del Vuoto (PhD)

Ancora su liquido e ... vapore

➤ **Attenzione:** *vapore descritto mediante il calore latente di evaporazione.*

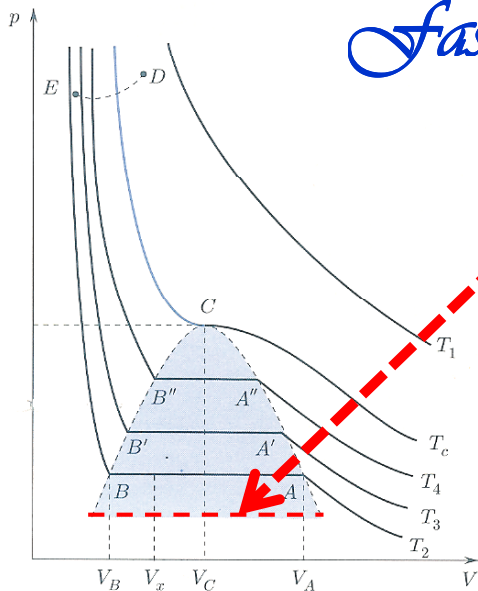
• calore latente di evaporazione puo fornito a pressione del vapor saturo a T ...

○

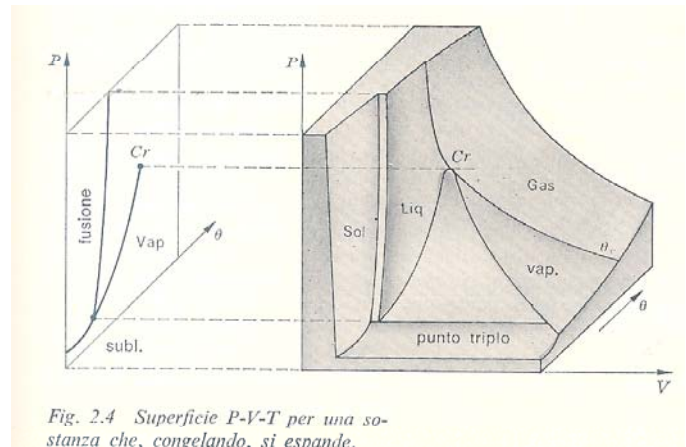
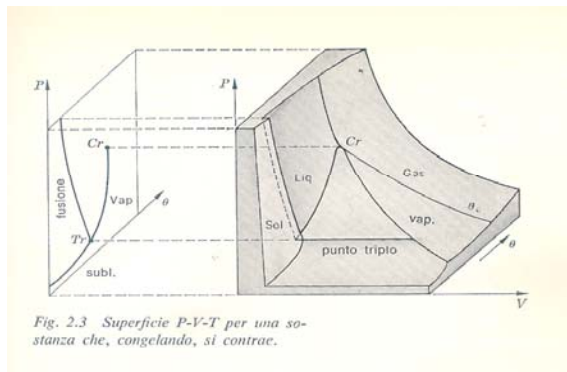
• per l'acqua alla pressione 1 atmosfera.

In vuoto non si raggiunge mai la saturazione, e quindi il liquido o il solido presente evapora/sublima o condensa/solidifica in funzione della T (criopumpaggio).

Fase Solida: vapore-solido



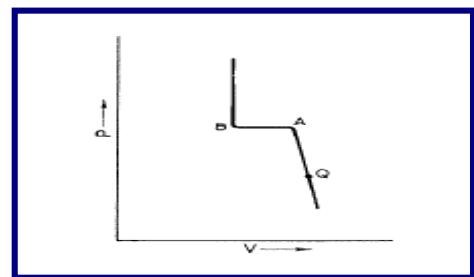
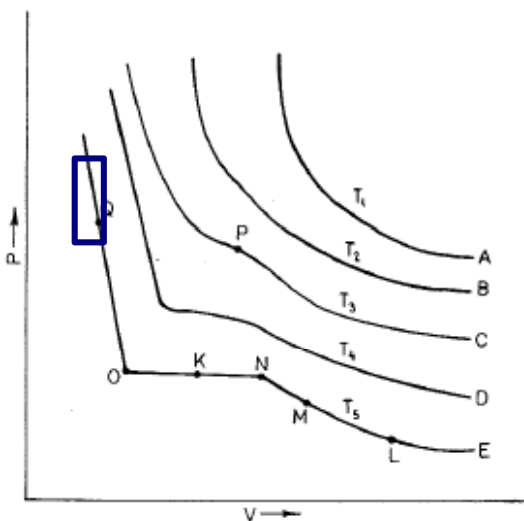
- Zona a più bassa temperatura, concernente la fase solida. In questo caso il plateau individua zone vapore-solido (sublimazione). La linea di demarcazione tra vapore-liquido e vapore-solido e detta linea tripla, associata con il punto triplo per l'acqua (4.58 mm Hg , $0.01 \text{ }^\circ\text{C}$, $1.00 \text{ cm}^3/\text{g}$ $< v_s < 206 \text{ 000 cm}^3/\text{g}$)



AA 2009/2010

Tecnologia del Vuoto (PhD)

Fase solida: liquido - solido



Se il liquido viene compresso ancora si ha un altro plateau: transizione liquido-solido.

punto di congelamento-fusione T_{freez}

AA 2009/2010

Tecnologia del Vuoto (PhD)

Semplificazione: Gas Perfetti - VLOTO

Leggi:

Boyle 1662

$$PV = P'V' \quad (N, T \text{ cost.})$$

Charle 1787

$$\frac{V}{T} = \frac{V'}{T'}$$

Gay - Lussac 1802

$$V = V_0 (1 + \beta t)$$

$$P = P_0 (1 + \beta t)$$

← Amonton

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad (N, V \text{ cost.})$$

Legge di Dalton 1801

$$P = nRT = n_1RT + n_2RT + \dots + n_iRT$$

(V constant)

$$= P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_i \quad (\text{Gas Ideali})$$

Avogadro 1811

$$\frac{P}{N} = \frac{P'}{N'} \quad (T, V \text{ constant}) \quad N_A = 6.02252 \times 10^{23} \text{ mol/mole}$$

Sintesi: equazione di stato dei gas perfetti.

AA 2009/2010

Tecnologia del Vuoto (PhD)

Gas perfetti - rarefatti

$$P [\text{Torr}], \quad V = 22.415 \text{ l}, \quad T = 273.15 \text{ K},$$

$$\nu = \# \text{ moli} \Rightarrow$$

$$R_0 = 62.364 \frac{\text{Torr} \cdot \text{l}}{\text{K} \cdot \text{mole}} \approx 2 \text{ cal/K} \cdot \text{mole}$$

$$\frac{PV}{T} = \nu \cdot R_0$$

Gas di massa W si ha :

$$PV = (W / M) R_0 T$$

$$N_A = 6.023 \cdot 10^{23} \text{ molec/mole},$$

per un gas perfetto alla $P = 1 \text{ atm}$, $T = 273.15 \text{ K}$ e $V = 22.415 \text{ l}$

$$n = \frac{W}{M} \cdot \frac{N_A}{V} = \text{densità molecolare} = \frac{N_A}{R_0} \frac{P}{T}$$

$$P = n \frac{R_0}{N_A} T = nkT$$

$$P (\text{Torr}) R_0 (\text{Torr cm}^3 / \text{K}) n = 9.66 \cdot 10^{18} \left(\frac{P}{T} \right)$$

$$\text{cond. standard } n = 2.687 \cdot 10^{19} \text{ molec/cm}^3 : \# \text{ Loschmidt}$$

$$G(\text{massatot}) = mN = \frac{M}{R_0 T} PV$$

$$k = \frac{8.314 \cdot 10^7}{6.023 \cdot 10^{23}} = 1.3805 \cdot 10^{-16} \text{ erg/K}$$

Approssimazione NON valida per alte pressioni e basse T.

AA 2009/2010

Tecnologia del Vuoto (PhD)

L'aria nei calcoli

➤ Peso molecolare di una miscela di gas:

- Dalla legge di Dalton per le pressioni parziali

P_1, P_2, \dots, P_n , le rispettive masse W_1, W_2, \dots, W_n , e pesi molecolari M_1, M_2, \dots, M_n

- E le rispettive masse, e i pesi molecolari

$$PV = \left(\sum_{i=1}^n P_i \right) \cdot V = \left(\sum_{i=1}^n \frac{W_i}{M_i} \right) \cdot R_0 \cdot T \quad (a)$$

- Si può dedurre il peso molecolare medio da

$$PV = (W / \bar{M}) \cdot R_0 \cdot T \quad (b)$$

Imponendo (b)=(a):

$$\bar{M} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n W_i \right)}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{W_i}{M_i} \right)}$$

Pressione: u.m.

Dyne/cm² = μbar (CGS)

Newton/m² = Pascal (SI)

Usati anche mbar e bar.

1 Pa = 1.0 10⁻⁵ bar

1 atm = 760 Torr (mm Hg)

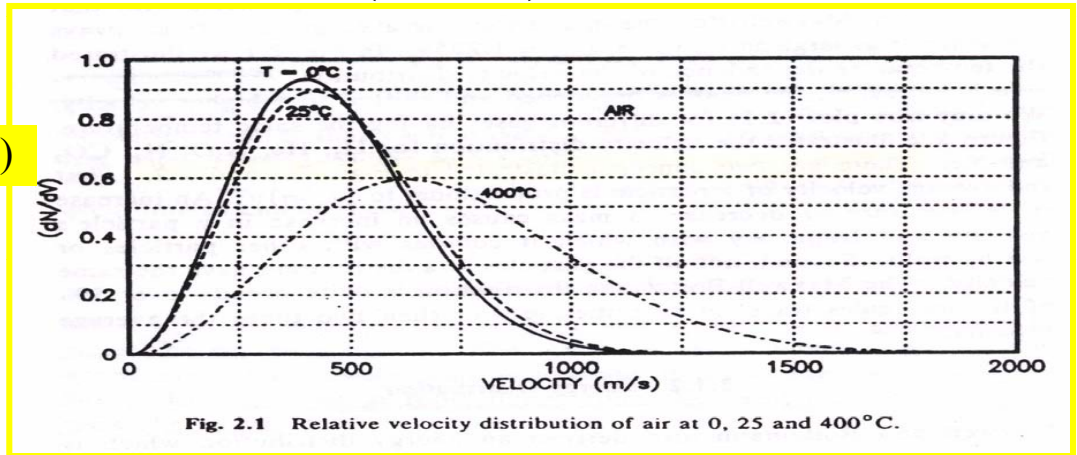
1atm = 1.013 Bar

1 mbar = 0.75 Torr

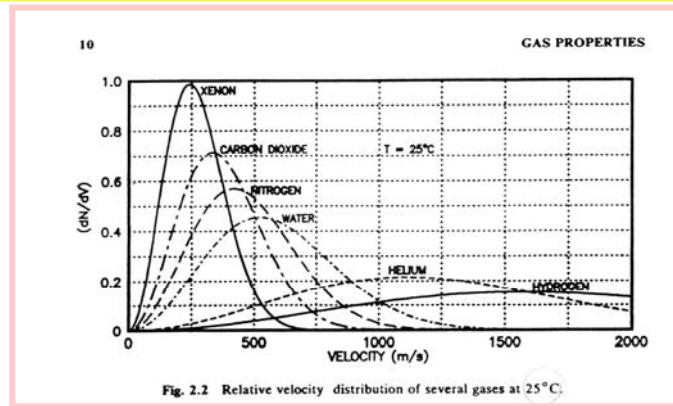
Distribuzione di v

$$\frac{1}{n} \frac{dn}{dv} = f_v = \frac{4}{\pi^{1/2}} \left(\frac{m}{2kT} \right)^{3/2} v^2 e^{-mv^2/2kT}$$

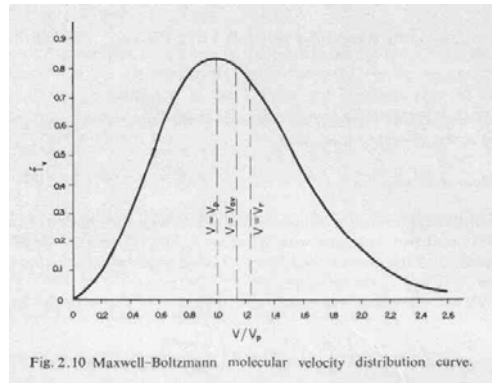
$$f_v = f(T)$$



$$f_v = f(m)$$



Velocità ...



Velocità più probabile:

$$\frac{df_v}{dv} = 0 \implies v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$$

Velocità media (flussi):

$$v_{ave} = \frac{\int_0^{+\infty} v f_v dv}{\int_0^{+\infty} f_v dv} \equiv v_{ave} = \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \right) \sqrt{\frac{2kT}{m}} = 1.128 v_p$$

Velocità quadratica media (E_{kin}):

$$v_{rms} = \sqrt{v^2} = \sqrt{\frac{\int_0^{+\infty} v^2 f_v dv}{\int_0^{+\infty} f_v dv}} \equiv v_{rms} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = 1.225 v_p$$

Integrali tipo $I_v = \int_0^{\infty} v^v \cdot e^{-\lambda v^2} dv$

M. Born Atomic physics (DOVER).

Distribuzione di \mathcal{E}

$$\frac{1}{n} \frac{dn}{dE} = f_E = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{E}}{(kT)^{3/2}} e^{-E/kT}$$

Energia media :

$$E_{ave} = \frac{\int_0^{+\infty} E f_E dE}{\int_0^{+\infty} f_E dE} = \frac{3}{2} kT$$

Energia più probabile:

$$\frac{\partial f_E}{\partial E} = 0 \equiv E_p = \frac{1}{2} kT$$

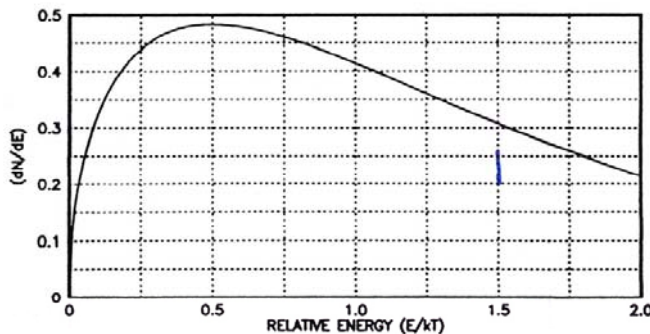


Fig. 2.3 Relative energy distribution of a gas at 25°C.

AA 2009/2010

Tecnologia del Vuoto (PhD)

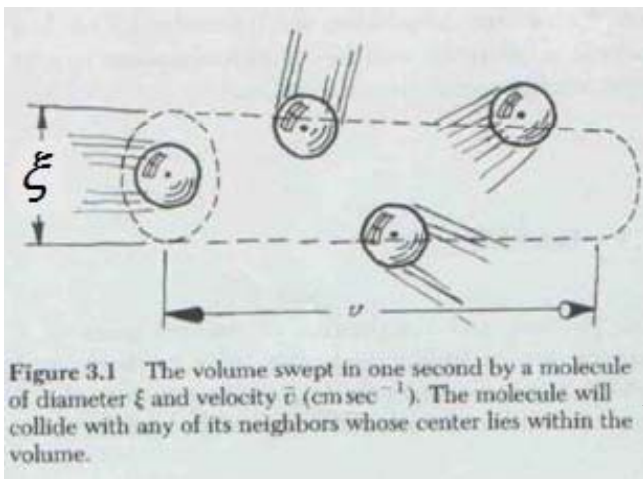


Figure 3.1 The volume swept in one second by a molecule of diameter ξ and velocity \bar{v} (cmsec^{-1}). The molecule will collide with any of its neighbors whose center lies within the volume.

Libero Cammino medio = λ

Calcolo approssimato: sfere di diametro $\xi \sim 10^{-8} \text{ cm}$

Una molecola di vel. $v \Rightarrow$ percorre $l = vdt$.
Gli urti con altre molecole a distanza ξ

$$(V \text{ spazzolato}) \cdot (n) \equiv \# \text{ collisioni} \quad (vt \cdot \pi \xi^2) \cdot n = \# \text{ coll}$$

$$\lambda = \text{spazio percorso} / \# \text{ coll} \quad \lambda = vt / (\# \text{ collisioni}) = 1 / n \pi \xi^2$$

Con la velocità relativa

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} (n \pi \xi^2)} \stackrel{n = \frac{p}{kT}}{=} \frac{kT}{\sqrt{2} (\pi \xi^2 p)}$$

Per l'aria a RT : $\lambda = 5 \cdot 10^{-3} / P$; λ [cm], P [Torr]

AA 2009/2010

Tecnologia del Vuoto (PhD)

Aria *Si evacuano sistemi dall'aria, e sono circondati da aria.*

	% by weight	% by volume	Partial pressure mbar
N ₂	75.51	78.1	792
O ₂	23.01	20.93	212
Ar	1.29	0.93	9.47
CO ₂	0.04	0.03	0.31
Ne	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$1.9 \cdot 10^{-2}$
He	$7 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$5.3 \cdot 10^{-3}$
CH ₄	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Kr	$3 \cdot 10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$
N ₂ O	$6 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$
H ₂	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Xe	$4 \cdot 10^{-5}$	$8.7 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-5}$
O ₃	$9 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-5}$
Σ 100 %	Σ 100 %	Σ 100 %	Σ 1013
50 % RH at 20 °C	1.6	1.15	11.7

Note: In the composition of atmospheric air the relative humidity (RH) is indicated separately along with the temperature.
At the given relative humidity, therefore, the air pressure read on the barometer is 1024 mbar

Table VIII: Composition of atmospheric air

formule contengono
numero di massa (?)
 ξ delle molecole (?)

• **Comportamento dei singoli gas:** (f_v , Maxwell).

• **Comportamento medio:**

*A seconda del caso : o usiamo formule che hanno
il diametro della molecola dell'azoto (28) (ξ)
In altri casi il valore medio dei gas presenti
(per esempio il numero di massa medio 28.98) .*

La differenza non è eccessiva.

Tecnologia del Vuoto (PhD)

➤ **I parametri utili per catalogare i regimi di vuoto e progettare i sistemi:**

- *Libero cammino medio,*
- *# di collisioni (flusso - pressione),*
- *Tempo di formazione di un monostrato.*

➤ **Sono dedotti dalla teoria cinetica dei gas perfetti.**

Precisione su λ

v_i in v_k ,
 n_k e $f(v_k)$.

SR sulla molecola k : la molecola v_i si muove con la velocità relativa $g = v_i - v_k$.

$$dV = \sigma g dt$$

$$dW = n_k f(\vec{v}_k) d\vec{v}_k dV = n_k \sigma (\vec{g}) g f(\vec{v}_k) d\vec{v}_k dt$$

Integrando su tutte le v e le direzioni della particella k :

$$W = P \text{ (part } i \text{ urti con part } k \text{ in } dt \text{ (} dt = ds/v_i \text{))}$$

Assumiamo n_k costante lungo s (tot = L)

$$W = n_k L \int \sigma(\vec{g}) \frac{g}{v_i} f(\vec{v}_k) d\vec{v}_k = n_k L \sigma_{eff}$$

Soluzione impossibile in forma chiusa:

Soluzione numerica permette di ricavare λ

$$\lambda = \frac{1}{1.4761 n \sigma} \quad (\text{appross.}) \approx$$

$$\approx \frac{1}{n \sigma \sqrt{\pi}} = 7.33 \cdot 10^{-4} \frac{T}{P \sigma} \text{ (cm)}$$

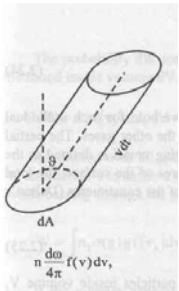
$$\lambda \approx \frac{1}{\sqrt{2} (n \pi d^2)}$$

T [Torr], P [Torr], σ [Å]

Tecnologia del Vuoto (PhD)

AA 2009/2010

di collisioni (flusso, pressione) per chi necessita formalismo



Particelle su dA in dt da $d\omega$ (θ e ϕ).

$$n \frac{d\omega}{4\pi} f(v) dv \quad \# \text{ particelle /unità vol}$$

$$dV = v \cos \theta dA dt \Rightarrow n \frac{d\omega}{4\pi} f(v) dv dV$$

collisioni /dA in dt.

collisioni / (unità di A ed unità di t) =

$$= \frac{n}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^{\infty} f(v) v \cos \theta \sin \phi dv d\theta d\phi = \frac{n \bar{v}}{4}$$

Si deriva anche la **pressione**

(trasferimento della componente normale di $p = 2mv \cos \theta$):

$$F dt = \frac{nm}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^{\infty} v^2 f(v) \cos^2 \theta \sin \theta d\theta d\phi dt dA = \frac{nm \bar{v^2}}{3} dt dA$$

$$P = \frac{1}{3} nm \bar{v^2}$$

Usando la relazione $v_{rms} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$, oppure $E_{ave} = \frac{3}{2} kT$:

$$P = nkT$$

AA 2009/2010

tempo di formazione di un monostrato τ_{ml}

molecole per coprire un. di superf.

$$\Theta_m = \frac{1}{d_m^2}$$

flusso per un. di superf.

$$\Phi = \frac{1}{4} n v_{ave}$$

v_{ave} \doteq velocità media m/sec

n \doteq densità molecolare (molec/m³)

$$\tau_{ml} = \frac{\Theta_m}{\Phi}$$

$$\tau_{ml} = \frac{1}{\frac{1}{4} v_{ave} \cdot n \cdot d_m^2 \cdot S}$$

S \doteq coefficiente di adesione $S(0 \div 1)$.

Table 2.1 Low Pressure Properties of Air^a

Pressure (Pa)	n (m ⁻³)	d' (m)	λ (m)	Γ (m ⁻² ·s ⁻¹)
1.01×10^5 (760 Torr)	2.48×10^{25}	3.43×10^{-9}	6.5×10^{-8}	2.86×10^{27}
100 (0.75 Torr)	2.45×10^{22}	3.44×10^{-8}	6.6×10^{-5}	2.83×10^{24}
1 (7.5 mTorr)	2.45×10^{20}	1.6×10^{-7}	6.6×10^{-3}	2.83×10^{22}
10^{-3} (7.5 $\times 10^{-6}$ Torr)	2.45×10^{17}	1.6×10^{-6}	6.64	2.83×10^{19}
10^{-5} (7.5 $\times 10^{-8}$ Torr)	2.45×10^{15}	7.41×10^{-6}	664	2.83×10^{17}
10^{-7} (7.5 $\times 10^{-10}$ Torr)	2.45×10^{13}	3.44×10^{-5}	6.6×10^4	2.83×10^{15}

^a Particle density, n ; average molecular spacing, d' ; mean free path, λ ; and particle flux on a surface, Γ . $T = 22^\circ\text{C}$.

Link a
categorìe del vuoto

Categorìe di vuoto

Le categorìe del vuoto sono descritte sulla base delle grandezze finora derivate dalla teoria cinetica dei gas

- Pressione (Macro-scopico)
- * libero cammino medio (micro-scopico)
- * # di collisioni /superficie tempo (micro-scopico)
- * Tempo di formazione di un monostrato (micro-scopico).

Classificazione del Vuoto

➤ Convenzioni non accreditate, a volte autoreferenziali, meglio fornire i parametri

TABLE I. Properties of Nitrogen at 20°C in Various Pressure Ranges

Pressure range ^a	Pressure (Torr)	Gas density (molecules/cm ³)	Mean free path (N ₂ in N ₂)(cm)	Monolayer time ^b	Impingement rate (molecules/cm ² /sec)	$\frac{N_{\text{surface}}}{N_{\text{volume}}}$ ^c
<u>Rough vacuum</u>	760	2.5×10^{19}	5.9×10^{-8}	1.7×10^{-9} sec	3.0×10^{23}	2×10^{-5}
<u>Fine vacuum</u>	1	3.3×10^{16}	4.5×10^{-3}	1.3×10^{-6} sec	3.9×10^{20}	1.5×10^{-2}
<u>High vacuum</u>	10^{-3}	3.3×10^{13}	4.5	1.3×10^{-3} sec	3.9×10^{17}	15
<u>Very high vacuum</u>	10^{-5}	3.3×10^{10}	4.5×10^3	1.3 sec	3.9×10^{14}	1.5×10^4
<u>Ultrahigh vacuum</u>	10^{-9}	3.3×10^7	4.5×10^6	22 min	3.9×10^{11}	1.5×10^7
<u>Extreme high vacuum</u>	10^{-12}	3.3×10^4	4.5×10^9	360 hr	3.9×10^8	1.5×10^{10}
	Below 10^{-12}	$< 3.3 \times 10^4$	$> 4.5 \times 10^9$	> 360 hr	$< 3.9 \times 10^8$	$> 1.5 \times 10^{10}$

^a The names listed in this column do not have official status, but are commonly used.

^b The monolayer time is here taken to be the time required to form one layer of adsorbed gas containing 5×10^{14} molecules/cm², assuming a sticking probability of unity.

^c ($N_{\text{surface}}/N_{\text{volume}}$) is the ratio of the number of molecules adsorbed per cm² in a monolayer, 5×10^{14} , to the number per cm³ in the gas phase.

AA 2009/2010

Tecnologia del Vuoto (PhD)

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} (n \pi \xi^2)} = \frac{kT}{\sqrt{2} (\pi \xi^2 p)}$$

$$\lambda = 2.33 \cdot 10^{-20} \frac{T}{(\xi^2 p)} \text{ [cm]}$$

$$\begin{aligned} T & \text{ [K]} \\ \xi & \text{ [cm]} \\ p & \text{ [Torr]} \end{aligned}$$

Coefficients of viscosity η of gases at 0°C, 760 Torr and computed values of molecular diameters ξ and mean free path λ , according to eqs. (2.71), (2.56).

Gas	η micropoises	ξ cm	λ^* cm
Helium	186.9	2.20×10^{-8}	1.32×10^{-2}
Neon	312.4	2.55×10^{-8}	9.82×10^{-3}
Argon	208.8	3.69×10^{-8}	4.67×10^{-3}
Krypton	224.9	4.27×10^{-8}	3.49×10^{-3}
Xenon	216.5	4.87×10^{-8}	2.68×10^{-3}
Hydrogen	84.7	2.68×10^{-8}	8.83×10^{-3}
Nitrogen	166.6	3.78×10^{-8}	4.45×10^{-3}
Oxygen	191.0	3.65×10^{-8}	4.77×10^{-3}
Air	171.2	3.76×10^{-8}	4.49×10^{-3}
Chlorine	124.0	5.51×10^{-8}	7.61×10^{-3}
Ammonia	88.9	4.57×10^{-8}	3.05×10^{-3}
Carbon monoxide	165.8	3.79×10^{-8}	4.42×10^{-3}
Carbon dioxide	137.6	4.66×10^{-8}	2.93×10^{-3}
Methane	103.2	4.18×10^{-8}	3.64×10^{-3}
Acetylene	93.5	4.96×10^{-8}	2.59×10^{-3}

T (Macroscopica) misurata
 ξ (microscopica) dedotta dalla misura di η (Macro).
 p (Macroscopica)

$$\text{Per l'aria a RT : } \lambda = 5 \cdot 10^{-3} / P ; \lambda \text{ [cm], } P \text{ [Torr]}$$

AA 2009/2010

Tecnologia del Vuoto (PhD)

Fenomeni di trasporto: viscosità

Forza di taglio

$$P_{xy} = \frac{F_x}{A_{xz}} = -\eta \frac{du}{dy}$$

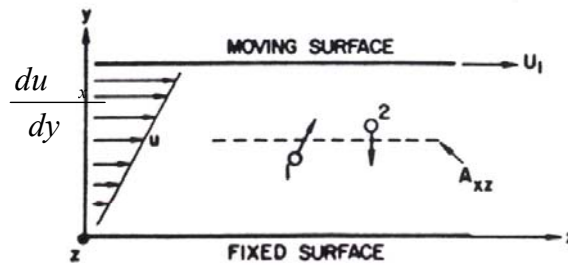


Fig. 2.5 Origin of the viscous force in a gas.

Il coefficiente di viscosità : η nella TCG viene determinato dal trasferimento di impulso.

$$\eta = \frac{1}{3} n m \bar{v} \lambda$$

$$\eta = \frac{1}{3} n m \bar{v} \frac{1}{\sqrt{2} n \sigma}$$

n : densità
 m : massa molec.
 v : velocità
 λ : lib. camm

$$\eta = \frac{1}{3} n m v \lambda$$

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} n \sigma}$$

Indipendente da n e
 (data T) da P

$$v_{av} = \sqrt{\frac{3 kT}{m}}$$

$$\eta = 0.499 n m v \lambda = \frac{0.499}{\pi^{3/2}} \frac{(4 m k T)^{1/2}}{d_0^2} \propto \frac{(m T)^{1/2}}{d_0^2}$$

La fisica di Berkeley – Fisica Statistica.

Conducibilità termica

$$Q = -k \frac{dT}{dy}$$

flusso di calore conducibilità termica

Misuratori vuoto:
 Termo-croci e Pirani

Nel modellino, presentato nella figura precedente, si consideri il trasferimento di energia invece dell'impulso, si ha allora:

$$k = \frac{1}{3} n m c_v \bar{v} \lambda$$

Utilizzando l'equazione ricavata per η :

$$k = \eta \cdot c_v$$

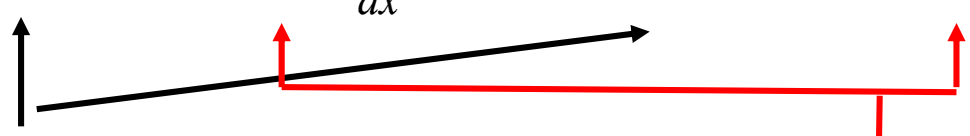
La relazione sopra è approssimata, si può ricavare una relazione più precisa ($\gamma = c_p / c_v$):

$$k = \frac{1}{4} (9\gamma - 5) \eta c_v$$

Le stesse considerazioni fatte per η valgono per k

$$k \propto \eta \propto \frac{(m T)^{1/2}}{d_0^2}$$

Diffusione

$$\Gamma_1 = -D \frac{dn_1}{dx}, \quad \Gamma_2 = -D \frac{dn_2}{dx}$$


Flusso

Coeff. di diffusione

Dalla Teoria Cinetica dei Gas (TCG) per l'autodiffusione si ha:

$$D = \frac{1}{3} \bar{v} \lambda$$

$$D = \frac{\lambda = 1/\sqrt{2}n\sigma}{v_{av} = \sqrt{3kT/m}} \approx \frac{1}{\sqrt{6}} \frac{1}{p\sigma} \sqrt{\frac{(kT)^3}{m}}$$

$$D \propto \frac{1}{p} \propto T^{3/2}$$

Regimi di flusso

➤ Nei sistemi da vuoto:

• il gas passa o può trovarsi in tutti i regimi di flusso:

- ❖ Viscoso $\lambda < D$
- ❖ Intermedio $\lambda \sim D$
- ❖ Molecolare $\lambda > D$

Il parametro che permette di individuare, in quale regime ci si trova e quindi quali leggi utilizzare è

λ il libero cammino medio

da confrontare con le dimensioni (più piccola) dello spazio in cui si trova il gas volume, del tubo ecc.

D .

Regimi di Flusso

Numero di Knudsen:

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

$$R_e = \frac{\rho v d}{\eta}$$

Numero di Reynold:

Stato del gas	k	Regime di Flusso	R_e
Viscoso	$D/\lambda < 110$	Turbolento	2100
		Laminare	1100;
Transitorio		Intermedio	$1 < D/\lambda < 110$
Rarefatto		molecolare	$D/\lambda > 110$

Per l'aria si ha

$$D \cdot P > 5 \cdot 10^{-1} \text{ cm Torr}$$

$$5 \cdot 10^{-3} < D \cdot P < 5 \cdot 10^{-1} \text{ cm Torr}$$

$$D \cdot P < 5 \cdot 10^{-3} \text{ cm Torr}$$

Ricavare
Come esercizio

Regimi di flusso e modelli da utilizzare

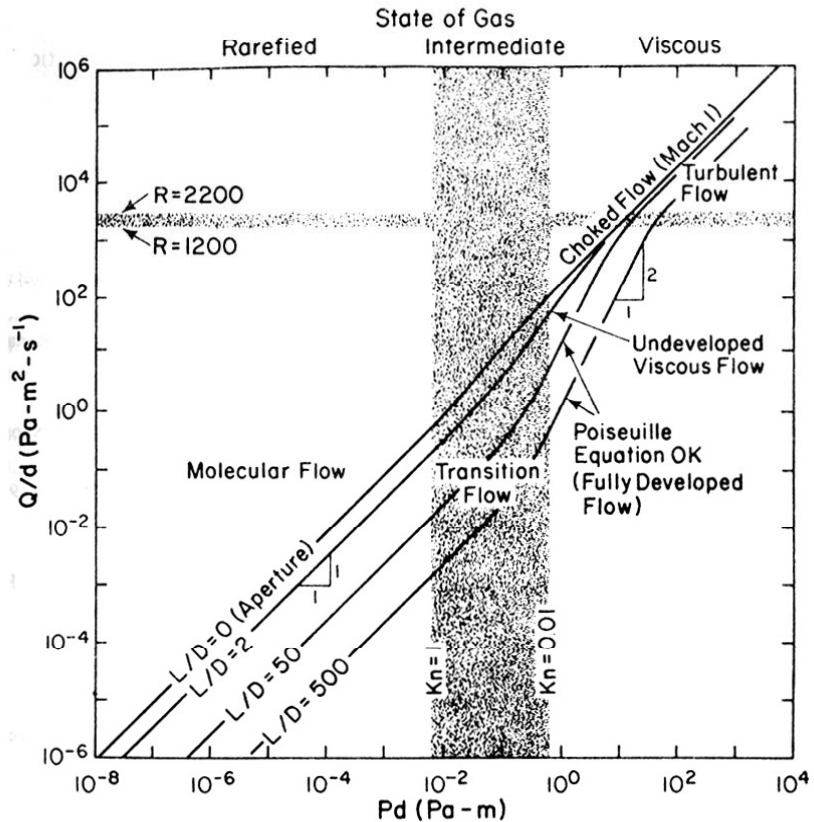


Fig. 3.17 Gas flow—pressure regimes

La Portata

Portata Q: $Q = \frac{d(PV)}{dt}$; SI $\left[\frac{\text{Pa} \cdot \text{m}^3}{\text{s}} \right] = \text{Watt}$

Stazionari o ($p = \cos t$): $Q = \frac{Pd(V)}{dt}$;

$$PV = NkT \quad ;$$

$$Q = P \frac{dV}{dt} \stackrel{T = \text{cost}}{=} kT \frac{dN}{dt}$$

} **Relazione Portata e Φ_{mol}**

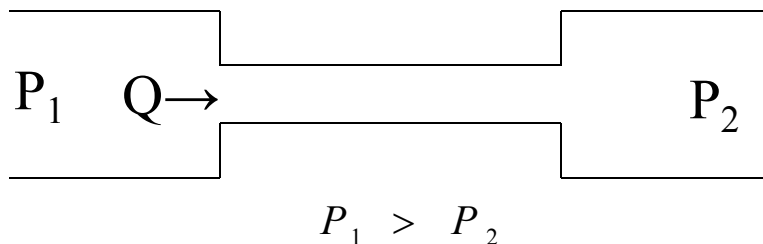
$$Q = P \frac{d(V)}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{W}{M} R_0 T \right) \stackrel{T = \text{cost}}{=} \frac{R_0 T}{M} \frac{dW}{dt}$$
} **Relazione Portata e Φ_{massa}**

$$N' \text{ (kg - moles / sec) } = \frac{Q}{N_0 k T} = \frac{Q}{R_0 T}$$

$$m' \text{ (kg/sec) } = M \frac{Q}{N_0 k T} = \frac{MQ}{R_0 T}$$

Flusso di moli e/o gas correlata come a Q.

Conduttanza



Se $\Delta P \neq 0$; si ha flusso di gas (Q):

Si definisce conduttanza (C): $C = \frac{Q}{\Delta P} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$

Equivalente elettrico

$$C = \frac{I}{\Delta V}$$

Velocità di pompaggio

Si definisce velocità di pompaggio (S):

$$S = \frac{dV}{dt} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \quad \text{usati} \quad \text{l/s} \quad \text{e/o} \quad \text{m}^3/\text{h}$$

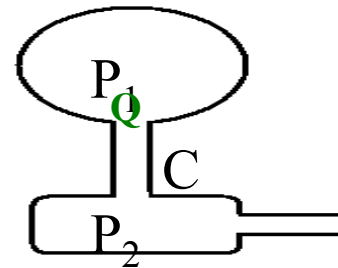
S è il volume di gas aspirato in t ad una data P

Stazionari o ($p = \text{cost}$): $Q = P \cdot S$

Q è la grandezza che si conserva in un sistema da vuoto (a T costante).

Possiamo ricavare le seguenti equazioni maestre

$$S_i = \frac{Q}{P_i}$$
$$\frac{1}{S_1} = \frac{1}{S_2} + \frac{1}{C}$$



AA 2009/2010

Tecnologia del Vuoto (PhD)

Conduttanze in serie ed in parallelo

Utilizzando l'equivalente elettrico:

$$C = \frac{I}{\Delta V} \qquad C = \frac{Q}{\Delta P}$$

Possiamo ricavare le conduttanze in parallelo

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$

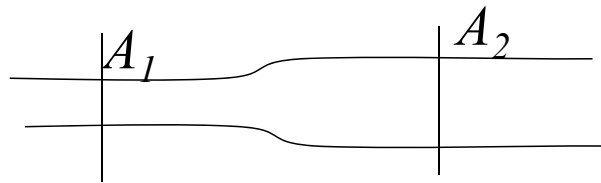
Possiamo ricavare le conduttanze in serie:

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

AA 2009/2010

Tecnologia del Vuoto (PhD)

Derivazione di C (μscopico)



$$\dot{N}_1 = A_1 v_1 n_1 = S_1 n_1$$

$$\dot{N}_2 = A_2 v_2 n_2 = S_2 n_2$$

Flusso costante

$$\dot{N}_{\forall pt} = \dot{N}_1 = \dot{N}_2$$

Flusso verso volumi a densità minore:

$$\dot{N} \propto \Delta n = (n_1 - n_2)$$

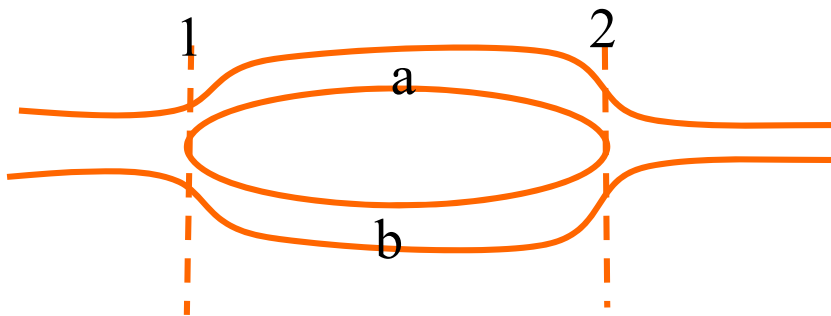
$$C \stackrel{def}{=} \frac{\dot{N}}{(n_1 - n_2)}$$

$$[C] = [m^3/s]$$

Si ricava nuovamente l'equazione maestra:

$$1/C = (1/S_1) - (1/S_2)$$

Conduttanze in serie ed in parallelo

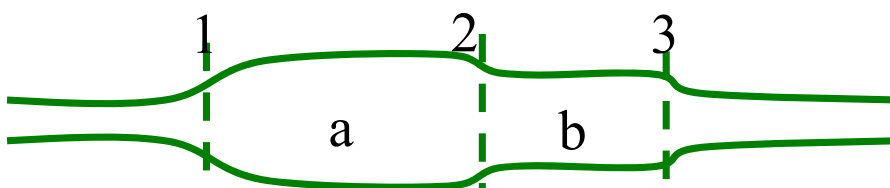


C in parallelo

$$\left. \begin{aligned} \dot{N}_a &= C_a (n_1 - n_2) \\ \dot{N}_b &= C_b (n_1 - n_2) \end{aligned} \right\}$$

$$\dot{N}_a + \dot{N}_b = \dot{N} = C_{\parallel} (n_1 - n_2)$$

$$C_{\parallel} = C_a + C_b + \dots$$



C in serie

$$\dot{N} = C_a (n_1 - n_2) = C_b (n_2 - n_3) = C_s (n_1 - n_3)$$

$$1/C_s = 1/C_a + 1/C_b + \dots$$

Dal μ -scopico al M-scopico

- # molecole / t = \dot{N}

come collegarla a Q [Pa m³/s=W]

$$\begin{aligned} \dot{N} &\propto \Delta n \equiv \dot{N} = C (n_1 - n_2) \equiv \dot{N} \cdot kT \\ \equiv \dot{N} kT &= C (n_1 kT - n_2 kT) \quad \begin{matrix} P = nkT \\ \dot{N} = Sn \end{matrix} \\ \begin{matrix} P = nkT \\ \dot{N} = Sn \end{matrix} SP &= Q = C (P_1 - P_2) \end{aligned}$$

Più in uso esprimere Q in mbar l/s