

# M.Sioli's Thermodynamics

Pocket reference for 1st year course - BSc Physics, Unibo

2023

## Contents

1	Fluidostatica e fluidodinamica	1
2	Sistemi termodinamici	1
3	Teoria Cinetica	3
4	Primo principio	3
5	Trasmissione del calore	6
6	II Principio	8
7	Entropia	8
8	Potenziali termodinamici	11
9	Terzo principio	11
10	Termodinamica statistica	12
11	Differenziali esatti	12
12	Costanti fisiche, u.m. e proprietà termodinamiche	12

## 1 Fluidostatica e fluidodinamica

Sforzo di Taglio  $\vec{T} = \frac{d\vec{F}_t}{dS}$

Equazione della statica (1D)  $\frac{dp}{dz} = -\rho(z)g$

Equazione generalizzata della statica  $\nabla p = \rho\vec{H} = -\rho\nabla\Phi$  ove  $\vec{H}$  indica forza di volume (f. che agisce tramite il v. del corpo)

Legge di Stevino  $p = p_0 + \rho gh$

Tensione superficiale  $\tau = \frac{dF}{dl} = \frac{dL}{dS}$  (alternativamente indicata con  $\gamma$ )

Equazione di continuità  $\rho Av = \text{cost}$

Resistenza del mezzo (per corpo sferico)  $F = 6\pi R\eta v$  a piccole velocità,  $F = \frac{1}{2}\rho v^2 \cdot S \cdot C$  a grandi v.

## 2 Sistemi termodinamici

Regola delle Fasi di Gibbs  $\nu = C + 2 - F$  ove  $\nu$  sono i d.o.f. termodinamici (var. intensive indipendenti),  $C$  le componenti e  $F$  le fasi

Scala Celsius  $\theta(x) = 100 \frac{x - x_0}{x_{100} - x_0} C$

**Coefficiente di dilatazione termica lineare**  $\alpha_L = \frac{1}{l} \left( \frac{\partial l}{\partial T} \right)_p$  indicato anche con  $\alpha$   
(per un filo è a  $\tau$ , tensione ai capi, costante)

$$\Delta l \approx l \cdot (1 + \alpha_L \Delta T)$$

**Coefficiente di dilatazione termica volumetrico**  $\alpha = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p$  indicato anche con  $\beta$

$$\Delta V \approx V \cdot (1 + \alpha \Delta T) \quad \text{Per } \Delta T \rightarrow 0 \quad \beta \approx 3\alpha_l$$

**Coefficiente di comprimibilità isoterma**  $\frac{1}{k} = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_T$

**Pendolo dilatato** anticipa in un giorno di  $\Delta\tau_1$  a  $\theta_1$  e  $\Delta\tau_2$  a  $\theta_2$

$$\alpha_L = \frac{2(\Delta\tau_1 - \Delta\tau_2)}{\tau_0(T_1 - T_2)}$$

**Potenziale di Lennard-Jones**  $U(r) = \varepsilon \left[ \left( \frac{r_{min}}{r} \right)^{12} - 2 \left( \frac{r_{min}}{r} \right)^6 \right]$

**Termometro a GP**  $\theta(p) = 273.16 \frac{p}{p_3}$  ove  $p_3 =$  punto triplo

#### LEGGI DEI GAS PERFETTI

**I Legge di Gay-Lussac** a  $p$  cost  $V = V_0 \beta \theta$  ( $V \propto \theta$ )

**II Legge di Gay-Lussac** a  $V$  cost  $p = p_0 \beta \theta$  ( $p \propto \theta$ )

**Legge di Boyle** a  $n, \theta$  cost  $V = \frac{cost}{p}$  ( $V \propto \frac{1}{p}$ )

**Legge di Avogadro** a  $p, \theta$  cost  $V = cost' \cdot n$  ( $V \propto n$ )

**Equazione di stato dei GP**  $pV = nR\theta$

**Dilatazione volumica e comprimibilità per GP**  $\alpha = \frac{1}{\theta} \left| k = p \right.$

**Dipendenza pressione dalla quota ( $\theta$  cost)**  $p(z) = p_0 e^{-z/h_0}$  con  $h_0 = \frac{R\theta}{gM}$  (massa molecolare media)

**Sviluppo del viriale**  $z = \frac{pV}{nR\theta}$  fattore di compressione

$$z(p) \approx 1 + Ap + Bp^2 + Cp^3 + \dots$$

**Equazione di stato di Van der Waals**  $\left( p + a \frac{n^2}{V^2} \right) (V - bn) = nR\theta$

oppure  $\left( p + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = R\theta$  con volume molare  $v$

**Pressione per GR**  $p(\theta, V) = \frac{nR\theta}{V - bn} - \frac{an^2}{V^2} = \frac{R\theta}{v - b} - \frac{a}{v^2} = p(\theta, v)$

**Temperatura e volume molare critici** (flesso orizzontale isoterma piano  $pv$ ) con coeff. compressione

$$v_C = 3b \quad \theta_C = \frac{8a}{27Rb} \quad z_C = \frac{p_C v_C}{R\theta_C} = \frac{3}{8} = 0.375$$

**Vapore saturo**  $\frac{n_L}{n_G} = \frac{v_G - v}{v - v_L}$

**Recipienti comunicanti: si scalda 2**  $p_f = \frac{V_1 + V_2}{V_1 + \frac{\theta_0}{\theta_f} V_2}$

### 3 Teoria Cinetica

**Pressione**  $p = \frac{1}{3}(p_x + p_y + p_z) = \frac{m}{3V} \sum_{i=1}^N (v_{ix}^2 + v_{iy}^2 + v_{iz}^2) = \frac{m}{3V} \sum_{i=1}^N v_i^2$

**Energia cinetica media**  $\langle \varepsilon \rangle = \frac{3}{2} k_B \theta$

**Teorema di equipartizione dell'energia** definizione Kelvin  $\theta = \frac{2\langle \varepsilon \rangle}{k_B \nu}$  con  $\nu = n.d.o.f.$  e cost. di Boltzmann definita come valore esatto

**Legge di Dalton (pressioni parziali)**  $(p_1 + p_2)V = (n_1 + n_2)R\theta$   
ove  $p_1, p_2$  sono pressioni esercitate in assenza dell'altro gas

**Gas sulla bilancia**  $|\Delta v_{iy}| = \frac{gL}{|\vec{v}_{iy}|}$  da cui  $\Delta p = \frac{Mg}{S}$

**Distribuzione di Boltzmann (PDF)**  $\rho(v; m, \theta) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{m}{2k_B \theta} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2k_B \theta}}$  con  $m$  massa della singola molecola

**Moda**  $\frac{d\rho}{dv} = 0 \rightarrow \sqrt{\frac{2R\theta}{M}} = \sqrt{\frac{2k_B \theta}{m}}$

**Velocità media**  $\langle v \rangle = \int_0^{+\infty} v \rho(v) dv = \sqrt{\frac{8R\theta}{\pi M}} = \sqrt{\frac{8k_B \theta}{\pi m}}$

**Velocità quadratica media**  $\langle v^2 \rangle = \int_0^{+\infty} v^2 \rho(v) dv = \frac{3R\theta}{M} = \frac{3k_B \theta}{m}$   $\sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{3k_B \theta}{m}} = \sqrt{\frac{3\pi}{8}} \langle v \rangle$

**Selettore di velocità**  $\Delta l(v) = \frac{2R^2 \omega}{v}$

**Atmosfere planetarie** raggio limite (posta  $v_f = \sqrt{\langle v^2 \rangle}$ )  $r = \sqrt{\frac{9R\theta}{8G\pi M \rho_{pianeta}}}$  a  $\theta, \rho$  unif

**Libero cammino medio - Mean free path**  $\lambda = \frac{k_B \theta}{\sigma p \sqrt{2}}$  con  $\sigma$  cross section molecole

**Frequenza urti**  $f = \frac{\bar{v}}{\lambda} = \sqrt{\frac{6\sigma p}{mkT}}$  **N° urti in unità di volume e tempo**  $n(V, \Delta t) = f \cdot \frac{N}{V} \cdot \Delta t = f \cdot \frac{p}{kT} \cdot \Delta t$

### 4 Primo principio

**Lavoro**  $L_{term} = \sum F_{GEN} \cdot \Delta S_{GEN}$  (tra sistema e ambiente, esterno)

**pV per quasistatiche**  $\delta L = p dV \rightarrow L = \int_{V_i}^{V_f} p(V) dV$

**Altri tipi di lavori termodinamici**  $L = \int_i^f p dV + \int_i^f T dl + \int_i^f \tau dS + \int_i^f \varepsilon dq + \int_i^f \mu_i dn_i$

#### LAVORO IN QUASISTATICHE

**Isocora**  $L = 0$

**Isobara**  $L = p(V_f - V_i) = p\Delta V$

**Isoterma** per **GP**  $L = nR\theta \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right)$  per **GR**  $L = nR\theta \ln\left(\frac{V_f - nb}{V_i - nb}\right) + an^2\left(\frac{1}{V_f} - \frac{1}{V_i}\right)$

**Per stati condensati** con dilatazione termica trasc: quasistatica  $L = \frac{V}{k}[p_i^2 - p_f^2]$  brusca  $L = -\frac{V}{k}p_f(p_f - p_i)$

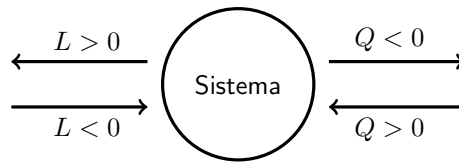
**Bolla di sapone** differenza di pressione int-est  $\Delta p = \frac{4\tau}{r}$

## ENERGIA INTERNA E CALORE

**En. interna e adiabatiche**  $\Delta U_{A \rightarrow B} = L_{A \rightarrow B}^{(ad)}$

**PRIMO PRINCIPIO** integrale  $Q = \Delta U + L$  locale  $\delta Q = dU + \delta L$

Convenzione segni:



**Sistemi idrostatici** semplici  $\delta Q = p dV + dU$  non semplici  $\delta Q = \sum p_i dV_i + dU$

**Altre forme di energia** sistema *nella sua totalità* non in quiete  $+\Delta K$  e/o sottoposto a campo di forze, potenziale conservativo  $+\Delta V$

**Ciclo**  $\Delta U = 0 \implies Q = L$

## CAPACITÀ TERMICA

**C.t. media**  $\bar{C} = \frac{Q}{\Delta T}$

**Locale**  $C(\theta) = \lim_{\theta_f \rightarrow \theta} \frac{Q}{\theta_f - \theta} = \frac{\delta Q}{d\theta}$

**Calore specifico**  $c_m = \frac{C}{m} = \frac{1}{m} \frac{\delta Q}{d\theta} \Big| [c_m] = \text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$

**Calore molare**  $c_n = c = \frac{C}{n} \Big| [c] = \text{J K}^{-1} \text{mol}^{-1}$

A pressione costante  $c_p = \frac{1}{n} \left( \frac{\delta Q}{d\theta} \right)_p$ , a volume costante  $c_V = \frac{1}{n} \left( \frac{\delta Q}{d\theta} \right)_V$

**Calore latente** locale  $\lambda = \frac{\delta Q}{dm}$ , integrale  $\lambda = \frac{Q}{m}$  con  $m$  massa che transisce di fase e  $Q$  assorbito o ceduto.

Anche molare  $\lambda_n = \frac{Q}{n}$

**Lungo politropica per GP**  $pV^\alpha = \text{cost} \implies c_\alpha = c_V + \frac{R}{1-\alpha}$  (si riduce a  $c_p$  se  $\alpha = 0$ )

**Lavoro in transizione** e.g. liquido-vapore  $L = p(v_G - v_L)$

**Dulong-Petit e Debye**  $c \approx c_V(\theta) = 3R \left( \frac{\theta}{\theta_D} \right)^3 \int_0^{\theta_D/\theta} \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} dx$

per  $\theta \gg \theta_D \longrightarrow c \approx 3R \text{ cost}$

per  $\theta \ll \theta_D \longrightarrow c \propto \left( \frac{\theta}{\theta_D} \right)^3$

**GP Monoatomici**  $c_V = \frac{3}{2}R \Big| c_p = \frac{5}{2}R \Big| \gamma = \frac{5}{3}$

**Biatomici**  $c_V = \frac{5}{2}R \Big| c_p = \frac{7}{2}R \Big| \gamma = \frac{7}{5}$

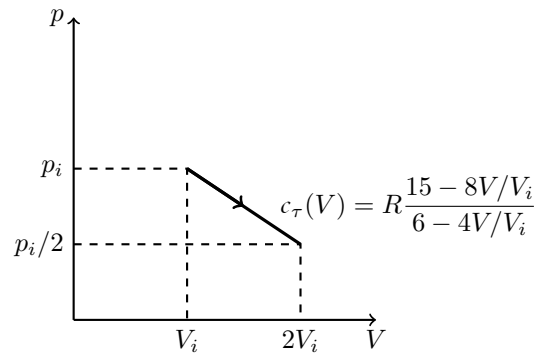
**Calorimetro di Bunsen**  $c_m = \frac{\lambda_f}{m_c \Delta \theta} \frac{\Delta V}{\Delta V_{LS}} = \frac{\lambda_f m_G}{m_c \Delta \theta}$  ove  $\Delta V_{LS}$  è la variazione di vol. per unità di massa sciolta

**Equilibrio termico**  $\theta_e = \frac{C_1 \theta_1 + C_2 \theta_2}{C_1 + C_2}$  per termostato  $\theta_e = \frac{1 + \frac{C_2 \theta_2}{C_1 \theta_1}}{1 + \frac{C_2}{C_1}} \theta_1 \xrightarrow{\frac{C_2}{C_1} \rightarrow 0} \theta_1$

**Calorimetro delle mescolanze (di Regnault)**  $c = c_{H_2O} \frac{m_{H_2O}}{m} \left[ \frac{\theta_e - \theta_{H_2O}}{\theta - \theta_e} \right]$  con  $m_{H_2O} = m_{H_2O}^0 + m_{H_2O}^{(equiv)}$

**Calori molari per sistemi idrostatici**  $c_V = \frac{1}{n} \left( \frac{\partial U}{\partial \theta} \right)_V$  |  $c_p = \frac{1}{n} \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial \theta} \right)_p + p \left( \frac{\partial V}{\partial \theta} \right)_p \right] = \frac{1}{n} \left( \frac{\partial H}{\partial \theta} \right)_p$   
(vd. potenziali)

**Energia interna GP**  $dU = nc_V d\theta$  da cui assunto calore molare costante  $U(\theta) = nc_V \theta + cost$



**Seconda equazione dell'energia**  $\left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_\theta = \theta \left( \frac{\partial p}{\partial \theta} \right)_V - p$

**Energia interna GR**  $U(\theta, V) = nc_v \theta - \frac{an^2}{V} + cost$

**TEOREMA DI EQUIPARTIZIONE (bis)**  $c_V = \frac{f}{2} R$  con  $f$  d.o.f.

**Contributi cinetici (König)**  $\varepsilon = \varepsilon_{TRASL} + \varepsilon_{ROT} + \varepsilon_{VIBR}$  per quest'ultima 2 termini per ogni modo vibrazionale

**Biatomici**  $f = 3 \text{ trasl} + 2 \text{ rot (terzo asse princ d'inerzia trasc)} + 2 \text{ vib (attivi solo sopra alta soglia quantica)}$

**Poliatomici**  $f = 3 \text{ trasl} + \overbrace{f_{ROT}^{ANG} = 3 \vee f_{ROT}^{LIN} = 2} + \overbrace{f_{VIB}^{ANG} = 2(3N-6) \vee f_{VIB}^{LIN} = 2(3N-5)}$   
dunque  $c_V^{ANG} = 3R(N-1)$  |  $c_V^{LIN} = \frac{6N-5}{2} R$

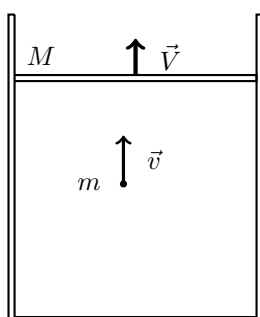
**Relazione di Meyer (per GP)**  $c_p = c_V + R$

**$\gamma$  per poliatomici**  $\gamma_{LIN} = 1 + \frac{2}{6N-5}$  |  $\gamma_{ANG} = 1 + \frac{1}{3N-3}$   
(ma nel limite di  $N$  elevato correzioni quantistiche non trascurabili!)

**Adiabatiche di sistemi idrostatici**  $\gamma \frac{dV}{V} = -\frac{dp}{p} \rightarrow pV^\gamma = cost$  |  $\theta V^{\gamma-1} = cost$  |  $\theta p^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = cost$

**Lavoro in QS per GP**  $L = \frac{p_i V_i - p_f V_f}{\gamma - 1} = \delta U$

**Curve**  $\left( \frac{\partial p}{\partial V} \right)_T = -\frac{p}{V} > \left( \frac{\partial p}{\partial V} \right)_{ad} = -\gamma \frac{p}{V} \Rightarrow \left| \left( \frac{\partial p}{\partial V} \right)_T \right| < \left| \left( \frac{\partial p}{\partial V} \right)_{ad} \right|$  (adiabatica più 'ripida')



**Spiegazione meccanica per esp adiabatica**  $r \equiv \frac{m}{M}$

$$V' = \frac{2mv + (M-m)V}{m+M} \xrightarrow{r \rightarrow 0} V \text{ (immutato)}$$

$$v' = \frac{2MV + (m-M)v}{m+M} \xrightarrow{r \rightarrow 0} 2V - v \text{ (varia modulo: si ha mediamente diminuzione } \varepsilon \text{ e dunque } \Delta U, \Delta \theta < 0)$$

**Prima equazione di Friedmann - espansione adiabatica dell'universo**

$$\dot{\rho} = -3(p + \rho)H$$

con  $H = \frac{\dot{a}}{a}$  costante di Hubble

**Dipendenza temperatura dalla quota**  $L \equiv \frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{mg}{R}$  Lapse rate (gradiente adiabatico secco)  $\frac{d\theta}{dz} = -L \implies \theta(z) = \theta_0 - Lz$  (in realtà si usa lapse rate umido - o saturo)

**Dipendenza pressione**  $\frac{dp}{p} = \frac{mg}{RL} \frac{Ldz}{\theta_0 - Lz} \implies p(z) = p_0 \left(1 - \frac{Lz}{\theta_0}\right)^{\frac{mg}{RL}}$

**Esperienza di Rüchardt**  $\gamma = \frac{4\pi^2 mV}{A^2 p \tau}$  ove  $\tau$  = periodo di oscillazione,  $A$  sezione tubo

**Velocità del suono**  $v = \sqrt{\frac{k_s}{\rho}}$  con  $k_s = \left[ -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_S \right]^{-1}$  coeff. di comprimibilità adiabatico

si ottiene  $\boxed{\gamma = \frac{v^2 \rho}{p}}$

**Curva generica nel piano pV** Massimizz  $T \rightarrow$  si ricava  $p(V)$  e sostituisce in eq. di stato  $\left( \frac{\partial T}{\partial V} \right)_\tau = 0$  per  $V_{max}$

**Velocità angolare media biatom**  $\langle \varepsilon_{ROT} \rangle = \left\langle \frac{1}{2} I_A \omega_A^2 + \frac{1}{2} I_B \omega_B^2 \right\rangle = \frac{2}{2} kT = kT$   $\langle \omega^2 \rangle = 2 \cdot \langle \omega_i^2 \rangle = \frac{2kT}{md^2}$   
con  $m = m_{nucleo}$  e  $d = d_{legame}$

**Radiazione elettromagnetica**  $\approx$  gas di fotoni  $\langle U = bVT^4 \mid p = \frac{1}{3} bT^4 \mid b = 7.56 \times 10^{-16} \text{ J K}^{-4} \text{ m}^{-3}$   
Espansione adiabatica dell'universo osservabile:  $R_0 T_0 = R_f T_f$

**Pistone adiabatico con molla** elongazione quando accelerazione pistone eguaglia quella del contenitore:

$$\Delta l = \frac{m_{pist} \cdot a_{cont}}{k + \frac{8\gamma V_0 p_0}{l^2}}$$

**Velocità massima setto mobile** adiabatico che divide due gas con stesso  $\gamma$  in contenitore isolato

$$v_{max} = \sqrt{\frac{2}{m(1-\gamma)} \left[ p_{eq}(V_{TOT}) - p_1^0 V_1^0 - p_2^0 V_2^0 \right]}$$

**Capacità termica contenitore con pistone e molla**  $C = \frac{Q}{\Delta T} = \frac{\Delta U}{\Delta T} = 2R$

**Due camere: setto fisso conduttore + pistone mobile adiabatico**  $\boxed{B \parallel A \leftarrow \mid \rightarrow}$

$$L_e = -\frac{3}{2} R (T_f - T_0) (n_B + n_A) \mid p_B^f = \frac{n_A R T_f}{V_A} \mid \text{politropica: } pV^{\frac{5n_A+3n_B}{3n_A+3n_B}} = cost$$

**Adiabatico con aggiunta massa**  $T_f = \frac{2}{5nR} (p_0 A + Mg) (h_0 - h_f) + T_0 \mid h_f = \left[ 1 - \frac{x}{\gamma(1+x)} \right] h_0$  con  $x \equiv \frac{Mg}{p_0 A}$

**Vapore d'acqua e ghiaccio a 0°C** con vapore estratto: rimane solo ghiaccio  $\Rightarrow m_G = \frac{\lambda_V}{\lambda_V + \lambda_F} V_0 \rho_{H_2O}$

## 5 Trasmissione del calore

**Conduzione: Legge di Fourier**

$$\boxed{\frac{\delta Q}{dt} = -k dA \left( \frac{d\theta}{dx} \right)}$$

ove l'ultimo termine indica il gradiente termico,  $[k] = \text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$  la conducibilità termica (segno negativo in quanto fluisce da più caldo a più freddo)

$$\underbrace{\vec{\Phi}_Q}_{\text{flusso di } Q} = -k \vec{\nabla} \theta$$

**Trattazione generale: equazione del trasporto**  $\frac{\partial u}{\partial t} + \mathbf{b} \cdot \nabla u = f$  con  $u : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^n$

**Geometria planare**  $P = \frac{\delta Q}{dt} = k \cdot A \cdot \frac{\theta_1 - \theta_2}{d} = -AH\Delta\theta$  con **conduttanza**  $H \equiv \frac{k}{d}$

**Conduttanza di strati in serie**  $\frac{1}{H_{tot}} = \sum_i \frac{1}{H_i}$

**Caso non stazionario: equazione del calore**  $\nabla^2 \theta = \frac{\rho c}{k} \frac{\partial \theta}{\partial t}$  con  $\alpha \equiv \frac{\rho c}{k}$  diffusività termica

**Geometria cilindrica**  $\frac{\delta Q}{dt} = 2\pi \cdot l \cdot k \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$  con 1 int, 2 est

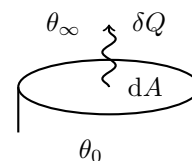
**Geometria sferica**  $\frac{\delta Q}{dt} = 4\pi k \left( \frac{r_2 r_1}{r_1 - r_2} \right) (\theta_1 - \theta_2)$

**Superficie ghiacciata del lago / nel contenitore** spessore  $z(t) = \sqrt{2 \left( \frac{k dT}{\lambda_f \rho_G} \right) t} + z_0^2$

**Convezione: legge del raffreddamento di Newton**

$$\frac{\delta Q}{dt} = h dA (\theta_0 - \theta_\infty)$$

con  $h$  coefficiente di trasferimento termico (o di convezione)



**Raffreddamento del tè**  $\theta(t) = (\theta_0 - \theta_\infty) e^{-\frac{hA}{C}t} + \theta_\infty$

**Tempo di raffreddamento**  $\frac{dT}{dt} = -\frac{hA}{V\rho c} (T - T_\infty)$  da cui  $t_f = \frac{V\rho c}{hA} \ln \left( \frac{T_i - T_\infty}{T_f - T_\infty} \right)$

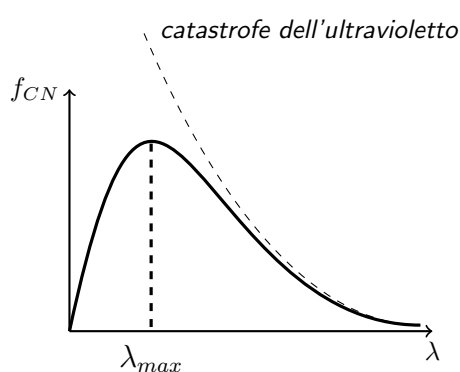
**Irraggiamento: legge di Stefan-Boltzmann**

$$\frac{\delta Q}{dt} = \varepsilon \sigma A \theta^4$$

con  $0 < \varepsilon < 1$  approssimabilità a corpo nero,  $\sigma$  cost. di S-B

**Corpi irradiati**  $\underbrace{r(\alpha, \lambda)}_{\text{riflettanza}} + \underbrace{a(\alpha, \lambda)}_{\text{assorbanza}} + \underbrace{t(\alpha, \lambda)}_{\text{trasmissione}} = 1$  con  $\alpha$  angolo di incidenza. Dopo assorbimento si ha emissione:

**Legge di Kirchhoff** emittanza  $\epsilon(\lambda) = \int a(\lambda)$  sull'angolo solido (tutta riemessa)



**Radiazione elettromagnetica**  $\lambda\nu = c$   
 $E = h\nu$  con  $h$  costante di Planck

**Spettro di Corpo Nero: Legge di Planck** (curva planckiana)

$$f_{CN}(\lambda; \theta) = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda\theta} - 1)}$$

$\int_0^\infty f_{CN}(\lambda) d\lambda = \sigma \theta^4$  (energia totale per unità di tempo e superficie - flusso irradiato)

**Legge di Wien**  $\theta \lambda_{max} = \text{cost} = b$  costante dello spostamento di Wien (massimo si ottiene annullando derivata)

**Emittanza monocromatica:**  $\epsilon(\lambda) = \frac{f(\lambda)}{f_{CN}(\lambda)}$  (tra corpo in esame e CN). Parametro della legge si ottiene secondo:

$$\epsilon = \frac{\int f(\lambda) d\lambda}{\int f_{CN}(\lambda) d\lambda}$$

## 6 II Principio

**Kelvin-Planck** per cicli monotermini  $Q = L \leq 0$

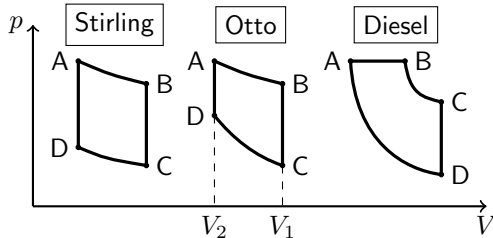
**Rendimento/efficienza macchina termica**

$$\eta = \frac{L}{Q_{ass}} = 1 + \frac{Q_{ced}}{Q_{ass}} = 1 - \frac{|Q_{ced}|}{|Q_{ass}|}$$

ove  $Q_{ass}$  e  $Q_{ced}$  sono la somma dei calori ceduti ai ed assorbiti dai vari serbatoi (anche più di 2)

**Ciclo di Stirling** (combustione esterna)

$$\eta = \frac{R \ln \left( \frac{V_B}{V_A} \right) (\theta_1 - \theta_2)}{\theta_1 R \ln \left( \frac{V_B}{V_A} \right) + c_V (\theta_1 - \theta_2)}$$



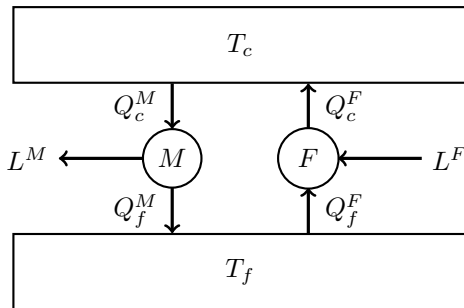
**Ciclo Otto** (comb. interna)  $\eta = 1 - \frac{1}{\left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1}} = 1 - \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1}$

**Ciclo Diesel**  $\eta = 1 - \frac{c_V}{c_p} \frac{\theta_C - \theta_D}{\theta_B - \theta_A}$

**Coefficiente di prestazione (macchina frigorifera)**

$$\varepsilon(\omega) = \frac{Q_f}{|L|} = \frac{|Q_f|}{|Q_c| - |Q_f|}$$

**Teorema di Carnot**  $\eta_M \leq \eta_C$  per MdC operante con i medesimi serbatoi tra o con cui opera M. Uguaglianza se M di Carnot



**Rendimento MdC**

$$\eta_C = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

**Coeff di prestazione frigo di Carnot**

$$\omega_C = \frac{T_f}{T_c - T_f}$$

**Temperatura termodinamica assoluta**  $T_x = T_3 \frac{|Q_x|}{|Q_3|}$  definita da rapporto calori scambiati da MdC che opera tra essa e il punto triplo.

**Massimo lavoro estraibile: Serbatoio caldo a  $C < \infty$**  :  $L_{max} = C \left[ T_c - T_f + T_f \ln \frac{T_f}{T_c} \right]$

**Freddo a  $C < \infty$**  :  $L_{max} = C \left[ T_f - T_c + T_c \ln \frac{T_c}{T_f} \right]$

**MdC tra serbatoi a C finita e costante**  $C_c = C_f$   $\left\{ \begin{array}{l} T_e = \sqrt{T_c \cdot T_f} \\ L = C(T_c + T_f - 2T_e) \end{array} \right.$

**M irr tra serbatoi accoppiata con  $\bar{C}$**  definito  $\epsilon = \frac{Q_c^M}{Q_c^{\bar{C}}}$  si ha  $\eta_M = \frac{1}{\epsilon} \eta_C$  |  $\Delta S_{ciclo} = \frac{Q_f^M}{T_f} \left[ \left( \frac{T_c}{T_f} - 1 \right) (\epsilon - 1) \right]$

## 7 Entropia

**Teorema (o disuguaglianza) di Clausius**

caso discreto  $\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{T_i} \leq 0$  al continuo  $\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$  ove T è

la temperatura del termostato con cui avviene scambio infinitesimo.

**Definizione entropia**  $S$ :  $\Delta S_{AB} = S(B) - S(A) = \int_A^B \frac{\delta Q}{T} \forall R$  trasf rev. tra i due stati:  $\Delta S$  per irrev. si calcola

da rev. tra medesimi stati.  $dS = \frac{\delta Q_R}{T} \Rightarrow$  **Piano T-S**  $\int_i^f T dS = Q_R$

**Estensiva e additiva**

**Processi irreversibili**  $\int_I \frac{\delta Q}{T} < \int_R \frac{\delta Q}{T} = \Delta S \Leftrightarrow \frac{\delta Q}{T} \leq dS$  |  $dS_S = dS_U + \frac{\delta Q_S}{T} \Rightarrow \Delta S_U = \Delta S_S - \int_I \frac{\delta Q_S}{T}$



**Sistemi isolati: Principio di aumento dell'entropia** ogni  $\delta Q = 0 \implies \Delta S \geq 0$   
per universo termodinamico (isolato per def)  $\Delta S_U \geq 0$

**Espansione libera (irr.)**  $\Delta S = nR \ln \frac{V_f}{V_i}$  per due gas con stesso volume iniziale (processi indipendenti sovrapposti)  
 $\Delta S_U = \Delta S_A + \Delta S_B = (n_A + n_B)R \ln 2$

**Scambio di calore**  $\Delta S_U = C_1 \ln \frac{T_e}{T_1} + C_2 \ln \frac{T_e}{T_2}$   
 $\square$  Se  $C_1 = C_2$   $\Delta S_U = C \ln \left( 1 + \frac{(T_1 - T_2)^2}{4T_1 T_2} \right)$ . Per  $T_1 - T_2 = dT$  si ha  $\Delta S_U \approx 0$  (q.s. = rev!)  
 $\square$  Se  $C_1 \gg C_2$ , ovvero  $r \equiv \frac{C_2}{C_1} \rightarrow 0$  si ha  $T_e \rightarrow T_1$  e  $\Delta S_U = C_2 [R - 1 - \ln R]$  con  $R \equiv \frac{T_2}{T_1}$  da:

**Variazione entropia termostato**  $\Delta S_{term} = -\frac{Q}{T_{term}}$  ove  $Q$  è il calore scambiato con il termostato (a  $T_{term}$  cost)  
dal sistema (con segno opportuno).

**Scambio tra termostati** con corpo conduttore in stato stazionario  $\Delta S_U = |Q| \left[ \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right]$  con  $T_1 > T_2$   
 $\Delta S_U \approx 0$  se differenza di temp. infinitesima ( $\rightarrow$  reversibilità quasistatiche di politermiche)

**CICLI**  $\Delta S_S = 0$  (f. di stato)  $\implies \Delta S_U = \Delta S_A$   $\oint \frac{\delta Q}{T} = -\Delta S_U = \text{traccia}$   
**Reversibili:** vale uguaglianza in Clausius  $\Leftrightarrow \Delta S_U = 0$   $\mid$  possibile calcolare  $L = \oint p dV = \oint T dS$

**ENTROPIA PER GP** per qualsiasi trasformazione

$$\Delta S = n \int_R^f c_V(T) \frac{dT}{T} + nR \ln \frac{V_f}{V_i} \quad \text{assunto calore molare costante:}$$

$$\Delta S = nc_V \ln \frac{T_f}{T_i} + nR \ln \frac{V_f}{V_i} = nc_V \ln \left( \frac{T_f V_f^{\gamma-1}}{T_i V_i^{\gamma-1}} \right) = nc_V \ln \left( \frac{p_f V_f^\gamma}{p_i V_i^\gamma} \right) = nc_p \ln \left( \frac{T_f p_f^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}}{T_i p_i^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}} \right)$$

**Entropia GR**  $\Delta S = nc_V \ln \frac{T_f}{T_i} + nR \ln \frac{V_f - b}{V_i - b}$  (no dipendenza da  $a$ !)  
Esp. libera:  $\Delta S_{GP} > \Delta S_{GR}$

**En. sistemi condensati** incompressibili  $\Delta S = \int_i^f C(T) \frac{dT}{T}$  per intervallo di validità Dulong-Petit  $\Delta S = C \ln \frac{T_f}{T_i} = mc_m \ln \frac{T_f}{T_i}$  nel limite di  $T \rightarrow 0$  applicando Debye  $\Delta S \propto \frac{1}{3}(T_f^3 - T_i^3)$

**Coefficiente di dilatazione volumico isoentropico per GR e GP**  $\alpha_S \equiv \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_S = -\frac{c_V}{RT}$

**Acqua versata nel bicchiere**  $\Delta S = mc_a \ln \left( 1 + \frac{gh}{c_a T_i} \right)$  ove  $h$  altezza di caduta

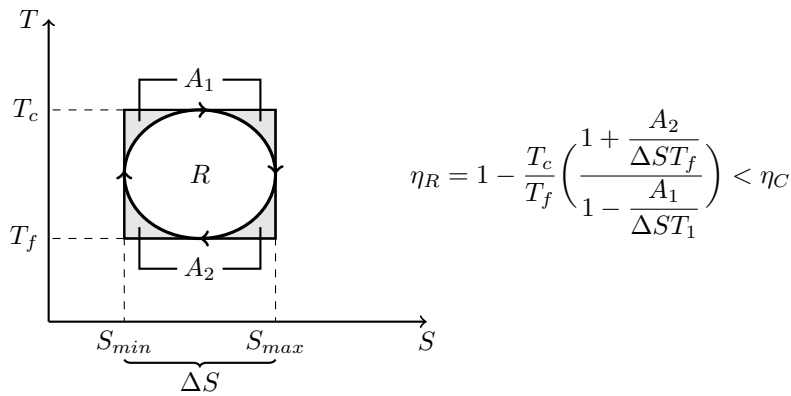
**Transizioni di fase**  $\Delta S = \pm \frac{m\lambda}{T}$

**Degradazione dell'energia**  $\times$  bitermica irr.  $\eta_{CLAUSIUS} \equiv \frac{\Delta S_U T_f}{Q_c} \rightarrow \boxed{\eta_M = \eta_C - \eta_{CLAUSIUS}}$

(MdC operante con stessi serb)

Politermica irreversibile  $\eta_M = \eta_R - \eta_{CLAUSIUS} < \eta_C - \eta_{CLAUSIUS}$  con  $R$  operante con medesimi serb. e  $C$  con i due estremi

**PRINCIPIO DI DEGRADAZIONE DELL'ENERGIA** in processo irreversibile  $\boxed{L_{lost} = T_0 \cdot \Delta S_U}$  con  $T_0$  temperatura termostato più freddo con cui sist. a contatto  
Rev  $\Delta S_U = 0 \implies$  massimo lavoro ottenibile



**Calore irrecuperabile** accoppiando irreversibile con frigo di Carnot  $\bar{C}$  (max efficienza-rendimento):

$$\text{recuperabile } Q_c^{\bar{C}} = Q_c^M - \frac{T_c T_f}{T_c - T_f} \Delta S_U < Q_c^M$$

**RELAZIONE FONDAMENTALE DELLA TERMODINAMICA** per qualsiasi trasformazione ( $U, S, V$  funzioni di stato — e lavoro qs rev)

$$dU = TdS - pdV + \sum x_i dX_i$$

con la sommatoria dei lavori termodinamici delle altre forze generalizzate.  $\rightarrow S, V$  variabili naturali per  $U$

**GP con pistone a contatto termico con acqua**  $T_f = T_0 \cdot 3^{\frac{R}{nc_V + C/n}}$  con  $C$  capacità di acqua+contenitori

$$L_{est} = \frac{T_0}{nc_V + C} \left( 1 - 3^{\frac{R}{nc_V + C/n}} \right) \quad \Delta S_G = \frac{(1 - \gamma)C \ln 3}{1 + C/(nc_V)} \quad \Delta S_U = 0$$

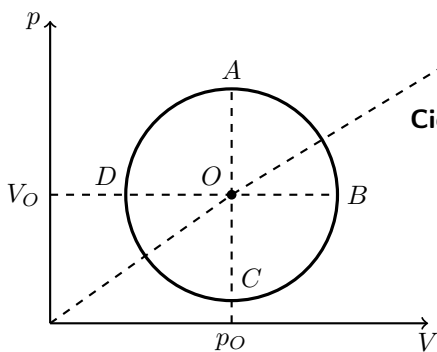
**GP + vapor d'acqua saturo** compr isot rev.  $p_f = p_0 \frac{V_0}{V_f} + p^* \left( 1 - \frac{V_0}{V_f} \right) \quad \left| \quad L = p^*(V_f - V_0) + (p_0 - p^*)V_0 \ln \frac{V_f}{V_0} \right.$   
 con  $p^*$  press di vap saturo.  $m_{cond} = m \Delta n_v = -\frac{m p^*}{RT} (V_f - V_0)$

**2 S a contatto termico con capacità**  $C(T) = \beta T \quad \left. \vphantom{\beta T} \right\} \quad T_e = \sqrt{\frac{T_A^2 + T_B^2}{2}} \quad \left| \quad \Delta S = \beta(2T_e - T_A - T_B) \right.$

**Massima temperatura con corpi in bagno termico**  $T_0$  corpi,  $T_B$  bagno. Usando MdC invertita

$$T_{max} = T_B + \sqrt{2}|T_0 - T_B| \quad (\text{analogo sia per } T_0 > T_B \text{ che viceversa})$$

**Serbatoio caldo = GP compresso a T cost** (MdC)  $\left( \frac{V_f}{V_i} \right)_{ciclo} = e^{\frac{L}{nR(T_c - T_f)}}$



**Ciclo circolare**  $\Delta U_{AC} = \frac{5}{2} V_A (p_C - p_A) \quad \left| \quad L_{tot} = \pi \cdot (p_A - p_O) \cdot (V_B - V_O) \right.$

Imponendo  $dT = 0$  si ha  $\frac{p}{V} = \frac{p_O}{V_O}$  (giacciono su retta)

$$Q_{ass} = \Delta U_{DB} + L_{DB} = \frac{L_{tot}}{2} + \frac{\gamma}{\gamma - 1} p_O (V_B - V_D) \quad \left. \vphantom{\frac{\gamma}{\gamma - 1} p_O (V_B - V_D)} \right\} \quad \eta = \frac{L_{tot}}{Q_{ass}}$$

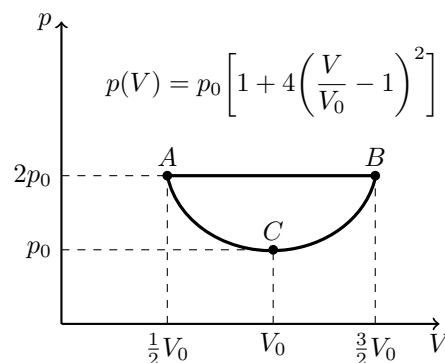
**Ciclo peculiare GP** per  $V_A, V_B$  si impone  $p(V) = 2p_0$

$$T_B = 3T_0 \quad | \quad T_A = T_0$$

$$Q_{AB} = \frac{2\gamma}{\gamma-1} p_0 V_0 \quad \rangle \quad \text{per mono: } Q_{AB} = 5p_0 V_0$$

$$L_{tot} = p_A(V_B - V_A) - \int_A^B p(V) dV = \frac{2}{3} p_0 V_0 \quad \rangle$$

$$\rangle \quad Q_{BCA} = -\frac{13}{3} p_0 V_0 \quad | \quad \Delta S_{B \rightarrow C} = nR \ln \left( \frac{2}{\sqrt{243}} \right)$$



## 8 Potenziali termodinamici

**Entalpia**  $H \equiv U + pV \quad \left| \quad dH = TdS + Vdp \quad (S, p \text{ var nat}) \right.$   
 A  $p$  costante  $dH = (\delta Q_R)_p$

**Energia libera di Helmholtz**  $F \equiv U - TS \quad \left| \quad dH = dU - TdS - SdT \quad (T, V \text{ var nat}) \right.$   
 A  $T$  cost  $dF = dU - TdS \leq -\delta L$ . In assenza di lavoro di volume  $dF \leq -\delta L^{(non-pV)}$

**Potenziali chimici**  $\mu_i \equiv \left( \frac{\partial F}{\partial n_i} \right)_{T,V}$

**Equilibrio liquido-vapore**  $dF = 0, dn_L = -dn_G \implies \mu_L = \mu_G$

**Energia libera di Gibbs**  $G \equiv H - TS = U - TS + pV \quad \left| \quad dG = Vdp - SdT \quad (p, T \text{ var nat}) \right.$   
 A  $T, p$  cost  $dG \leq -\delta L^{(non-pV)}$

**In transizioni di fase** (sola specie!!) all'eq.  $\frac{\partial G}{\partial n_i} = \mu_i = g_i \equiv \frac{G_i}{n_i}$  per ogni fase

**Gibbs per GP**  $G(T, p) = RT[\Phi(T) + \ln p]$  con  $\Phi(T) = (H_0 - TS_0 + c_p T - c_p T \ln T)/RT$   
 Per isoterme  $\Delta G = \ln \frac{p_f}{p_i}$

**Gibbs per miscele di GP**  $\mu_i(T, p) = g_i(T, p) + RT \ln x_i$  ove  $x_i$  = fraz. molare (unica specie  $\rightarrow$  caso prec)

### RELAZIONI DI MAXWELL

$$\text{I} \rangle \left( \frac{\partial T}{\partial V} \right)_S = - \left( \frac{\partial p}{\partial S} \right)_V \quad \text{II} \rangle \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_V = \left( \frac{\partial S}{\partial V} \right)_T \quad \text{III} \rangle \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_S = \left( \frac{\partial V}{\partial S} \right)_p \quad \text{IV} \rangle \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p = - \left( \frac{\partial S}{\partial p} \right)_T$$

### EQUAZIONI DELL'ENERGIA

$$\text{I} \rangle \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T = T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_V - p \quad \text{II} \rangle \left( \frac{\partial U}{\partial p} \right)_T = -T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p - p \left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_T$$

**Equazioni di Clapeyron**  $\frac{dp}{dT} = \frac{\Delta v}{T \Delta v} = \frac{\lambda}{T \Delta v}$  per passaggi di stato

Per temperature lontane da  $T_c$ , dunque  $v_G \gg v_L \rightarrow \Delta v \approx v_G$  si ha  $p(T) = p_0 e^{-\frac{\lambda}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$

## 9 Terzo principio

**Principio di Nernst**  $\lim_{T \rightarrow 0} S(T, x_i) - S(T, x_f) = \Delta S = 0$  isoterma con  $x$  coord term generica

**Enunciato di Planck**  $S_0 = S(0) = 0$  per cristallo perfetto

## 10 Termodinamica statistica

**Molteplicità di un macrostato** con  $N$  particelle e  $\mu$  cellette fisiche

$$W = \frac{N!}{\prod_{i=1}^{\mu} N_i!}$$

Sommando sui macrostati  $\sum W = \mu^N$  e ovviamente  $\sum_{i=1}^{\mu} N_i = N$

**Volume in emispazio dello SdF**  $\tau = W \Delta \tau$  con  $\Delta \tau = (\Delta V)^N$  celletta in SdF e  $\Delta V = \frac{V_{sist}}{\mu}$

**Quantizzazione SdF**  $d\vec{p}d\vec{x} = \left(\frac{h}{4\pi}\right)^{3N}$

### ENTROPIA DI BOLTZMANN

$$S = k_B \ln W$$

**Funzione di partizione**  $Z = \sum e^{-\beta \varepsilon_i}$  con  $\beta = \frac{1}{k_B T}$

**Distribuzione di Boltzmann**  $p_i(\varepsilon_i) = \frac{e^{-\varepsilon_i/k_B T}}{Z}$

**Ricavare funz termodinamiche**  $U = -N \frac{\partial \ln Z}{\partial \beta} \Big|_{\langle \varepsilon \rangle} = -\frac{\partial \ln Z}{\partial \beta}$

**Informazione**  $I_i = I(x_i) = -\log_b p_i$  con  $x_i$  possibile outcome di variabile aleatoria discreta con probabilità  $p_i$ .

**ENTROPIA DI SHANNON**  $S_I \equiv \sum p_i I(x_i) = -\sum p_i \log_b p_i = -k_I \sum p_i \ln p_i$  con  $k_I \equiv \frac{1}{\ln b}$

## 11 Differenziali esatti

Funzionale (1-forma su spazio vettoriale) in due coordinate generiche:

$$\alpha = a(x, y)dx + b(x, y)dy$$

Se  $\exists Q : a = \frac{\partial Q}{\partial x}$  e  $b = \frac{\partial Q}{\partial y}$  allora  $\alpha = dQ$  differenziale esatto, dunque integrabile con  $Q = \int \alpha = \int (\vec{\nabla} Q) \cdot d\vec{x}$

Ciò è verificato **se e solo se**  $a, b$  definite su insieme *semplicemente connesso* e vale il **Teorema di Schwarz**, ovvero:

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial x \partial y} = \frac{\partial a}{\partial y} = \frac{\partial^2 Q}{\partial y \partial x} = \frac{\partial b}{\partial x}$$

## 12 Costanti fisiche, u.m. e proprietà termodinamiche

### Costanti e u.m.

#### Costanti

**Velocità della luce nel vuoto**  $c = 299792458 \text{ m s}^{-1}$

**Costante di Gravitazione universale**  $G = 6.67428 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$

**Accelerazione di gravità** (in prossimità del suolo)  $g \approx 9.81 \text{ m s}^{-2}$

**Costante dei Gas**  $R = 8.314472 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$

**Numero di Avogadro**  $N_A \approx 6.02214179 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

**Costante di Boltzmann**  $k_B \equiv \frac{R}{N_A} \approx 1.3806504 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$

**Costante di Planck**  $h \approx 6.62606896 \times 10^{-34} \text{ J s}$

**Costante di Stefan-Boltzmann**  $\sigma \approx 5.670367 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

**Costante dello spostamento di Wien**  $b = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m K}$

#### Unità di misura

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J} = 1.16 \times 10^4 \text{ K}$$

$$1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ atm} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ mmHg} = 133.3 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ cal} = 4.18 \text{ J}$$

#### Condizioni peculiari

- Condizioni standard (STP) .....  $0^\circ \text{C}$  |  $10^5 \text{ Pa}$
- Condizioni normali .....  $300 \text{ K}$  |  $1 \text{ atm}$

### Proprietà termodinamiche

#### Densità

- Ghiaccio .....  $917 \text{ kg m}^{-3}$
- Acqua distillata .....  $1000 \text{ kg m}^{-3}$

#### Temperatura di punto triplo ( $T_3$ )

- Acqua .....  $273.16 \text{ K} / 0.01^\circ \text{C}$
- Ossigeno .....  $54.36 \text{ K} / -218.79^\circ \text{C}$
- Idrogeno .....  $13.80 \text{ K} / -259.35^\circ \text{C}$
- Mercurio .....  $234.32 \text{ K} / -38.83^\circ \text{C}$

#### Punto di solidificazione / fusione

- Alluminio .....  $933.47 \text{ K} / 660.32^\circ \text{C}$
- Oro .....  $1337.33 \text{ K} / 1064.18^\circ \text{C}$
- Rame .....  $1357.77 \text{ K} / 1084.62^\circ \text{C}$

### Calori latenti per acqua

- Fusione .....  $333 \text{ J g}^{-1}$
- Vaporizzazione .....  $2272 \text{ J g}^{-1}$

### Calore specifico (per unità di massa)

- Ghiaccio .....  $2.05 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- Acqua .....  $4.18 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- Vapore .....  $2.08 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- Alluminio .....  $0.88 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$

### Coefficiente di dilatazione lineare ( $\alpha_L$ )

- Acciaio .....  $1.2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
- Alluminio .....  $2.4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
- Platino .....  $9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

### Coefficiente di dilatazione volumetrico ( $\alpha$ )

- Ghiaccio .....  $1.5 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$
- Aria .....  $3.4 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$
- Vetro .....  $-3 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
- Mercurio .....  $1.8 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$

### Coefficiente di comprimibilità isoterma ( $k$ )

- Acqua .....  $2.2 \text{ GPa}$
- Aria .....  $10^5 \text{ Pa}$
- Acciaio .....  $160 \text{ GPa}$
- Diamante .....  $400 \text{ GPa}$

### Costanti di Van der Waals

- Anidride carbonica .....  $a = 364 \text{ L}^2 \text{ kPa mol}^{-2}$  /  $b = 0.043 \text{ L mol}^{-1}$
- Ossigeno .....  $a = 138 \text{ L}^2 \text{ kPa mol}^{-2}$  /  $b = 0.032 \text{ L mol}^{-1}$
- Vapore acqueo .....  $a = 553 \text{ L}^2 \text{ kPa mol}^{-2}$  /  $b = 0.030 \text{ L mol}^{-1}$
- Etanolo .....  $a = 1218 \text{ L}^2 \text{ kPa mol}^{-2}$  /  $b = 0.084 \text{ L mol}^{-1}$
- Azoto ( $N_2$ ) .....  $a = 141 \text{ L}^2 \text{ kPa mol}^{-2}$  /  $b = 0.039 \text{ L mol}^{-1}$

### Diametro molecolare

- Ossigeno, azoto ( $O_2$ ,  $N_2$ ) .....  $1.7 \text{ \AA}$

### Massa molecolare

- Aria .....  $28.8 \text{ uma}$

### Energie molecolari per l'acqua

- Legame a idrogeno ..... 0.2 eV
- Energia cinetica media ..... 0.04 eV
- Minimo potenziale LJ ..... 0.03 eV

### Velocità medie molecolari a 300 K come $\sqrt{\langle v^2 \rangle}$

- Idrogeno ( $H_2$ ) ..... 1934 m s<sup>-1</sup>
- Azoto ( $N_2$ ) ..... 493 m s<sup>-1</sup>

### Libero cammino medio a 300 K e 1 atm

- Ossigeno, azoto ( $O_2, N_2$ ) ..... 320 nm

### Conducibilità termica

- Argento, Rame ..... 400 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>
- Ghiaccio ..... 2 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>
- Vetro ..... 1 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>
- Aria ..... 0.02 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>

### Irraggiamento solare

- Costante solare (in cima all'atmosfera)  $k_s$  ..... 1350 W m<sup>-2</sup>
- Costante solare (al suolo)  $k'_s$  ..... 1000 W m<sup>-2</sup>
- $\lambda_{max}$  spettro solare ..... 510 nm
- Albedo medio (frazione luce riflessa) terrestre  $a$  ..... 0.30

### Bilancio termico corpo umano

- Superficie media ..... 1.5 m<sup>2</sup>
- Coefficiente di trasferimento termico ( $h = h_{conv} + h_{rad}$ ) ..... 6.5 W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>
- Valore ottimale temperatura esterna ..... 26 °C

### Dulong Petit

- Costante di proporzionalità  $A$  per  $C(T) = AT^3$  nel limite  $T \rightarrow 0$  .....  $1.25 \times 10^{-3}$  J kg<sup>-1</sup> K<sup>-4</sup>

### Respirazione cellulare

- $\Delta g$  molare ..... -2840 kJ mol<sup>-1</sup>

### Volumi molari per acqua a 300 K e 1 atm

- Gassoso ( $v_G$ ) .....  $2.5 \times 10^4$  cm<sup>3</sup>
- Liquido ( $v_L$ ) ..... 18 cm<sup>3</sup>