

# 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	2
4	Primo principio	3
5	Trasmissione del calore	6
6	II Principio	7
7	Entropia	7
8	Costanti fisiche e proprietà termodinamiche	8
8.1	Costanti . . . . .	8

## 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  $\alpha$ , 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  $\beta$

$$\Delta V \approx V \cdot (1 + \alpha \Delta T)$$

Per  $\Delta T \rightarrow 0$   $\beta \approx 3\alpha_l$

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

**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**  $\alpha = \frac{1}{\theta} \quad k = p$

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

## 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)**  $\rho(v; m, \theta) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m}{2k_B\theta}\right)^{\frac{3}{2}} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2k_B\theta}}$

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

**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 particelle

## 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  $L = -\frac{V}{k}p_f(p_f - p_i)$

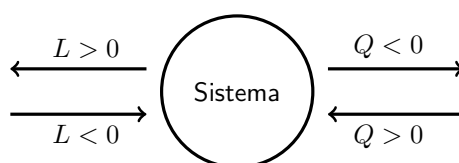
**Bolla di sapone** differenza di pressione int-est  $\Delta p = \frac{4\tau}{r}$

### 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**  $c_m = \frac{C}{m} = \frac{1}{m} \frac{\delta Q}{d\theta}$   $[c_m] = \text{JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$

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

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

**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  $\theta \gg \theta_D$   $c \approx 3R$  cost  
per  $\theta \ll \theta_D$   $c \propto \left( \frac{\theta}{\theta_D} \right)^3$

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

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

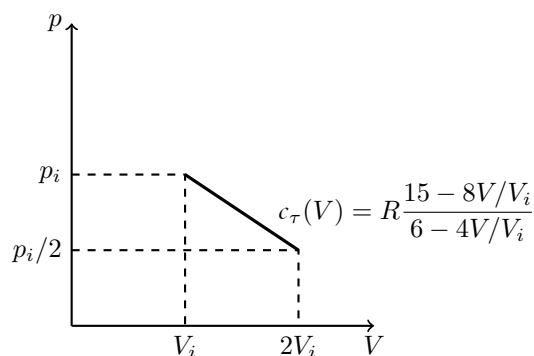
**Calorimetro di Bunsen**  $c_m = \frac{\lambda_f}{m_c \Delta\theta} \frac{\Delta V}{\Delta V_{LS}} = \frac{\lambda_f m_G}{m_c \Delta\theta}$  ove  $\Delta V_{LS}$  è la variazione di vol. per unità di massa sciolta

**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  $m_{H_2O} = m_{H_2O}^0 + m_{H_2O}^{(eq)}$

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

**Energia interna GP**  $dU = n c_V d\theta$  da cui assunto calore molare costante  $U(\theta) = n c_V \theta + \text{cost}$



**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**  $f = 3$  trasl + 2 rot (terzo asse principale d'inerzia trasc) + 2 vib (attivi solo sopra elevata soglia quantica)

**Poliatomici**  $f = 3$  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  $c_V^{ANG} = 3R(N-1) \left| c_V^{LIN} = \frac{6N-5}{2}R \right.$

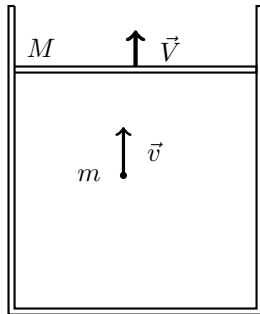
**Relazione di Meyer (per GP)**  $c_p = c_V + R$

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

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

**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

**Storia termica dell'universo**

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

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

**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  $\gamma = \frac{v^2 \rho}{p}$

## 5 Trasmissione del calore

### Conduzione: Legge di Fourier

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

ove l'ultimo termine indica il gradiente termico,  $[k] = \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  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**  $\frac{\delta Q}{dt} = 4\pi k \left( \frac{r_2 r_1}{r_1 - r_2} \right) (\theta_1 - \theta_2)$

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

### 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:

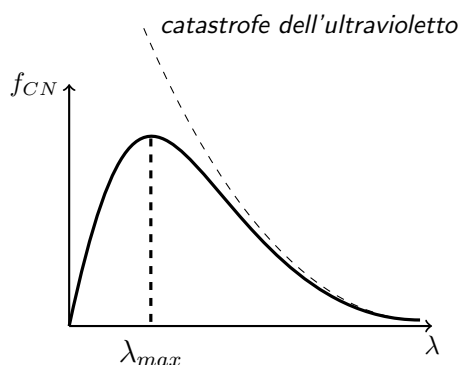
**Legge di Kirchhoff** emittanza  $\epsilon(\lambda) = \int a(\lambda)$  sull'angolo solido (tutta riemessa)

**Radiazione elettromagnetica**  $\lambda \nu = c \quad \left| \quad E = h\nu \right.$  con  $h$  cost di Planck

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

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

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



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

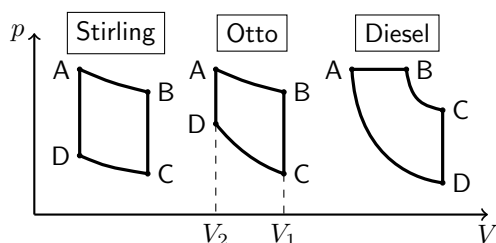
**Emittanza** monocromatica:  $\epsilon^{(\lambda)} = \frac{f(\lambda)}{f_{CN}(\lambda)}$  (tra corpo in esame e CN). Parametro della legge si ottiene secondo:

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

## 6 II Principio

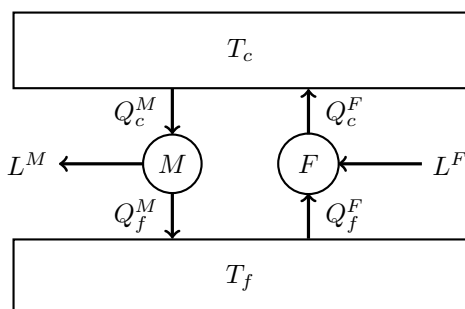
**Kelvin-Planck** per cicli monotermini  $Q = L \leq 0$

**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 scambiati ed assorbiti coi 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)**  $\epsilon(\omega) = \frac{Q_f}{|L|} = \frac{|Q_f|}{|Q_c| - |Q_f|}$

**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.

## 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**  $S: \Delta S_{AB} = S(B) - S(A) = \int_R \frac{\delta Q}{T} \forall R$  trasf rev. tra i due stati:  $\Delta S$  per irrev. si calcola da rev. tra medesimi stati.  $dS = \frac{\delta Q_R}{T}$   
Estensiva e additiva

**Processi irreversibili**  $\int_I \frac{\delta Q}{T} < \int_R \frac{\delta Q}{T} = \Delta S \Leftrightarrow \frac{\delta Q}{T} \leq dS$

**Sistemi isolati: Principio di aumento dell'entropia**  $\delta Q = 0 \Rightarrow \Delta S \geq 0$   
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**  $\Delta S_U = C_1 \ln \frac{T_e}{T_1} + C_2 \ln \frac{T_e}{T_2}$   
 Se  $C_1 = C_2$   $\Delta S_U = C \ln \left( 1 + \frac{(T_1 - T_2)^2}{4T_1 T_2} \right)$ . Per  $T_1 - T_2 = dT$   $\Delta S_U \approx 0$  (q.s. = rev!)  
 Se  $C_1 \gg C_2$ , ovvero  $r \equiv \frac{C_2}{C_1} \rightarrow 0$  si ha  $T_e \rightarrow T_1$  e:

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

## 8 Costanti fisiche e proprietà termodinamiche

### 8.1 Costanti

**Costante di Boltzmann**  $k_B \equiv \frac{R}{N_A} \approx 1.380649 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

**Costante di Planck**  $h \approx 6.67 \times 10^{-34} \text{ Js}$

**Costante di Stefan-Boltzmann**  $\sigma \approx 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

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