Fisica CdL in Viticoltura ed Enologia — Appello 06/02/2019

Problema 1: Un punto materiale P di massa $m = 441\,\mathrm{g}$ cade da un piano inclinato di altezza h=90 cm e angolo $\alpha = 51\,°$.

i) Calcolare la velocità di P in fondo al piano inclinato se questo è liscio. (1 pt)

ii) Se il piano inclinato è ruvido con coefficiente di attrito pari a μ=0.526, calcolare in quanto tempo P raggiunge la base del piano. (1.5 pt)

iii) Nelle stesse condizioni del punto (ii), calcolare il lavoro (con segno) dissipato dalla forza di attrito. (2 pt)

iv) Nelle stesse condizioni del punto (ii), calcolare l'enercia cinetica finale di P se questo è anche spinto da un motore che fa lungo il piano inclinato un lavoro complessivo pari a L_{mot} =2.29 J. (1.5 pt)

v) Rifare il quesito (iv) se il motore ha un'efficienza η=88%. (0.5 pt)

Soluzione:

i) Si tratta di un moto uniformemente accelerato con accelerazione $a = g \sin\alpha$, quindi $v = \sqrt{2aD} = 4.2$ m/s, dove $D = h/\sin\alpha$ è la lunghezza del piano inclinato. Notare che viene uguale alla velocità di un punto materiale che cade da un'altezza h in caduta libera.

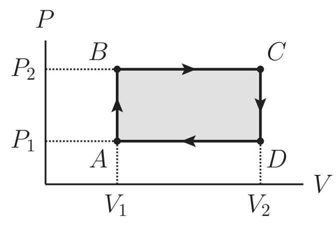
ii) Si tratta di un moto uniformemente accelerato con accelerazione $a = g(\sin\alpha - \mu\cos\alpha)$, quindi $t = \sqrt{2D/a} = 0.73$ s, dove $D = h/\sin\alpha$ è la lunghezza del piano inclinato e si è sfruttata la relazione cinematica $D = 1/2at^2$.

iii) Il lavoro della forza di attrito è $L_a = -F_a D = -1.66$ J, dove $F_a = \mu mg\cos\alpha$ e $D = h/\sin\alpha$ è la lunghezza del piano inclinato.

iv) Usando il teorema dell'energia cinetica o delle forze vive, l'energia cinetica finale è pari a $E_{c,f} = mgh + L_{mot} + L_a = 4.52$ J.

v) Come in iv) ma inserendo l'efficienza η=88% nell'espressione del lavoro motore, si ha $E_{c,f} = mgh + \eta L_{mot} + L_a = 4.25$ J.

Problema 2: Una mole di gas perfetto compie il ciclo termodinamico reversibile mostrato nel diagramma PV a lato. Il volume del gas e la sua pressione nel punto A sono $V_1 = 40\,\mathrm{L}$ e $P_1 = 10\,\mathrm{kPa}$. Il volume massimo raggiunto dal gas nel ciclo è $V_2 = 4V_1$, mentre la pressione massima è $P_2 = 2P_1$.



i) Calcolare le temperature massima e minima che il gas raggiunge durante il ciclo e i punti in cui queste sono raggiunte. (1.5 pt)

ii) Calcolare il lavoro fatto <u>dal</u> gas durante un ciclo. (1.5 pt)

iii) Il calore specifico per una mole di gas in una trasformazione a volume costante è $C_V = 3R/2$, mentre per un'espansione a pressione costante è $C_P = 5R/2$, dove R è la costante universale dei gas. Calcolare il calore assorbito dal gas durante un ciclo. (Si noti che il gas assorbe calore solo durante le trasformazioni in cui la sua temperatura <u>aumenta</u>.) (2 pt)

iv) Calcolare l'efficienza del ciclo. (1 pt)

v) Confrontare l'efficienza del ciclo con quella di una macchina di Carnot che operi tra due sorgenti di calore la cui temperatura sia pari a quella massima e minima raggiunte dal gas nel ciclo. (0.5 pt)

Soluzione:

i) Prima di tutto notiamo che la pressione e il volume del gas nei punti estremi del ciclo sono date da

$$P_A = P_D = P_1 = 10 \times 10^3\,\mathrm{Pa}\,, \quad P_B = P_C = P_2 = 2P_1 = 20 \times 10^3\,\mathrm{Pa}\,,$$
$$V_A = V_B = V_1 = 40 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}^3\,, \quad V_C = V_D = V_2 = 4V_1 = 160 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}^3\,.$$

Usando l'equazione di stato dei gas perfetti $PV = nRT$ troviamo che le termperature nei punti A, B, C e D sono

$$\begin{aligned}
T_A &= \frac{P_A V_A}{nR} = \frac{(10 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}^3)(40 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}^3)}{(1\,\mathrm{mol})(8.314\,\mathrm{J/mol \cdot K})} = 48.11\,\mathrm{K}\,,\\
T_B &= \frac{P_B V_B}{nR} = \frac{(20 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}^3)(40 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}^3)}{(1\,\mathrm{mol})(8.314\,\mathrm{J/mol \cdot K})} = 96.22\,\mathrm{K}\,,\\
T_C &= \frac{P_C V_C}{nR} = \frac{(20 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}^3)(160 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}^3)}{(1\,\mathrm{mol})(8.314\,\mathrm{J/mol \cdot K})} = 384.9\,\mathrm{K}\,,\\
T_D &= \frac{P_D V_D}{nR} = \frac{(10 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}^3)(160 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}^3)}{(1\,\mathrm{mol})(8.314\,\mathrm{J/mol \cdot K})} = 192.4\,\mathrm{K}\,.
\end{aligned}$$

La temperatura minima è quindi raggiunta nel punto A, mentre la massima è raggiunta nel punto C.

ii) Il gas compie un lavoro solamente durante le trasformazioni isobare ($B \to C$ e $D \to A$), mentre non compie lavoro durante le isocore (essendo il volume costante). Abbiamo quindi

$$\begin{aligned}
W_{AB} &= W_{CD} = 0\,\mathrm{J}\,,\\
W_{BC} &= P_2(V_2 - V_1) = (20 \times 10^3\,\mathrm{Pa})(160 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}^3 - 40 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}^3) = 2400\,\mathrm{J}\,,\\
W_{DA} &= P_1(V_1 - V_2) = (10 \times 10^3\,\mathrm{Pa})(40 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}^3 - 160 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}^3) = -1200\,\mathrm{J}\,.
\end{aligned}$$

Il lavoro totale compiuto dal gas in un ciclo è quindi

$$W = W_{AB} + W_{BC} + W_{CD} + W_{DA} = 0\,\mathrm{J} + 2400\,\mathrm{J} + 0\,\mathrm{J} - 1200\,\mathrm{J} = 1200\,\mathrm{J}\,.$$

Alternativamente si può determinare il lavoro calcolando l'area racchiusa nel ciclo:

$$W = (P_2 - P_1)(V_2 - V_1) = (20 \times 10^3\,\mathrm{Pa} - 10 \times 10^3\,\mathrm{Pa})(160 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}^3 - 40 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}^3) = 1200\,\mathrm{J}\,.$$

Poiché il ciclo è percorso in verso orario il lavoro fatto dal gas è positivo.

iii) Il gas assorbe calore durante le trasformazioni $A \to B$ (isocora) e $B \to C$ (isobara), mentre lo cede nelle trasformazioni $C \to D$ (isocora) e $D \to A$ (isobara). Il calore assorbito o ceduto è dato da

$$\begin{aligned}
Q_{AB} = nC_V(T_B - T_A) &= \frac{3}{2}(8.314\,J/\mathrm{mol \cdot K})(1\,\mathrm{mol})(96.22\,\mathrm{K} - 48.11\,\mathrm{K}) = 600\,\mathrm{J}\,,\\
Q_{BC} = nC_P(T_C - T_B) &= \frac{5}{2}(8.314\,J/\mathrm{mol \cdot K})(1\,\mathrm{mol})(384.9\,\mathrm{K} - 96.22\,\mathrm{K}) = 6000\,\mathrm{J}\,,\\
Q_{CD} = nC_V(T_B - T_A) &= \frac{3}{2}(8.314\,J/\mathrm{mol \cdot K})(1\,\mathrm{mol})(192.4\,\mathrm{K} - 384.9\,\mathrm{K}) = -2400\,\mathrm{J}\,,\\
Q_{DA} = nC_P(T_B - T_A) &= \frac{5}{2}(8.314\,J/\mathrm{mol \cdot K})(1\,\mathrm{mol})(48.11\,\mathrm{K} - 192.4\,\mathrm{K}) = -3000\,\mathrm{J}\,.
\end{aligned}$$

Il calore assorbito in un ciclo è quindi

$$Q_{ass} = Q_{AB} + Q_{BC} = 600\,\mathrm{J} + 6000\,\mathrm{J} = 6600\,\mathrm{J}\,.$$

Il calore ceduto è

$$Q_{ced} = Q_{CD} + Q_{DA} = -2400\,\mathrm{J} - 3000\,\mathrm{J} = -5400\,\mathrm{J}\,.$$

Si noti che $W = Q_{ass} - Q_{ced}$, in accordo con il primo principio della termodinamica.

In alternativa si può calcorare il calore scambiato nel modo seguente

$$\begin{aligned}
Q_{AB} &= nC_V(T_B - T_A) = \frac{3}{2}Rn(T_B - T_A) = \frac{3}{2}(P_B V_B - P_A V_A) = \frac{3}{2}V_1(P_2 - P_1)\\
&= \frac{3}{2}(40 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}^3)(20 \times 10^3\,\mathrm{Pa} - 10 \times 10^3\,\mathrm{Pa}) = 600\,\mathrm{J}\,,\\
Q_{BC} &= nC_P(T_C - T_B) = \frac{5}{2}Rn(T_B - T_A) = \frac{5}{2}(P_C V_C - P_B V_B) = \frac{5}{2}P_2(V_2 - V_1)\\
&= \frac{5}{2}(20 \times 10^3\,\mathrm{Pa})(160 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}^3 - 40 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}^3) = 6000\,\mathrm{J}\,,
\end{aligned}$$

e analogamente per Q_{CD} e Q_{DA}.

iv) L'efficienza del ciclo è data da

$$e = \frac{W}{Q_{ass}} = \frac{1200\,\mathrm{J}}{6600\,\mathrm{J}} = 0.1818 = 18.18\%\,.$$

v) L'efficienza di una macchina di Carnot che operi tra le temperature T_C e T_A è data da

$$e_C = 1 - \frac{T_A}{T_C} = 1 - \frac{48.11\,\mathrm{K}}{384.9\,\mathrm{K}} = 0.875 = 87.5\%\,.$$

In alternativa si può usare il fatto che

$$T_A = \frac{P_A V_A}{nR} \qquad \mathrm{e} \qquad \mathrm{T_C} = \frac{\mathrm{P_C V_C}}{\mathrm{nR}} \tag{1}$$

per riscrivere

$$\frac{T_A}{T_C} = \frac{P_A V_A}{P_C V_C} = \frac{P_1}{P_2}\frac{V_1}{V_2}\,,$$

da cui

$$e_C = 1 - \frac{P_1}{P_2}\frac{V_1}{V_2} = 1 - \frac{1}{2}\frac{1}{4} = 1 - \frac{1}{8} = 0.875\,.$$

Da questi risultati si vede che $e_C > e$, cioè l'efficienza della macchina di Carnot è maggiore di quella del ciclo conciderato nell'esercizio.

Domande a risposta multipla (risposta corretta 1.5 pt, nessuna risposta 0 pt, risposta errata -0.5 pt)

1. Un'auto di massa $m = 1777\,\mathrm{kg}$ si muove di moto rettilineo uniforme con velocità v=42 km/h. In quanto tempo (in secondi) percorre una distanza s=714 m?

   a) 8330 s b) 61.2 s c) 17 s d) 29.04 s

   Soluzione: La risposta corretta è la b), in quanto t=s/v=61.2 s.

2. Quale delle seguenti affermazioni collegate ai tre principi della dinamica non è corretta?

   a) Un punto materiale non soggetto a forze si muove di moto rettilineo uniforme o resta in quiete.
   b) Un punto materiale soggetto a forze acquisisce un'accelerazione inversamente proporzionale alla sua massa.
   c) Le forze di azione e reazione tra due punti materiali sono uguali in modulo e direzione, ma hanno verso opposto e sono applicate sulla stessa retta di azione.
   d) Un punto materiale soggetto a forze acquisisce un'accelerazione inversamente proporzionale alla forza applicata.

   Soluzione: La risposta corretta è la d), in quanto l'accelerazione prodotta è direttamente proporzionale alla forza applicata.

3. Un'auto A si muove su una strada rettilinea a velocità v_A=80 km/h, mentre sull'altra carreggiata un auto B si muove in direzione opposta alla velocità v_B=79 km/h. Calcolare la velocità relativa di A rispetto a B (senza segno).

   a) 79 km/h b) 1 km/h c) 159 km/h d) 80 km/h

   Soluzione: La risposta corretta è la c), in quanto la velocità relativa è data da $v_A + v_B$, cioè 159 km/h.

4. Un motore di un auto eroga una potenza massima pari a P=87 kW. Partendo da ferma, qual è il tempo minimo (in secondi) affinchè l'auto di massa $m = 2038\,\mathrm{kg}$ raggiunga la velocità di v=110 km/h?

   a) 0.09145 s b) 10.94 s c) 5.468 s d) 141.7 s

   Soluzione: La risposta corretta è la b). Per il teorema dell'energia cinetica il lavoro necessario per raggiungere la velocità di v = 110 km/h, partendo l'auto da ferma, è dato da $L = 1/2mv^2$, quindi il tempo minimo richiesto è $t = L/P = (1/2mv^2)/P = 10.94$ s.

5. Una ruota di un escavatore, descrivibile come un disco omogeneo di massa $m = 19\,\mathrm{kg}$ e raggio r=65 cm, ruota rispetto al suo asse facendo 295 giri al minuto. Se improvvisamente si dimezza il raggio della ruota mantenendo la stessa massa, qual è la nuova velocità angolare in rad/s?

   a) 19.67 rad/s b) 61.75 rad/s c) 7410 rad/s d) 123.5 rad/s

   <u>Soluzione:</u> La risposta corretta è la d). Per la conservazione del momento angolare la quantità $I\omega$ è costante, dove $I = 1/2mr^2$ è il momento di inerzia di un disco omogeneo rispetto ad un asse perpendicolare passante per il suo centro, mentre ω è la velocità angolare. Quindi $\omega_f = I_i\omega_i/I_f = 4\omega_i = 123.5$ rad/s, dato che $\omega_i = 2 \times 295\pi/60 = 30.88$ rad/s e $I_f = I_i/4$.

6. Una carriola è schematizzabile come una leva di secondo genere con i due bracci pari rispettivamente a $b1$=60 cm e $b2$=120 cm. Se si vuole sollevare un carico di 72 kg (resistenza), qual è il valore minimo della forza da applicare (misurata nel S.I.)?

   a) 36 kgf b) 0.002834 N c) 1411 N d) 352.8 N

   <u>Soluzione:</u> La risposta corretta è la d). Per l'equilibrio di un leva di secondo genere si ha $F = Rb_r/b_f = 352.8$ N, dove F ed R sono rispettivamente la forza e la resistenza mentre b_f e b_r sono i relativi bracci. Notare che $R = mg = 705.6$ N, $b_f = b2$, $b_r = b1$. La risposta a) è sbagliata in quanto il risultato non è nelle unità del S.I.

7. Un corpo di massa $m = 1.5\,\mathrm{kg}$ e densità $\rho = 500\,\mathrm{kg/m^3}$ galleggia in un recipiente pieno di olio ($\rho_{olio} = 920\,\mathrm{kg/m^3}$). Quale percentuale del volume del corpo emerge dal liquido?

   a) 72.83% b) 45.65% c) 54.35% d) 50%

   <u>Soluzione:</u> La risposta corretta è la b). Indichiamo con V il volume del corpo, con V_I il volume immerso nel liquido e con $V_E = V - V_I$ il volume emerso. In condizioni di galleggiamento, il peso del corpo $F_p = V\rho\, g$, è bilanciato dalla spinta di Archimede

$$F_A = V_I \rho_{olio}\, g\,.$$

   Quindi otteniamo

$$V\rho\, g = V_I \rho_{olio}\, g \qquad \Rightarrow \qquad \frac{V_I}{V} = \frac{\rho}{\rho_{olio}}\,. \tag{2}$$

   Da questa equazione ricaviamo

$$\frac{V_E}{V} = \frac{V - V_I}{V} = 1 - \frac{V_I}{V} = 1 - \frac{\rho}{\rho_{olio}} = 1 - \frac{500\,\mathrm{kg/m^3}}{920\,\mathrm{kg/m^3}} = 0.4565 = 45.65\%\,.$$

   Come si può notare la conoscenza della massa del corpo non è necessaria per risolvere l'esercizio. Tuttavia essa può essere utilizzata per calcolare numericamente i passaggi intermedi della soluzione. Infatti possiamo utilizzare la formula $m = V\rho$ per determinare il volume del corpo V e successivamente ricavare il valore numerico di V_I utilizzando il risultato in eq. (2).

8. Un sistema consiste in $m = 10\,\mathrm{g}$ di ghiaccio alla temperatura di $T_0 = 0°\mathrm{C}$. Dopo un certo intervallo di tempo il ghiaccio si è completamente trasformato in acqua alla temperatura di $T_1 = 50°\mathrm{C}$. Quanto calore è stato assorbito dal sistema in questa trasformazione? (Trascurare la variazione di volume tra ghiaccio ed acqua.)

   a) 24690 J b) 3330 J c) 5423 J d) 2093 J

   <u>Soluzione:</u> La risposta corretta è la c). La trasformazione termodinamica consiste in due stadi successivi. Il primo è la transizione di fase da ghiaccio ad acqua liquida, che avviene a temperatura costante $T_0 = 0°\mathrm{C}$ e richiede un apporto di calore

$$Q_1 = mL_f = (10 \times 10^{-3}\,\mathrm{kg})(3.33 \times 10^5\,\mathrm{J/kg}) = 3330\,\mathrm{J}$$

   dove $L_f = 3.33 \times 10^5\,\mathrm{J/kg}$ è il calore latente di fusione del ghiaccio. Il secondo stadio è il riscaldamento dell'acqua liquida dalla temperatura T_0 alla temperatura T_1. Questa trasformazione richiede una quantità di calore

$$Q_2 = mc(T_1 - T_0) = (10 \times 10^{-3}\,\mathrm{kg})(4186\,\mathrm{J/kg°C})(50°\mathrm{C} - 0°\mathrm{C}) = 2093\,\mathrm{J}\,,$$

   dove $c = 4186\,\mathrm{J/kg°C}$ è il calore specifico dell'acqua. Il calore totale assorbito dal sistema è quindi

$$Q = Q_1 + Q_2 = 3330\,J + 2093\,J = 5423\,J\,.$$

9. Un recipiente contenente $V_{olio} = 2 \times 10^3\,\mathrm{L}$ di olio è caricato su un carrello di massa $m_c = 500\,\mathrm{kg}$. Se il carrello poggia su 4 ruote e la superficie di contatto di ogni ruota col terreno è $A = 200\,\mathrm{cm}^2$ quale è la pressione esercitata sul suolo? (Si trascuri il peso del recipiente e si usi il valore $\rho_{olio} = 920\,\mathrm{kg/m}^3$ per la densità dell'olio.)

   a) $29250\,\mathrm{Pa}$ b) $286600\,\mathrm{Pa}$ c) $225400\,\mathrm{Pa}$ d) $1.147 \times 10^6\,\mathrm{Pa}$

   Soluzione: La risposta corretta è la b). La pressione esercitata sul suolo è data da

$$P = \frac{m_{tot} g}{A_{tot}}\,,$$

   dove m_{tot} è la massa totale (comprendente l'olio e il carrello) e A_{tot} è la superficie totale di contatto con il suolo. Usando il fatto che

$$m_{tot} = m_{olio} + m_c = V_{olio}\rho_{olio} + m_c\,,$$

   e $A_{tot} = 4A$, otteniamo la pressione

$$P = \frac{V_{olio}\rho_{olio} + m_c}{4A} = \frac{(2\,\mathrm{m}^3)(920\,\mathrm{kg/m}^3) + 500\,\mathrm{kg}}{4\,(200 \times 10^{-4}\,\mathrm{m}^2)} = 286600\,\mathrm{Pa}$$

10. Quale delle seguenti affermazioni collegate al secondo principio della termodinamica non è corretta?

   a) Il coefficiente di prestazione (COP) di una pompa di calore è minore di 1.
   b) Non può esistere una sorgente di calore a $T = 0\,\mathrm{K}$.
   c) Il rendimento di una macchina termica operante tra due sorgenti di calore è minore o uguale a quello di una macchina di Carnot che operi tra le stesse sorgenti.
   d) Non è possibile convertire integralmente il calore in lavoro meccanico.

   Soluzione: Le affermazioni b), c) e d) sono corrette e sono tutte equivalenti al secondo principio della termodinamica. L'affermazione a) è errata, infatti il coefficiente di prestazione di una pompa di calore è definito come

$$COP_P = \frac{Q_H}{W} = 1 + \frac{Q_C}{W}\,,$$

   dove Q_H è il calore ceduto alla sorgente calda, Q_C il calore assorbito dalla sorgente fredda e W il lavoro utilizzato dalla pompa per ottenere il trasferimento di calore. Le due espressioni nella precedente equazione sono equivalenti come conseguenza del primo principio della termodinamica $Q_H = Q_C + W$. Poiché si ha sempre che $Q_C/W \geq 0$, segue che $COP_P \geq 1$.

11. Una macchina di Carnot che lavora tra le temperature $T_1 = -30°\mathrm{C}$ e $T_2 = 50°\mathrm{C}$ ha efficienza

   a) $e = 0.4$ b) $e = 1.6$ c) $e = 0.2476$ d) $e = 0.7524$

   Soluzione: La soluzione corretta è la c). L'efficienza di una macchina di Carnot che operi tra una sorgente calda a temperatuta T_H e una sorgente fredda a temperatura T_C è data da

$$e = 1 - \frac{T_C}{T_H}\,.$$

   Bisogna notare che le temperature nella formula precedente devono essere espresse in kelvin. Il risultato numerico dell'esercizio corrisponde quindi a

$$e = 1 - \frac{(-30 + 273.15)K}{(50 + 273.15)K} = 0.2476\,.$$

12. Tre resistori con resistenza $r_1 = 10\,\Omega$, $r_2 = 5\,\Omega$ e $r_3 = 15\,\Omega$ sono collegati in parallelo. Quanto vale la resistenza equivalente?

   a) $2.727\,\Omega$ b) $0.3667\,\Omega$ c) $0.03333\,\Omega$ d) $30\,\Omega$

   Soluzione: La soluzione corretta è la a). La resistenza equivalente R di resistenze in parallelo si ottiene applicando la formula

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}\,, \qquad \text{ovvero} \qquad \mathrm{R} = \frac{1}{\frac{1}{\mathrm{r}_1} + \frac{1}{\mathrm{r}_2} + \frac{1}{\mathrm{r}_3}} = \frac{1}{\frac{1}{10\,\Omega} + \frac{1}{5\,\Omega} + \frac{1}{15\,\Omega}} = 2.727\,\Omega\,.$$

Costanti fisiche

densità	
acqua	$\rho = 1000\,\mathrm{kg/m^3}$
olio	$\rho = 920\,\mathrm{kg/m^3}$
calori specifici	
acqua	$4186\,\mathrm{J/kg\cdot{}^\circ C}$
ghiaccio	$2090\,\mathrm{J/kg\cdot{}^\circ C}$
vapore	$2010\,\mathrm{J/kg\cdot{}^\circ C}$
calori latenti	
fusione ghiaccio	$3.33 \times 10^5\ \mathrm{J/kg}$
vaporizzazione acqua	$2.26 \times 10^6\ \mathrm{J/kg}$
costanti termodinamiche	
costante universale dei gas	$R = 8.314\,\mathrm{J/mol\cdot K}$
costante di Boltzmann	$k_B = 1.38 \times 10^{-23}\,\mathrm{J/K}$
numero di Avogadro	$N_A = 6.022 \times 10^{23}/\mathrm{mol}$
equiv. meccanico del calore	$1\,\mathrm{cal} = 4.186\,\mathrm{J}$
zero assoluto	$-273.15^\circ\mathrm{C}$
costanti elettromagnetiche	
costante di Coulomb	$k_e = 8.988 \times 10^9\,\mathrm{N\cdot m^2/C^2}$
carica del protone	$e = 1.602 \times 10^{-19}\,\mathrm{C}$