Fisica Generale I
A.A. 2014-2015, 13 gennaio 2015

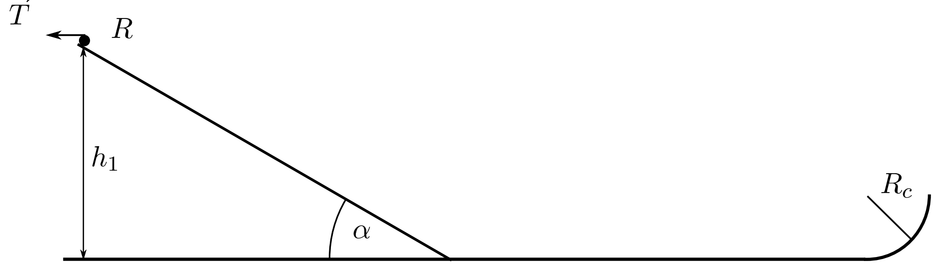
Esercizi di meccanica relativi al primo modulo del corso

Esercizio I.1
Una sfera, di massa $m = 3$ kg e raggio $R = 5$ cm, è mantenuta in equilibrio su un piano inclinato scabro mediante un nastro adesivo teso orizzontalmente e attaccato alla parte superiore della sfera. Il piano forma con l'orizzontale un angolo $\alpha = 30°$ e l'attrito statico è tale da tenere la sfera in quiete.
a) Determinare modulo e direzione della tensione $\vec{T}$ esercitata dal nastro, e della forza di attrito $\vec{F}_a$ e della reazione vincolare $\vec{N}$ esercitate dal piano di appoggio. Si determini inoltre il minimo valore del coefficiente di attrito statico μ_s necessario a mantenere la sfera in equilibrio.

La quota iniziale del centro di massa della sfera sia $h_1 = 7$ m (si noti che $h_1 \gg R$). Ad un certo istante il nastro adesivo si stacca dalla sfera e questa inizia a rotolare (rotolamento puro) lungo tutto il piano inclinato fino a raggiungere il tratto orizzontale.
b) Determinare l'energia cinetica E_{k1}, la velocità del centro di massa $\vec{v}_1$, il momento angolare $\vec{L}_1$ della sfera quando questa si trova sul piano orizzontale.

Alla fine del piano orizzontale è presente una rampa che descrive un quarto di circonferenza ($R_c = 1$ m) e termina rivolta verso l'alto. La sfera percorre di rotolamento puro anche questo tratto e poi è libera di muoversi sotto il solo effetto della gravità.
c) Si determini la quota massima raggiunta dal centro di massa della sfera h_2, il momento angolare $\vec{L}_2$ e l'energia cinetica E_{k2} della sfera in tale istante. Si trascuri l'attrito con l'aria.

d) Prima della rampa la sfera si muove in direzione orizzontale, successivamente si trova a muoversi in direzione verticale. In definitiva l'interazione con la rampa può essere considerata come un urto; si determini l'impulso esercitato dalla rampa sulla sfera nella direzione orizzontale.



Esercizio I.2

Un corpo come quello raffigurato in basso a sinistra è formato da un'asta cilindrica di raggio $R_0 = 5$ cm e altezza $h_0 = 28$ cm e da un disco di raggio $R_1 = 10$ cm e altezza $h_1 = 2$ cm, rigidamente connessi e coassiali. L'oggetto è fatto interamente di alluminio ($\rho_{Al} = 2700$ kg/m^3) e ruota su un piano orizzontale liscio attorno al proprio asse di simmetria con velocità angolare $\Omega_1 = 20$ rad/s.

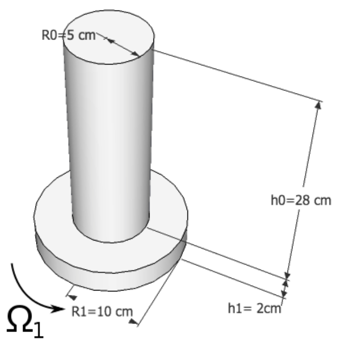
a) Determinare il momento di inerzia I_1 e il momento angolare L_1 del corpo.

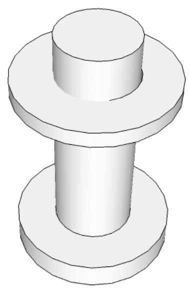
Un secondo disco di alluminio forato, di altezza h_1, raggio esterno R_1 e raggio interno R_0 viene infilato all'asta e lasciato cadere sul primo disco (figura al centro). L'attrito presente fra i due dischi fa sì che anche il disco forato inizi a ruotare. Dopo un certo intervallo di tempo tutto il sistema composto dai due dischi e dall'asta ruota solidalmente con la stessa velocità angolare Ω_2.

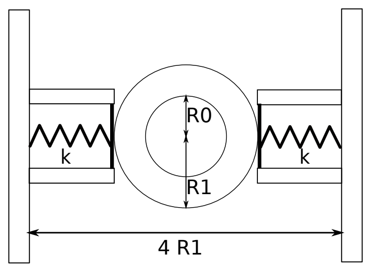
b) Determinare Ω_2 e il nuovo momento angolare L_2 del sistema complessivo.

Si supponga ora di applicare al corpo un dispositivo frenante composto da due piastre (di spessore trascurabile) spinte da molle identiche connesse a pareti fisse distanti $4R_1$, come mostrato nella figura a destra (visione dall'alto); le due piastre premono contro il disco inferiore in due punti diametralmente opposti e l'attrito dinamico presente tra esse ed il disco, con coefficiente $\mu_d = 0.4$, porta all'arresto completo del sistema rotante.

c) Se la lunghezza a riposo di ciascuna molla è pari a $2R_1$ e la costante elastica è $k = 5$ N/m, si determini il tempo Δt necessario ad arrestare completamente il sistema.







Esercizi di termodinamica relativi al secondo modulo del corso

Esercizio II.1
Un cilindro a pareti rigide è diviso in due parti A e B da un pistone adiabatico di massa trascurabile e libero di scorrere senza attrito. In ciascuna delle due parti è contenuta una mole di gas ideale monoatomico. Le pareti del cilindro sono adiabatiche salvo la base della parte A, che è perfettamente conduttrice e garantisce il contatto termico tra il gas in A e un serbatoio costituito da una miscela di acqua e ghiaccio alla temperatura costante $t_0 = 0°$C. All'inizio le temperature di A e B sono entrambe uguali a t_0 e una forza esterna applicata al pistone mantiene fissi i volumi $V_A = 1$ l e $V_B = 2$ l.
a) Calcolare il valore della forza esterna necessaria a tenere fermo il pistone, se la sua area è di 10 cm^2 (si usi $R = 8.314$ J/mol K).
Da un certo istante in poi la forza esterna viene lentamente diminuita e il pistone si sposta, fino a raggiungere una nuova posizione di equilibrio con forza esterna nulla. A seguito di tale processo, nel serbatoio si osserva la formazione di una massa aggiuntiva di ghiaccio pari a $m = 2.27$ g (calore latente $\lambda = 3.3 \times 10^5$ J/kg).
b) Determinare i volumi finali di A e B;
c) Determinare i valori finali di pressione e temperatura in A e B;
d) Determinare i lavori svolti dai gas in A e in B, e il lavoro svolto dalla forza esterna, $W_{\text{ext}} = -(W_A + W_B)$, e verificare che la trasformazione per il sistema complessivo A+B soddisfa il primo principio della termodinamica.
e) Calcolare la variazione di entropia del gas in A, del gas in B e dell'universo.

Esercizio II.2
All'interno di un recipiente rigido, con pareti adiabatiche e dotato di pistone anch'esso adiabatico, è presente una bombola di $V_A = 37$ l riempita con un gas ideale monoatomico alla pressione $P_A = 2 \times 10^5$ Pa e temperatura $t_A = 23°$C (stato A). Al di fuori della bombola, che occupa 1/5 del volume del recipiente, c'è il vuoto. Il pistone è bloccato. Ad un certo istante il tappo della bombola si rompe e il gas si espande liberamente nel recipiente portandosi ad un nuovo stato di equilibrio B. A questo punto il pistone viene sbloccato e mosso in modo da comprimere rapidamente il gas, compiendo un lavoro pari a $|W_{BC}| = 12$ kJ fino ad uno stato di equilibrio C con pressione uguale a quella iniziale, $P_C = P_A$. Infine, al recipiente viene tolta la guaina che impediva gli scambi termici con l'esterno, e il gas si trova a contatto termico con un termostato a temperatura T_A compiendo così una trasformazione isobara che lo riporta allo stato iniziale A in un tempo di 10s. Tutte le trasformazioni sono irreversibili. Determinare:
a) la variazione di entropia nella trasformazione AB;
b) la temperatura e il volume del gas nello stato C;
c) la potenza fornita dal termostato in CA;
d) la variazione di entropia dell'universo nel ciclo.

Soluzione esercizio I.1

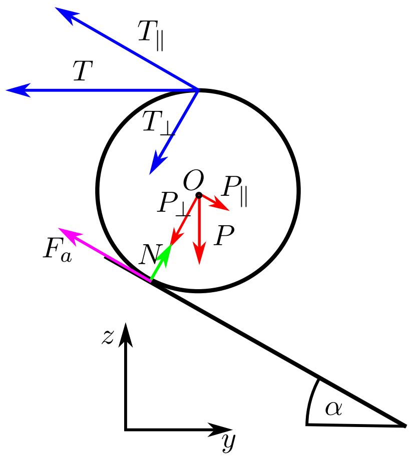


Figura 1: Schema delle forze agenti sulla sfera

a)
Affinché il corpo sia in equilibrio la somma dei momenti e quella delle forze devono essere nulle. Per comodità scomponiamo tutte le forze in direzione parallela e perpendicolare al piano. Per l'equilibrio delle forze abbiamo il seguente sistema:

$$\begin{cases} T_\parallel + P_\parallel + F_a = -T\cos\alpha + mg\sin\alpha - F_a = 0 \\ T_\perp + P_\perp + N = -T\sin\alpha - mg\cos\alpha + N = 0 \ , \end{cases}$$

dove con T ed N abbiamo indicato, rispettivamente, i moduli della tensione e della reazione vincolare. Per quanto riguarda i momenti delle forze, prendendo come polo il centro della sfera, le uniche due forze ad esercitare un momento sono la tensione del nastro adesivo e la forza di attrito. Inoltre, entrambe le forze sono perpendicolari al vettore che individua la posizione del punto di applicazione della forza rispetto al polo. Quindi la condizione di equilibrio diventa:

$$RT - RF_a = 0\,,$$

che implica $T = F_a$. In totale abbiamo un sistema di 3 equazioni in 3 incognite (T, N, F_a) da risolvere :

$$\begin{cases} -\,T\cos\alpha + mg\sin\alpha - F_a = 0 & (1) \\ -\,T\sin\alpha - mg\cos\alpha + N = 0 & (2) \\ F_a = T\,. & (3) \end{cases}$$

Sostituendo la 3 nella 1 otteniamo il modulo della tensione:

$$T = \frac{mg \sin\alpha}{1 + \cos\alpha} \simeq 7.88 \text{ N}.$$

Per calcolare la reazione vincolare sviluppiamo la 2 utilizzando il risultato appena trovato per la tensione:

$$N = mg\cos\alpha + \frac{mg\sin^2\alpha}{1+\cos\alpha} = \frac{mg(\cos\alpha + \cos^2\alpha + \sin^2\alpha)}{1+\cos\alpha} = mg \simeq 29.4 \text{ N}.$$

La forza F_a che tiene ferma la sfera non può superare il valore massimo imposto dal coefficiente di attrito statico: $F_a \leq \mu_s N$. Il valore critico corrisponde al caso in cui si ha l'uguaglianza. Ricordando che $F_a = T$, troviamo

$$\mu_s = \frac{F_a}{N} = \frac{T}{N} = \frac{\sin\alpha}{1+\cos\alpha} \simeq 0.27 \ .$$

b)

Il moto è di puro rotolamento quindi non si ha dissipazione e l'energia cinetica nel tratto orizzontale è esattamente uguale all'energia potenziale persa nella discesa lungo la rampa:

$$E_{k1} = mgh_1 \simeq 206 \text{ J},$$

dove non si è considerata la differenza tra l'altezza iniziale del centro di massa ed h_1 in quanto trascurabile.

Attenzione però che questa energia cinetica comprende sia l'energia del moto di traslazione che quella associata alla rotazione:

$$mgh_1 = \frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2}I\Omega_1^2$$

dove $I = \frac{2}{5}mR^2$ è il momento di inerzia della sfera. Ricordando la condizione di rotolamento puro $v_1 = R\Omega_1$ si può scrivere

$$mgh_1 = \frac{1}{2}m\Omega_1^2R^2 + \frac{1}{2}I\Omega_1^2 = \frac{1}{2}(mR^2 + I)\Omega_1^2,$$

Prendendo come riferimento il verso positivo dell'asse x uscente dal piano abbiamo $\vec{\Omega} = -|\Omega|\hat{\imath}$, dove il modulo della velocità angolare segue dalla formula precedente:

$$\Omega_1^2 = \frac{2mgh_1}{mR^2 + \frac{2}{5}mR^2} = \frac{10}{7}\frac{gh_1}{R^2} \rightarrow |\Omega_1| = \sqrt{\frac{10}{7}\frac{gh_1}{R^2}} \simeq 198 \text{ rad/s}.$$

Trattandosi di una rotazione lungo un asse principale di inerzia il momento angolare sarà:

$$\vec{L_1} = -I|\Omega_1|\hat{\imath} = -\frac{2}{5}mR^2\sqrt{\frac{10}{7}\frac{gh_1}{R^2}}\ \hat{\imath} \simeq -0.59\ \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}}\hat{\imath}.$$

La velocità del centro di massa può essere calcolata facilmente a partire dalla velocità angolare:
$$\vec{v}_1 = R|\Omega_1|\ \hat{\jmath} \simeq 9.9 \text{ m/s } \hat{\jmath}.$$

c)

Lo studio del moto deve essere scomposto in due parti: la salita lungo la rampa curvilinea e la rimanente salita verticale nel vuoto.

Nel primo tratto la sfera continua a rotolare ma la velocità del centro di massa diminuisce e di conseguenza anche la velocità angolare. Applicando il principio di conservazione dell'energia e considerando il momento in cui la quota del centro di massa coincide con il termine della guida abbiamo:

$$E_{k1} = mgR_c + \frac{1}{2}mv_2^2 + \frac{1}{2}I\Omega_2^2 = mgR_c + \frac{7}{10}m\Omega_2^2R^2,$$

da cui si può facilmente calcolare il modulo della nuova velocità angolare:

$$|\Omega_2| = \sqrt{\frac{10}{7}\frac{g(h_1 - R_c)}{R^2}} \simeq 183 \text{ rad/s}.$$

Da questo istante in poi il momento angolare si conserva quindi $\vec{L}_2 = -I|\Omega_2|\hat{\imath} \simeq -0.55 \ \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}}\hat{\imath}$, e la sfera sale continuando a ruotare con velocità angolare costante.

Per calcolare l'energia cinetica nel punto più alto basta considerare che, dal momento del distacco, soltanto la sua componente traslazionale si trasforma in energia potenziale. Pertanto nel punto più alto l'energia cinetica sarà soltanto rotazionale:

$$E_{k2} = \frac{1}{2}I\Omega_2^2 = \frac{2}{7}mg(h_1 - R_c) \simeq 50.4 \text{ J}.$$

Infine per calcolare la quota raggiunta si applica nuovamente il principio di conservazione dell'energia:

$$mgh_2 = E_{k1} - E_{k2} = \frac{mg}{7}(5h_1 + 2R_c) \rightarrow h_2 = \frac{5h_1 + 2R_c}{7} \simeq 5.3 \text{ m}$$

d)

Nella fase di salita lungo il tratto di rampa curvilinea, la componente orizzontale della quantità di moto della sfera, $p = mv_1$, si annulla completamente. A tale variazione della quantità di moto deve corrispondere un impulso, uguale in modulo, esercitato dalla rampa sulla sfera tramite le forze vincolari. Quindi la componente orizzontale dell'impulso vale

$$\text{Impulso} = mv_1 \simeq 29.7 \ \frac{\text{kg m}}{\text{s}} \ .$$

Soluzione esercizio I.2

a)
L'asse di rotazione è un asse principale d'inerzia e il momento di inerzia è dato dalla somma dei singoli momenti di sbarra e disco:

$$I_1 = \frac{1}{2} m_1 R_1^2 + \frac{1}{2} m_0 R_0^2 \simeq 0.016 \text{ kg m}^2,$$

dove le masse sono state calcolate a partire dalla densità dell'alluminio, rispettivamente $m_0 = 5.9$ kg ed $m_1 = 1.7$ kg. Considerando una terna cartesiana orientata in modo che l'asse z sia parallelo all'asse di rotazione il momento angolare risulta essere pari a:

$$\vec{L}_1 = I_1 \vec{\Omega}_1 \simeq 0.32 \ \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}} \hat{k}.$$

b)
L'attrito è una forza interna pertanto il momento angolare si conserva e quindi $\vec{L}_2 = \vec{L}_1$. Applicando proprio la conservazione del momento angolare è facile ricavare la nuova velocità angolare:

$$\vec{L}_1 = I_1 \vec{\Omega}_1 = I_2 \vec{\Omega}_2 \quad \rightarrow \quad \vec{\Omega}_2 = \frac{I_1}{I_2} \vec{\Omega}_1 \simeq 13.3 \text{ rad/s},$$

dove il nuovo momento di inerzia è stato calcolato considerando il contributo del secondo disco come quello di un disco pieno meno l'equivalente della parte forata:

$$I_2 = \frac{1}{2} (m_0 R_0^2 + 2 m_1 R_1^2 - m_1' R_0^2),$$

con $m_1' = \rho_{al} \pi R_0^2 h_1$. Si noti che sarebbe stato equivalente calcolare il momento di inerzia di un sistema composto da un disco pieno di altezza doppia e da una sbarra di altezza $H = h_0 - h_1$.

c)
La forza di attrito che i due blocchi esercitano sul sistema in rotazione dà luogo a una coppia frenante. Se calcoliamo il momento rispetto all'asse di simmetria, il momento della coppia vale:

$$\vec{\tau}_c = -2 R_1 F_a \ \hat{k},$$

dove F_a è il modulo della forza di attrito che agisce in ciascuno dei due punti di contatto tra il disco e i due blocchi del freno. L'attrito è di tipo dinamico e pertanto il modulo della forza risulta essere:

$$F_a = \mu_d N = \mu_d k R_1,$$

dove con $N = k R_1$ è stato indicato il modulo della reazione vincolare e R_1 è la compressone di ciascuna molla rispetto alla propria lunghezza di equilibrio. Quindi possiamo scrivere il momento della coppia come:

$$\vec{\tau}_c = -2 \mu_d k R_1^2 \ \hat{k} = -0.04 \text{ N m } \hat{k}.$$

Per calcolare il tempo necessario affinché il disco si fermi completamente applichiamo la seconda equazione cardinale:

$$\tau = \frac{dL}{dt} = I_2 \frac{d\Omega}{dt} = I_{c2}\alpha \quad \rightarrow \quad \alpha = -\frac{2\mu_d k R_1^2}{I_2} \simeq -1.7 \text{ rad/s}^2.$$

Conoscendo l'accelerazione angolare α, costante, è sufficiente scrivere l'equazione che regola l'andamento della velocità angolare per trovare il tempo di arresto:

$$\Omega(t) = \Omega(0) - \alpha t \rightarrow 0 = \Omega_2 - \alpha \Delta t \quad \rightarrow \quad \Delta t = \frac{\Omega_2}{\alpha} \simeq 8.0 \text{ s}.$$

Soluzione esercizio II.1

a)
La forza esterna deve compensare la differenza di pressione esercitata dal gas in A e B. I valori delle pressioni si ricavano dall'equazione di stato, essendo $n_A = n_B = 1$ mol, $V_A = 10^{-3}$ m^3, $V_B = 2 \times 10^{-3}$ m^3, e $T_{0A} = T_{0B} = T_0 =$ 273.15 K:

$$\begin{aligned} P_{0A} = nRT_0/V_{0A} &= 22.7 \times 10^5 \text{ Pa} \quad (4) \\ P_{0B} = nRT_0/V_{0B} &= \frac{1}{2} P_{0A} = 11.35 \times 10^5 \text{ Pa}. \quad (5) \end{aligned}$$

Dunque, essendo l'area del pistone $S = 10^{-3}$ m^2, la forza esterna deve essere

$$F = S(P_{0A} - P_{0B}) = 1135 \text{ N}. \quad (6)$$

b)
Il gas in A compie un'isoterma quasistatica, assorbendo calore dal serbatoio di acqua e ghiaccio e aumentando il proprio volume. Il calore assorbito è noto dalla quantità di ghiaccio prodotta nel serbatoio:

$$Q_A = m\lambda = 750 \text{ J}. \quad (7)$$

Dato che nella trasformazione isoterma l'energia interna non cambia, il calore assorbito è uguale al lavoro svolto:

$$Q_A = nRT_0 \ln(V_A/V_{0A}). \quad (8)$$

In questa relazione l'unica incognita è il volume finale del gas in A, che può essere ricavato esponenziando i due membri:

$$V_A = V_{0A} e^{\frac{m\lambda}{nRT_0}} = 1.39 \times 10^{-3} \text{ m}^3. \quad (9)$$

Noto V_A, il volume a disposizione di B si ricava per differenza dal volume totale costante:

$$V_B = (V_{0A} + V_{0B}) - V_A = 1.61 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \,. \tag{10}$$

c)
La pressione finale in A si ottiene dall'equazione di stato:

$$P_A = nRT_0/V_A = 16.3 \times 10^5 \text{ Pa} \,. \tag{11}$$

La pressione è diminuita perché la temperatura è rimasta invariata ma il volume è aumentato. La pressione finale in B deve essere uguale a quella in A all'equilibrio in assenza di firza esterna:

$$P_B = P_A = 16.3 \times 10^5 \text{ Pa} \,. \tag{12}$$

La pressione in B è aumentata a seguito della compressione adiabatica. La temperatura finale in B si ottiene dall'equazione di stato:

$$T_B = P_B V_B/(nR) = 315.6 \text{ K} \,. \tag{13}$$

Notiamo che lo stesso risultato sarebbe stato ottenuto applicando la legge $TV^{\gamma-1}$ = costante, valida per la trasformazione in B.

d)
Applicando il primo principio all'isoterma quasistatica eseguita dal gas in A, nella quale

$$\Delta U_A = 0 \,, \tag{14}$$

si ha

$$W_A = Q_a = m\lambda = 750 \text{ J} \,. \tag{15}$$

Applicandolo all'adiabatica quasistatica eseguita dal gas in B, nella quale

$$Q_B = 0 \,, \tag{16}$$

si ha

$$W_B = -\Delta U_B = -nc_v(T_B - T_0) = -530 \text{ J} \,, \tag{17}$$

essendo $c_v = (3/2)R$. Il lavoro svolto dalla forza esterna è dunque

$$W_{\text{ext}} = -(W_A + W_B) = -220 \text{ J} \,, \tag{18}$$

e si vede facilmente che il primo principio, applicato al sistema complessivo (A+B),

$$\Delta U_{AB} = Q - W_{\text{ext}} \tag{19}$$

è soddisfatto, essendo $\Delta U_{AB} = \Delta U_B$ la variazione di energia interna complessiva e $Q = Q_A$ il calore complessivamente assorbito.

e)
La variazione di entropia in A è data da:

$$\Delta S_A = nRln(V_A/V_{0A}) = \frac{Q}{T_0} = 2.74 \text{ J/K} , \tag{20}$$

mentre quella in B è nulla perché la trasformazione è adiabatica reversibile:

$$\Delta S_B = 0 . \tag{21}$$

La variazione di entropia del serbatoio è:

$$\Delta S_{\text{serb}} = -\frac{Q}{T_0} = -\Delta S_A = -2.74 \text{ J/K} . \tag{22}$$

Infine la variazione di entropia dell'universo, somma algebrica delle precedenti, è nulla, come dev'essere per una trasformazione reversibile.

Soluzione esercizio II.2

a)
La trasformazione AB è un'espansione adiabatica libera, irreversibile, di un gas ideale. Quindi la temperatura finale è uguale a quella iniziale

$$T_B = T_A = t_A + 273.15 \text{ K} = 296.15 \text{ K} \tag{23}$$

e la variazione di entropia del gas è data da

$$\Delta S_{AB} = nR\ln(V_B/V_A) = nR\ln 5 . \tag{24}$$

Qui ci manca il numero di moli, che però può essere ricavato dall'equazione di stato applicata allo stato di equilibrio iniziale A:

$$n = \frac{p_A V_A}{RT_A} = \frac{2 \times 10^5 \times 37 \times 10^{-3}}{8.314 \times 296.15} \text{mol} = 3 \text{ mol} . \tag{25}$$

Dunque

$$\Delta S_{AB} = 3 \times 8.314 \ln 5 \text{ J/K} = 40.1 \text{ J/K} . \tag{26}$$

b)
La trasformazione BC è una compressione adiabatica irreversibile. Il calore scambiato è nullo, $Q_{BC} = 0$, e dal I principio segue che il lavoro (adiabatico) compiuto dal gas è uguale a meno la variazione di energia interna. Dato che il lavoro compiuto dal gas nella compressione è negativo, possiamo scrivere

$$\Delta U_{BC} = |W_{BC}| \tag{27}$$

e legare il lavoro alla variazione di temperatura, tramite la relazione

$$\Delta U_{BC} = nc_v(T_C - T_B) \ . \tag{28}$$

Ricordando che $T_B = T_A$ e che $c_v = (3/2)R$, si ha

$$T_C = T_A + \frac{|W_{BC}|}{nc_v} = 296.15 \text{ K} + \frac{12000}{(9/2) \times 8.314} \text{ K} = 616.9 \text{ K} \ . \tag{29}$$

Avendo la temperatura, e sapendo che $P_C = P_A$, possiamo usare l'equazione di stato per ricavare il volume

$$V_C = \frac{nRT_C}{P_A} = 76.93 \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 76.93 \text{ l} \tag{30}$$

c)
La trasformazione CA è isobara irreversibile. La relazione tra il calore ceduto al termostato e l'energia interna è data da:

$$Q_{CA} = nc_p(T_A - T_C) = n\frac{5}{2}R(T_A - T_C) = -2 \times 10^4 \text{ J} \ . \tag{31}$$

Il calore è negativo in quanto ceduto dal gas al termostato, e la potenza è

$$\frac{Q_{CA}}{\Delta t} = -2000 \ W = -2 \ kW \ . \tag{32}$$

d)
Possiamo scrivere

$$\Delta S_{\text{univ}} = \Delta S_{\text{gas}} + \Delta S_{\text{amb}} \ . \tag{33}$$

Le tre trasformazioni sono irreversibili ma, costituendo un ciclo, deve essere:

$$\Delta S_{\text{gas}} = 0 \ . \tag{34}$$

E' quindi da calcolare solo la variazione di entropia dell'ambiente. Quest'ultimo è costituito da un solo serbatoio che assorbe dal gas un calore pari a $Q_{\text{amb}} = -Q_{CA} = 20$ kJ a temperatura costante T_A. Perciò:

$$\Delta S_{\text{univ}} = \Delta S_{\text{amb}} = \frac{Q_{\text{amb}}}{T_A} = 67.5 \text{ J/K} \ . \tag{35}$$