UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI "FEDERICO II"
Facoltà di Scienze
Corso di Laurea in FISICA

Esercitazioni di MECCANICA e TERMODINAMICA

Anno Accademico 2016–2017

UNITÀ **D**

Termodinamica

[a cura di Alberto Clarizia]

Avvertenze:

- *in tutta l'unità, con la lettera greca θ o con la lettera t viene indicata la temperatura nella scala Celsius, mentre con la lettera T viene indicata quella nella scala Kelvin (poi temperatura Assoluta).*
- *in alcuni esercizi delle Sezioni 1 e 2 ci sono domande relative alla funzione di stato Entropia (presenti nelle versioni originali degli esercizi). S'intende che esse andranno affrontate solo dopo l'introduzione di quella funzione di stato.*

1 Preliminari

1.1 Calorimetria

Esercizio 1.1 In un recipiente, contenente una massa m_1 di ghiaccio alla temperatura θ_1, si versa una massa m_2 di acqua alla temperatura θ_2. La capacità termica del recipiente e la quantità di calore ceduta dal sistema all'ambiente esterno sono trascurabili. Si calcoli la temperatura θ_f del sistema all'equilibrio termico.

APPLICAZIONE NUMERICA: Per il calore specifico dell'acqua si usi (nell'intervallo di temperature considerato) $c = 4.184\,J/(g\ °C)$ e per il calore specifico del ghiaccio si usi il valore approssimato (nell'intervallo di temperature considerato) $c^* = 2.092\,J/(g\ °C)$; calore latente di fusione del ghiaccio: $\lambda_f = 333.5\,J/g$ $(= 79.7\,cal/g)$; $m_1 = 3\,kg$; $\theta_1 = -20°C$; $m_2 = 200\,g$; $\theta_2 = 10°C$.

Esercizio 1.2 Un corpo solido, di massa m, posto in contatto termico con ghiaccio fondente, provoca la fusione di una massa m_1 di ghiaccio se la sua temperatura iniziale è θ_1, e di una massa m_2 se la sua temperatura iniziale è θ_2. Nell'intervallo di temperature $[0°,\ 40°\,C]$ il calore specifico del corpo ha valore:

a) costante c_0;

b) dato dalla relazione $c(\theta) = c_0(1 + \beta\,\theta)$.

Si calcolino i valori di c_0 e m_2 nei due casi.

APPLICAZIONE NUMERICA: $m = 650\,g$; $m_1 = 18\,g$; $\beta = 4 \cdot 10^{-3}\,(°C)^{-1}$; $\theta_1 = 20°C$; $\theta_2 = 40°C$; calore latente di fusione del ghiaccio: $\lambda_f = 333.5\,J/g$.

Esercizio 1.3 Una massa m di ghiaccio a temperatura t_i viene posta in un ambiente che ha una temperatura t_A (che si mantiene costante). Sapendo che il calore specifico del ghiaccio fra t_i e $t_0 = 0°C$ è dato approssimativamente dalla relazione empirica $c(t) = 2.11 + 0.00778\,t$ (con t temperatura Celsius e c in $J/(°C\,g)$) e che il calore di fusione del ghiaccio a $0°C$ è λ, calcolare:

a) la variazione di energia interna che si ha nell'intero processo di fusione del ghiaccio fino al raggiungimento dell'equilibrio termodinamico con l'ambiente;

b) la variazione di entropia dell'acqua nel processo;

c) la variazione dell'entropia dell'universo nel processo.

APPLICAZIONE NUMERICA: $m = 600\,g$; $t_i = -40°C$; $t_A = 20°C$; $\lambda = 333.5\,J/g$; $c_{\text{acqua}} = 4.184\,J/(°C\,g)$.

1.2 Gas perfetti e gas reali

Esercizio 1.4 Un recipiente cilindrico di volume V è diviso in due camere A e B da un setto di spessore e massa trascurabili e scorrevole senza attrito lungo il cilindro. Nelle due camere si trovano una massa m_A di H_2 e una massa m_B di He, rispettivamente. In condizioni di equilibrio la temperatura dei gas è T_0. Considerando i gas come gas perfetti, si calcoli:

a) i volumi V_A e V_B delle camere;

b) la pressione p della mescolanza dei due gas che si forma se il setto viene rimosso.

APPLICAZIONE NUMERICA: $V = 54 \cdot 10^{-3}\, m^3$; $m_A = 8\, g$; $m_B = 8\, g$; $T_0 = 273\, K$.

Esercizio 1.5 Con una certa quantità di gas perfetto, a partire da uno stato A con pressione p_A e volume V_A, si esegue un ciclo reversibile così formato: si esegue una trasformazione isocora e la pressione viene variata al valore $p_B = x\, p_A$, dopodiché si esegue una isobara fino al volume $V_C = y\, V_A$; si ritorna poi allo stato A eseguendo prima una isocora e, infine, una isobara.

Si determini, in funzione di p_A, V_A, x e y, il lavoro totale compiuto dal gas e il calore scambiato da questo con l'esterno. Si utilizzino, inoltre, opportunamente le trasformazioni considerate per rendersi conto del contenuto del **1° Principio della Termodinamica**.

Esercizio 1.6 Una massa m di anidride carbonica subisce una trasformazione isoterma reversibile alla temperatura θ e il volume cambia da V_1 a V_2. Si calcoli il lavoro $\mathcal{L}_e$ fatto dall'esterno sul gas considerando il gas **a)** come un gas perfetto o **b)** come un gas di Van der Waals (che soddisfa, cioè, l'equazione di stato di Van der Waals, equazione (1) nell'esercizio **3.16**).

APPLICAZIONE NUMERICA: $m = 10\, g$; $\theta = 20°C$; $V_1 = 3\, l$; $V_2 = 4\, l$; le costanti di Van der Waals per l'anidride carbonica hanno i valori: $a = 195.7 \cdot 10^{-3}\, J\, m^3/\text{mole}^2$, $b = 3.13 \cdot 10^{-5}\, m^3/\text{mole}$, $r = 6.08\, J/(K\, \text{mole})$.

2 Primo Principio della Termodinamica

Esercizio 2.1 Una mole di gas ideale monoatomico, inizialmente alla pressione p_0 e volume V_0 (stato A), esegue una espansione reversibile in modo tale che la sua pressione vari secondo la funzione

$$p = p_0 \left[1 + \left(\frac{V - V_0}{V_0} \right)^2 \right]$$

fino a raddoppiare il volume (stato B). Calcolare:

a) il lavoro compiuto dal gas nella trasformazione;

b) il calore scambiato nella trasformazione;

c) la variazione di entropia del gas e dell'ambiente nella trasformazione.

APPLICAZIONE NUMERICA: $p_0 = 2\, atm$; $V_0 = 10\, l$.

Esercizio 2.2 Un recipiente a pareti isolanti contiene una grande quantità di acqua e ghiaccio, in equilibrio alla pressione atmosferica e alla temperatura $t_0 = 0°\, C$, e in mezzo un cilindro a pareti conduttrici munito di un pistone ideale (cioè scorrevole senza attrito e a perfetta tenuta) di massa trascurabile e manovrabile dall'esterno (vedi figura 1). All'interno del cilindro si trovano

n moli di un gas perfetto che, a partire da uno stato iniziale di equilibrio, viene compresso quasi staticamente fino a che il suo volume è ridotto a metà. Determinare la massa m di ghiaccio che si scioglie durante la compressione.

APPLICAZIONE NUMERICA: $n = 5\,moli$.

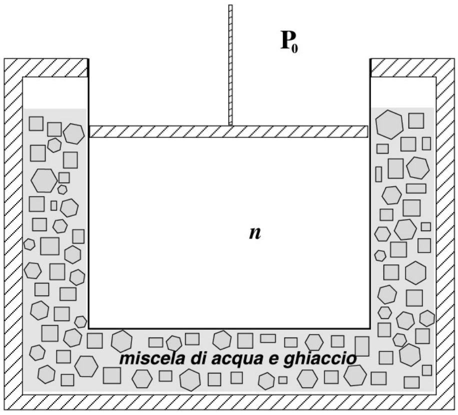

Figura 1: relativa all'esercizio **2.2**.

Esercizio 2.3 La figura 2 rappresenta una sezione verticale di un dispositivo immerso nell'atmosfera, costituito da un recipiente A attaccato in alto ad un sostegno fisso e da un recipiente B sospeso nel vuoto: due pistoni chiudono i recipienti e sono collegati da un cavo ideale; in A e B sono contenute n_A e n_B moli di un gas perfetto monoatomico. Tutte le pareti dei recipienti sono isolate termicamente. I due pistoni sono entrambi di sezione S e massa m e possono scorrere verticalmente senza attrito. Il sistema è in equilibrio e in A e B la temperatura vale T_0, e i volumi $V_{A,0} = V_{B,0}$.

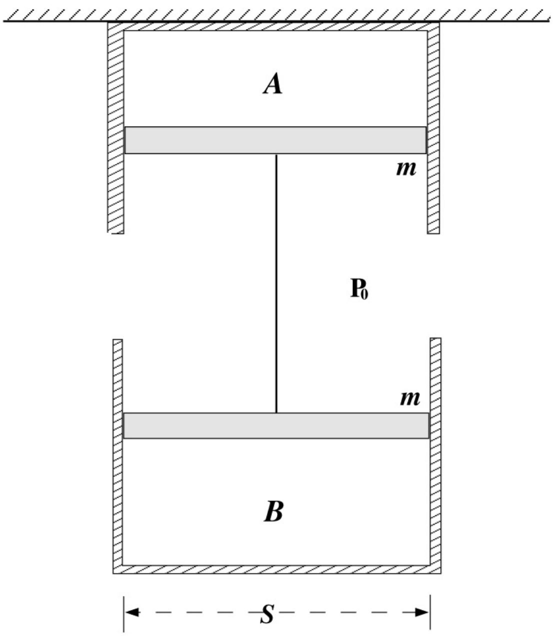

Figura 2: relativa all'esercizio **2.3**.

a) Si determini la differenza $p_{B,0} - p_{A,0}$ tra le pressioni in A e B.

b) La massa del recipiente B (escluso il pistone) è m_B: quanto valgono $p_{A,0}$ e $p_{B,0}$?

c) Sopra il pistone che chiude B si aggiungono dei pesi, uno alla volta e sufficientemente piccoli per poter considerare la trasformazione reversibile, fino a raddoppiare la massa del pistone in questione; si calcolino i volumi finali V_A e V_B di A e B, le due temperature T_A e T_B e il lavoro compiuto complessivamente dalle forze peso che agiscono sull'intero sistema.

APPLICAZIONE NUMERICA: $S = 1.8\,dm^2$; $m = 16\,kg$; $m_B = 9\,kg$; $T_0 = 300\,K$; $V_{A,0} = 2.5\,l$.

Esercizio 2.4 In un recipiente cilindrico disposto verticalmente, di sezione S, può scorrere un pistone ideale di massa m_P e spessore d. Il pistone e le pareti laterali del recipiente sono impermeabili al calore. La camera interna contiene una massa m_g di ghiaccio alla temperatura $\theta_0 = 0^\circ C$ e un volume V_0 di azoto alla stessa temperatura; ghiaccio e gas sono separati da un setto rigido AB permeabile al calore così come il fondo del cilindro stesso (vedi la figura 3). Al di sopra del pistone il cilindro è riempito d'acqua: l'altezza del pelo libero dell'acqua rispetto al setto AB è h. Si riscalda il fondo del recipiente, il pistone si solleva lentamente fino alla posizione CD facendo tracimare tutta l'acqua. Considerando l'azoto come un gas perfetto, si calcoli:

a) la pressione iniziale p_0 e il numero n di moli dell'azoto;

b) la pressione finale p_f, la temperatura finale θ_f del gas e la quantità di calore Q fornita al sistema ghiaccio + gas.

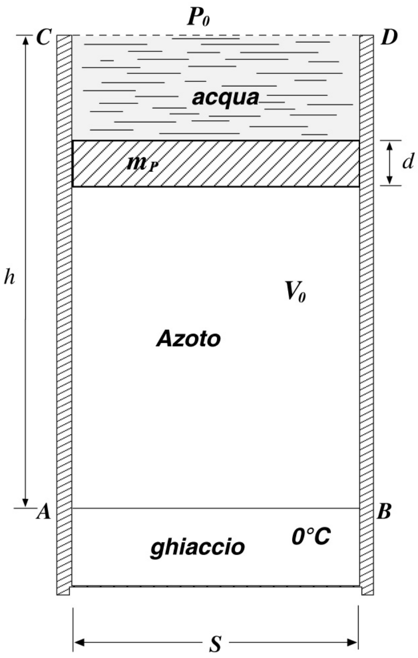

Figura 3: relativa all'esercizio **2.4**.

APPLICAZIONE NUMERICA: $S = 0.36\,m^2$; $m_P = 700\,kg$; $d = 40\,cm$; $m_g = 2\,kg$; $V_0 = 0.81\,m^3$; $h = 3.5\,m$.

Esercizio 2.5 Un recipiente cilindrico con pareti trasparenti al calore, chiuso superiormente da un pistone scorrevole di massa m e sezione S, è circondato lateralmente da una miscela di acqua e ghiaccio; la pressione dell'ambiente esterno è quella atmosferica P_0 (si può fare riferimento alla figura 1). Nel recipiente sono contenute n moli di un gas perfetto monoatomico, che è in equilibrio. Si posa sopra il pistone un corpo di massa m^*, il pistone si abbassa e nella trasformazione (irreversibile?) si ha la fusione di una massa m_1 di ghiaccio.

a) Si calcoli m^*.

b) Adesso si applica al pistone una forza esterna di intensità opportuna variabile in modo da riportare il gas allo stato iniziale reversibilmente; si calcoli la massa m_2 di ghiaccio formatosi in questa trasformazione.

APPLICAZIONE NUMERICA: $m = 20\,kg$; $S = 4\,dm^2$; $n = 1 mole$; $m_1 = 3\,g$.

Esercizio 2.6 Un gas perfetto monoatomico (calore molare a volume costante $c_V = \frac{3}{2}R$) è contenuto in un recipiente che è collegato, tramite un rubinetto chiuso, con un cilindro munito di un pistone ideale (cioè scorrevole senza attrito e a perfetta tenuta) soggetto alla pressione atmosferica esterna. Tutte le pareti che circondano il gas sono isolanti (vedi la figura 4). Il gas è inizialmente in equilibrio alla temperatura T_i. Aprendo appena il rubinetto si osserva che il pistone si sposta con estrema lentezza, finché il gas raggiunge uno stato finale di equilibrio in cui il suo volume è quadruplo del volume iniziale e la sua pressione è uguale a quella esterna. Determinare la temperatura finale T_f del gas.

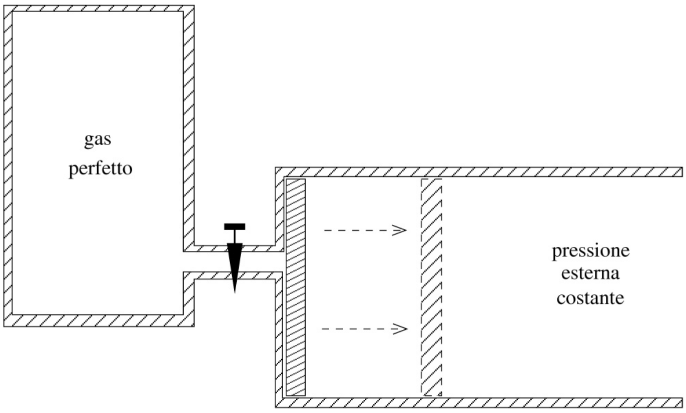

Figura 4: relativa all'esercizio **2.6**.

APPLICAZIONE NUMERICA: $T_i = 360\,K$.

Esercizio 2.7 Un cilindro rigido ed isolato termicamente, con asse verticale, contiene gas perfetto biatomico. Superiormente il cilindro è chiuso da un pistone ideale, di massa m, anch'esso isolato termicamente. Inizialmente il pistone è appoggiato su dei supporti, di volume trascurabile, posti ad una quota h dal fondo del cilindro ed il gas si trova in equilibrio a temperatura T_0 (vedi la figura 5). Viene rimosso l'isolamento dal fondo del cilindro ed il sistema è messo a contatto termico con una sorgente ideale a temperatura T_1. Al conseguimento del nuovo equilibrio termico del sistema, la base del pistone risulta essere a quota $2h$ dal fondo del cilindro ed il gas ha compiuto un lavoro $\mathcal{L}$ contro la pressione esterna e ricevuto una quantità di calore Q dalla sorgente. Si determini:

a) il volume iniziale, V_0, occupato del gas;

b) la temperatura finale del gas ed il numero di moli di gas contenuto nel cilindro;

c) la pressione iniziale, p_0, del gas nel cilindro e la variazione di entropia dell'universo nella trasformazione.

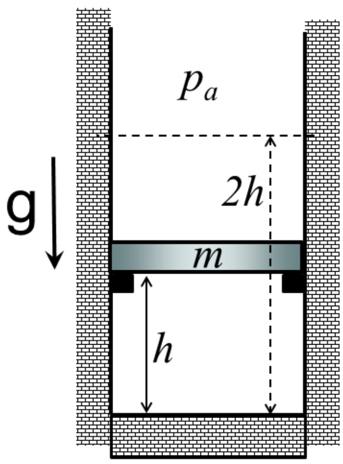

Figura 5: relativa all'esercizio **2.7**.

APPLICAZIONE NUMERICA: $m = 8\,kg$; $h = 60\,cm$; $T_0 = 273\,K$; $\mathcal{L} = 6500\,J$; $Q = 24 \cdot 10^3\,J$.

Esercizio 2.8 Un pistone isolante, di massa trascurabile e di superficie S divide, scorrendo senza attrito e a perfetta tenuta, un cilindro isolato termicamente in due parti. Il pistone è compresso da una molla ideale di costante elastica k e c'è il vuoto nella parte del cilindro occupata dalla molla: questa si trova in posizione di riposo quando il pistone è a fine corsa (volume utile interno nullo, vedi la figura 6). Nella parte del cilindro non occupata dalla molla viene introdotta una certa quantità di elio che va ad occupare un volume iniziale V_A, in equilibrio con la pressione sviluppata dalla molla e a temperatura t_A. In seguito, viene introdotto un cubetto di ghiaccio di massa m, che ha una temperatura t_0 (il suo volume si può trascurare e si può assumere che non ci sia stata alterazione dei parametri iniziali del gas).

a) Dopo un certo tempo il sistema raggiunge una situazione di equilibrio, in cui si è sciolta la metà del ghiaccio. Calcolare il valore della massa m e il volume finale V_B occupato dal gas.

b) Per tale valore della massa di ghiaccio, determinare il valore del volume iniziale V'_A (a parità di temperatura iniziale t_A) necessario perché la temperatura finale di equilibrio sia t_B.

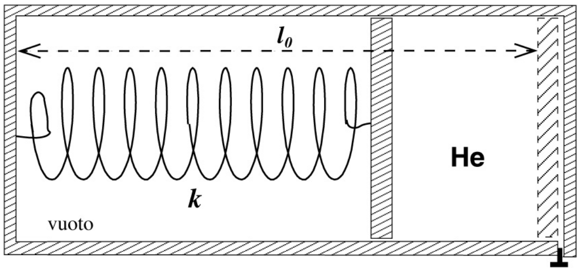

Figura 6: relativa all'esercizio **2.8**.

APPLICAZIONE NUMERICA: $S = 225\,cm^2$; $k = 1000\,N/m$; $V_A = 10\,l$; $t_A = 500°C$; $t_0 = -10°C$; $t_B = 10°C$. Si consideri per il calore di fusione del ghiaccio: $\lambda_f = 333.5\,J/g$; mentre per il calore specifico del ghiaccio il valore: $c_{\text{gh}} = 2.093\,J/(g\,°C)$; e per quello dell'acqua: $c_{\text{acqua}} = 4.184\,J/(g\,°C)$.

Esercizio 2.9 La parte inferiore di un tubo di massa trascurabile e sezione S, chiuso superiormente e contenente mercurio e ossigeno, è immersa in una bacinella contenente mercurio (vedi la figura 7). Si considerino, in questa situazione, le pareti del tubo diatermiche. In condizioni di equilibrio la temperatura dell'atmosfera esterna, del mercurio e dell'ossigeno è T_0 e inoltre è $h = h_1$ e $H = H_1$.

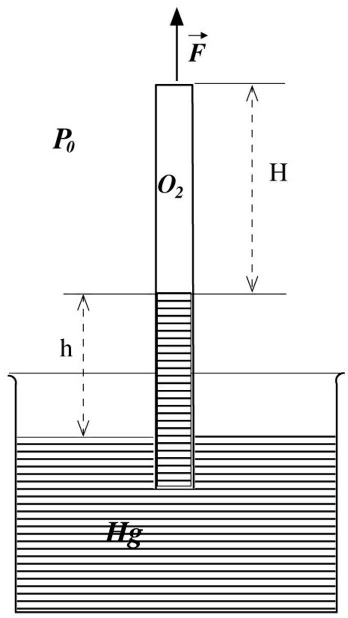

Figura 7: relativa all'esercizio **2.9**.

a) Si calcoli il numero n di moli di ossigeno contenute nel tubo e il modulo F_1 della forza $\vec{F}$ che si è applicata al tubo per tenerlo in equilibrio nella posizione considerata.

b) Si diminuisce lentamente l'intensità della forza $\vec{F}$, il tubo si immerge ulteriormente e in corrispondenza ad una nuova situazione di equilibrio risulta $h = h_2$ e $H = H_2$; la trasformazione è isoterma quasi statica. Si calcoli H_2 e la quantità di calore Q scambiata dal gas con l'esterno.

APPLICAZIONE NUMERICA: $S = 5\,cm^2$; $T_0 = 273\,K$; $h_1 = 30\,cm$; $H_1 = 70\,cm$; $h_2 = 10\,cm$.

Esercizio 2.10 Il recipiente con pareti diatermiche, mostrato in figura 8, è chiuso inferiormente da un pistone ideale. Nella parte superiore il recipiente ha un capillare cilindrico di lunghezza l e raggio r e il volume complessivo è inizialmente V_0. Una certa quantità di acqua allo stato di vapore, a temperatura θ_0, riempie completamente il recipiente e la pressione è p_0. Si comprime isotermicamente e reversibilmente sino a che l'acqua occupa soltanto il volume del capillare. Calcolare:

a) la pressione finale;

b) il lavoro e calore scambiati con l'esterno.

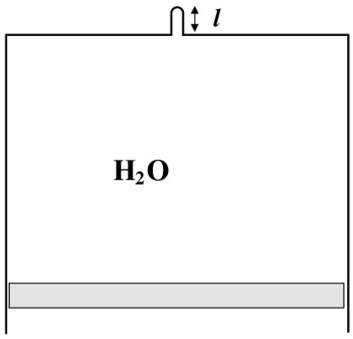

Figura 8: relativa all'esercizio **2.10**.

APPLICAZIONE NUMERICA: $l = 1\,cm$; $r = 1\,mm$; $V_0 = 320\,cm^3$; $\theta_0 = 27°C$; $p_0 = 12.6 \cdot 10^{-5}\,atm$. A $27°C$ la tensione di vapore saturo dell'acqua è $p_{\text{v.s.}} = 3.16 \cdot 10^{-2}\,atm$; e il calore latente di vaporizzazione è $\lambda_v = 2116.7\,J/g$.

Esercizio 2.11 Un recipiente cilindrico chiuso, con l'asse verticale, ha le pareti isolanti e lo spazio interno è suddiviso in due parti da un pistone ideale isolante di massa m e superficie S; dalla parete del fondo del recipiente può essere rimosso l'isolamento (vedi la figura 9). Nella parte superiore è stato fatto il vuoto, nella parte inferiore vi sono n moli di un gas perfetto monoatomico.

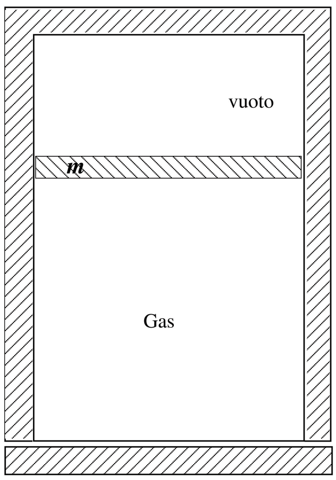

Figura 9: relativa all'esercizio **2.11**.

Il gas si trova inizialmente in equilibrio (stato A) e la temperatura è T_A. Il pistone può essere manovrato dall'esterno e viene abbassato (applicando una forza opportuna) in modo che la trasformazione sia reversibile, fino a raggiungere un volume V_B occupato dal gas (stato B). A questo punto il pistone viene lasciato libero e verrà raggiunto uno stato di equilibrio C. Solo ora, rimuovendo l'isolamento dal fondo, viene scambiato reversibilmente del calore in modo da tornare allo stato iniziale. Determinare:

a) la pressione e la temperatura nello stato B;

b) i parametri termodinamici dello stato C e il calore scambiato nell'ultima trasformazione;

c) il lavoro compiuto dal gas e la variazione d'entropia dell'universo termodinamico, nell'intero ciclo.

APPLICAZIONE NUMERICA: $m = 80\,kg$; $S = 520\,cm^2$; $n = 0.15$; $T_A = 363\,K$; $V_B = 20.0\,l$.

Esercizio 2.12 Un recipiente cilindrico chiuso, con l'asse verticale, ha le pareti isolanti e lo spazio interno è suddiviso in due parti da un pistone ideale di massa m (vedi la figura 10). Nella parte superiore è stato fatto il vuoto, nella parte inferiore vi sono n moli di un gas perfetto, il cui rapporto $\gamma = c_p/c_V$ è costante. Si indichi con z la quota generica della faccia inferiore del pistone rispetto al fondo del recipiente. Il pistone è abbandonato inizialmente in quiete.

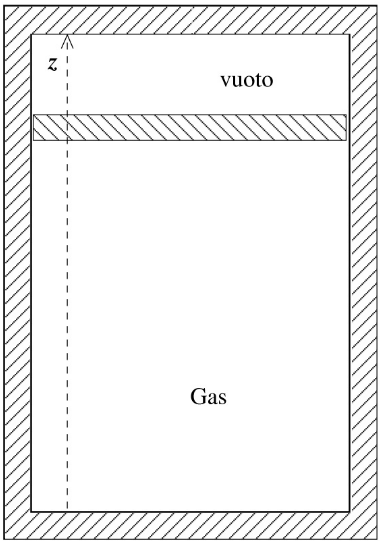

Figura 10: relativa all'esercizio **2.12**.

a) Calcolare il valore h di z per cui il pistone, e quindi l'intero sistema, è in equilibrio alla temperatura t_0.

b) Si sposta lentamente il pistone dalla quota h alla quota z_0 e poi lo si lascia libero, il pistone si muoverà e il gas inizierà una trasformazione. Si può considerare reversibile la trasformazione? Ipotizzarla tale! Esprimere il modulo al quadrato della velocità, v_z^2, in funzione di z; poi, per due valori diversi di z_0, calcolare la temperatura iniziale T_0', il massimo valore $v_{\max}$ di v_z e il corrispondente valore di z; inoltre calcolare il valore minimo di z durante il moto del pistone e il valore massimo della temperatura. Rimarrà il pistone in moto perpetuo?

c) Ipotizzare, a questo punto, che la trasformazione sia irreversibile: si fermerà, allora, il pistone e quale sarà lo stato finale di equilibrio (quota z_f e temperatura T_f)?

APPLICAZIONE NUMERICA: $m = 4.8\,kg$; $n = 0.01\,moli$; $\gamma = 1.5$; $t_0 = 7°C$; $z_0 = 60$ e $54\,cm$.

3 Secondo Principio della Termodinamica ed Entropia

Esercizio 3.1 Con n moli di gas perfetto monoatomico si effettua un ciclo reversibile costituito dalle seguenti trasformazioni:

1) una trasformazione isocora a partire dallo stato A, in cui il gas occupa un volume V_A e ha temperatura T_A, fino allo stato B a temperatura $T_B = T_A/2$;

2) una compressione adiabatica fino allo stato C con $T_C = T_A$;

3) un'espansione isoterma dallo stato C allo stato iniziale A.

Si calcoli il volume V_C e il rendimento η del ciclo.

APPLICAZIONE NUMERICA: $V_A = 8\,l$.

Esercizio 3.2 Una certa massa di gas perfetto monoatomico subisce una trasformazione ciclica reversibile. Iniziando con pressione p_1 e temperatura T_1 si esegue una espansione adiabatica con rapporto di espansione $V_1/V_2 = x$, quindi una trasformazione isobarica fino alla temperatura $T_3 = x\,T_1$; il ciclo si conclude con una compressione adiabatica seguita da una isovolumica. Si calcoli:

a) la temperatura del gas all'inizio e alla fine delle varie trasformazioni che formano il ciclo;

b) il rendimento η del ciclo.

APPLICAZIONE NUMERICA: $p_1 = 1\,atm$; $T_1 = 400\,K$; $x = 0.729$.

Esercizio 3.3 Una macchina termica contenente n moli di gas perfetto monoatomico funziona con tre sorgenti di calore alle temperature $\theta_1 = 0°C$, $\theta_2 = +100°C$ e $\theta_3 = +200°C$, con le quali scambia le quantità di calore Q_1, Q_2 e Q_3, rispettivamente.

a) Si calcoli il rendimento della macchina se è $Q_3 = 500\,cal$, $Q_2 = 400\,cal$ e $Q_1 = -700\,cal$.

b) Si dimostri che con $Q_3 = 500\,cal$ e $Q_2 = 400\,cal$, se il ciclo eseguito è reversibile, risulta $Q_1 = -581\,cal$.

c) Il ciclo sia reversibile con i tre calori scambiati dati al punto precedente: si specifichino le varie trasformazioni e l'ordine relativo col quale vengono eseguite.

Esercizio 3.4 Una macchina termica utilizza soltanto tre sorgenti alle temperature t_1, t_2 e t_3; le quantità di calore scambiate in ogni ciclo con le prime due sono Q_1 e Q_2 rispettivamente. Trovare i possibili valori della quantità di calore Q_3 che la macchina scambia in ogni ciclo con la terza sorgente, del lavoro $\mathcal{L}$ compiuto in ogni ciclo e del rendimento η.

APPLICAZIONE NUMERICA: $t_1 = +100°C$; $t_2 = +20°C$; $t_3 = -30°C$; $Q_1 = +55\,cal$; $Q_2 = -7\,cal$.

Esercizio 3.5 Un cubo di ghiaccio di massa m alla temperatura t_1 viene immerso in una massa d'acqua M alla temperatura t_2 posta in un thermos (isolato termicamente dall'ambiente) di capacità termica trascurabile. Determinare:

a) nelle stesse condizioni di temperatura e con la stessa massa d'acqua, quale sarebbe la massima quantità, m_M, di ghiaccio che si scioglierebbe completamente;

b) che cosa accade, invece, nella situazione definita nell'applicazione numerica e quale sia la variazione dell'entropia del sistema ghiaccio+acqua fino al raggiungimento dell'equilibrio.

Successivamente l'isolamento termico del thermos viene rimosso e il sistema si troverà in contatto con l'ambiente esterno (si può considerare infinita la sua capacità termica), che è a temperatura $t_a = t_2$, e raggiungerà l'equilibrio termico finale. Determinare:

c) la variazione dell'entropia dell'universo, in questa seconda trasformazione.

APPLICAZIONE NUMERICA: $m = 50$ g; $t_1 = -10$°C; $M = 110$ g; $t_2 = 27$°C; si assuma: $c_{\text{ghiaccio}} = 2.093$ J/(g °C); $c_{\text{acqua}} = 4.184$ J/(g °C); $\lambda_f = 333.5$ J/g.

Esercizio 3.6

Un sistema termodinamico è costituito da n moli di gas perfetto monoatomico contenute in un cilindro dotato di un pistone mobile che scorre privo di attrito. Il sistema è sottoposto al seguente ciclo:

AB) il sistema parte da uno stato di equilibrio iniziale A, caratterizzato da una temperatura t_A e pressione p_A, e, messo a contatto termico con una sorgente ideale a temperatura t_B, è sottoposto ad una espansione isobara fino al raggiungimento dell'equilibrio termico con la sorgente. Durante questa trasformazione il sistema compie un lavoro $L_{A \to B}$;

BC) mantenendo sempre il contatto termico con la sorgente a temperatura t_B, il sistema è sottoposto ad una espansione isoterma reversibile fino ad uno stato C, caratterizzato da una pressione $p_C = p_A/2$;

CD) il sistema è messo a contatto termico con una sorgente ideale a temperatura t_A ed è sottoposto ad una compressione isobara fino al raggiungimento dell'equilibrio termico con la sorgente (stato D);

DA) mantenendo sempre il contatto termico con la sorgente a temperatura t_A, il sistema è sottoposto ad una compressione isoterma reversibile fino a riportarlo nello stato iniziale A .

Determinare:

a) il numero di moli, n, ed i volumi V_A e V_B;

b) il rendimento del ciclo e confrontarlo col rendimento di una macchina di Carnot che scambi calore con le stesse sorgenti;

c) la variazione di entropia dell'universo in un ciclo.

APPLICAZIONE NUMERICA: $t_A = 20$ °C ; $t_B = 100$ °C ; $p_A = 2\,atm$; $L_{A \to B} = 1996\,J$.

Esercizio 3.7

Un recipiente munito di pistone scorrevole, di massa trascurabile, contiene n moli di un gas perfetto monoatomico, ed una massa m di ghiaccio ad una temperatura iniziale $T_A < T_0$, dove T_0 è la temperatura di fusione. Ghiaccio e gas sono in equilibrio termodinamico, e la pressione del gas è quella atmosferica P_0. Recipiente e pistone sono impermeabili al calore.

Caso 1: si fa compiere al sistema una compressione reversibile, che viene interrotta non appena tutto il ghiaccio si è sciolto. Calcolare:

a) il lavoro fatto sul sistema;

b) la variazione di entropia del gas e la pressione finale.

Caso 2: partendo dallo stesso stato di equilibrio iniziale, si applica bruscamente al pistone una forza esterna costante, che viene scelta in modo tale da raggiungere uno stato finale di equilibrio dove $T = T_0$ e tutto il ghiaccio si è sciolto. Calcolare:

c) la pressione finale e la variazione di entropia del gas e dell'universo.

APPLICAZIONE NUMERICA: $n = 2$ moli; $m = 12$ g; $T_A = 200$ K; $T_0 = 273$ K; si consideri per il calore specifico del ghiaccio un valor medio: $c_{\text{ghiaccio}} = 2.1$ J/(g °C); $\lambda = 333.5$ J/g.

Esercizio 3.8 Una massa d'aria occupa un volume V. Essa viene raffreddata in un tempo Δt dalla temperatura iniziale $T_i^{(2)}$ alla temperatura finale $T_f^{(2)}$, alla pressione costante P_0, da una macchina termica reversibile. La sorgente fredda è costituita dalla superficie del mare alla temperatura costante $T^{(1)}$.

Si calcoli la potenza media erogata dalla macchina ed il relativo rendimento η.

APPLICAZIONE NUMERICA: considerare l'aria un gas ideale biatomico; $V = 10\,m^3$; $\Delta t = 4\,ore$; $T_i^{(2)} = 313\,K$; $T_f^{(2)} = 303\,K$; $P_0 = 1\,atm$; $T^{(1)} = 298\,K$.

Esercizio 3.9 In un cilindro verticale termicamente isolato, chiuso superiormente da un pistone ideale (anch'esso isolante), è inserito un volume V_0 di acqua a temperatura ambiente T_0. Sul pistone è mantenuta una pressione costante (pressione atmosferica + pressione dovuta al peso del pistone) p_0. All'istante $t = 0$ viene acceso nel cilindro un riscaldatore in cui è dissipata una potenza costante W_0 che riscalda il contenuto del cilindro (si può trascurare la potenza necessaria a riscaldare il recipiente). Calcolare:

a) quanto tempo è necessario perché il pistone salga a definire un volume finale V_f;

b) la variazione totale di entropia dell'acqua.

Discutere esplicitamente le approssimazioni fatte.

APPLICAZIONE NUMERICA: $V_0 = 0.5\,l$; $T_0 = 293\,K$; $p_0 = 1.4\,atm$; $W_0 = 50\,W$; $V_f = 800\,l$; temperatura di ebollizione: $T_{1.4\,\text{atm}}^{(\text{eboll})} = 383\,K$; calore latente di vaporizzazione: $\lambda_{1.4\,\text{atm}} = 5.3 \cdot 10^2\,cal/g$.

Esercizio 3.10 Due recipienti cilindrici comunicano con un sottile tubo, di volume trascurabile, e contengono complessivamente n moli di un gas perfetto monoatomico. I due recipienti sono chiusi superiormente da due pistoni ideali di massa m_1 ed m_2 e di superficie S_1 ed S_2, rispettivamente (vedi figura 11). Le pareti dei recipienti ed i pistoni non conducono il calore. Inizialmente il gas è in equilibrio e i due pistoni sono rispettivamente alle quote h_1 ed h_2 rispetto al fondo comune dei recipienti. Ad un certo istante si elimina l'isolamento del fondo e si fornisce al gas una quantità di calore Q e poi si rimette l'isolamento termico fino a raggiungere un nuovo stato di equilibrio.

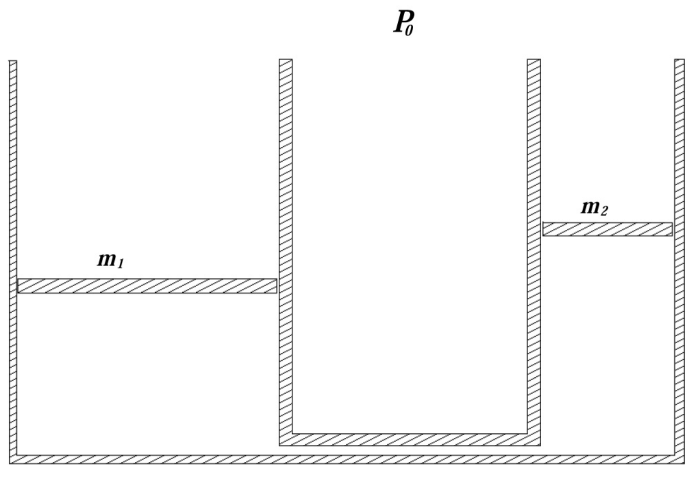

Figura 11: relativa all'esercizio **3.10**.

Sapendo che la variazione di entropia del gas nel processo è stata di ΔS_{gas}, determinare:

a) la pressione e il volume (totale) iniziale del gas;

b) la pressione e il volume finale del gas;

c) il numero di moli n e la temperatura finale.

APPLICAZIONE NUMERICA: $m_1 = 150$ kg; $m_2 = 60$ kg; $S_1 = 0.1$ m^2; $h_1 = 0.5$ m; $h_2 = 0.7$ m; $Q = 3600$ J; $\Delta S_{\text{gas}} = 7.5$ J/K.

Esercizio 3.11 Una quantità, n moli, di gas perfetto è contenuta in un cilindro chiuso superiormente da un pistone ideale di sezione S, di massa trascurabile ed isolato termicamente; le pareti del recipiente sono tutte isolanti, quella inferiore è conduttrice o può essere isolata quando necessario. Inizialmente il fondo del recipiente è a contatto termico con un termostato, a temperatura T_A, il pistone è bloccato e il volume occupato dal gas è V_A mentre la pressione risulta essere p_A. Mantenendo il contatto termico con il termostato, sul pistone viene appoggiata una massa m e il blocco viene tolto, lasciando che il gas si porti in un nuovo stato di equilibrio (B). Raggiunto l'equilibrio, al gas viene fatto chiudere un ciclo di Carnot, attraverso una espansione adiabatica reversibile, che porta il gas alla temperatura T_C, una compressione isoterma reversibile e, infine, una compressione adiabatica reversibile che lo riporta allo stato iniziale. Calcolare:

a) il rendimento del ciclo;

b) la variazione di entropia dell'universo termodinamico;

c) il rendimento di una macchina di Carnot che lavori tra le stesse temperature.

APPLICAZIONE NUMERICA: $n = 0.8\,moli$; $S = 120\,cm^2$; $V_A = 9.6\,l$; $p_A = 3.42\,atm$; $m = 90\,kg$; $T_C = 200\,K$.

Esercizio 3.12 Un recipiente cilindrico con asse orizzontale ha un volume interno V ed è termicamente isolato; un pistone ideale (si può muovere liberamente e senza attrito ed è perfettamente a tenuta), che ha massa trascurabile ed una debole conducibilità termica, lo divide in due compartimenti A e B. Entrambi i compartimenti contengono la stessa quantità, n moli, di un gas perfetto monoatomico. Inizialmente c'è un equilibrio meccanico tra le due parti, ma i due gas sono in uno stato di equilibrio con due temperature diverse: la temperatura nel volume A è t_0^A e nel volume B è t_0^B. Si lascia evolvere il sistema liberamente verso l'equilibrio termico.

a) Come avviene la trasformazione fino allo stato di equilibrio finale?

b) Quali sono i volumi e le pressioni iniziali e finali e quale la temperatura finale dei due gas?

c) Qual è la variazione dell'entropia dell'intero sistema nella trasformazione?

APPLICAZIONE NUMERICA: $V = 12\,l$; $n = 0.25\,moli$; $t_0^A = 27°C$; $t_0^B = 147°C$.

Esercizio 3.13 Una mole di gas perfetto monoatomico è contenuta in un recipiente cilindrico chiuso superiormente da un pistone ideale di massa trascurabile, al quale si può accedere liberamente e su cui è posta una massa m. La temperatura del gas è identica a quella dell'ambiente ed è t_0. L'altezza del pistone rispetto al fondo del recipiente è h_0.

Considerare le due ipotesi seguenti:

A - le pareti del recipiente sono conduttrici;

B - le pareti sono perfettamente isolanti.

Nelle due ipotesi, fare un confronto tra il caso in cui la massa poggiata sul pistone è tolta tutta in una volta e quello in cui è tolta in modo da poter considerare reversibile la trasformazione. Si calcolino i parametri (T, p, h) dello stato finale di equilibrio e le variazioni di entropia del gas e dell'ambiente, nonché dell'universo termodinamico.

APPLICAZIONE NUMERICA: $m = 80\,kg$; $t_0 = 30°C$; $h_0 = 75\,cm$.

Esercizio 3.14 Nella figura 12 è rappresentato schematicamente un recipiente che ha le pareti esterne ed il pistone (mobile ed ideale) isolanti. Il volume interno del recipiente, V_1, è suddiviso in due parti, V_1^A e V_1^B, tramite un diaframma rigido e fissato stabilmente alle pareti del recipiente: il diaframma è trasparente al calore. Nelle parti A e B sono contenute n_A e n_B moli dello stesso gas ideale monoatomico. Sul pistone, dall'esterno, agiscono la pressione atmosferica, P_0, ed una forza $\vec{F}$. Inizialmente l'intensità della forza corrisponde ad una pressione $f_1 = \frac{|\vec{F}_1|}{S}$: i due gas sono in equilibrio e tra le due facce del diaframma sussiste una differenza di pressione $\Delta p_1 = p_1^B - p_1^A$. Si fa aumentare opportunamente l'intensità della forza in modo da avere trasformazioni reversibili in entrambe le parti A e B e fino ad ottenere una variazione di Entropia del gas in A uguale a $\Delta S_{1\to 2}^A$. Determinare:

a) il volume V^A e la temperatura iniziale T_1;

b) la temperatura finale T_2 e il valore finale della pressione dovuta alla forza $\vec{F}$, $f_2 = \frac{|\vec{F}_2|}{S}$;

c) il lavoro compiuto dalla sola forza $\vec{F}$ nella trasformazione.

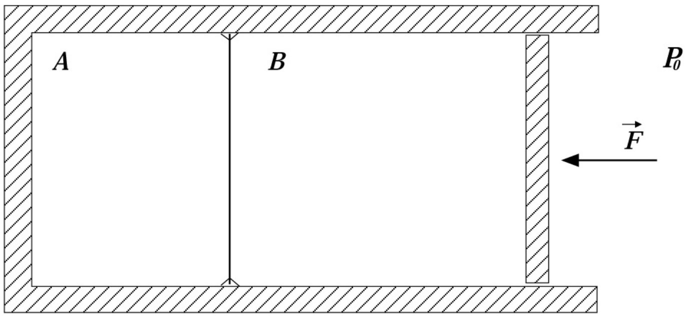

Figura 12: Descrizione dell'esercizio n. 2.

APPLICAZIONE NUMERICA: $V_1 = 32.5\,l$; $n_A = 0.4$ moli ; $n_B = 0.8$ moli ; $f_1 = 0.2\,atm$; $\Delta p_1 = 0.3\,atm$; $\Delta S_{1\to 2}^A = 0.65\,J/K$.

Esercizio 3.15 Un recipiente cilindrico con pareti isolanti e rigide, è diviso in due parti da un pistone ideale di massa trascurabile. Inizialmente, mediante opportuni fermi, il pistone è tenuto in modo che le due parti misurino rispettivamente V_0^A e V_0^B.

In A sono contenute n_A moli di Idrogeno e in B sono contenute n_B moli di Ossigeno. I due gas sono in equilibrio e la temperatura di entrambi è T_0.

1° caso) Il pistone è diatermico. In seguito alla rimozione del fermo, viene raggiunto l'equilibrio: determinare gli stati finali e la variazione d'entropia del sistema.

2° caso) Il pistone è isolante. In seguito alla rimozione del fermo, viene raggiunto l'equilibrio e si osserva che il volume finale di A è V_1^A: determinare gli stati finali e la variazione d'entropia del sistema. In questo caso l'evoluzione del sistema è intrinsecamente non determinata, ma il 2° Principio pone dei limiti ai possibili valori dei volumi finali. Calcolare la variazione di entropia nel caso di un valore V_2^A per il volume finale di A e discutere il risultato.

APPLICAZIONE NUMERICA: $V_0^A = 15\,l$; $V_0^B = 45\,l$; $n_A = 2\,moli$; $n_B = 1\,mole$; $T_0 = 300\,K$; $V_1^A = 32\,l$; $V_2^A = 36\,l$.

Esercizio 3.16 *(Equazione di Van der Waals)* Due recipienti, isolati termicamente, sono collegati da un tubo (anch'esso isolato), che possiede un rubinetto, e hanno rispettivamente volumi V_1 e V_2. Il rubinetto è chiuso e ciascun recipiente contiene n moli di azoto, in equilibrio, alla stessa temperatura t_0.

In queste condizioni l'equazione di Van der Waals:

$$\left(p + \frac{n^2 a}{V^2}\right)(V - n\,b) = n\,r\,T \tag{1}$$

(dove a, b e r sono costanti positive variabili da gas a gas)

descrive accuratamente gli stati di equilibrio dell'azoto. Essa è l'equazione di stato dei gas reali maggiormente utilizzata.

L'espressione della Energia interna $U(T,V)$, di un "gas di Van der Waals", si può ottenere facilmente dalla (1) e dalla seguente legge generale, che è detta Equazione dell'Energia Interna ed è valida per qualunque aeriforme (essa è conseguenza della definizione della funzione di stato Entropia[1]):

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = T\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V - p\,.$$

Ci si applichi, per prima cosa, a ricavare la dipendenza funzionale dal volume dell'energia interna di Van der Walls, mentre per la dipendenza funzionale dalla temperatura il ragionamento è lo stesso seguito per l'energia interna dei gas perfetti.

Si apra, dunque, il rubinetto del tubo che connette i nostri recipienti. Si attende che venga raggiunto l'equilibrio. Si determini:

a) l'eventuale variazione di temperatura;

b) la pressione finale;

c) la variazione totale d'entropia del gas.

APPLICAZIONE NUMERICA: $V_1 = 1\,l$; $V_2 = 50\,l$; $n = 1\,mole$; $t_0 = 15°C$.

Si usino le seguenti tabelle per i parametri necessari; si consideri $r \simeq R$ ed inoltre si considerino indipendenti dalla temperatura C_p e C_V e approssimatamente eguale ad R la loro differenza.

Coefficienti di Van der Waals per alcuni gas		
	a ($l^2\,atm/mole^2$)	**b** ($l/mole$)
Ammoniaca	4.170	0.037
Anidride Carbonica	3.592	0.043
Argon	1.345	0.032
Azoto	1.390	0.039
Elio	0.034	0.024
Etano	5.489	0.064
Etilene	4.471	0.057
Idrogeno	0.244	0.027
Metano	2.253	0.043
Ossigeno	1.360	0.032
Vapor d'acqua	5.464	0.030

[1]Si può verificare che applicando questa Equazione dell'Energia Interna all'equazione di stato dei gas perfetti si ottiene immediatamente, e per via teorica, che l'energia interna dei gas perfetti non dipende dal volume.

Calori specifici molari a pressione costante per alcuni gas (a 15°C e 1 atm)				
			C_p	
GAS			$J/(mole\ K)$	$cal/(mole\ K)$
Monoatomici	Elio	He	20.80	4.97
	Argon	A	20.93	5.00
Biatomici	Idrogeno	H_2	28.59	6.83
	Ossigeno	O_2	29.01	6.93
	Azoto	N_2	29.18	6.97
	Ossido di Carbonio	CO	29.05	6.94
	Ossido di Azoto	NO	29.26	6.99
	Acido cloridrico	HCl	29.59	7.07
	Cloro	Cl_2	34.12	8.15

$$\frac{5}{2}R = 20.79\, J/(mole\ K) \qquad \frac{7}{2}R = 29.10\, J/(mole\ K)$$

Esercizio 3.17 *(Frigorifero e pentola a pressione)* Una bacinella, di capacità termica trascurabile, contenente 20 *moli* d'acqua è posta in un frigorifero che impiega una potenza di $1/2KW$. Si consideri il processo in cui l'acqua è raffreddata da 25°C a 0°C e completamente congelata. Si ipotizzi un frigorifero ideale operante in maniera reversibile e che tutto il calore da esso prodotto, in questo processo, sia utilizzato senza dispersioni e ritardi temporali per portare ad ebollizione altre 20 *moli* d'acqua, anch'esse inizialmente a 25°C, contenute in una pentola a pressione (di capacità termica trascurabile), la cui pressione di lavoro è di 3 atmosfere.

a) Quante moli d'acqua sono convertite in vapore (e quasi completamente espulse attraverso la valvola), ammettendo che anche questa trasformazione sia reversibile?

b) Quanto tempo impiegherà il frigorifero nel processo considerato?

La variazione della tensione di vapore saturo con la temperatura si può trovare tabulata sui manuali tecnici ed essa, per il vapore d'acqua, è di 3 atmosfere ($2280\, mm_{Hg}$) corrispondentemente alla temperatura di $t_{3\,\mathrm{atm}}^{(\mathrm{eboll})} = 134°C$ (e si può quindi capire perché in una pentola a pressione i cibi impiegano meno tempo a cuocersi, a causa della maggiore temperatura di ebollizione dell'acqua). A questa temperatura e a questa pressione il calore latente di vaporizzazione è $\lambda_{3\,\mathrm{atm}} = 515.9\, cal/g$.

RISPOSTE "Unità D"

1.1 – $\theta_f = -7.5°C$

1.2 – **a)** $c_0 = 0.462\,J/(g\,°C)$ $\quad m_2 = 36\,g$

b) $c_0 = 0.444\,J/(g\,°C)$ $\quad m_2 = 37.4\,g$

1.3 – **a)** $\Delta U = 297 \cdot 10^3\,J$ $\quad$ **b)** $\Delta S_{\text{acqua}} = 1096\,J/K$ $\quad$ **c)** $\Delta S_{\text{U}} = 81.5\,J/K$

1.4 – **a)** $V_A = 36\,l$ $\quad V_B = 18\,l$ $\quad$ **b)** $p = 2.49\,atm$

1.5 – $\mathcal{L}_{\text{tot}} = p_A V_A (x-1)(y-1)$ $\quad Q = \mathcal{L}_{\text{tot}}$

1.6 – **a)** $\mathcal{L}_e = -159\,J$ $\quad$ **b)** $\mathcal{L}_e = -115.7\,J$

2.1 – **a)** $\mathcal{L}_{A\to B} = 2.70 \cdot 10^3 J$ $\quad$ **b)** $Q_{A\to B} = 11.8 \cdot 10^3 J$ $\quad$ **c)** $\Delta S_{\text{gas}} = 23.05\,J/K = -\Delta S_{\text{amb}}$

2.2 – $m = 23.6\,g$

2.3 – **a)** $p_{B,0} - p_{A,0} = 0.172\,atm$

b) $p_{B,0} = 0.952\,atm$ $\quad p_{A,0} = 0.779\,atm$

c) $V_{A,f} = 2.682\,l$ $\quad T_{A,f} = 286.3\,K$ $\quad V_{B,f} = V_{B,0}$ $\quad T_{B,f} = T_0$ $\quad \mathcal{L}_{\text{f.peso}} = 4.88\,J$

2.4 – **a)** $p_0 = 1.27\,atm$ $\quad n = 45.9\,moli$

b) $p_f = 1.19\,atm$ $\quad \theta_f = 79°C$ $\quad Q = 344\,kcal$

2.5 – **a)** $m^* = 191\,kg$ $\quad$ **b)** $m_2 = 2.5\,g$

2.6 – $T_f = 240\,K$

2.7 – **a)** $V_0 = 63.7\,l$ $\quad$ **b)** $T_1 = 591.5\,K$ $\quad n = 2.64\,moli$

c) $p_0 = 0.93\,atm$ $\quad \Delta S_U = 17.1\,J/K$

2.8 – **a)** $m = 1.36\,g$ $\quad V_B = 5.94\,l$ $\quad$ **b)** $V'_A = 14.7\,l$

2.9 – **a)** $n = 9.5 \cdot 10^{-3}\,moli$ $\quad F_1 = 20.0\,N$ $\quad$ **b)** $H_2 = 49.2\,cm$ $\quad Q = -7.60\,J$

2.10 – $p_f = 3.16 \cdot 10^{-2} atm$ $\quad \mathcal{L} = -0.027\,J$ $\quad Q = -0.084\,J$

2.11 – **a)** $p_B = 0.293\,atm$ $\quad T_B = 476\,K$ $\quad$ **b)** $p_C = p_A$ $\quad T_C = 382\,K$ $\quad V_C = 31.6\,l$

c) $\mathcal{L}_{\text{tot}} = -60.0\,J = Q_{C\to A}$ $\quad \Delta S_U = 0.161\,J/K$

2.12 – **a)** $h = 49.5\,cm$

b) e **c)** $$v_z^2 = 2g(z_0 - z) + \frac{2nRT'_0}{m(\gamma-1)}\left[1 - \left(\frac{z_0}{z}\right)^{\gamma-1}\right]\ ;$$

	$z_0 = 60\,cm$	$z_0 = 54\,cm$
T'_0	$254\,K$	$268\,K$
$v_{\text{max}} = v_1$	$0.53\,m/s$	$0.24\,m/s$
z_1	h	h
z_{min}	$40.6\,cm$	$45.3\,cm$
T_{max}	$309\,K$	$293\,K$
Trasformazione IRREVERSIBILE		
T_f	$282.5\,K$	$280.5\,K$
z_f	$49.88\,cm$	$49.53\,cm$

3.1 – $V_C = 2.83\,l$ $\quad \eta = 27.9\,\%$

3.2 – **a)** $T_2 = 324\,K$ $T_3 = 291.6\,K$ $T_4 = 335.6\,K$

b) $\eta = 16\,\%$

3.3 – **a)** $\eta = 22\,\%$ **b)** deve essere: $\dfrac{Q_1}{273} + \dfrac{400}{373} + \dfrac{500}{473} = 0$

c) Espansione isoterma a T_3, una ulteriore espansione isoterma a T_2 può avvenire o dopo l'espansione adiabatica o dopo la compressione adiabatica.

Alla temperatura T_1 si tratta ovviamente di una compressione isoterma.

3.4 – $-48\,cal \leq Q_3 \leq -30\,cal$ $0 \leq \mathcal{L} \leq 75.2\,J$ $0 \leq \eta \leq 33\,\%$

3.5 – **a)** $m_M = 35.1\,g$ **b)** $\Delta S_{\text{ghiaccio+acqua}} = 2.18\,J/K$ **c)** $\Delta S_U = 4.63\,J/K$

3.6 – **a)** $n = 3.00\,moli$ $V_A = 36.1\,l$ $V_B = 45.9\,l$

b) $\eta = 12.1\,\%$ $\eta_{\text{Carnot}} = 21.4\,\%$ **c)** $\Delta S_U = 3.65\,J/K$

3.7 – **a)** $\mathcal{L}_{\text{ext}} = 7.66 \cdot 10^3\,J$ **b)** $\Delta S_{\text{gas}} = -22.5\,J/K$ $p_f = 8.42\,atm$

c) $p'_f = 3.67\,atm$ $\Delta S_{\text{gas}}^{\{\text{IRR}\}} = -8.68\,J/K$ $\Delta S_U = 13.8\,J/K$

3.8 – $\langle W \rangle = 0.25\,watt$ $\eta = 3.24\,\%$

3.9 – **a)** $\Delta t_{\text{tot}} \simeq 7^h 50'$ **b)** $\Delta S_{\text{tot}} = 889\,cal/K$

3.10 – **a)** $p_i = 1.15\,atm$ $V_i = 78.0\,l$ **b)** $p_f = 1.15\,atm$ $V_f = 90.4\,l$

c) $n = 2.44\,moli$ $T_f = 516\,K$

3.11 – **a)** $\eta = 44.8\,\%$ **b)** $\Delta S_{\text{Univ}} = 1.25\,J/K$

c) $\eta_C = 60\,\%$

3.12 – **a)** discussione

b) $V_0^{(A)} = 5\,l$ $V_0^{(B)} = 7\,l$ $p_0 = 1.23\,atm$
$V_f^{(A)} = V_f^{(B)} = 6\,l$ $p_f = 1.23\,atm$ $T_f = 360\,K$

c) $\Delta S_{\text{tot}} = 0.15\,J/K$

3.13 – **A)** **rev.)** $T_f = 303\,K$ $p_f = 1\,atm$ $h_f = 97.9\,cm$ $\Delta S_{\text{gas}} = -\Delta S_{\text{amb}} = 2.22\,J/K$

A) **irr.)** $T_f = 303\,K$ $p_f = 1\,atm$ $h_f = 97.9\,cm$ $\Delta S_{\text{gas}} = 2.22\,J/K$

$\Delta S_{\text{amb}} = -1.94\,J/K$ $\Delta S_{\text{Uni}} = 0.28\,J/K$

B) **rev.)** $p_f = 1\,atm$ $T_f = 272.4\,K$ $h_f = 88.0\,cm$ $\Delta S_{\text{gas}} = \Delta S_{\text{amb}} = 0$

B) **irr.)** $p_f = 1\,atm$ $T_f = 274.7\,K$ $h_f = 88.7\,cm$ $\Delta S_{\text{gas}} = 0.17\,J/K$

3.14 – **a)** $V_1^A = 13\,l$ $T_1 = 356.5\,K$ **b)** $T_2 = 406\,K$ $f_2 = 0.833\,atm$

c) $V_2^B = 14.5\,l$ $\mathcal{L}_F = 240.3\,J$

3.15 – 1°**caso)** $T_f^A = T_f^B = T_0$ $V_f^A = 40\,l$ $V_f^B = 20\,l$ $p_f^A = p_f^B = 1.23\,atm$

$\Delta S_{\text{tot}} = 9.6\,J/K$

2°**caso)** $T_f^A = 240\,K$ $T_f^B = 420\,K$ $p_f^A = p_f^B = 1.23\,atm$

$\Delta S_{\text{tot}} = 6.37\,J/K$

se $V_f^A = 36\,l$ si ha che $\Delta S_A = 10.2\,J/K$ e $\Delta S_B = -1.44\,J/K$

e quest'ultima è proibita dal II Principio!

3.16 – Energia interna di Van der Waals: $U(T,V) = n\,c_V T - \dfrac{a\,n^2}{V} + \text{cost.}$

a) $\Delta T = -3.27\,K$ **b)** $p_f = 0.9\,atm$

c) $\Delta S_{\text{tot}} = 21.17\,J/K$

3.17 – **a)** $n' = 1.08\,moli$ **b)** $\Delta t \simeq 96.4\,s$ (tempo puramente teorico)