

Lavoro e calore

Termodinamica

- Rapporto tra lavoro e calore
- I principî della Termodinamica

Trasformazioni

- Variabili termodinamiche
 - tutte costanti in $t \rightarrow$ **equilibrio**
 - una o più non costanti \rightarrow **trasformazione**
- **Trasformazione reversibile**
 - ad *ogni istante* è noto lo **stato del sistema**
 - la trasformazione **può** essere **invertita**
 - » si può tornare allo **stato iniziale** passando per gli *stessi* **stati intermedi**
 - » viene ripristinato *non solo* lo stato iniziale **del sistema**, ma anche quello **dell'ambiente circostante**

Trasformazioni

- Trasformazione irreversibile
 - sono noti solo gli stati **iniziale** e **finale** *non* gli stati **intermedi**
 - la trasformazione **non può** essere **invertita**
 - » non si può tornare allo **stato iniziale** passando per gli stessi **stati intermedi**
 - » si può tornare allo **stato iniziale** passando attraverso altri **stati intermedi**
 - » lo stato iniziale **dell'ambiente circostante** *non* viene ripristinato

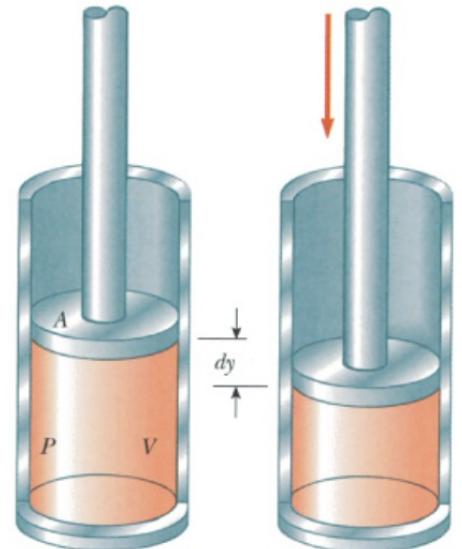
Trasformazioni

- A causa degli **attriti** le trasformazioni **reali** sono sempre **irreversibili**
 - però se **estremamente lente**: reali \approx reversibili
 - » trasformazioni **quasi-statiche**: sistema sempre \sim in equilibrio

Lavoro nelle trasformazioni

- Si abbia un volume di gas in un cilindro
- Ad uno **spostamento** dy del pistone corrisponde un **lavoro** δL delle **forze di pressione**

$$\delta L = F d y = p A d y = p d V$$



- Il lavoro totale è quindi pari a

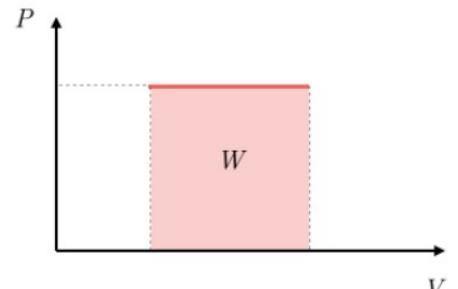
$$L = \int \delta L = \int_{V_i}^{V_f} p dV$$

Lavoro nelle trasformazioni

- Ad esempio

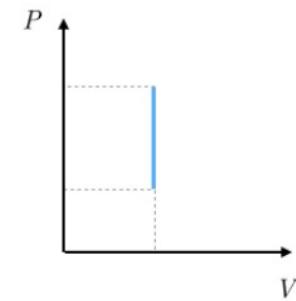
- trasformazione **isobara** ($p = \text{cost}$)

$$L = \int_{V_i}^{V_f} p dV = p \int_{V_i}^{V_f} dV = p(V_f - V_i) = p \Delta V$$



- trasformazione **isocora** ($V = \text{cost}$)

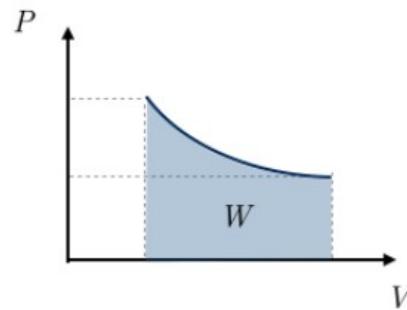
$$V_f = V_i \Rightarrow L = \int_{V_i}^{V_f} p dV = 0$$



- trasformazione **isoterma** ($T = \text{cost}$)

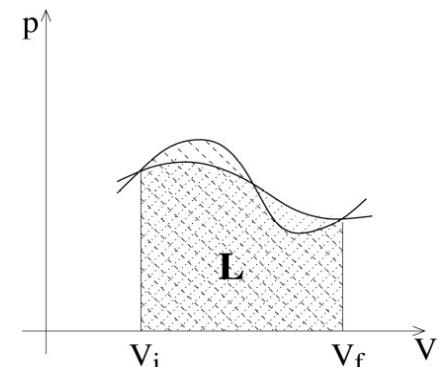
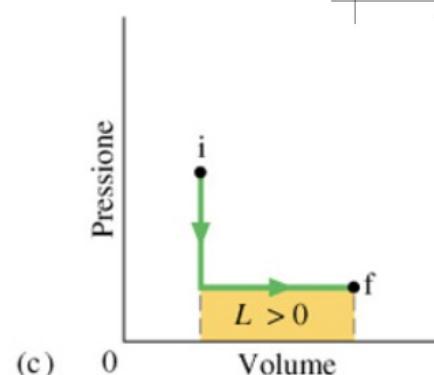
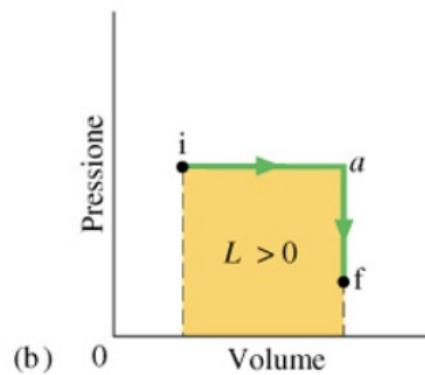
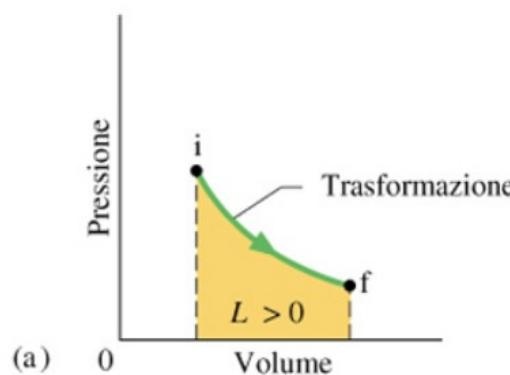
$$T = \text{cost} \Rightarrow p = \frac{nRT}{V}$$

$$L = \int_{V_i}^{V_f} p dV = nRT \int_{V_i}^{V_f} \frac{dV}{V} = nRT (\ln V_f - \ln V_i) = nRT \ln \frac{V_f}{V_i}$$



Lavoro nelle trasformazioni

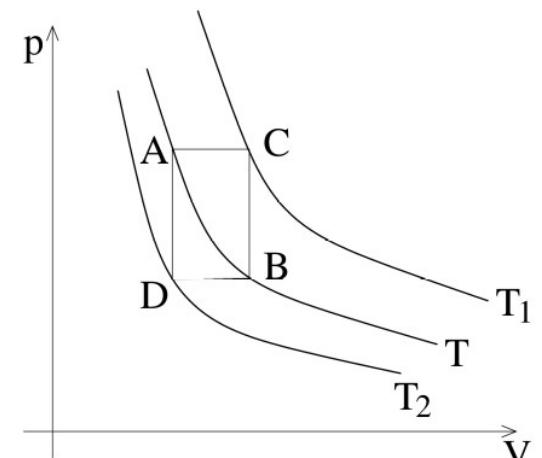
- Il lavoro **dipende dal tipo** di trasformazione!
 - partendo dallo stesso stato iniziale e arrivando allo stesso stato finale si hanno lavori diversi
- Ad esempio



- Il **lavoro nelle trasformazioni termodinamiche non è conservativo!**
 - $\delta L \neq dL$

Calore nelle trasformazioni

- Data una certa **quantità di gas**, la si faccia **passare** da uno stato A(p_A, V_A, T) ad uno stato B(p_B, V_B, T)
 - stessa temperatura
- Si calcoli il **calore scambiato**
 - se A \rightarrow C(p_A, V_B, T_1) \rightarrow B



$$\Delta Q_{ACB} = \Delta Q_{AC} + \Delta Q_{CB} = C_p(T_1 - T) + C_V(T - T_1) = (C_p - C_V)(T_1 - T)$$

- se A \rightarrow D(p_B, V_A, T_2) \rightarrow B

$$\Delta Q_{ADB} = \Delta Q_{AD} + \Delta Q_{DB} = C_V(T_2 - T) + C_p(T - T_2) = (C_p - C_V)(T - T_2)$$

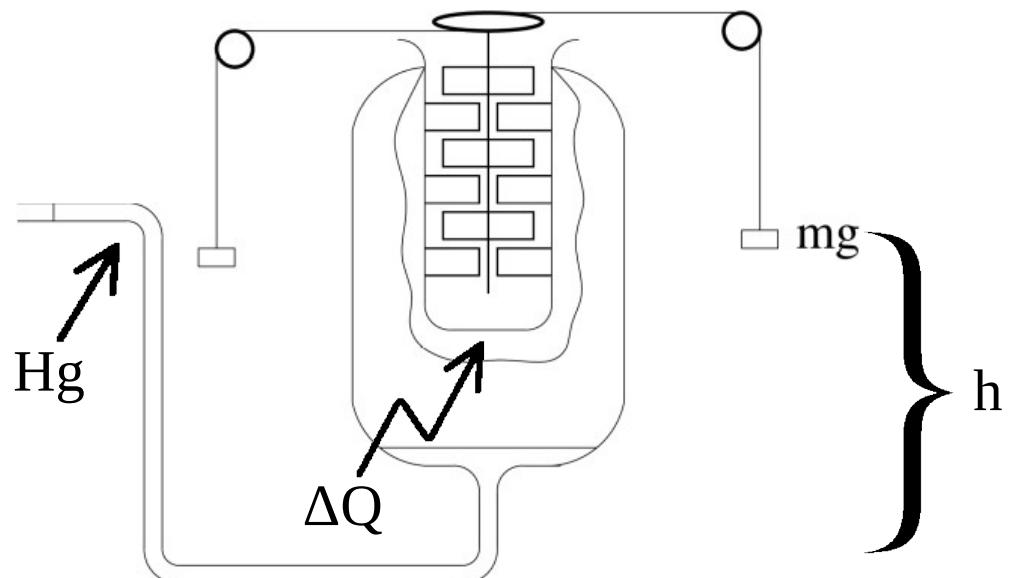
- i due scambi sono diversi: $\Delta Q_{ACB} \neq \Delta Q_{ADB}$!

Calore nelle trasformazioni

- Il **calore scambiato** in una trasformazione *dipende* dalla **trasformazione**
 - e quindi **da come** si passa dallo stato iniziale allo stato finale
- Lo **scambio di calore** nelle **trasformazioni termodinamiche** **non** è **conservativo!**
 - $\delta Q \neq dQ$

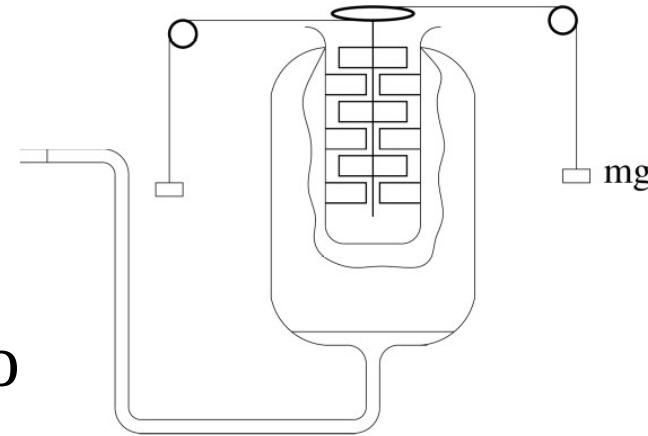
Esperienza di Joule

- Rapporto Lavoro eseguito \Leftrightarrow Calore prodotto
- Esperienza di Joule
 - mulinello immerso in un calorimetro



Esperienza di Joule

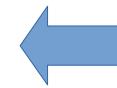
- Trasformazione di **lavoro** in **calore**
 - le pale fisse impediscono al fluido di mettersi in moto → non acquista K
 - le masse vengono lasciate cadere e fanno girare il mulinello, quindi
- E_{pot} della masse = E_{k} delle masse + attrito + lavoro
- $$2mg h = 2 \left(\frac{1}{2} m v^2 \right) + E_{\text{attr}} + L$$
- Joule misurò con **estrema precisione** tutti gli **attriti** (carrucole, mulinelli, ecc.)
 - infine si lascia che il sistema torni nello **stato iniziale**
 - » in modo tale da non modificare lo **stato interno** del sistema



Esperienza di Joule

- Così si calcola il **lavoro prodotto** e si misura il **calore scambiato**
- Dato che il sistema torna poi nelle **condizioni iniziali** (T, p, \dots) si tratta di una **trasformazione ciclica**
- Joule trovò che per *qualsiasi* sistema con *qualsiasi* fluido e per *qualsiasi* temperatura il **rapporto** fra **lavoro prodotto** e **calore scambiato** era **costante**

$$\frac{\oint \delta L}{\oint \delta Q} = J = 4.186 \text{ J/cal}$$



**Equivalente
meccanico del calore**

(non è 1 perchè accidentalmente le unità di misura di L e ΔQ sono diverse)

Il calore

- Questo permette di interpretare cosa sia il calore:

il calore è una **forma di energia**
come capacità di compiere un lavoro

- Nel SI: grandezza **derivata**
 - $[Q] = \text{J}$

Primo Principio della Termodinamica

- In una **trasformazione ciclica** il **lavoro compiuto** è *pari* alla quantità di **calore scambiato**

$$\oint \delta L = \oint \delta Q$$

- E' una forma più generale della **conservazione dell'energia**

Moto perpetuo

- Per il I Principio in un ciclo **chiuso** il **lavoro totale** prodotto è uguale alla **quantità di calore** scambiato: $L_{tot} = \Delta Q$
- Questo implica che *non è possibile* costruire una **macchina** che **lavorando ciclicamente** produca **più** lavoro di quanto calore le sia stato fornito
 - o, più in generale, di quanta energia le sia stata fornita
- Quindi per il I Principio è **impossibile** il **moto perpetuo di prima specie**
- Una macchina **non ciclica** può farlo
 - usando la sua **energia interna**
 - ma allora non torna nello stato iniziale: non è ciclica