

# Lavoro termodinamico

si ha scambio di energia mediante *lavoro termodinamico* quando si ha un cambiamento *macroscopico* della configurazione di un sistema meccanico

Nota bene: in termodinamica non e' una singola forza, o un campo di forze, a compiere lavoro,

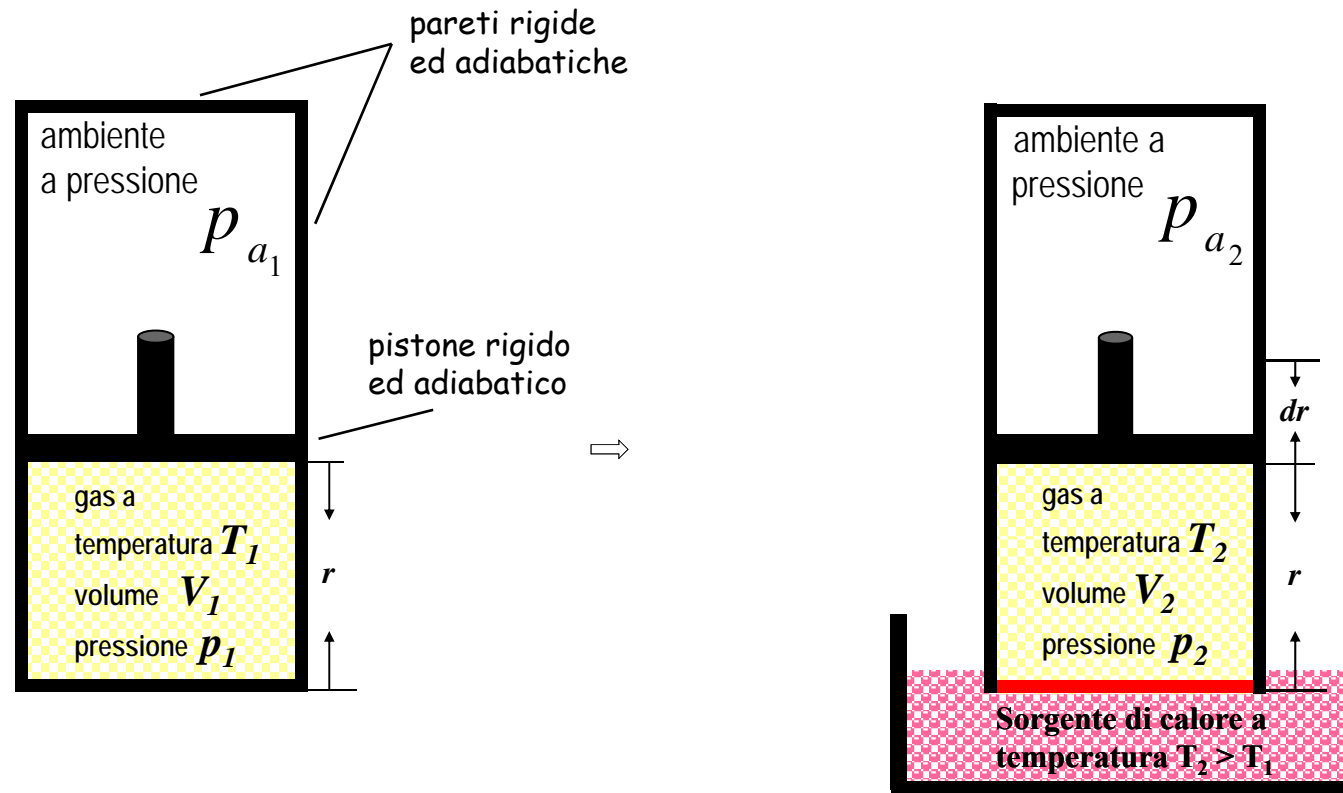
e' il *sistema* che compie lavoro sull'ambiente circostante (segno positivo) e/o

l' *ambiente* circostante sul sistema (segno negativo)

Nota bene: nel calcolo del lavoro termodinamico non si tiene conto del lavoro delle forze interne

intramolecolari che compongono il sistema o degli scambi di energia tra le varie parti del sistema

es. cilindro riempito di gas ideale e pistone mobile ( il gas e' il sistema in esame ) fornendo calore al sistema si osserva che il gas si espande e che il pistone si solleva di un tratto  $dr$ ,



si verifica sperimentalmente che  $T_2 > T_1$  che  $p_{a_2} > p_{a_1}$  e chiaramente  $V_2 > V_1$

se ne deduce che il sistema sta facendo *lavoro motore* verso l'esterno mentre le forze esterne compiono *lavoro resistente*

se si assumesse che l' attrito sia nullo e che il peso del pistone sia trascurabile

la sola forza agente sarebbe quella dovuta alla pressione esterna  $p_a$

e per uno spostamento infinitesimo  $dr$  il lavoro infinitesimo  $dL = \vec{F} \cdot d\vec{r}$

sarebbe esprimibile come  $dL = Fdr = p_a Sdr = p_a dV$

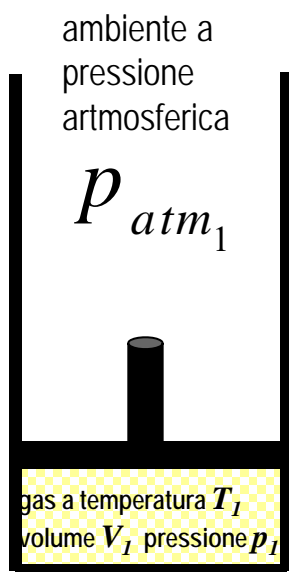
per una trasformazione finita del volume del gas dal volume iniziale  $V_A$

al volume  $V_B$  il lavoro effettuato dal sistema sull'ambiente sarebbe

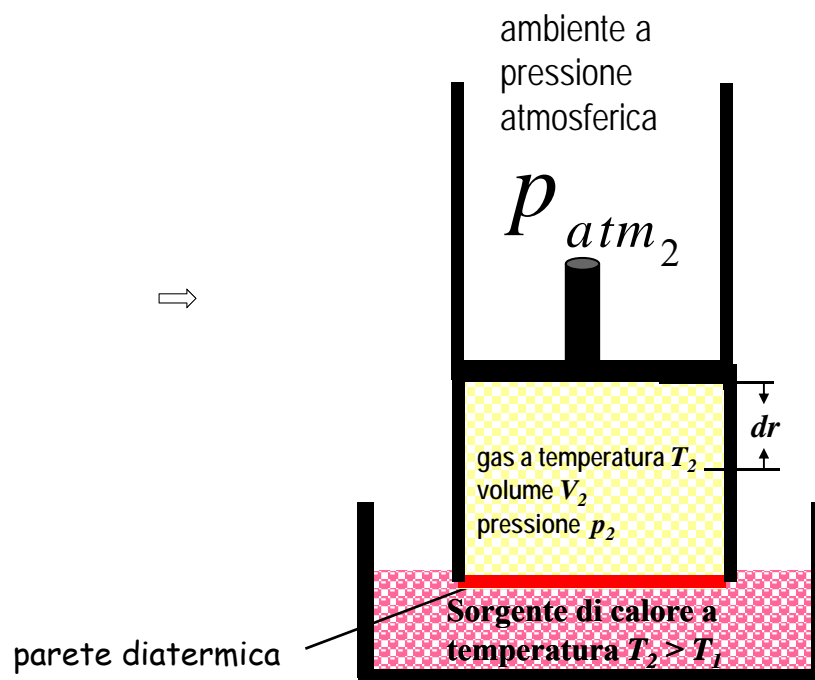
$$L = \int_{V_A}^{V_B} p_a(V) dV$$

ma l' integrale puo' essere calcolato solo se *durante tutta la trasformazione* si conosce come varia la pressione esterna in funzione del volume, ossia si conosce la  $p_a(V)$  e questo avviene soltanto in alcuni casi particolari :

- se la pressione esterna non varia durante la trasformazione  $\rightarrow p_a = \text{costante}$   
 ad es. se la trasformazione di un ( piccolo ) volume di gas avviene a pressione atmosferica come e' nel caso di molte reazioni chimiche



⇒



quindi

$$T_2 > T_1 \quad V_2 > V_1$$

e

$$P_{atm_1} \cong P_{atm_2}$$

- nella espansione libera del gas nel vuoto → pressione esterna nulla  
→  $p_a = 0$
- durante una trasformazione quasi statica (*reversibile o irreversibile*)  
→  $p_a \equiv p$  ad ogni istante di tempo dove  $p$  e' la pressione del gas

se la trasformazione fosse "*quasi statica*" oppure e ancor meglio se "*reversibile*"  
si potrebbe determinare il lavoro *in funzione delle sole coordinate*  
*termodinamiche del sistema stesso*

( pressione, volume e temperatura del gas ) sempre a patto che sia noto come varia la pressione

del sistema al variare del volume ossia che sia nota la forma della  $p(V)$

o della  $p(T)$  dato che nei gas perfetti  $p = p(V,T)$

o in altri termini che sia nota l'equazione di stato del sistema

## Trasformazioni quasi statiche e trasformazioni reversibili

qualunque sia il tipo di trasformazione *quasi statica, reversibile o irreversibile*

percorrendo la trasformazione in senso inverso la variazione di energia interna

sarà sempre  $\Delta U_{BA} = -\Delta U_{AB}$  perché l'energia interna è

una *funzione di stato*

data una qualsiasi trasformazione termodinamica da  $A$  a  $B$

nella quale sia scambiato il lavoro  $L_{AB}$  e la quantità di calore  $Q_{AB}$

per il primo principio  $\Delta U_{AB} = Q_{AB} - L_{AB}$  ossia  $Q_{AB} = \Delta U_{AB} + L_{AB}$

se la trasformazione fosse quasi statica  $dL = p(V)dV$  ma,

per via degli attriti in gioco una parte del lavoro fatto dalle forze di attrito

verrà dissipata sotto forma di calore che non potrà mai essere reso integralmente al sistema

sotto forma di lavoro → secondo principio della termodinamica

ripercorrendo la trasformazione in senso inverso semplicemente scambiando il segno del

calore e del lavoro scambiati non si riporterebbero il sistema e l'ambiente allo stato iniziale



se la trasformazione fosse reversibile  $dL = p(V)dV$

se si conosce l'equazione di stato del sistema si saprà sempre esattamente

come varia  $p$  in funzione di  $V$ , (o di  $T$ ) durante tutta la trasformazione ,

si sarà in grado di calcolare l'integrale definito che permette di calcolare il lavoro totale

effettuato da  $A$  a  $B$   $\Rightarrow L_{AB} = \int_{V_A}^{V_B} p(V)dV$

ripercorrendola in senso inverso per le proprietà matematiche degli integrali definiti

$$L_{BA} = \int_{V_B}^{V_A} p(V)dV = -\int_{V_A}^{V_B} p(V)dV = -L_{AB}$$

dunque  $\Delta U_{BA} = Q_{BA} - L_{BA}$  ossia  $Q_{BA} = \Delta U_{BA} + L_{BA}$

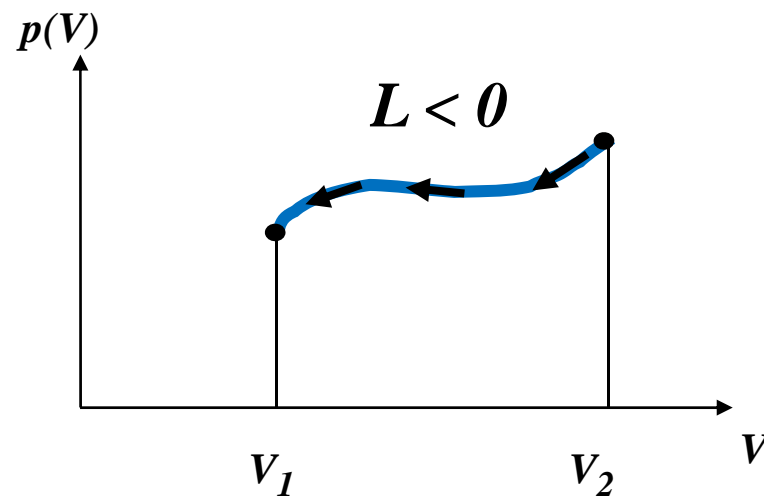
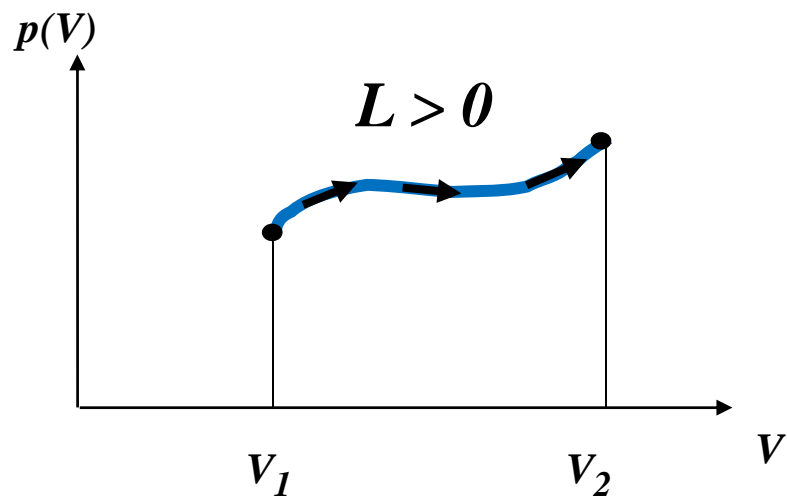
ovvero  $Q_{BA} = -\Delta U_{AB} - L_{AB} = -(\Delta U_{AB} + L_{AB}) = -Q_{AB}$

dunque in una trasformazione reversibile e' sufficiente cambiare il segno del calore e del

lavoro scambiati per ritornare alla condizione iniziale

nel piano di Clapeyron il lavoro durante una trasformazione *reversibile* e' dato

dall'area sottesa dalla curva che descrive la trasformazione termodinamica



Lavoro ( termodinamico ) di un gas perfetto in trasformazioni termodinamiche reversibili

se la trasformazione e' reversibile  $dL = p( V )dV$

$$\Rightarrow L = \int_{V_A}^{V_B} p( V )dV$$

in questo caso l'equazione di stato dei gas perfetti

e' utilizzabile istante per istante durante *tutta* la trasformazione

e la si potra' sfruttare per determinare l'espressione analitica della  $p(V)$

per un gas perfetto  $pV = nRT \Rightarrow p( V ) = \frac{nRT}{V}$

ad es. se la trasformazione reversibile del gas avvenisse a temperatura costante  $T$

$$L = \int_{V_A}^{V_B} p(V) dV = \int_{V_A}^{V_B} \frac{nRT}{V} dV = nRT \int_{V_A}^{V_B} \frac{dV}{V} = nRT \ln \frac{V_B}{V_A}$$

se la trasformazione reversibile del gas avvenisse a pressione costante  $p$

$$L = \int_{V_A}^{V_B} p(V) dV = \int_{V_A}^{V_B} p dV = p \int_{V_A}^{V_B} dV = p(V_B - V_A)$$

se la trasformazione reversibile del gas avvenisse a volume costante  $V_A$

$$L = \int_{V_A}^{V_B} p(V) dV = \int_{V_A}^{V_A} p(V) dV = 0$$

**Backup slides**