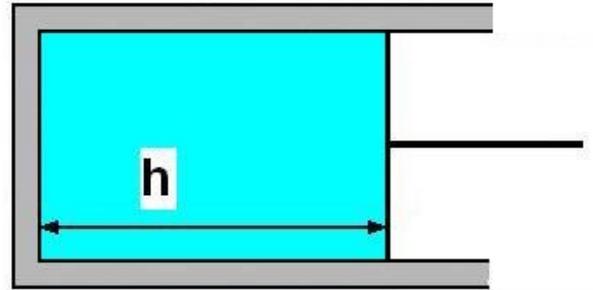


# Lavoro nelle trasformazioni quasi statiche

Consideriamo un fluido contenuto in cilindro chiuso da un pistone scorrevole, di area  $A$  e distante  $h$  dalla base:  
in uno spostamento infinitesimo quasi statico del pistone  $dh$  il lavoro compiuto dalle forze di pressione del fluido agenti sul pistone è dato da:



$$\delta L = pA dh = p dV \quad (1)$$

$\delta L > 0$  espansione

$\delta L < 0$  compressione

La (1) ha validità generale per le trasformazioni quasi statiche

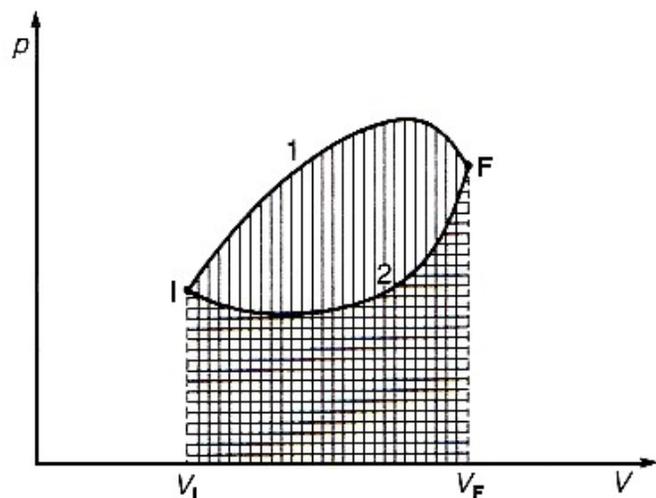
Per una trasformazione finita da stato iniziale I a stato finale F

$$L = \int_{V_I}^{V_F} p dV \quad \text{essendo } p > 0 \quad \rightarrow \quad \begin{array}{l} \text{se } V_F > V_I, L > 0 \\ \text{se } V_F < V_I, L < 0 \end{array}$$

Diagramma di Clapeyron

$L$  = area del trapezoide delimitato dalla curva che descrive la trasformazione e l'asse delle ascisse  $V$ .

Per una trasformazione ciclica:  
 $L$  = area racchiusa dalla curva che rappresenta il ciclo



**$L$  dipende quindi in generale dalla particolare trasformazione effettuata (e quindi non è una funzione di stato!)**

# Forze conservative e dissipative

## Per un Sistema meccanico

### Teorema delle forze vive

$$d(K + V^{(i)}) - \delta L^{(i,nc)} = \delta L^{(e)}$$

Se le forze interne sono **SOLO** conservative  $\rightarrow \delta L^{(i,nc)} = 0$

Se anche

$\delta L^{(e)} = 0$  (sistema isolato)  $\rightarrow K + V^{(i)} = U$  si conserva

**U** energia meccanica interna del sistema

Se invece

$\delta L^{(e)} \neq 0$  ma forze esterne conservative  
**conservazione energia meccanica**

Lavoro ambiente  $\rightarrow$  sistema  $L^{(e)} = U(F) - U(I)$

Si definisce:

Lavoro sistema  $\rightarrow$  ambiente  $L = U(I) - U(F)$

In questo caso le variazioni dell'energia meccanica interna dipendono solo dagli stati I e F e non dal percorso effettuato

Se invece

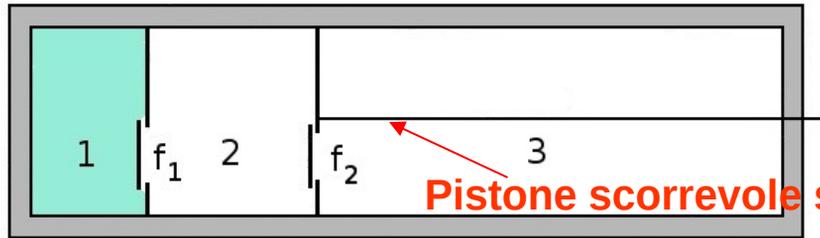
$\delta L^{(e)} \neq 0$  ma ci sono anche forze esterne non conservative: energia meccanica non si conserva, **diminuisce**  $\rightarrow$  dissipazione correlata a variazioni di temperatura  $\rightarrow$  necessità di indagine dal punto di vista termodinamico

In genere il lavoro L compiuto da o su un sistema termodinamico che passa da stato I a stato F dipende dalla trasformazione che collega i due stati. Non sarebbe quindi possibile determinare L come  $U(I) - U(F)$  ma .....

# Lavoro nelle trasformazioni adiabatiche

Sistema termodinamico (gas) contenuto entro pareti adiabatiche  
in tal caso vedremo che vale  $L = U(I) - U(F)$

Verifica sperimentale:



**Pistone scorrevole senza attrito**

Inizialmente gas in  $V_1$

1) **apertura  $f_1$**  :

espansione libera (tratteggio IA):  
 $L=0, \Delta T \approx 0$  (= 0 se gas perfetto)

2) **pistone da  $V_A$  a  $V_B$**  :

espansione adiabatica quasi  
statica AB- $\rightarrow$

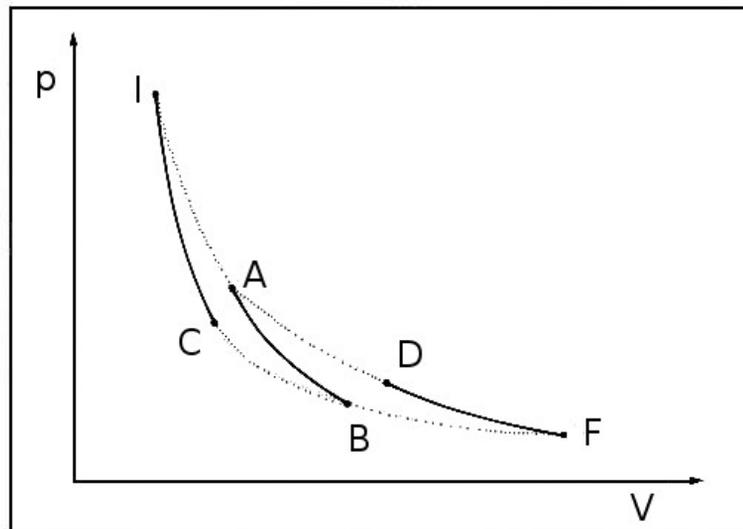
V aumenta, T diminuisce,

$$L_{AB}^{(ad)} = \int_{V_A}^{V_B} p \, dV$$

3) **apertura  $f_2$**

espansione libera (tratteggio BF):  
 $L = 0, \Delta T \approx 0$  (= 0 se gas perfetto)

Concludendo  $L = L_{AB}^{(ad)}$



Altrimenti ICF oppure IDF per le  
quali

$$L = L_{IC}^{(ad)} \quad \text{o} \quad L = L_{DF}^{(ad)}$$

**Sperimentalmente  $L_{AB}^{(ad)} = L_{IC}^{(ad)} = L_{DF}^{(ad)} = L$**

**“Il lavoro adiabatico, compiuto da un sistema termodinamico in qualsiasi trasformazione che collega due determinati stati, dipende solo dagli stati iniziali e finali considerati e non dalla particolare trasformazione adiabatica seguita”**

Nell'esempio mostrato esistono infinite trasformazioni adiabatiche da I a F ma nessuna che vada da F a I (invertibilità delle espansioni adiabatiche e NON invertibilità della espansione libera)

Sperimentalmente: se non esiste trasformazione adiabatica da A a B ne esiste almeno una che va da B ad A

# Primo principio della termodinamica

## Enunciato

“Per ogni coppia di stati di equilibrio di un sistema termodinamico qualsiasi esiste almeno una trasformazione adiabatica che va dal primo al secondo oppure dal secondo al primo; quando le trasformazioni adiabatiche sono più di una il lavoro corrispondente, detto **lavoro adiabatico**, è lo stesso per tutte e quindi il lavoro adiabatico dipende dallo stato iniziale e finale, ma **NON** dalla particolare trasformazione adiabatica che li collega”

## Definizione di “Energia interna” $U$ (funzione del singolo stato)

$$U(A) = \begin{cases} -L_{OA}^{(ad)} & \text{se esiste trasformazione adiabatica } O \rightarrow A \\ +L_{AO}^{(ad)} & \text{se esiste trasformazione adiabatica } A \rightarrow O \end{cases}$$

L'energia interna è definita a meno di una costante additiva arbitraria (come energia potenziale delle forze conservative), corrispondente alla scelta arbitraria di  $O$ .

Si ha quindi 
$$L_{IF}^{(ad)} = L_{IO}^{(ad)} + L_{OF}^{(ad)} = U(I) - U(F)$$

L'energia interna rappresenta il contenuto energetico di un sistema termodinamico che si impoverisce quando il sistema compie lavoro adiabatico sull'ambiente esterno  $(L_{IF}^{(ad)} > 0 \rightarrow U(F) < U(I))$

mentre si arricchisce quando è l'ambiente a fare lavoro adiabatico sul sistema  $(L_{IF}^{(ad)} < 0 \rightarrow U(F) > U(I))$

Se il sistema termodinamico passa da uno stato  $I$  ad uno stato  $F$  tramite una trasformazione adiabatica avremo

$$L_{IF}^{(ad)} = U(I) - U(F) = -\Delta U \quad \rightarrow \quad L_{IF}^{(ad)} + \Delta U = 0$$

Se la trasformazione non è adiabatica, la variazione  $\Delta U$  resta la stessa (in quanto  $U$  dipende solo dagli stati  $I$  e  $F$ ) ma cambia il lavoro (che in generale dipende dalla trasformazione), cioè

$$L_{IF}^{(non\ ad)} \neq L_{IF}^{(ad)} \quad \rightarrow \quad L_{IF}^{(non\ ad)} + \Delta U \neq 0$$

# Quantità di calore

La differenza tra trasformazione adiabatica e non adiabatica consiste nel mettere delle pareti diatermiche al posto di quelle adiabatiche, permettendo l'interazione termica tra sistema termodinamico e ambiente. Tale interazione produce un cambiamento di alcuni parametri di stato sia del sistema che dell'ambiente, ovvero delle corrispondenti energie interne (funzioni di stato). Quindi **Interazione termica → scambio di energia**

**Trasformazione adiabatica →  $L + \Delta U = 0$  scambio energia meccanica**

**Trasformazione non adiabatica →  $L + \Delta U = Q$  scambio energia meccanica e termica**

**Q = quantità di calore (modo termico di scambiare energia)**

Per trasformazioni non adiabatiche,

$Q > 0$  se la quantità di calore è acquistata dal sistema (se  $L=0$ ,  $\Delta U = Q > 0$ )

$Q < 0$  se la quantità di calore è ceduta dal sistema (se  $L=0$ ,  $\Delta U = Q < 0$ )

Sappiamo che l'Energia interna è una funzione di stato mentre il lavoro e la quantità di calore dipendono dalla trasformazione scelta per passare da stato iniziale I a stato finale F. Per una trasformazione Infinitesima scriveremo quindi

$$\delta Q - \delta L = dU$$

**Espressione matematica del primo principio della termodinamica**

In una generica trasformazione il sistema può aumentare o diminuire la sua energia interna tramite scambi energetici con l'ambiente.

Il **sistema globale** = sistema termodinamico + ambiente non interagisce con nient'altro né termicamente ( $Q=0$ ) né meccanicamente ( $L=0$ ) e la sua energia interna non varia ( $\Delta U=0$ ).

Quindi la somma delle energie interne di tutti i sistemi termodinamici che in un dato processo interagiscono tra loro rimane costante durante il processo (**principio di conservazione dell'energia**)