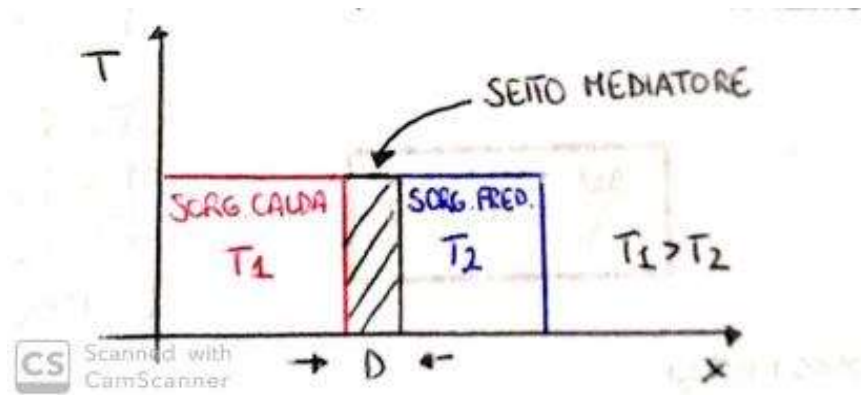


# Lezione 2: Trasporto del calore: conduzione

**Conduzione:** contatto fisico tra una parte e l'altra, per cui il calore è materialmente condotto.

Esaminando il caso descritto – generico- dei due corpi posti a contatto per mezzo di un setto di spessore  $D$ , si osserverà la quantità di calore  $\Delta Q$  scambiata che fluisce da  $T_1$  a  $T_2$ , data dalla legge di Fourier.



$\Delta Q$  = scambiato attraverso una sezione trasversale di una parete.

$S$  = area della sezione

$\Delta t$  = intervallo di tempo necessario a trasferire  $\Delta Q$

$w$  = costante di proporzionalità caratteristica del materiale della parete (conducibilità termica).

$\Delta T$  = gradiente termico

$D$  = spessore della parete

In genere metalli e soluzioni elettrolitiche sono buoni conduttori del calore ( $w$  grande)

**LEGGE DI FOURIER**  
(in termini finiti):

$$\frac{\Delta Q}{S \Delta t} = \frac{w(T_1 - T_2)}{D}$$

# Trasporto del calore: convezione

---

**Convezione:** è un fenomeno per cui il calore viene trasportato attraverso moti macroscopici di insieme di un fluido da regioni calde a regioni fredde. Non devono necessariamente essere due corpi a contatto, ma anche uno interno all'altro. Un sistema del genere non è all'equilibrio. (es. acqua degli oceani e aria dell'atmosfera si riscaldano/raffreddano soprattutto così). La modalità di scambio per conduzione può verificarsi per tutti gli stati di aggregazione della materia, mentre la convezione interessa solo le forme fluide.

**LEGGE DI NEWTON:**

$$\frac{\Delta Q_{\text{conv.}}}{S \Delta t} = W_{\text{conv.}} \Delta T$$

# Trasporto del calore: irraggiamento

**Irraggiamento:** Un corpo ad una temperatura  $T$  emette onde elettromagnetiche con un certo spettro continuo. Maggiore è  $T$ , maggiore è l'energia irraggiata come onde elettromagnetiche e più elevata la frequenza di picco delle onde emesse (più piccola quindi la lunghezza d'onda). Le onde elettromagnetiche sono anche assorbite del tutto o in parte dai corpi che per questo aumentano la loro energia interna (e anche le temperature). Un corpo nero perfetto assorbe in modo totale

La potenza termica irraggiata per unità di superficie diventa

$$\frac{\Delta Q}{S \Delta t} = W_{irr.} \Delta T^4$$

$$= W_{irr.} (T_1^4 - T_2^4)$$

dove  $\Delta T$  = gradiente termico tra corpo caldo e corpo freddo che riceve la potenza irraggiata

**Si dicono sorgenti lambertiane quelle che irraggiano in maniera uniforme in tutte le direzioni possibili dello spazio. Un esempio è il Sole.**

**LEGGE DI STEFAN – BOLTZMANN:**

$$I = e \sigma T^4$$

$\sigma$  (costante di Stefan Boltzmann) =  $5,67 \cdot 10^{-8}$  w/ (m<sup>2</sup> K<sup>4</sup>)

$0 < e < 1$  costante di emissività che dipende dal corpo

$I$  = intensità irraggiata

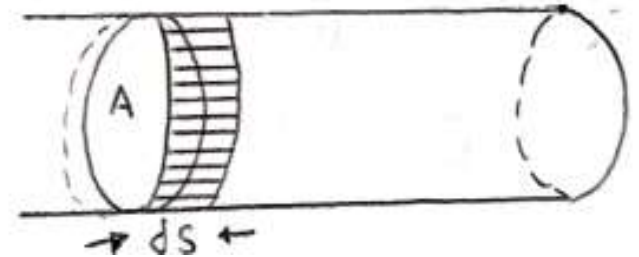
$T$  = temperatura del corpo nero

# Lavoro termodinamico

Tipicamente una macchina termica è basata su pistoni che scorrono nei cilindri.

LAVORO INFINITESIMO:

$$dL = \vec{F} \cdot d\vec{S}$$



La forza  $F$  con cui il sistema agisce sull'ambiente esterno è dovuta alla pressione del gas (o liquido o altro) all'interno del cilindro, pertanto:

$$|\vec{F}| = P \cdot A$$

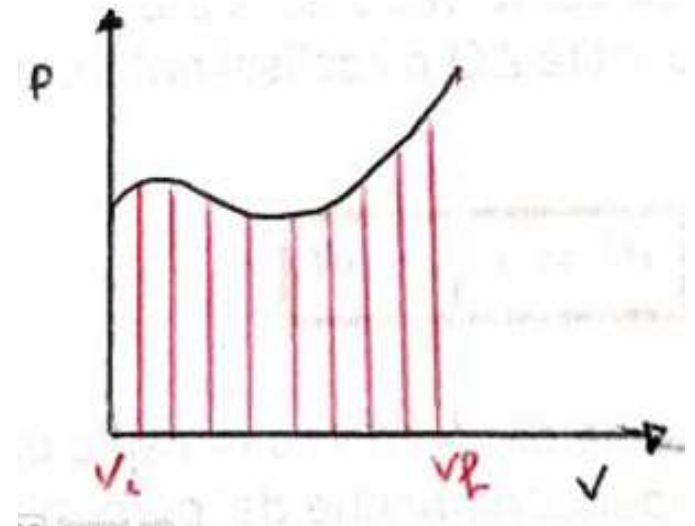
$A$  = area di base del cilindro

Inoltre  $F$  è normale all'area  $A$  del pistone/cilindro.

$$dL = P \cdot A \cdot dS = P \cdot (AdS) = P \cdot dV$$

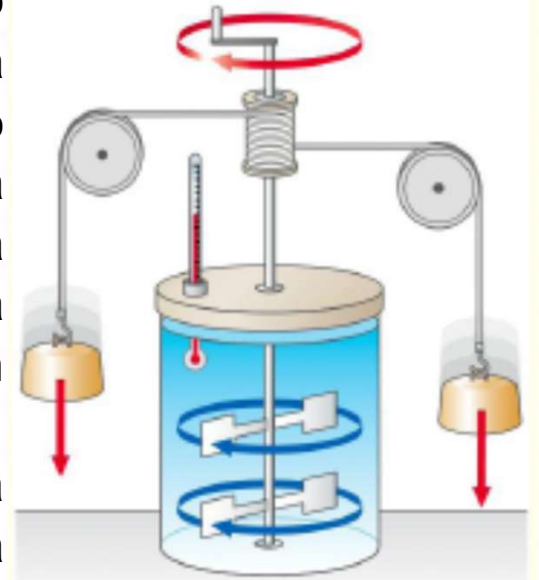
La pressione dipende del volume  $P = P(V)$ . Quindi:

$$L = \int_i^f dL = \int_{V_i}^{V_f} P(V) dV$$



# Esperienza di Joule ed equivalente meccanico della caloria

**Calorimetro delle mescolanze:** è un contenitore isolato dall'ambiente esterno, che impedisce un  $\Delta Q$  tra interno ed esterno. Ha due pesi i quali sono opportunamente legati a un asse centrale che può ruotare. I pesi cadendo mettono in rotazione l'asse con palette (energia meccanica viene trasferita al sistema). Quindi la temperatura dell'acqua sale (le palette in rotazione riscaldano l'acqua per effetto della viscosità dell'acqua la quale è l'attrito riscontrabile tra i vari strati costituenti un fluido, nonché l'attrito tra il fluido, l'acqua in questo caso, e le pareti). La dissipazione di energia meccanica per effetto della viscosità dell'acqua, provoca un aumento misurabile della temperatura dell'acqua da cui si può calcolare un  $\Delta Q$  trasmesso al sistema. Questo calore trasmesso è dovuto alla dissipazione di un uguale ammontare di energia potenziale meccanica (conservazione dell'energia). Il rapporto del lavoro fatto dalla forza di peso sul sistema  $L = -\Delta U_p$  ( $U_p$  energia potenziale del peso,  $mgh$ ) su  $\Delta Q$  è costante. Tale costante è, infine, un fattore di conversione di unità di misura e si chiama equivalente meccanico della caloria.



**EQUIVALENTE MECCANICO DELLA CALORIA, J:**

$$J = \frac{L}{\Delta Q} = \frac{4,186 J}{1 cal} = \frac{4186 J}{1 Kcal}$$

# I Principio della Termodinamica

---

## I PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA – ENERGIA INTERNA

Il I principio della termodinamica si può vedere come una forma generalizzata della conservazione dell'energia.

$$\Delta Q = L + \Delta U$$

**$\Delta Q$**  = quantità di calore fornita al sistema ( $\Delta Q > 0$  assorbito dal sistema,  $\Delta Q < 0$  ceduto dal sistema)

**$L$**  = lavoro fatto dal sistema sull'esterno ( $L > 0$ , quando è compiuto dal sistema sull'esterno, quindi espansione)

**$\Delta U$**  = variazione di una nuova funzione/grandezza termodinamica, l'energia interna.

**$U$ , energia interna:** è la somma dell'energia cinetica e potenziale di tutte le particelle che compongono il sistema.

# Energia interna

ENERGIA INTERNA:

$$U = \sum_i (K_i + U_i)$$

$U_i$  = energia potenziale della  $i$ -esima particella.

$U$  è una funzione di stato ovvero dipende solo dallo stato termodinamico del sistema  $\Delta U = U(B) - U(A) = \Delta U(A,B)$ , ma non dipende dalla trasformazione termodinamica per andare da  $A$  a  $B$ .

In forma infinitesima (si considera una quantità scambiata  $\Delta Q$  piccolissima) per trasformazioni termodinamiche infinitesime:

$dU \Rightarrow$  “ $d$ ” indica che la variazione infinitesima di  $U$  non dipende dal percorso ma solo dagli stati finale e iniziale (la « $d$ » latina).

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

$\delta Q, \delta L \Rightarrow$  “ $\delta$ ” (greco) indica che le variazioni di  $Q$  e  $L$  dipendono anche dal percorso e non solo dagli stati finale e iniziale.

# I principio per trasformazioni cicliche

$$\Delta U^{(1)} (A \rightarrow B) = \Delta U^{(2)} (A \rightarrow B)$$

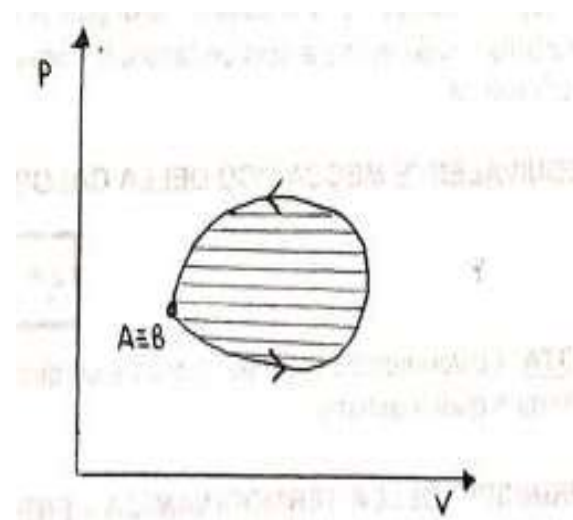
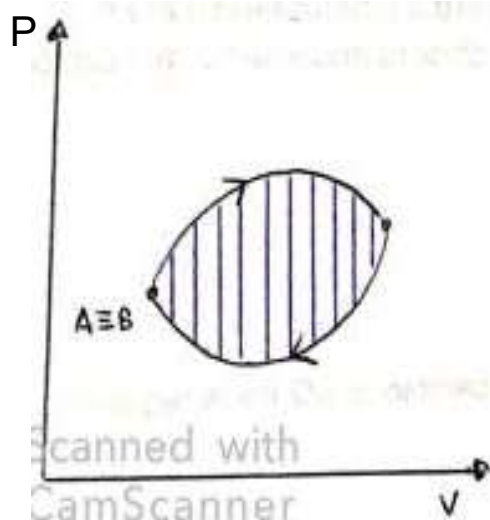
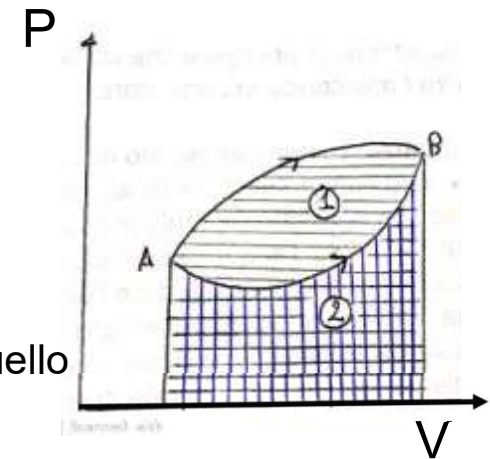
$L^{(1)} (A \rightarrow B) \neq L^{(2)} (A \rightarrow B)$  area verde  $\neq$  area blu

In particolare  $L^{(1)} (A \rightarrow B) > L^{(2)} (A \rightarrow B)$

Analogamente si ha in generale che:

$$\Delta Q^{(1)} (A \rightarrow B) \neq \Delta Q^{(2)} (A \rightarrow B)$$

Per trasformazioni cicliche si ha  $A = B$  (punto iniziale che coincide con quello finale).



$$\Delta U = U^{(B)} - U^{(A)} \quad L (A \rightarrow B) > 0 \text{ verso orario}$$

$$L (A \rightarrow B) < 0 \text{ verso antiorario}$$

$\Delta U = 0 \quad \Delta Q = L$  (che può essere  $>$  oppure  $<$  di 0) per **Trasformazioni cicliche**

# Trasformazioni termodinamiche

---

Una trasformazione si dice reversibile (o quasi statica) quando cambiando di un  $\epsilon$  piccolo a piacere le condizioni di trasformazione s'inverte il senso della trasformazione. Quando ciò non si verifica la trasformazione si dice irreversibile. A rigore tutte le trasformazioni reali sono irreversibili. Si tratta quindi di un concetto limite.

**Isobara:**  $P = \text{cost}$

**Isovolumica (isocora):**  $V = \text{cost}$

**Adiabatica:**  $\Delta Q = 0$  (il calore scambiato tra sistema e ambiente esterno è nullo)

**Isoterma:**  $T = \text{cost}$

Per quello che concerne la rappresentazione grafica di trasformazioni irreversibili, sul piano di Clapeyron, questa non è possibile, se non sottoforma di una curva del tutto indicativa. La trasformazione irreversibile non passa attraverso stati di equilibrio e, quindi, non è rappresentabile da punti del piano di Clapeyron che sono punti di equilibrio termodinamico.

# Gas perfetti

---

Un gas si dice perfetto quando (1) interagisce in modo elastico con le pareti del recipiente che lo contiene, (2) il volume occupato dalle molecole che lo compongono è trascurabile e, soprattutto, (3) l'interazione molecola-molecola è trascurabile. Nei gas perfetti non c'è energia potenziale ma solo energia cinetica associata alle particelle che lo compongono. Pertanto la sua energia interna dipende solo dalla temperatura. Ogni gas a  $T$  sufficientemente alta e  $P$  sufficientemente bassa si comporta come perfetto. All'equilibrio vale l'equazione di stato.

**EQUAZIONE DI STATO:**

$$PV = nRT$$

**P** = pressione

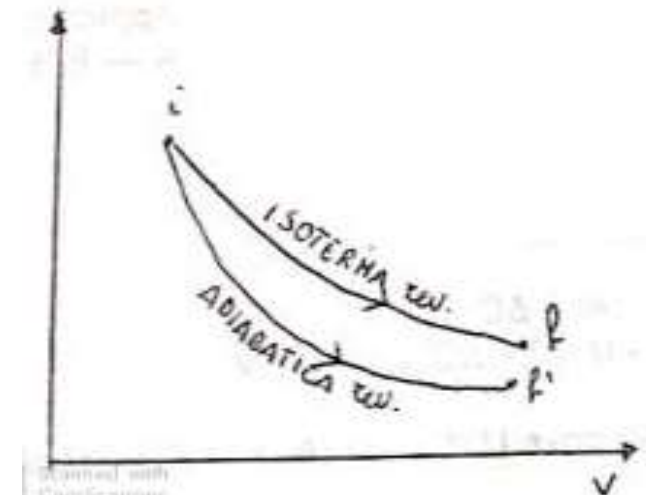
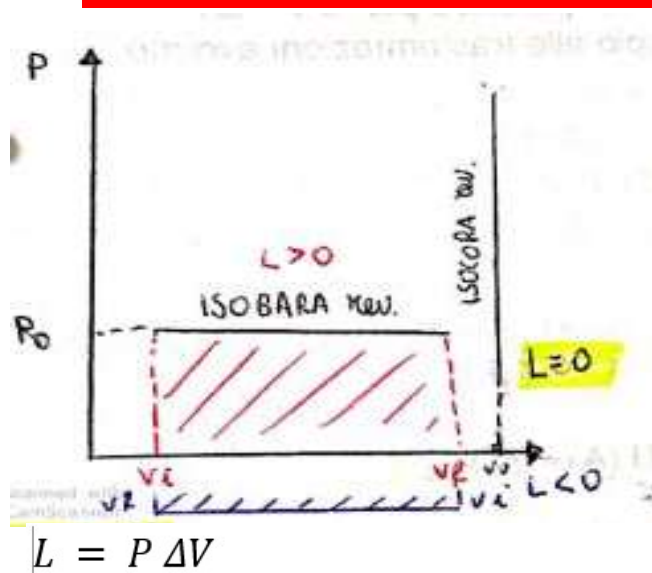
**N** = numero di moli del gas

**V** = volume

**T** = temperatura assoluta

**R** = è detta costante dei gas ed è una costante universale il cui valore dipende solo dalle unità di misura usate:  $0.0821 \text{ (L} \cdot \text{Atm)/(K} \cdot \text{mole)} = 8.31 \text{ Joule/(K} \cdot \text{mole)}$

# Rappresentazione grafica nel piano di Clapeyron



$f \neq f$

ISOTERMA (iperbole equilatera)  $P = \frac{nRT}{V} \propto$

ADIABATICA  $P \propto \frac{1}{V^\gamma} \quad \gamma > 1$

**Isobara:** Per la definizione di lavoro  $\int_{V_i}^{V_f} P(V) dV$ , dove  $p = \text{cost.}$  avremo  $L = p \Delta V$ , caso più banale in cui  $L$  coincide con l'area del rettangolo.

**Isocora:** Per la definizione di lavoro  $\int_{V_i}^{V_f} P(V) dV$ , dove  $V = \text{cost.}$ ,  $V_i = V_f$  avremo  $L = 0$ , non si visualizza infatti alcun arco al di sotto della retta verticale.

**Isoterma:** A partire da  $pV = nRT$ , per  $n$  e  $T = \text{cost.}$ ,  $pV = \text{cost.}$  e  $V = \text{cost}/p$ . Matematicamente si tratta di un ramo di iperbole equilatera (della forma  $y = 1/x$ ). Abbiamo una curva a pendenza negativa ( $p \propto 1/V$ ), cioè  $p$  e  $V$  sono inversamente proporzionali.

**Adiabatica:** La pressione è legata al volume dalla relazione  $p \propto 1/V^\gamma$ . Poiché si vedrà che  $\gamma > 1$  la pendenza della curva  $p(V)$  è più negativa che per l'isoterma. L'adiabatica «scende più rapida» dell'isoterma. Non sarà mai possibile, dunque, partendo da uno stesso stato iniziale arrivare allo stesso stato finale con adiabatica e isoterma. Per un punto passa una e una sola isoterma e una e una sola adiabatica.