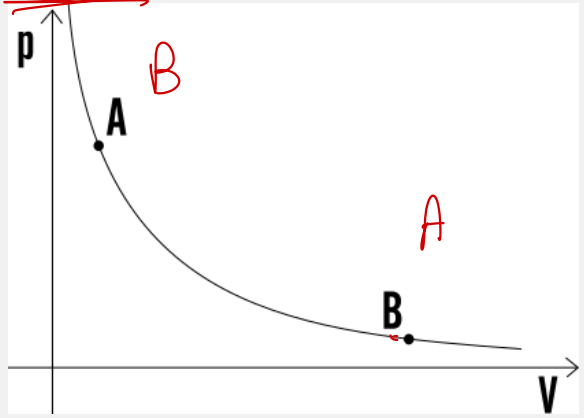


TERMODINAMICA

MACCHINE

~~Q-L = ΔU~~
Q = L

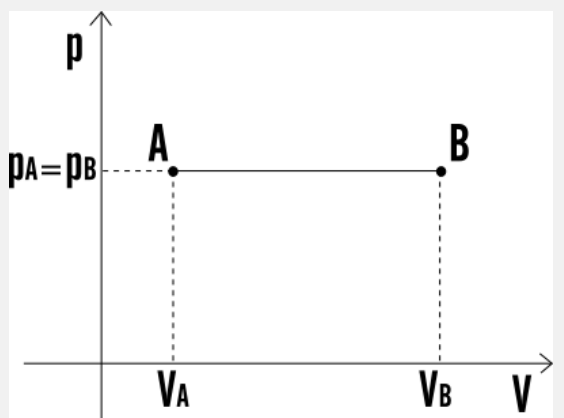


$$Q_{AB} = nRT \ln \left(\frac{V_B}{V_A} \right)$$

$L_{AB} = nRT \ln \left(\frac{V_B}{V_A} \right)$

$$\Delta U_{AB} = 0$$

Q-L = ΔU



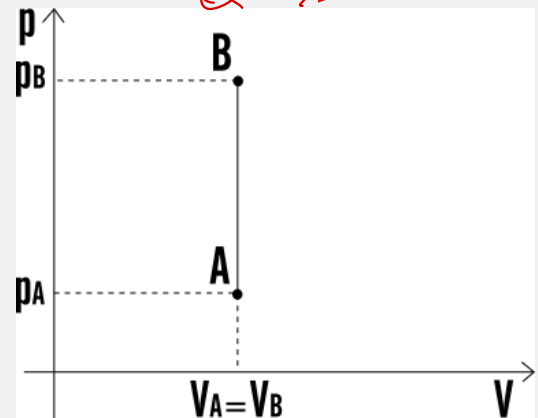
$$Q_{AB} = nc_P(T_B - T_A)$$

$$L_{AB} = p_A(V_B - V_A)$$

$$\Delta U_{AB} = nc_V(T_B - T_A)$$

RIEPILOGO

~~Q-L = ΔU~~
 Q = ΔU

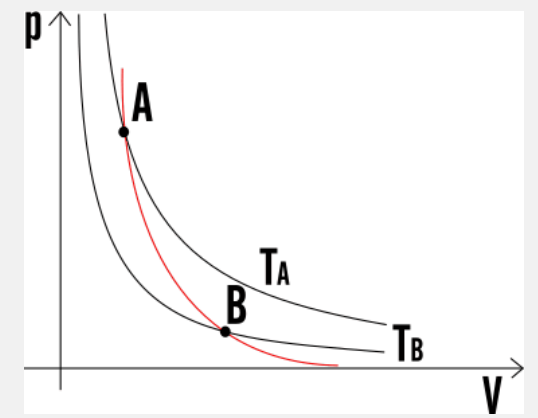


$$Q_{AB} = nc_V(T_B - T_A)$$

$$L_{AB} = 0$$

$$\Delta U_{AB} = Q_{AB} = nc_V(T_B - T_A)$$

~~Q-L = ΔU~~
~~-L = ΔU~~



$$Q_{AB} = 0$$

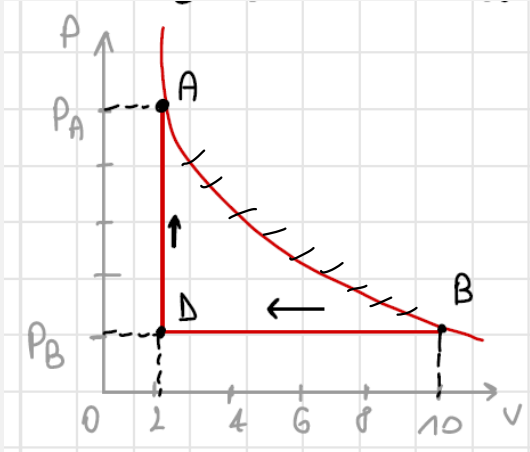
$$L_{AB} = -nc_V(T_B - T_A)$$

$$\Delta U_{AB} = -L_{AB} = nc_V(T_B - T_A)$$



Esempio

Un gas perfetto viene compresso lentamente a una pressione costante di 2 atm da 10 L a 2 L. In figura, la trasformazione è rappresentata come percorso BD, in cui viene ceduto calore. Successivamente, viene fornito calore al gas, mantenuto a volume costante, mentre pressione e temperatura vengono fatte salire (DA), finché la temperatura non torna al suo valore originario ($T_A = T_B$). a) Calcolare il lavoro totale compiuto dal gas nella trasformazione BDA e b) il calore totale assorbito dal gas.



$$P_B = P_D = 2 \text{ atm}$$

$$V_B = 10 \text{ L}$$

$$V_D = 2 \text{ L}$$

$$2 \text{ atm} = 2 \cdot 0.2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$10 \text{ L} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$2 \text{ L} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$L_{\text{TOT}} ? \rightarrow L_{BD} + L_{DA}$$

$$Q_{\text{TOT}} ? \rightarrow P\Delta V \quad 0$$

$$R \rightarrow \frac{\text{Pa} \cdot \text{m}^3}{\text{mol K}}$$

$$R \rightarrow \frac{\text{l} \cdot \text{atm}}{\text{mol K}}$$

$$L_{BD} = 2 \cdot 0.2 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot (2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 - 10 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3)$$

$$= -1.6 \cdot 10^3 \text{ J}$$

$$BDA \rightarrow \Delta U = 0$$

(perché T non cambia)

$$\rightarrow Q - L = \Delta U$$

$$Q_{BDA} - L_{BDA} = 0 \rightarrow Q_{BDA} = L_{BDA} = -1.6 \cdot 10^3 \text{ J}$$



Esempio

Un cilindro diviso da un pistone mobile contiene 96 g di O_2 inizialmente alla pressione $p_i = 150$ kPa e alla temperatura $T_i = 290$ K. A) determinare il volume iniziale di gas.

Successivamente, il gas si espande a pressione costante, compiendo un lavoro $L = 7.2$ kJ. B) calcolare il suo volume finale.

Infine, la pressione del gas viene aumentata fino a $p_f = 300$ kPa con una trasformazione isocora. C) determinare il lavoro compiuto dal gas nell'intero processo.

$$i \rightarrow T_i = 290 \text{ K}$$

$$p_i = 150 \text{ kPa}$$

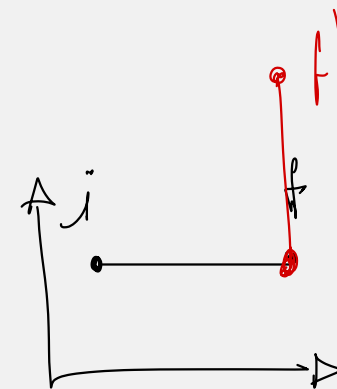
$$V_i = ?$$

$$p_i V_i = n R T_i$$

$$V_i = \frac{n R T_i}{p_i}$$

$$n = \frac{96 \text{ g}}{32} = \sim 3 \text{ mol}$$

$$V_i = \frac{3 \text{ mol} \cdot 8.31 \cdot 290 \text{ K}}{150 \cdot 10^3 \text{ Pa}} = 4.82 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$$



$$V_f = V_{f'}$$

$$p_f = 300 \text{ kPa}$$

$$L_{if} = 7.2 \text{ kJ}$$

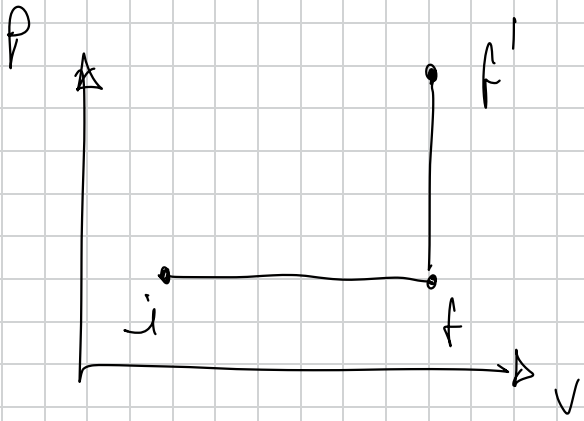
$$V_i = 4.82 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$$

$$V_f = ?$$

$$L = p \Delta V \rightarrow \Delta V = \frac{L}{p} = 4.8 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$$

$$V_f = V_i + \Delta V = 4.82 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 + 4.8 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 = 9.62 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \approx 2V_i$$

$$p_i = p_f = 150 \text{ kPa}$$



$$V_f = V_{f'} = 9.62 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$$

$$p_{f'} = 300 \text{ kPa}$$

$$p_A = 150 \text{ kPa}$$

$$L_{\text{TOT}}? \quad \underline{\underline{L_{if}}} + \underline{\underline{L_{ff'}}$$

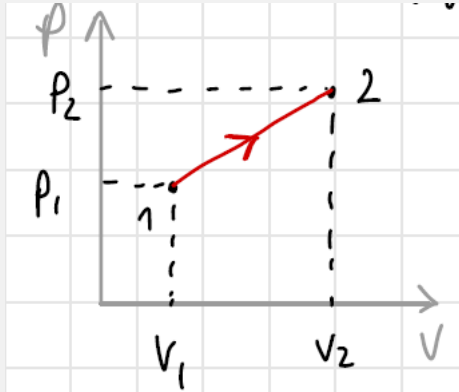
$$7.2 \text{ kJ}$$

$$L_{\text{TOT}} = L_{if} = 7.2 \text{ kJ}$$



Esempio

Si abbiano 2 moli di un gas ideale biatomico che si trovano inizialmente a pressione $p_1 = 2 \text{ atm}$ e temperatura $T_1 = 300 \text{ K}$. A partire da tale stato, il gas segue l'espansione reversibile delineata in figura, arrivando allo stato 2, in cui $2p_1 = p_2$ e $V_2 = 3V_1$. Determinare: a) il volume V_1 e la temperatura T_2 ; b) la variazione di energia interna del gas $\Delta U_{1,2}$; c) il calore scambiato $Q_{1,2}$; d) la variazione di entropia $\Delta S_{1,2}$.



$$n = 2 \text{ mol}$$

$$p_1 = 2 \text{ atm}$$

$$p_2 = 4 \text{ atm}$$

$$V_1 = ? \quad T_2 = ?$$

$$V_2 = 3V_1$$

$$T_1 = 300 \text{ K}$$

$$\Delta U_{1,2} ? \quad Q_{1,2} ?$$

$$p_1 V_1 = nRT_1 \rightarrow V_1 = \frac{nRT_1}{p_1} = \frac{2 \text{ mol} \cdot 0.082 \cdot 300 \text{ K}}{2 \text{ atm}} = 24.6 \text{ l} = 24.6 \text{ dm}^3$$

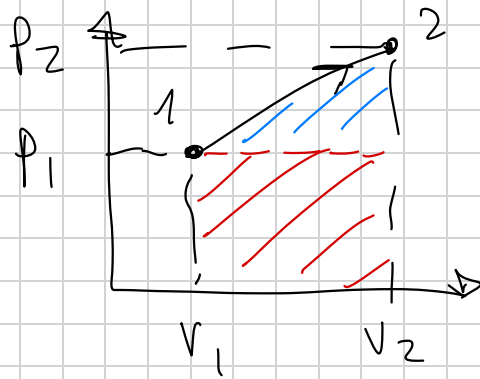
$$V_2 = 3V_1 = 73.8 \text{ L} = 73.8 \text{ dm}^3$$

$$p_2 V_2 = nRT_2 \rightarrow T_2 = \frac{p_2 V_2}{nR} = \frac{4 \text{ atm} \cdot 73.8 \text{ L}}{2 \text{ mol} \cdot 0.082} = 1800 \text{ K}$$

$$\Delta U_{1,2} = n c_v \Delta T = 2 \text{ mol} \cdot \frac{5}{2} R \cdot (1800 \text{ K} - 300 \text{ K}) = 6.23 \cdot 10^4 \text{ J}$$

$\hookrightarrow 8.31$

L



gen. $L = p \Delta V$



$$L_{1,2} = p_1 \cdot \Delta V$$

$$p_1(V_2 - V_1) + \frac{(p_2 - p_1)(V_2 - V_1)}{2} = 1.48 \cdot 10^4 \text{ J}$$

\downarrow
reuzingdo
 \uparrow
ruizingdo

$$Q - L = \Delta U$$

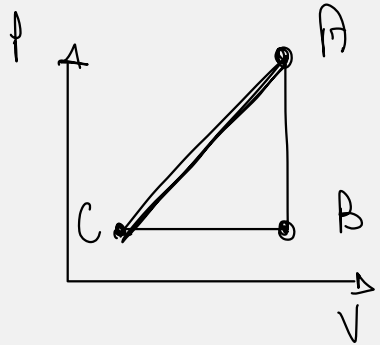
$$Q_{1,2} = \Delta U + L = 6.23 \cdot 10^4 \text{ J} + 1.48 \cdot 10^4 \text{ J} = 7.73 \cdot 10^4 \text{ J}$$



Esempio

Un gas biatomico occupa un volume $V_A = 0.03 \text{ m}^3$ e ha una pressione $p_A = 3 \times 10^5 \text{ Pa}$. Mantenendo il volume costante, il gas viene raffreddato a 180 K e portato a una pressione $p_B = p_A/3$. Infine, attraverso una trasformazione isobara, si arriva a un volume $V_C = V_A/3$.

Voglio conoscere $T_A, T_C, Q_{AB}, Q_{BC}, Q_{CA}, U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}, L_{CA}$. Disegnare le trasformazioni sul piano pV.



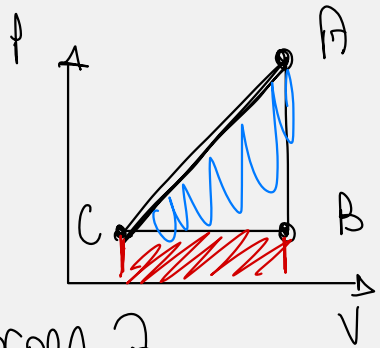
$$\begin{array}{lll}
 V_A = 0.03 \text{ m}^3 & V_B = V_A = 0.03 \text{ m}^3 & V_C = V_A/3 = 0.01 \text{ m}^3 \\
 p_A = 3 \cdot 10^5 \text{ Pa} & p_B = \frac{p_A}{3} = 10^5 \text{ Pa} & p_C = p_B = 10^5 \\
 T_A ? & T_B = 180 \text{ K} & T_C ?
 \end{array}$$

$$\begin{array}{lll}
 Q_{AB} & U_{AB} & \\
 Q_{BC} & U_{BC} & L_{CA} \\
 Q_{CA} & U_{CA} &
 \end{array}$$

$$pV = nRT \rightarrow T_A = \frac{p_A V_A}{nR} \rightarrow n = \frac{p_B V_B}{RT_B} = \frac{10^5 \text{ Pa} \cdot 0.03 \text{ m}^3}{8.31 \cdot 180 \text{ K}} \approx 2 \text{ mol}$$

$$\frac{p_A}{T_A} = \frac{p_B}{T_B} \rightarrow \frac{p_A}{p_B} = \frac{T_A}{T_B} = 3 \rightarrow T_A = 3 \cdot 180 \text{ K} = 540 \text{ K}$$

$$T_C = \frac{p_C V_C}{nR} \quad \text{isob.} \rightarrow \frac{V_B}{T_B} = \frac{V_C}{T_C} \rightarrow \frac{V_B}{V_C} = \frac{T_B}{T_C} = 3 \rightarrow T_C = \frac{1}{3} \cdot 180 \text{ K} = 60 \text{ K}$$



ISOCORA \rightarrow
 $Q - W = \Delta U$

$Q_{AB} \rightarrow$ ISOCORA

$$\hookrightarrow Q_{AB} = n C_V \Delta T = 2 \cdot \frac{5}{2} R (180 \text{ K} - 540 \text{ K}) = -14965 \text{ J}$$

$Q_{BC} \rightarrow$ ISOBARA

$$\hookrightarrow Q_{BC} = n C_p \Delta T = 2 \cdot \frac{7}{2} R (60 \text{ K} - 180 \text{ K}) = -6984 \text{ J}$$

$$Q = \Delta U = U_B - U_A = -14965 \text{ J}$$

ISOBARA \rightarrow

$$Q - L = \Delta U \rightarrow -6984 \text{ J} - 10^5 \cdot 2 \cdot 10^{-2} = -4984 \text{ J}$$

$$\hookrightarrow p \Delta V = 10^5 \cdot 2 \cdot 10^{-2}$$

$$\text{TRANSFORM. CA} \rightarrow \Delta U = n C_V \Delta T = 2 \text{ mol} \cdot \frac{5}{2} R (540 \text{ K} - 60 \text{ K}) = +19954 \text{ J}$$

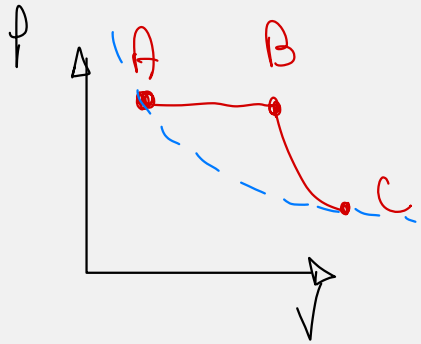
$$\text{CICLO} \rightarrow \Delta U_{\text{TOT}} = 0 \rightarrow -14965 - 4984 + 19954 \approx 0$$

$$L_{CA} = p_C \cdot (V_B - V_C) + \frac{1}{2} (V_B - V_C) (p_A - p_B) = 4000 \text{ J}$$



Esempio

Due moli di gas perfetto monoatomico passano dallo stato iniziale A allo stato finale C attraverso un'espansione isobara AB, seguita da un'espansione adiabatica BC. La temperatura in A e C è la medesima e vale $T_A = T_C = 18^\circ\text{C}$; $p_A = 2 \times 10^5 \text{ Pa}$; $V_B = 2V_A$. Calcolare: a) il valore delle variabili termodinamiche p, V, T nei tre punti; b) la quantità di calore scambiata nelle trasformazioni da A a C. Disegnare il grafico della trasformazione nel piano pV .



$$n = 2 \text{ mol}$$

$$T_A = T_C = 18^\circ\text{C} = 291 \text{ K}$$

$$p_A = 2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$V_B = 2V_A = 0.048 \text{ m}^3$$

$$p, V, T (A, B, C)? \rightarrow p_A V_A = nRT_A$$

$$V_A = \frac{nRT_A}{p_A} = 0.024 \text{ m}^3$$

$$\textcircled{B} p_B = p_A = 2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$V_B = 0.048 \text{ m}^3 \rightarrow p_B V_B = nRT_B \rightarrow T_B = \frac{p_B V_B}{nR} = 577.6 \text{ K} \approx 2 \cdot T_A$$

$$\textcircled{C} T_C = T_A = 291 \text{ K}$$

$$T_B V_B^{\gamma-1} = T_C V_C^{\gamma-1} \rightarrow V_C^{\gamma-1} = \frac{T_B V_B^{\gamma-1}}{T_C} \Rightarrow \underline{V_C} = 0.14 \text{ m}^3$$

$$p_C V_C = nRT_C \rightarrow p_C = \frac{nRT_C}{V_C} = 0.35 \text{ Pa}$$

a) ✓

$$Q_{AC} = Q_{AB} + \cancel{Q_{BC}}$$

BC adiabatic $\rightarrow Q=0$

$$Q_{AC} = Q_{AB} \rightarrow \text{ISOBARA}$$

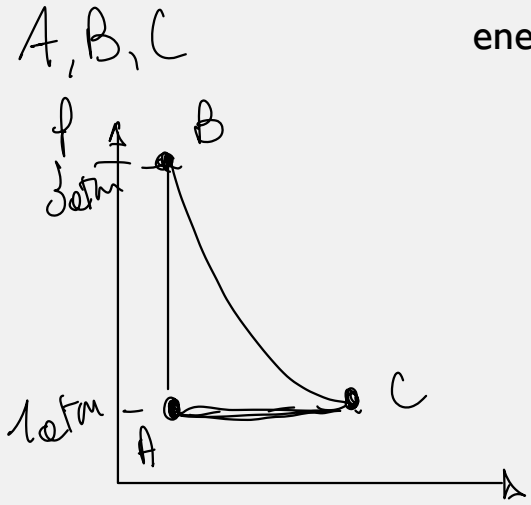
$$Q_{AB} = n C_p \Delta T = 2 \text{ mol} \cdot \frac{5}{2} R (577.6 \text{ K} - 29 \text{ K})$$
$$= 12091 \text{ J}$$

8.31



Esempio

Un gas perfetto **monoatomico** occupa nello stato A un volume $V_A = 5 \text{ L}$ a pressione atmosferica e temperatura $T_A = 300 \text{ K}$. Esso è riscaldato a volume costante fino allo stato B a pressione $p_B = 3 \text{ atm}$. Poi si espande isotermicamente fino allo stato C a pressione $p_C = 1 \text{ atm}$, ed infine è compresso isobaricamente fino allo stato iniziale A. a) si disegni nel piano pV il grafico della trasformazione subita dal gas e si calcolino il numero di moli n di cui è costituito il gas e le coordinate termodinamiche (p, V, T) degli stati A, B e C; b) si calcolino il calore Q , il lavoro L e la variazione di energia interna ΔU per le trasformazioni AB, BC, CA e per l'intero ciclo.



(A)

$$V_A = 5 \text{ L}$$

$$p_A = 1 \text{ atm}$$

$$T_A = 300 \text{ K}$$

(B)

$$V_B = V_A$$

$$p_B = 3 \text{ atm}$$

$$T_B \checkmark$$

(C)

$$V_C \checkmark$$

$$p_C = 1 \text{ atm}$$

$$T_C = T_B = 900 \text{ K}$$

$n? \checkmark$

$$\boxed{Q - L = \Delta U}$$

$$AB \rightarrow \text{ISOCORA} \rightarrow L = 0 \rightarrow Q = \Delta U$$

$$Q = \Delta U = n C_V \Delta T = 0.203 \text{ mol} \cdot \frac{3}{2} R \cdot (900 - 300) = 1.52 \cdot 10^3 \text{ J}$$

$$BC \rightarrow \text{ISOTERMA} \rightarrow Q - L = 0 \rightarrow Q = L$$

$$L_{BC} = nRT \cdot \ln\left(\frac{V_C}{V_B}\right) = 0.203 \text{ mol} \cdot 8.31 \cdot 900 \text{ K} \cdot \ln\left(\frac{15}{5}\right) = 1.67 \cdot 10^3 \text{ J} = Q_{BC}$$

$$p_A V_A = n R T_A \rightarrow n = \frac{p_A V_A}{R T_A} = 0.203 \text{ mol}$$

$$p_B V_B = n R T_B \rightarrow T_B = \frac{p_B V_B}{n R} = 900 \text{ K}$$

$$p_C V_C = n R T_C \rightarrow V_C = \frac{n R T_C}{p_C} = 15 \text{ L}$$

CA → ISOBARA $Q-L = \Delta U$

$$L_{CA} = p\Delta V = p_A(V_A - V_C) = 1.01 \cdot 10^5 \text{ Pa} (5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 - 15 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3) = -1.01 \cdot 10^3 \text{ J}$$

$$\Delta U = nC_V \Delta T = 0.203 \text{ mol} \cdot \frac{3}{2} R \cdot (T_A - T_C) = -1.52 \cdot 10^3 \text{ J}$$

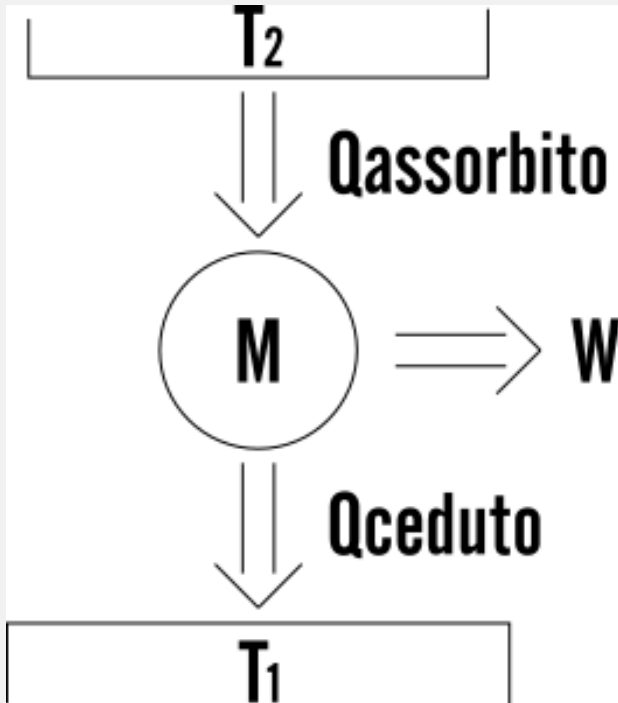
$$Q = \Delta U + L = nC_p \Delta T \rightarrow -2.53 \cdot 10^3 \text{ J}$$

$$Q_{\text{TOT}} = Q_{AB} + Q_{BC} + Q_{CA} = +0.66 \cdot 10^3 \text{ J}$$

$$L_{\text{TOT}} = L_{AB} + L_{BC} + L_{CA} = +0.66 \cdot 10^3 \text{ J}$$

$$\Delta U_{\text{TOT}} = \Delta U_{AB} + \Delta U_{BC} + \Delta U_{CA} = 0$$

MACCHINE TERMICHE



Una sorgente ad alta temperatura cede al sistema una quantità di calore Q per compiere lavoro, e lo stesso sistema cede poi una quantità di calore alla seconda sorgente termica a più bassa temperatura

Una macchina termica deve necessariamente lavorare su un ciclo.
Per un ciclo, il primo principio della termodinamica dice:

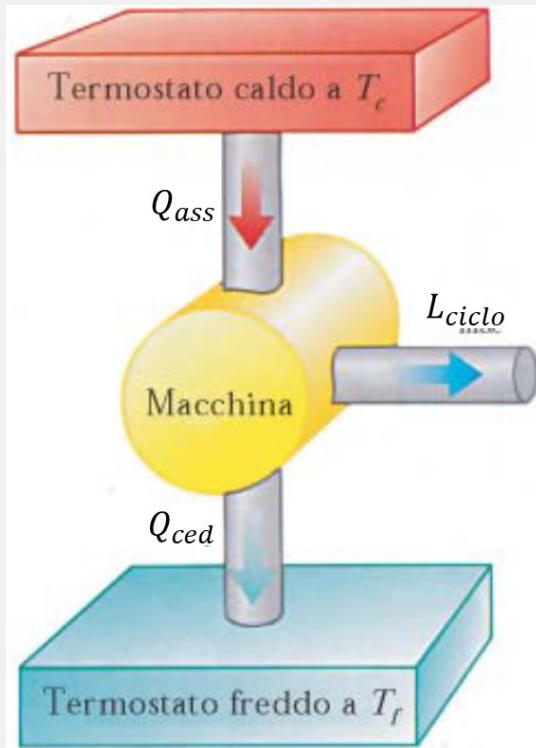
$$\Delta U = \Delta Q - L \rightarrow \Delta Q = L$$

MACCHINE TERMICHE

$$Q - L = \Delta U = 0$$

↓

$$Q = L$$



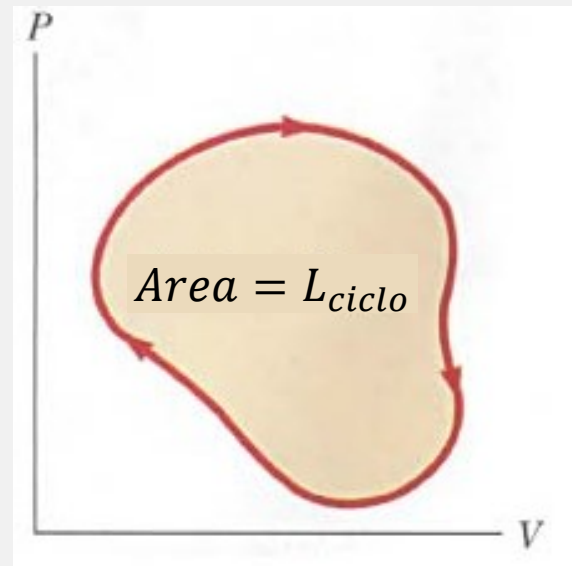
Assorbo Q_{ass} , cedo Q_{ced} e compio lavoro L_{ciclo}

Se $L_{ciclo} > 0$ MOTORE TERMICO

Se $L_{ciclo} < 0$ MACCHINA FRIGORIFERA

$$Q_{ciclo} = Q_{ass} + Q_{ced} = Q_{ass} - |Q_{ced}| \quad \Delta U_{ciclo} = 0 \quad L_{ciclo} = Q_{ciclo}$$

$$L_{ciclo} = Q_{ciclo} = Q_{ass} - |Q_{ced}|$$



Si definisce RENDIMENTO:

$$\eta = \frac{L_{ciclo}}{Q_{ass}} = \frac{Q_{ass} - |Q_{ced}|}{Q_{ass}} = 1 - \frac{|Q_{ced}|}{Q_{ass}} < 1$$

MACCHINE FRIGORIFERE

In una macchina frigorifera:

$$Q_{ciclo} = Q_{ass} + Q_{ced} = Q_{ass} - |Q_{ced}| \quad \Delta U_{ciclo} = 0 \quad L_{ciclo} = Q_{ciclo}$$

$$L_{ciclo} = Q_{ciclo} = Q_{ass} - |Q_{ced}|$$

Si definisce Coefficiente di Prestazione (COP):

$$COP = \frac{Q_{ass}}{|L_{ciclo}|} = \frac{|Q_{ced}| - |L_{ciclo}|}{|L_{ciclo}|} = \frac{|Q_{ced}|}{|L_{ciclo}|} - 1 > 0$$

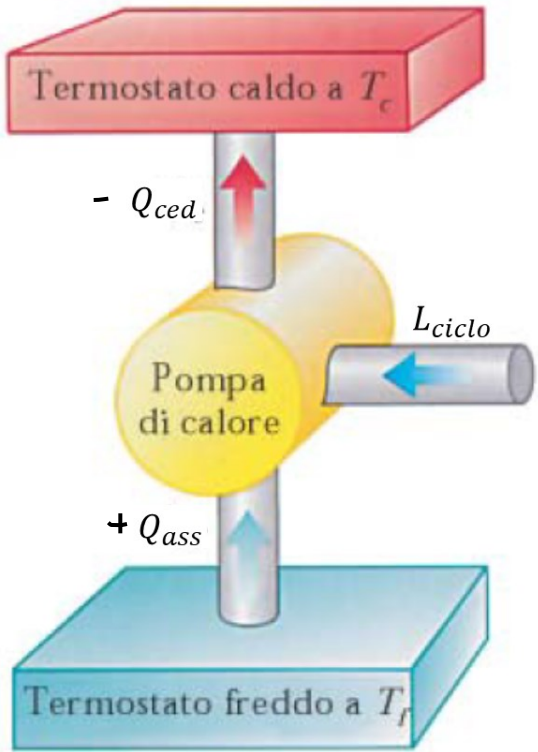
$$L_{ciclo} = Q_{ass} - |Q_{ced}|$$

$$|L_{ciclo}| = -Q_{ass} + |Q_{ced}|$$

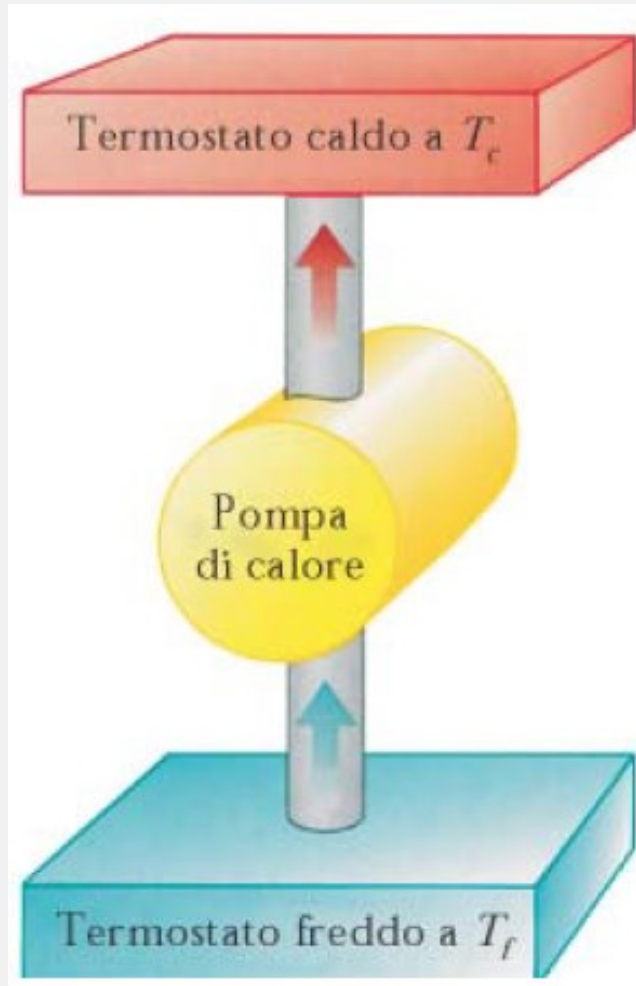
quindi $|L_{ciclo}| < |Q_{ced}|$

Perché è >0?

2



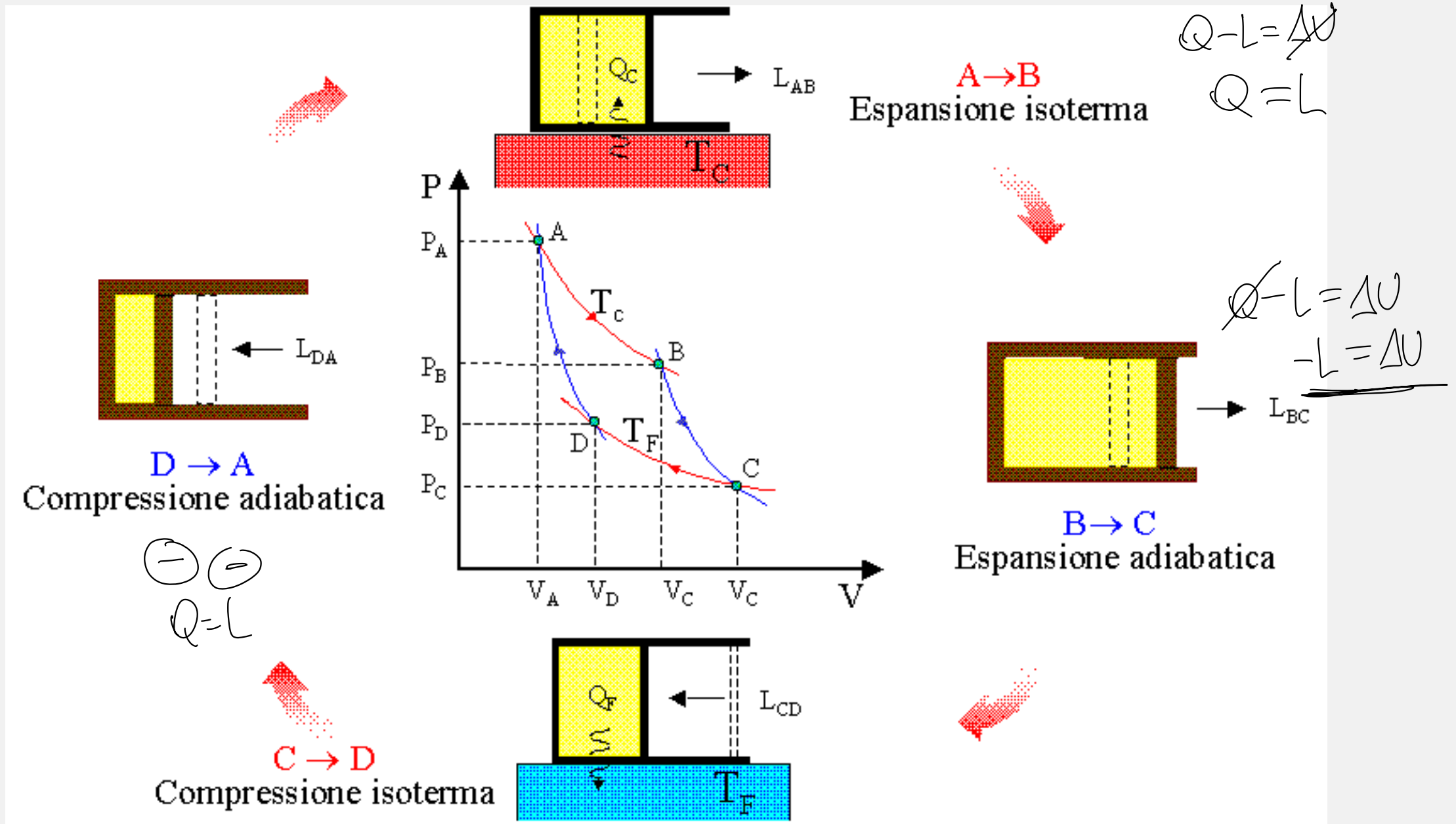
ENUNCIATO DI CLAUSIUS



È impossibile costruire una macchina che abbia come unico risultato il trasferimento di calore da un corpo freddo ad un corpo caldo:

Significa che è impossibile avere $COP=1$

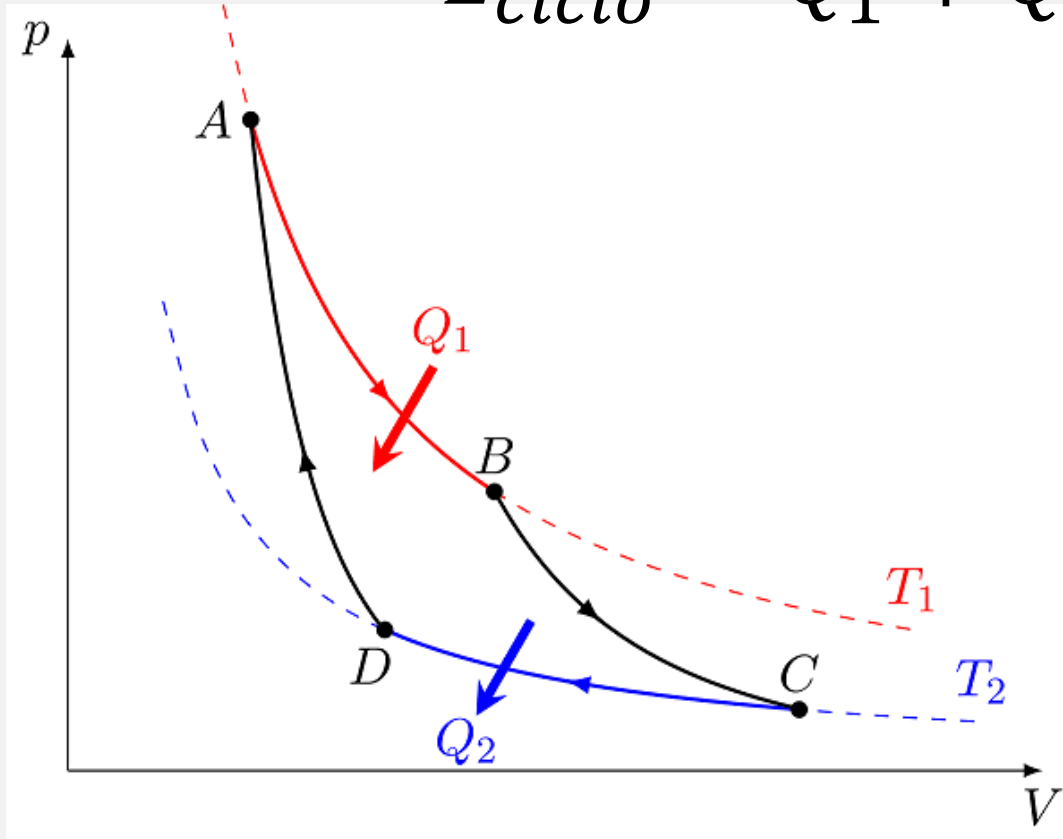
MACCHINA DI CARNOT



MACCHINA DI CARNOT

ciclo $\rightarrow \Delta U = 0 \rightarrow \Delta U = \underline{Q - L} \rightarrow Q = L$

$$L_{ciclo} = Q_1 + Q_2$$



$$L_{AB} = nRT_1 \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right) = Q_{AB} = Q_1 > 0$$

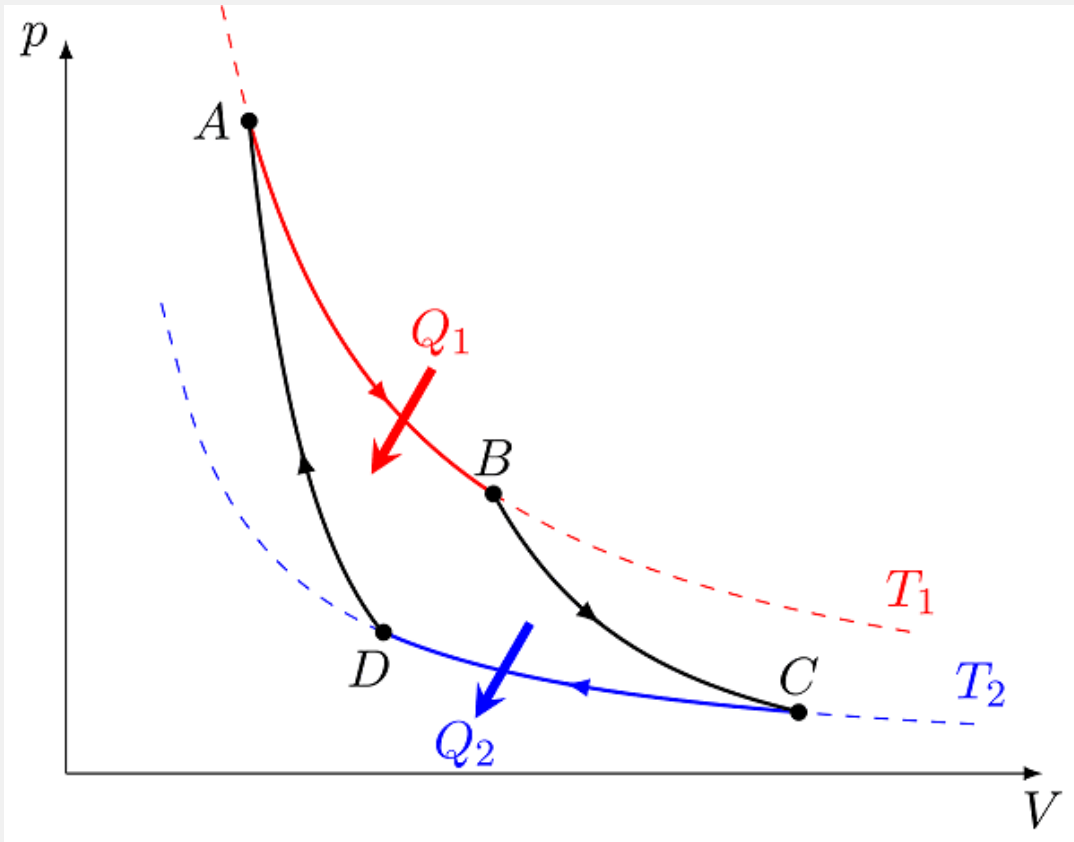
$$Q_{BC} = 0 \quad L_{BC} = -\Delta U_{BC} = -nc_V(T_C - T_B) = nc_V(T_B - T_C)$$

$$L_{CD} = nRT_2 \ln\left(\frac{V_D}{V_C}\right) = Q_{CD} = Q_2 < 0$$

$$Q_{DA} = 0 \quad L_{DA} = -\Delta U_{DA} = -nc_V(T_A - T_D) = nc_V(T_D - T_A)$$

$$\eta = \frac{L_{ciclo}}{Q_{ass}} = 1 - \frac{|Q_{ced}|}{Q_{ass}} = 1 - \frac{\cancel{nRT_2 \ln\left(\frac{V_C}{V_D}\right)}}{\cancel{nRT_1 \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)}} = 1 - \frac{T_2 \ln\left(\frac{V_C}{V_D}\right)}{T_1 \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)}$$

MACCHINA DI CARNOT



$$L_{AB} = nRT_1 \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right) = Q_{AB} = Q_1 > 0$$

$$Q_{BC} = 0 \quad L_{BC} = -\Delta U_{BC} = -nc_V(T_C - T_B) = nc_V(T_B - T_C)$$

$$L_{CD} = nRT_2 \ln\left(\frac{V_D}{V_C}\right) = Q_{CD} = Q_2 < 0$$

$$Q_{DA} = 0 \quad L_{DA} = -\Delta U_{DA} = -nc_V(T_A - T_D) = nc_V(T_D - T_A)$$

$$\eta = \frac{L_{\text{ciclo}}}{Q_{\text{ass}}} = 1 - \frac{|Q_{\text{ced}}|}{Q_{\text{ass}}} = 1 - \frac{nRT_2 \ln\left(\frac{V_C}{V_D}\right)}{nRT_1 \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)} = 1 - \frac{T_2 \ln\left(\frac{V_C}{V_D}\right)}{T_1 \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)}$$

$$\begin{cases} T_1 V_B^{\gamma-1} = T_2 V_C^{\gamma-1} \\ T_1 V_A^{\gamma-1} = T_2 V_D^{\gamma-1} \end{cases}$$

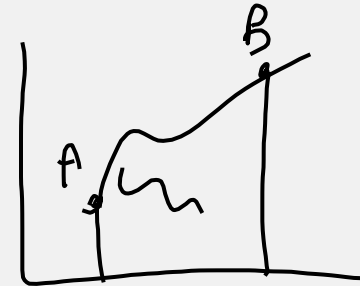
$$\frac{\left(\frac{V_B}{V_A}\right)^{\gamma-1}}{\left(\frac{V_C}{V_D}\right)^{\gamma-1}} = \frac{V_B}{V_A} = \frac{V_C}{V_D}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} < 1$$

ENTROPIA

Partiamo da una trasformazione termodinamica reversibile infinitesima

$$Q - L = \Delta U \quad \delta Q - \delta L = dU \quad \delta Q = nc_V dT + pdV$$



$$\frac{\delta Q}{T} = \frac{nc_V dT}{T} + \frac{pdV}{T}$$

Non è una funzione di stato

$$\int_A^B \frac{\delta Q}{T} = \int_{T_A}^{T_B} \frac{nc_V}{T} dT + \int_{V_A}^{V_B} \frac{nR}{V} dV = nc_V \ln\left(\frac{T_B}{T_A}\right) + nR \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)$$

è una funzione di stato

DEFINIAMO QUINDI ENTROPIA:

$$\int_{A, \text{rev}}^B \frac{\delta Q}{T} = S(B) - S(A) = \Delta S_{AB}$$

variazione di entropia

ENTROPIA

$$\int_A^B \frac{\delta Q}{T} = S(B) - S(A) = \Delta S_{AB}$$

$$\Delta S_{AB} = nc_V \ln \left(\frac{T_B}{T_A} \right) + nR \ln \left(\frac{V_B}{V_A} \right)$$

TRASFORMAZIONI REVERSIBILI

ISOTERMA

$$Q_{AB} = L_{AB} = nRT \ln \left(\frac{V_B}{V_A} \right)$$

$$\Delta S_{AB} = nR \ln \left(\frac{V_B}{V_A} \right)$$

ISOBARA

$$Q_{AB} = nc_P(T_B - T_A)$$
$$\frac{dQ}{T} = \frac{nc_P dT}{T}$$

$$\Delta S_{AB} = nc_V \ln \left(\frac{T_B}{T_A} \right) + nR \ln \left(\frac{V_B}{V_A} \right)$$

ISOCORA

$$Q_{AB} = nc_V(T_B - T_A)$$
$$\frac{dQ}{T} = \frac{nc_V dT}{T}$$

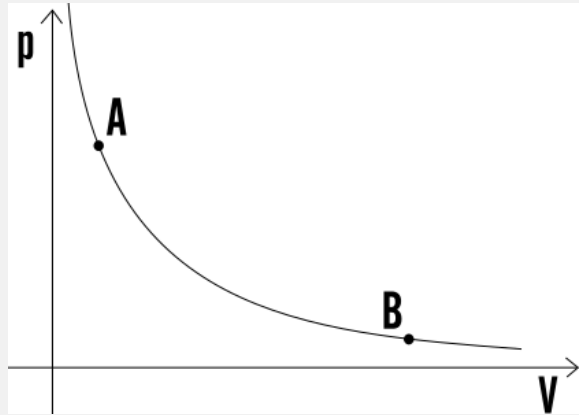
$$\Delta S_{AB} = nc_V \ln \left(\frac{T_B}{T_A} \right)$$

ADIABATICA

$$Q_{AB} = 0$$

$$\Delta S_{AB} = 0$$

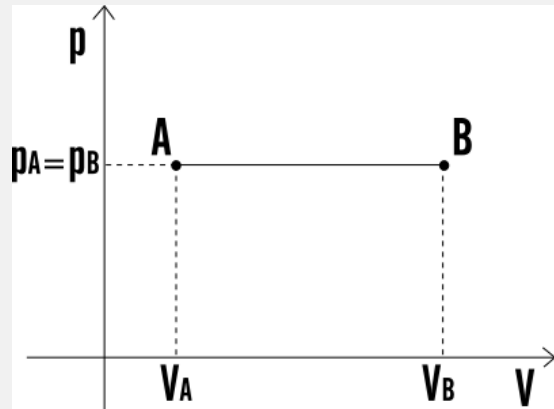
RIEPILOGO



$$Q_{AB} = nRT \ln \left(\frac{V_B}{V_A} \right)$$

$$L_{AB} = nRT \ln \left(\frac{V_B}{V_A} \right)$$

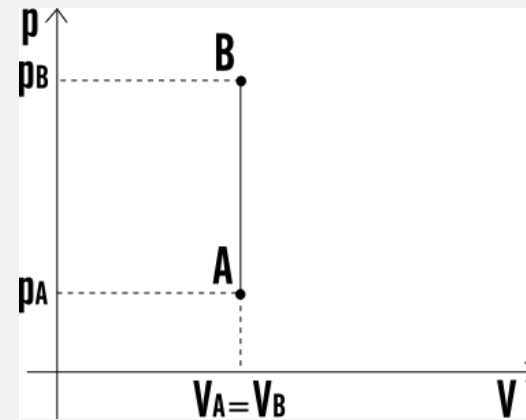
$$\Delta U_{AB} = 0$$



$$Q_{AB} = n c_P (T_B - T_A)$$

$$L_{AB} = p_A (V_B - V_A)$$

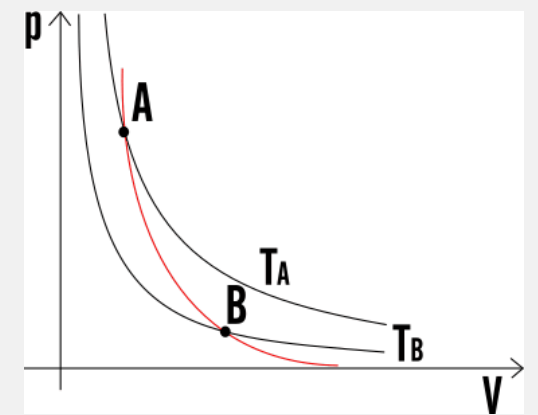
$$\Delta U_{AB} = n c_V (T_B - T_A)$$



$$Q_{AB} = n c_V (T_B - T_A)$$

$$L_{AB} = 0$$

$$\Delta U_{AB} = Q_{AB} = n c_V (T_B - T_A)$$



$$Q_{AB} = 0$$

$$L_{AB} = -n c_V (T_B - T_A)$$

$$\Delta U_{AB} = -L_{AB} = n c_V (T_B - T_A)$$

ENTROPIA

$$\Delta U = Q_{rev} - L_{rev} = Q_{irrev} - L_{irrev}$$

$$Q_{rev} - Q_{irrev} = L_{rev} - L_{irrev}$$

$$\rightarrow L_{rev} > L_{irrev}$$

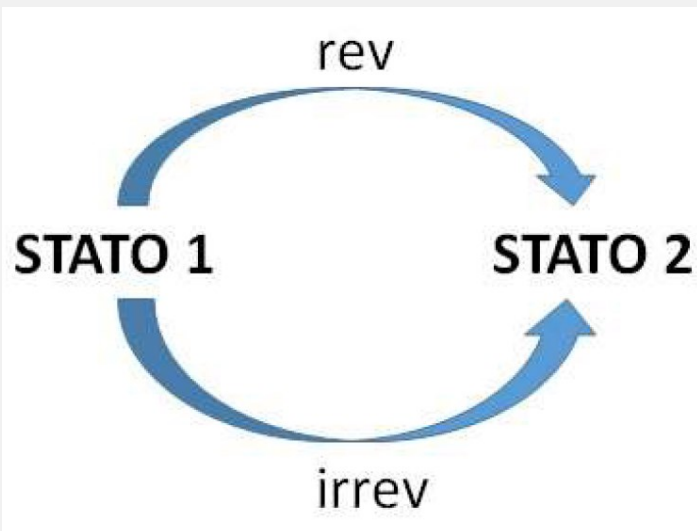
$$L_{rev} - L_{irrev} > 0$$

$$Q_{rev} - Q_{irrev} > 0$$

$$\frac{Q_{rev}}{T} - \frac{Q_{irrev}}{T} > 0$$

$$\frac{Q_{rev}}{T} > \frac{Q_{irrev}}{T}$$

$$\int_A^B \frac{\delta Q_{rev}}{T} \geq \int_A^B \frac{\delta Q}{T}$$



$$\Delta S_{AB} \geq \int_A^B \frac{\delta Q}{T}$$

Disuguaglianza di Clausius

L'entropia di un sistema isolato non può mai diminuire: rimane costante in un sistema di trasformazioni reversibili e cresce ogni volta che ha luogo una trasformazione irreversibile