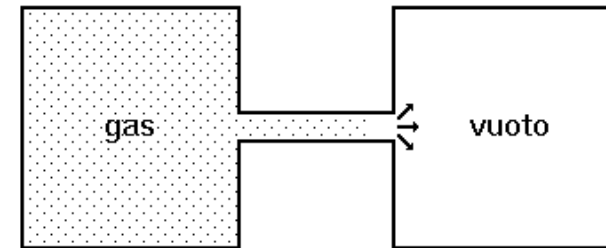




Trasformazioni reversibili e irreversibili:

Esempi di trasformazioni irreversibili:

- un gas compresso si espande spontaneamente in uno spazio vuoto
- la neve fonde al sole
- un sistema freddo si scalda se viene in contatto termico con un ambiente a temperatura più alta, per esempio un surgelato tirato fuori dal frigorifero
- un farmaco si scioglie nel solvente
- il metano brucia, $\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$
- un bicchiere di cognac evapora (se nessuno lo beve ...)





Esempi di trasformazioni reversibili:

- l'urto perfettamente elastico tra due palle da biliardo;
- ghiaccio in equilibrio di fase con l'acqua a $T = 273.15 \text{ K}$.
- Una trasformazione nella quale in ogni punto i parametri di stato siano definiti viene chiamata ***reversibile***
- In una trasformazione reversibile il gas passa per stati termodinamici
- È possibile ripercorrere la trasformazione “all'indietro” variando di un infinitesimo un parametro di stato



Il sistema è, istante per istante, in equilibrio con l'ambiente.

È una idealizzazione. Non esiste in realtà'.

È necessario introdurre il concetto astratto di "processo reversibile" perché la Termodinamica Classica dell'Equilibrio, non utilizza la variabile tempo.

Non vengono considerate le forze dissipative.



Trasformazioni irreversibili:

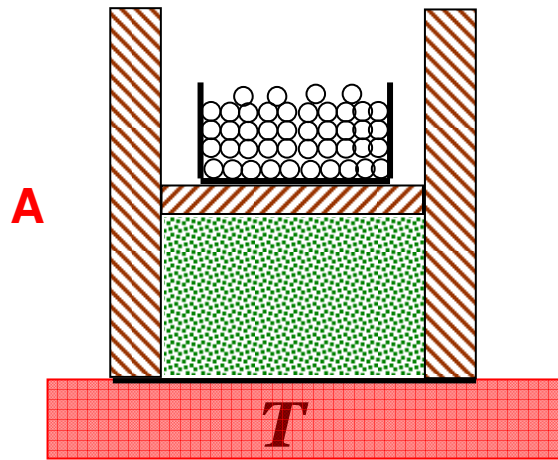
- Una trasformazione nella quale i parametri di stato non siano definiti viene chiamata **irreversibile**

Es. Espansione del gas – non posso determinare parametri intermedi

- In una trasformazione irreversibile il gas non passa per stati termodinamici
- È praticamente impossibile ripercorrere la trasformazione “all’indietro”
- Sono presenti forze dissipative o forze non bilanciate
- **TUTTI I PROCESSI SPONTANEI SONO IRREVERSIBILI!**

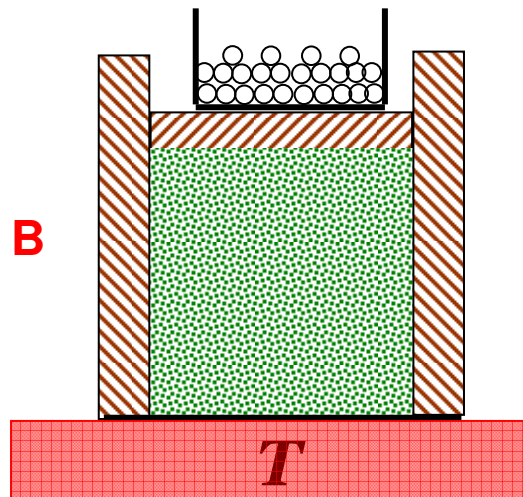


L'entropia: $\Delta S = \frac{Q}{T}$



Trasformazione A – B reversibile
rimovendo uno a uno i palini di piombo.

$$\Delta S_{AB} = \frac{|Q|}{T} \quad \Delta S_{BA} = -\frac{|Q|}{T}$$



Considerando il sistema gas – sorgente:

Per la trasformazione B – A abbiamo:

$$\Delta S_{gas} = -\frac{|Q|}{T} \quad \Delta S_{sorgente} = \frac{|Q|}{T}$$



La variazione complessiva di entropia del sistema chiuso è:

$$\Delta S = \Delta S_{gas} + \Delta S_{sorgente} = -\frac{|Q|}{T} + \frac{|Q|}{T} = 0$$

Il secondo principio della termodinamica:

In un sistema chiuso, l'entropia non diminuisce mai. L'entropia di un sistema aumenta quando si tratta di un processo irreversibile e rimane costante quando il processo è reversibile.

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

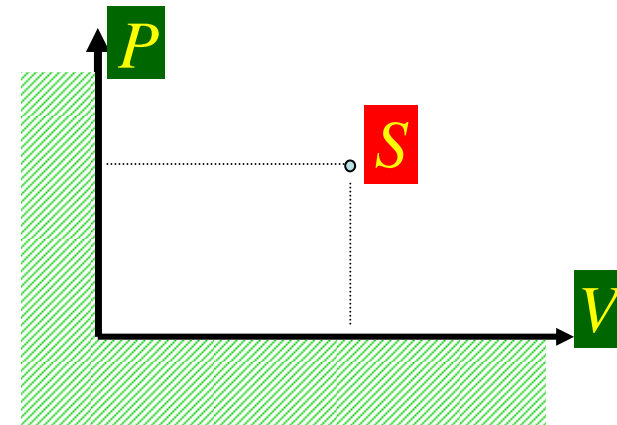
$$\Delta S_{irrev} > 0$$

$$\Rightarrow \Delta S \geq 0$$



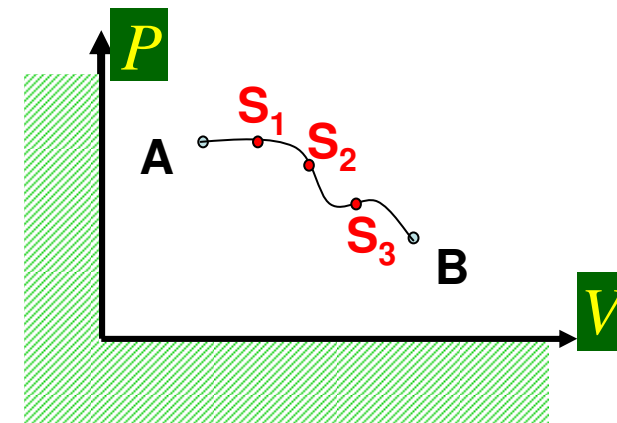
Il piano di Clapeyron (piano PV):

Uno **stato** termodinamico si rappresenterà con un punto nel piano **PV**:



- una trasformazione reversibile:

Una linea continua nel piano di Clapeyron rappresenta una successione di stati termodinamici



- una trasformazione irreversibile:

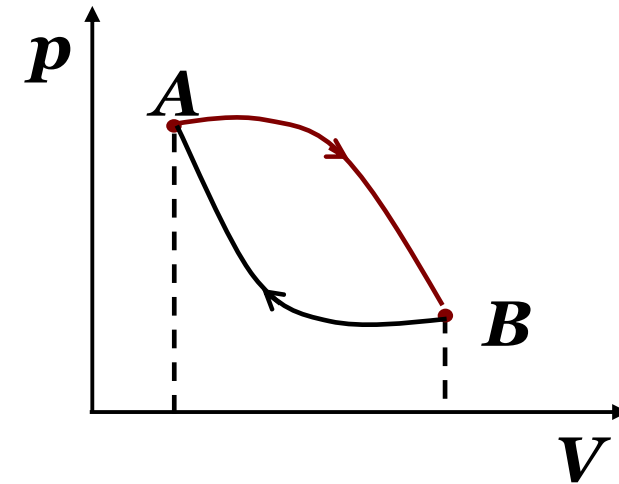
Non si può rappresentare sul piano PV



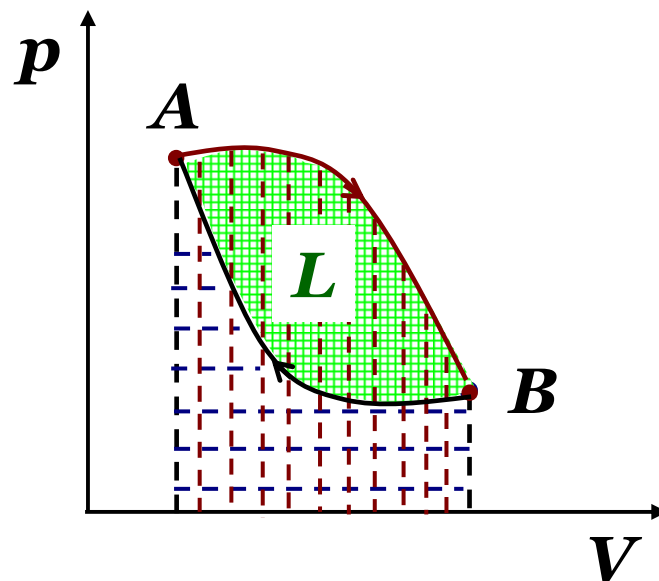
Trasformazione ciclica **A – B – A** :

$$\Delta U_{ABA} = \Delta S_{ABA} = 0$$

$$L_{ABA}, Q_{ABA} \neq 0$$



Ciclo termodinamico.

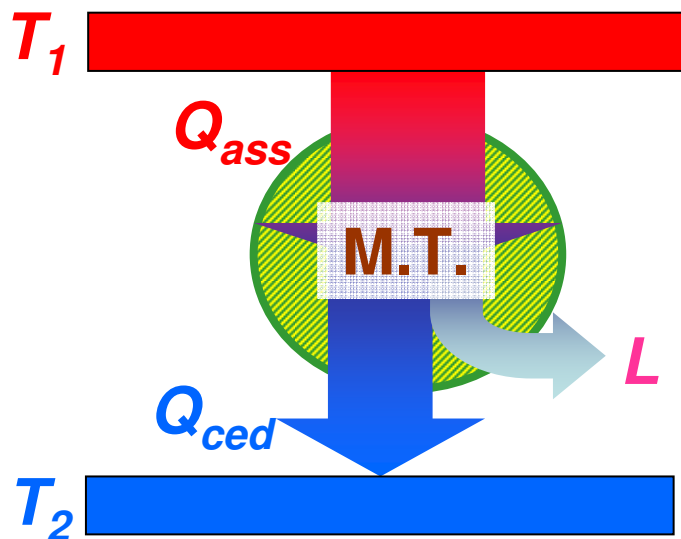


Lavoro = area rinchiusa
dentro la trasformazione
ciclica



La macchina termica:

Una macchina termica è un dispositivo che scambia calore con l'ambiente e produce lavoro.



Lavora secondo una trasformazione ciclica.

(ciclo termodinamico)

Supporremo che una macchina lavori fra due sorgenti di calore a temperatura sempre costante. (Termostati, riserve di energia molto grandi rispetto alla macchina)

Da quella a temperatura più *alta* viene *prelevato* calore: Q_{ass} .

Calore viene *ceduto* a quella a temperatura più *bassa*: Q_{ced} .

La differenza va in *lavoro*, $L = Q_{ass} - |Q_{ced}|$



Il secondo principio della termodinamica:

Clausius (tedesco, 1822-1888)

Non è possibile realizzare una trasformazione che abbia come unico risultato il trasferimento di calore da un corpo più freddo ad un corpo più caldo.

Lord Kelvin (inglese, 1824-1907)

Non è possibile realizzare una trasformazione il cui unico risultato sia la trasformazione in lavoro di tutto il calore sottratto da un'unica sorgente a temperatura costante.



Osservazioni:

Non è vietato il passaggio di calore da un corpo freddo a un corpo caldo.

è vietato che ciò accada spontaneamente

Es: frigorifero...

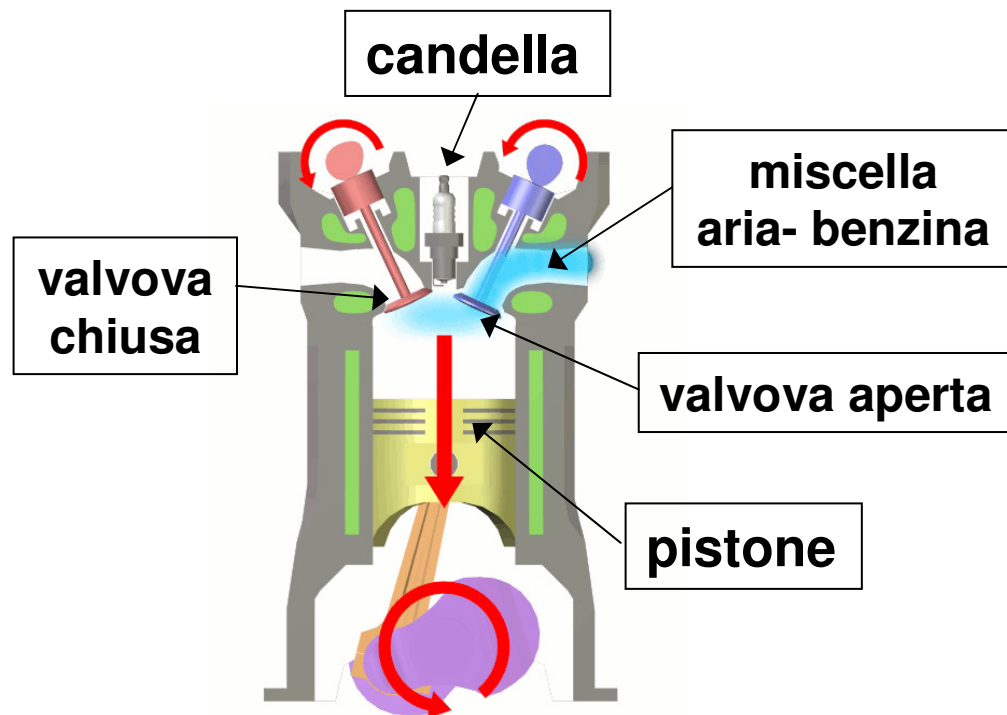
Non è vietata la trasformazione di calore integralmente in lavoro.

è vietata in una trasformazione ciclica

Es: trasformazione isoterma...



Il motore a combustione interna – motore a 4 tempi dell'automobile:

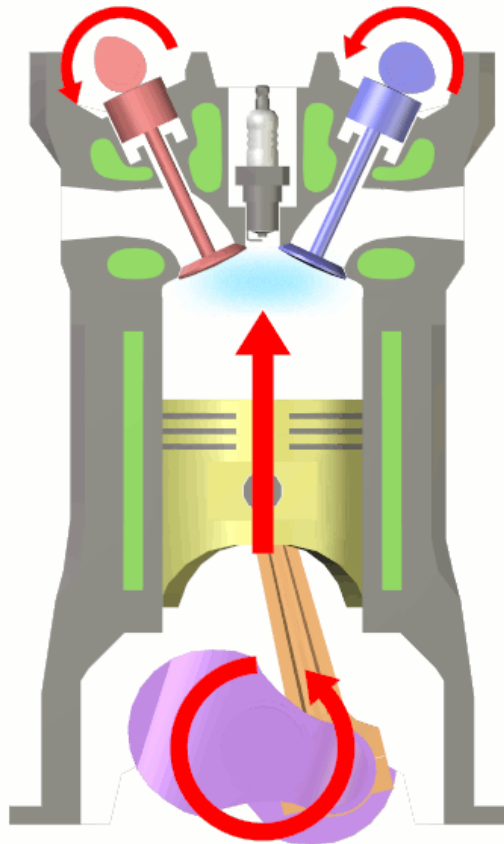


1. Aspirazione

Utilizza un ciclo termodinamico a quattro fasi.

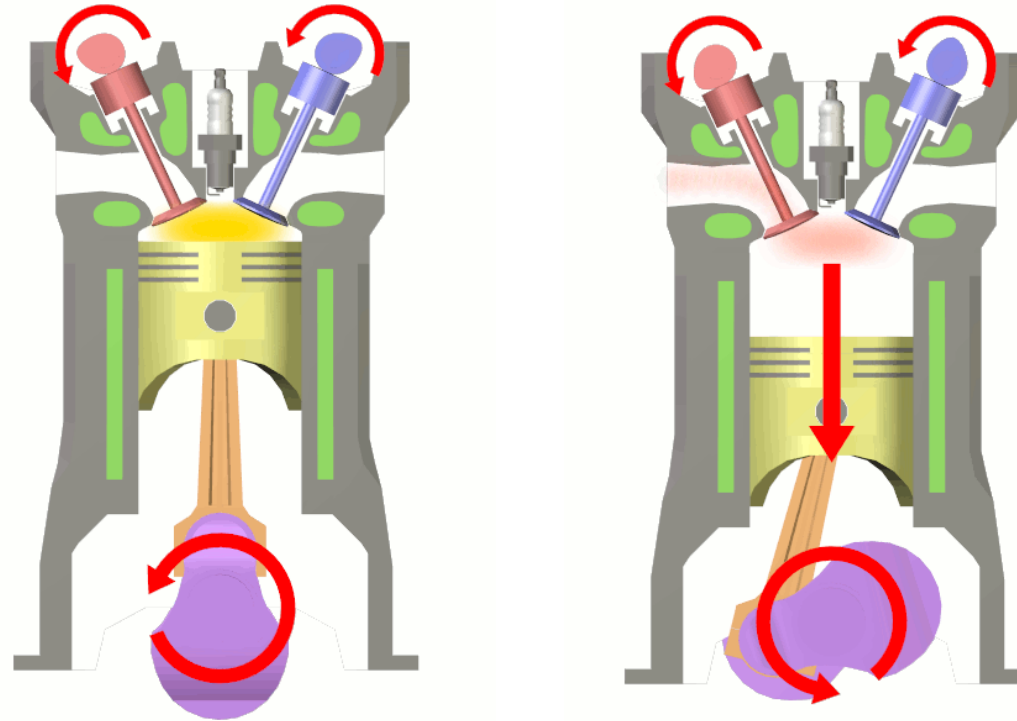
1. Aspirazione:

Il pistone blu si sposta verso il basso, aspirando la miscela aria – benzina nel cilindro a pressione atmosferica.



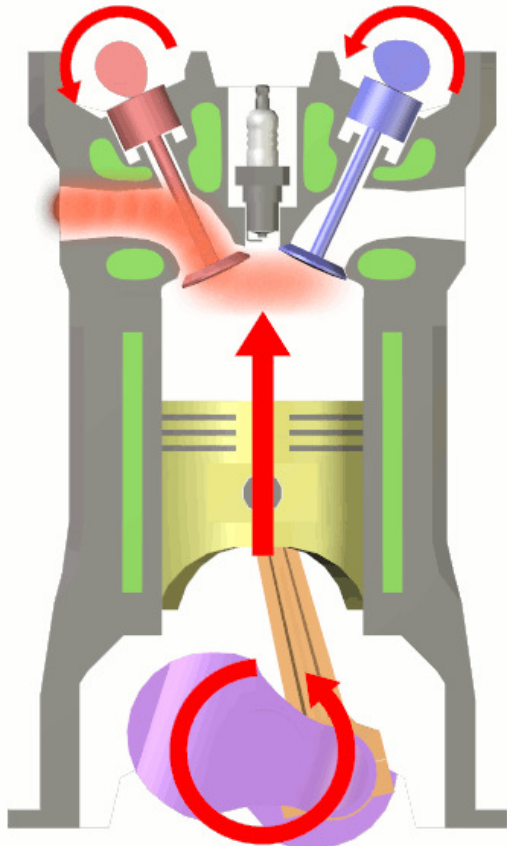
2. Compressione

Il pistone viene spostato verso l'alto, comprimendo la miscela aria-benzina, compiendo lavoro sul gas.



3. Scoppio e Potenza

Una scintilla innesca la combustione, aumenta la temperatura e la pressione che va a spingere il pistone verso il basso. I gas compiono lavoro sul pistone e una parte del calore fluisce dal cilindro.

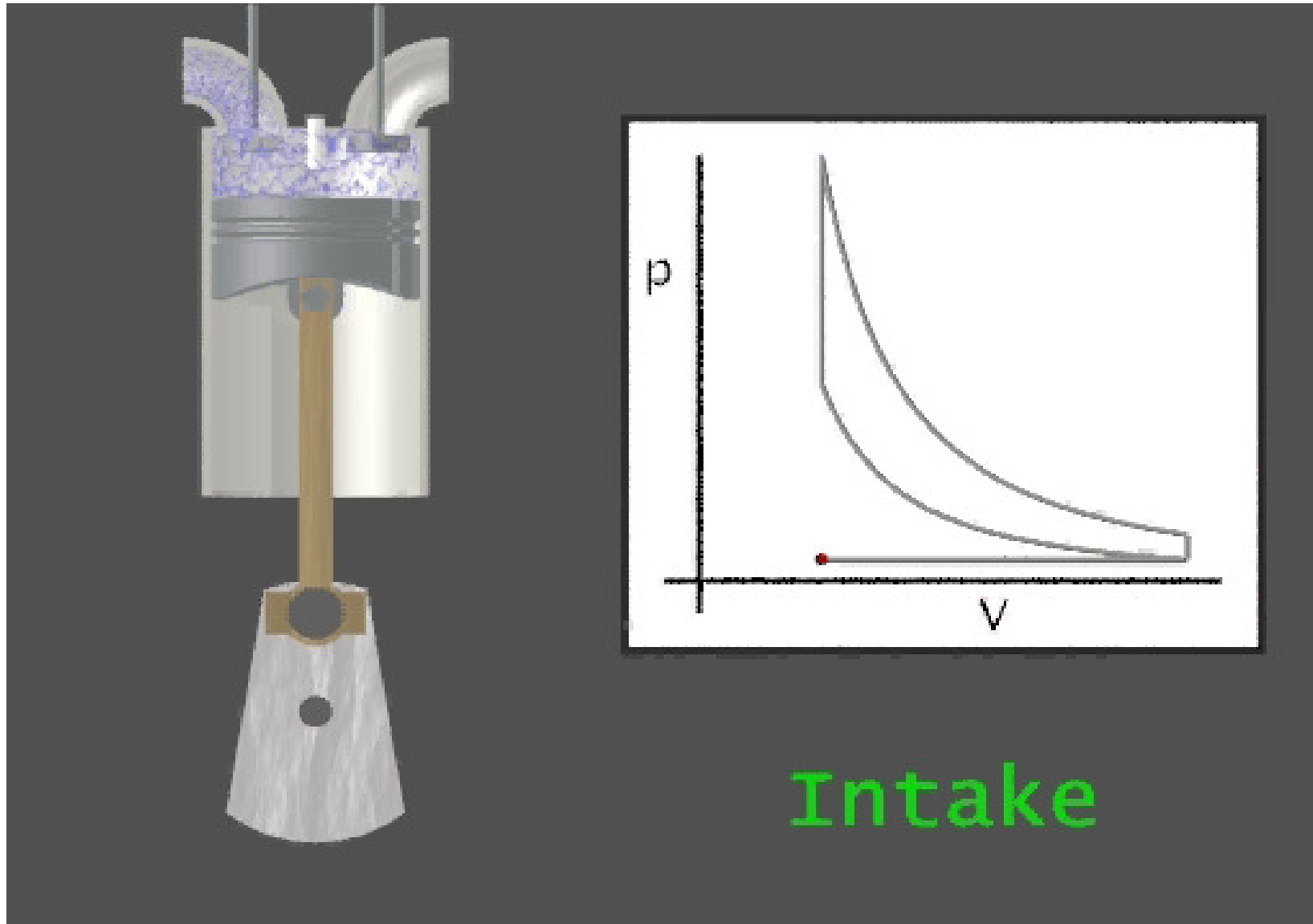


4. Scarico

L'altra valvola si apre e i gas di scarico vengono espulsi dal cilindro.



Università Politecnica delle Marche, Facoltà di Agraria
C.d.L. Scienze Forestali e Ambientali, A.A. 2008/2009, Fisica 1





Si definisce come **rendimento** di una macchina termica il rapporto fra *lavoro prodotto* e *calore assorbito*:

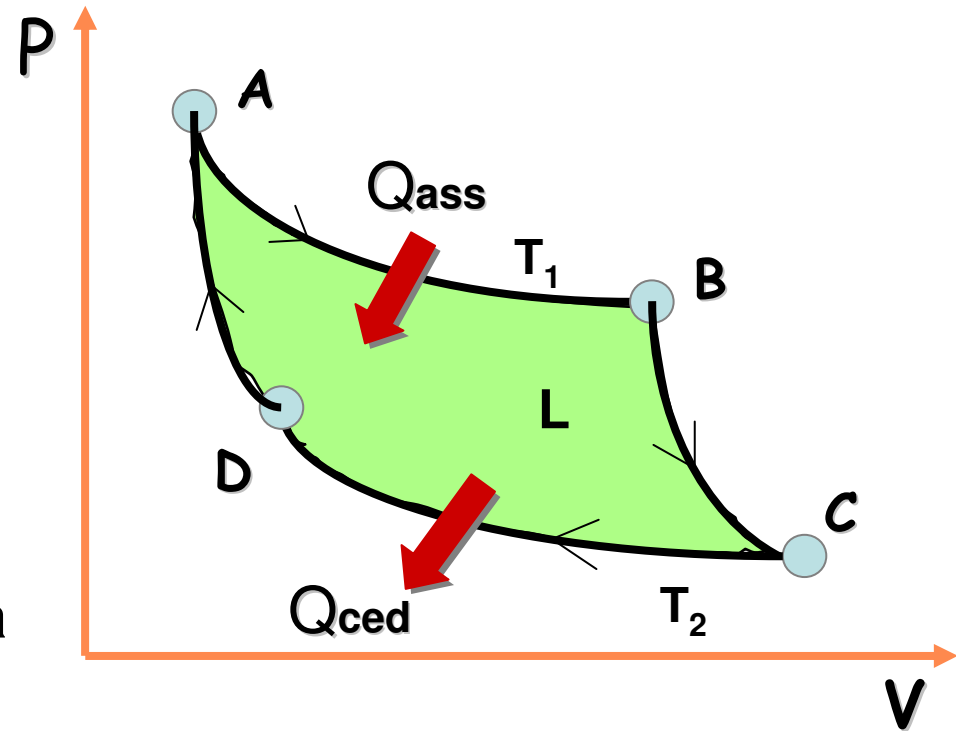
$$\eta = \frac{L}{Q_{ass}} = \frac{Q_{ass} - |Q_{ced}|}{Q_{ass}} = 1 - \frac{|Q_{ced}|}{Q_{ass}} < 1$$

Per un automobile, $\eta \approx 20-25\%$ \Leftrightarrow solo 20-25% dell'energia rilasciata dalla combustione della benzina viene convertita in lavoro meccanico per far muovere l'automobile!!!



La macchina di Carnot:

A - B : Espansione isoterma
B - C : Espansione adiabatica
C - D : Compressione isoterma
D - A : Compressione adiabatica



Sadi Carnot (francese, 1796-1832) ipotizza in 1824 una macchina termica ideale:

- non realizzabile in pratica
- che stabilisce dei limiti per le prestazioni delle macchine reali



$$\eta = \frac{L}{Q_{ass}} = \frac{Q_{ass} - |Q_{ced}|}{Q_{ass}} = 1 - \frac{|Q_{ced}|}{Q_{ass}}$$

$$|Q_{ced}| = \left| nRT_2 \ln \frac{V_D}{V_C} \right| = nRT_2 \ln \frac{V_C}{V_D} \quad ; \quad Q_{ass} = nRT_1 \ln \frac{V_B}{V_A}$$

$$\Rightarrow \eta = 1 - \frac{nRT_2 \ln \frac{V_C}{V_D}}{nRT_1 \ln \frac{V_B}{V_A}} = 1 - \frac{T_2 \ln \frac{V_C}{V_D}}{T_1 \ln \frac{V_B}{V_A}}$$



B – C e D – A sono adiabatiche:

$$T_B V_B^{\gamma-1} = T_C V_C^{\gamma-1} \Rightarrow T_1 V_B^{\gamma-1} = T_2 V_C^{\gamma-1} \Rightarrow \frac{T_1}{T_2} = \frac{V_C^{\gamma-1}}{V_B^{\gamma-1}}$$

$$T_D V_D^{\gamma-1} = T_A V_A^{\gamma-1} \Rightarrow T_2 V_D^{\gamma-1} = T_1 V_A^{\gamma-1} \Rightarrow \frac{T_1}{T_2} = \frac{V_D^{\gamma-1}}{V_A^{\gamma-1}}$$

$$\Rightarrow \frac{V_C^{\gamma-1}}{V_B^{\gamma-1}} = \frac{V_D^{\gamma-1}}{V_A^{\gamma-1}} \Rightarrow \frac{V_C}{V_B} = \frac{V_D}{V_A} \Rightarrow \frac{V_C}{V_D} = \frac{V_B}{V_A}$$

$$\Rightarrow \ln \frac{V_C}{V_D} = \ln \frac{V_B}{V_A} \Rightarrow \boxed{\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}}$$

**è il rendimento di un
ciclo Carnot**



Il rendimento di una macchina di Carnot dipende **solo** dalle temperature dei due termostati

- **non** dipende dalla sostanza usata
- **non** dipende da quanto è grande la macchina

Teorema di Carnot:

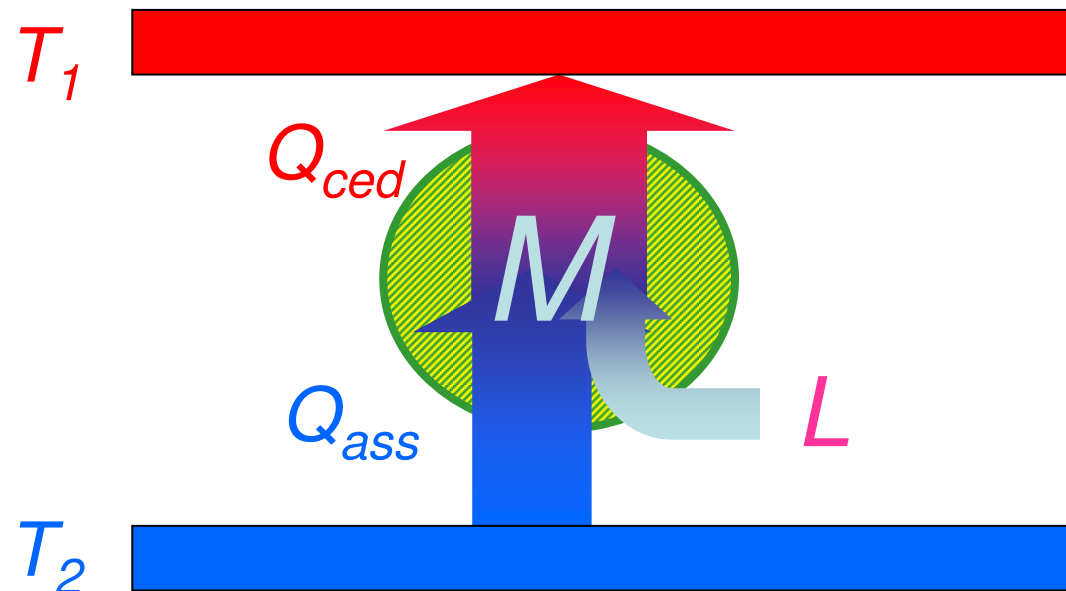
Nessuna macchina termica può superare il rendimento di una macchina di Carnot che lavori fra le stesse temperature.

Prima di dimostrarla, vediamo cosa succede se facciamo funzionare il ciclo alla rovescia?



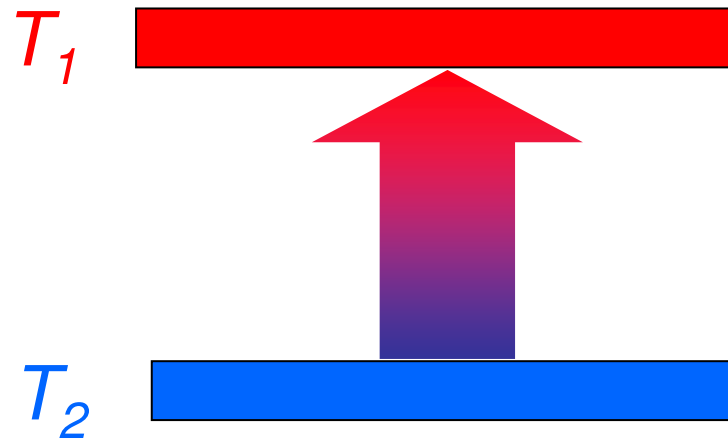
- **TUTTI** i calori e **TUTTI** i lavori cambiano di segno
 - forniremo lavoro
 - assorbiremo calore dalla sorgente fredda
 - forniremo calore alla sorgente calda

**AVREMO UN
FRIGORIFERO!**





Attenzione: non è vietato dal enunciato di Clausius del secondo principio della termodinamica, ciò che è vietato è questo:



Si definisce come coefficiente di prestazione della macchina frigorifera il rapporto fra calore tolto alla sorgente fredda e lavoro necessario per farlo:

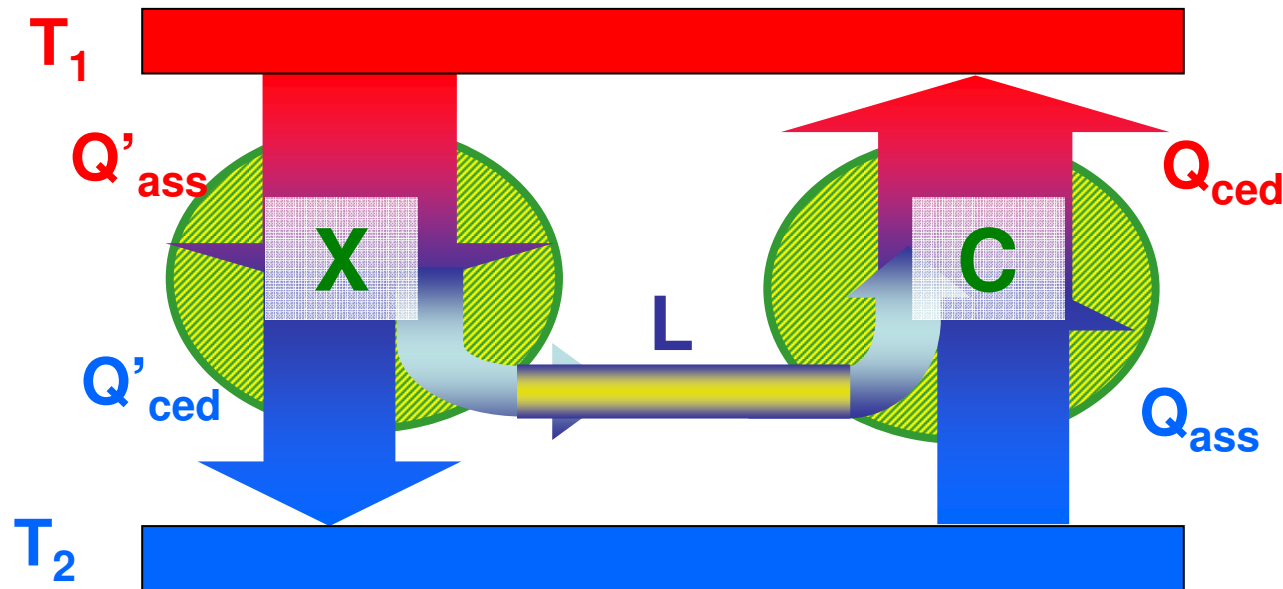
$$CdP = \frac{Q_{ass}}{|L|} = \frac{Q_{ass}}{|Q_{ced}| - Q_{ass}} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \quad \text{può essere } > 1 !$$



Consideriamo una macchina termica (un motore) X e una macchina di Carnot C che la facciamo funzionare a rovescio.

Facciamo in modo che X faccia giusto funzionare C ($L_x = L_c$)

... e supponiamo per assurdo che X abbia un rendimento superiore alla macchina di Carnot.





supponiamo per assurdo che: $\eta_X > \eta_C$

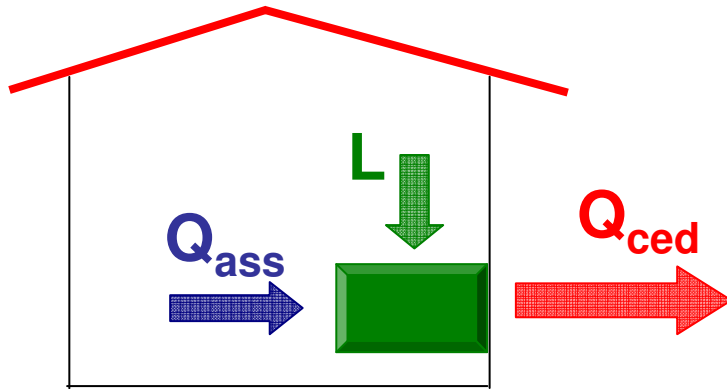
$$\left. \begin{aligned} \eta_X &= \frac{L_X}{Q'_{ass}} > \frac{|L_C|}{Q_{ced}} = \eta_C \\ L_X &= |L_C| \end{aligned} \right\} \Rightarrow Q'_{ass} < Q_{ced}$$

il termostato a temperatura alta riceve più calore di quanto ne dia
... e lo riceve da quello a temperatura più bassa ... **Impossibile!**

⇒ Vale la teorema di Carnot !



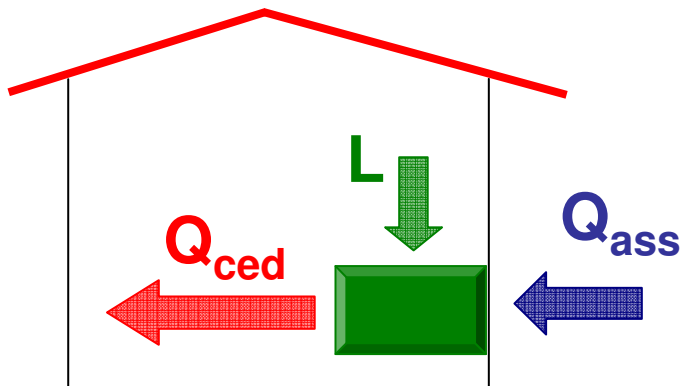
Condizionatore di aria:



- assorbe calore dalla stanza e la cede all'esterno per raffreddare la stanza;

$$CdP = \frac{Q_{ass}}{|L|} = \frac{|Q_{ced}|}{L} - 1$$

Pompa di calore:



- assorbe calore dall'esterno freddo e la cede alla stanza non per raffreddare l'esterno, ma per riscaldare l'ambiente;

$$CdP = \frac{|Q_{ced}|}{|L|} = \frac{Q_{ass}}{L} + 1$$



Esercizio 1:

Determinare se è più conveniente utilizzare una pompa di calore che ha un coefficiente di prestazione 2.5 o una stufa elettrica pensando a quanto calore viene fornito alla casa per ogni Joule di energia elettrica consumata.

Esercizio 2:

Un condizionatore di aria con un coefficiente di prestazione 3 consuma 1 kW di potenza elettrica. Durante 1 h di utilizzo, quanto calore riesce a cedere all'esterno?



Esercizio 3:

Una mole di un gas ideale monoatomico viene utilizzata come fluido di lavoro di una macchina termica che funziona lungo un ciclo fatto da due isobare e due isocore. Si conosce $P_B=2P_A$, $V_C=2V_B$, $P_A=10^5\text{Pa}$ e $V_A=20\text{l}$. Calcolare:

- il lavoro compiuto in ogni ciclo;
- il calore fornito a ogni ciclo durante la trasformazione ABC;
- il rendimento del ciclo;
- quale è il rendimento di una macchina termica di Carnot funzionante tra la temperatura più alta e quella più bassa che si manifestano nel ciclo? Com'è quest'ultimo rispetto al rendimento calcolato al punto c) ?



Esercizio 4:

Una mole di un gas ideale viene utilizzata come sostanza che compie lavoro in una macchina termica che funziona lungo il ciclo mostrato in figura. BC e DA sono processi adiabatici reversibili.

a) Il gas è monoatomico o biatomico?

b) Qual è il rendimento della macchina termica?

