

Fisica Generale B

*Secondo principio
della termodinamica*

Scuola di Ingegneria e Architettura

UNIBO – Cesena

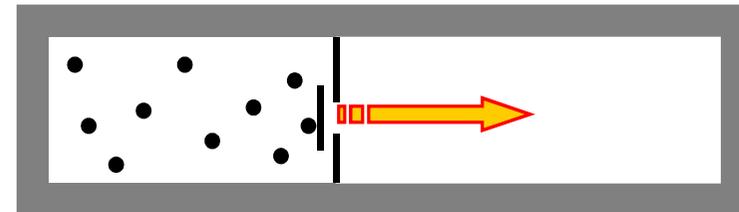
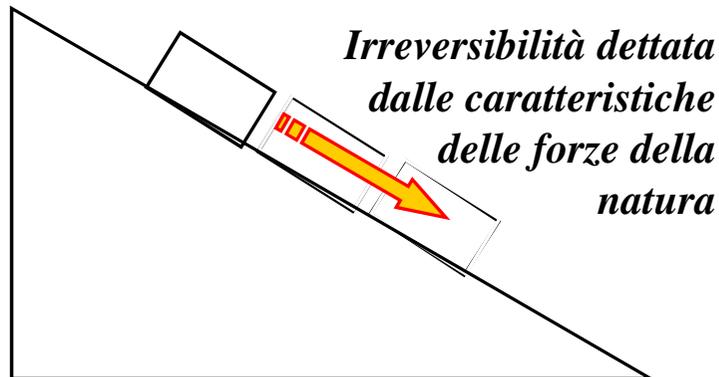
Anno Accademico 2014 – 2015

Irreversibilità delle trasformazioni reali

Per quale ragione in natura molte trasformazioni avvengono con un verso privilegiato?

Trasformazione irreversibile: non è possibile in alcun modo riportare il sistema allo stato iniziale senza che nell'ambiente circostante (il resto dell'universo) ne rimanga traccia.

Trasformazione reversibile: è possibile riportare il sistema allo stato iniziale in modo che anche l'ambiente circostante torni allo stato originario.



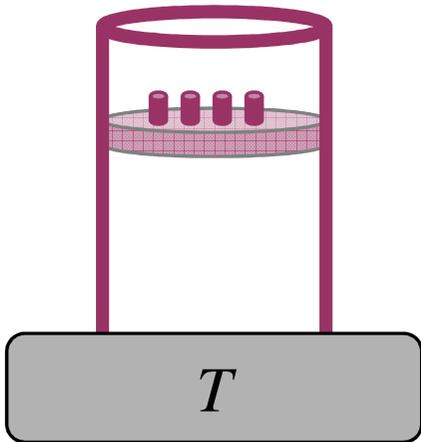
*Tutti i processi reali sono irreversibili
Le trasformazioni reversibili rappresentano una situazione limite che richiede le seguenti condizioni:*

- La trasformazione deve essere quasi-statica*
- Durante la trasformazione non debbono agire forze dissipative.*

Lavoro e serbatoi di calore

È possibile realizzare una macchina termica che, compiendo un ciclo termodinamico, trasformi completamente in lavoro il calore sottratto ad un serbatoio?

Espansione isoterma quasi statica di un gas perfetto
 (in assenza di attrito):  **reversibile**



$$\Delta U = Q - L$$

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

$$Q_{if} = L_{if} = \int_i^f p dV$$

Compressione:

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

$$L_{fi} = \int_f^i p dV = -Q_{if}$$

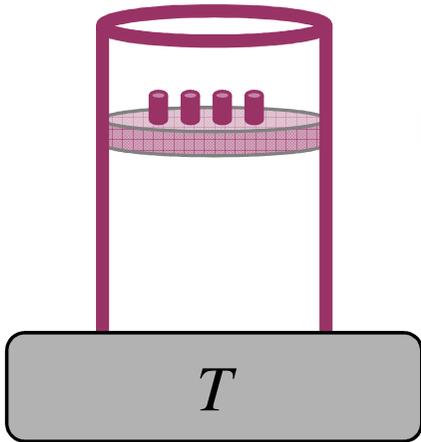


In un ciclo

$$Q = L = 0$$

Lavoro e serbatoi di calore

È possibile realizzare una macchina termica che, compiendo un ciclo termodinamico, trasformi completamente in lavoro il calore sottratto ad un serbatoio?



Espansione isoterma quasi statica di un gas perfetto (con attrito): ⇒ *irreversibile*

$\Delta U = Q - L$ $\Delta U_{if} = 0$ $Q_{if} = L_{if} = \int_i^f p dV$

Compressione:

$\Delta U_{fi} = 0$ $L_{fi} = \int_f^i p dV - L_{attr} = -Q_{if} - L_{attr}$

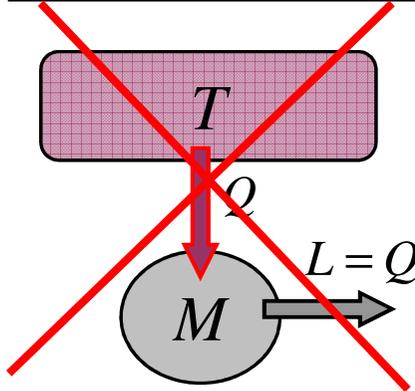
↓

In un ciclo $Q = L = -L_{attr}$

Conclusion: *la risposta, è negativa. In generale (incluso le macchine non reversibili) sperimentalmente si ha:*

$Q = L \leq 0$

Enunciato di Kelvin – Planck: macchine termiche



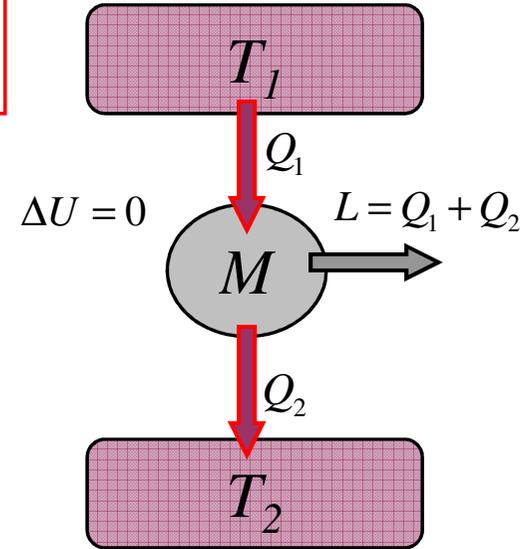
È impossibile realizzare una qualsiasi trasformazione il cui unico risultato sia quello di convertire completamente in lavoro il calore prelevato da un solo serbatoio.

$$L = Q_1 + Q_2$$

$$L = |Q_1| - |Q_2|$$

La più semplice macchina termica:
N.B.:
 $T_1 > T_2$
 $Q_2 < 0$ (riferito alla macchina)

$$\Delta U = Q - L$$



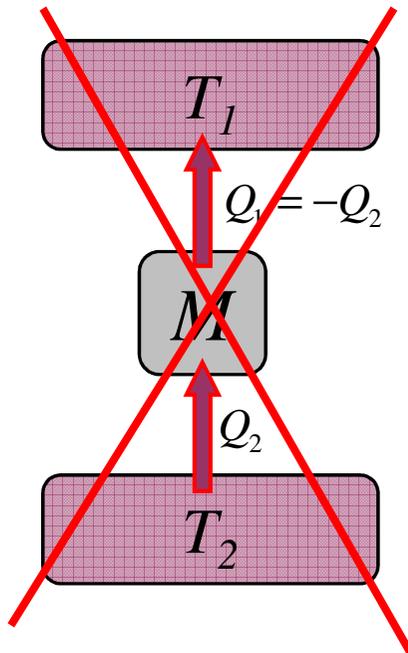
Rendimento di una macchina termica:

$$\eta = \frac{L}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|}$$

$$\eta < 1$$

NB.: è invece possibile realizzare trasformazioni il cui unico risultato sia quello di convertire completamente in calore il lavoro assorbito da una macchina termica.

Enunciato di Clausius: macchine frigorifere

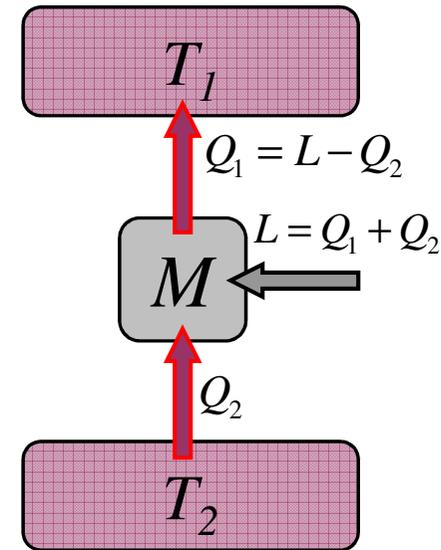


È impossibile realizzare una qualsiasi trasformazione il cui unico risultato sia quello di far passare una data quantità di calore da un corpo (più) freddo a uno (più) caldo.

$$L = Q_1 + Q_2$$

$$|Q_1| = |Q_2| + |L|$$

La più semplice macchina frigorifera:
N.B.:
 $T_1 > T_2$ $\Delta U = Q - L$ \Rightarrow
 $Q_1 < 0$ (riferito alla macchina)
 $L < 0$ ($|Q_1| > |Q_2|$)

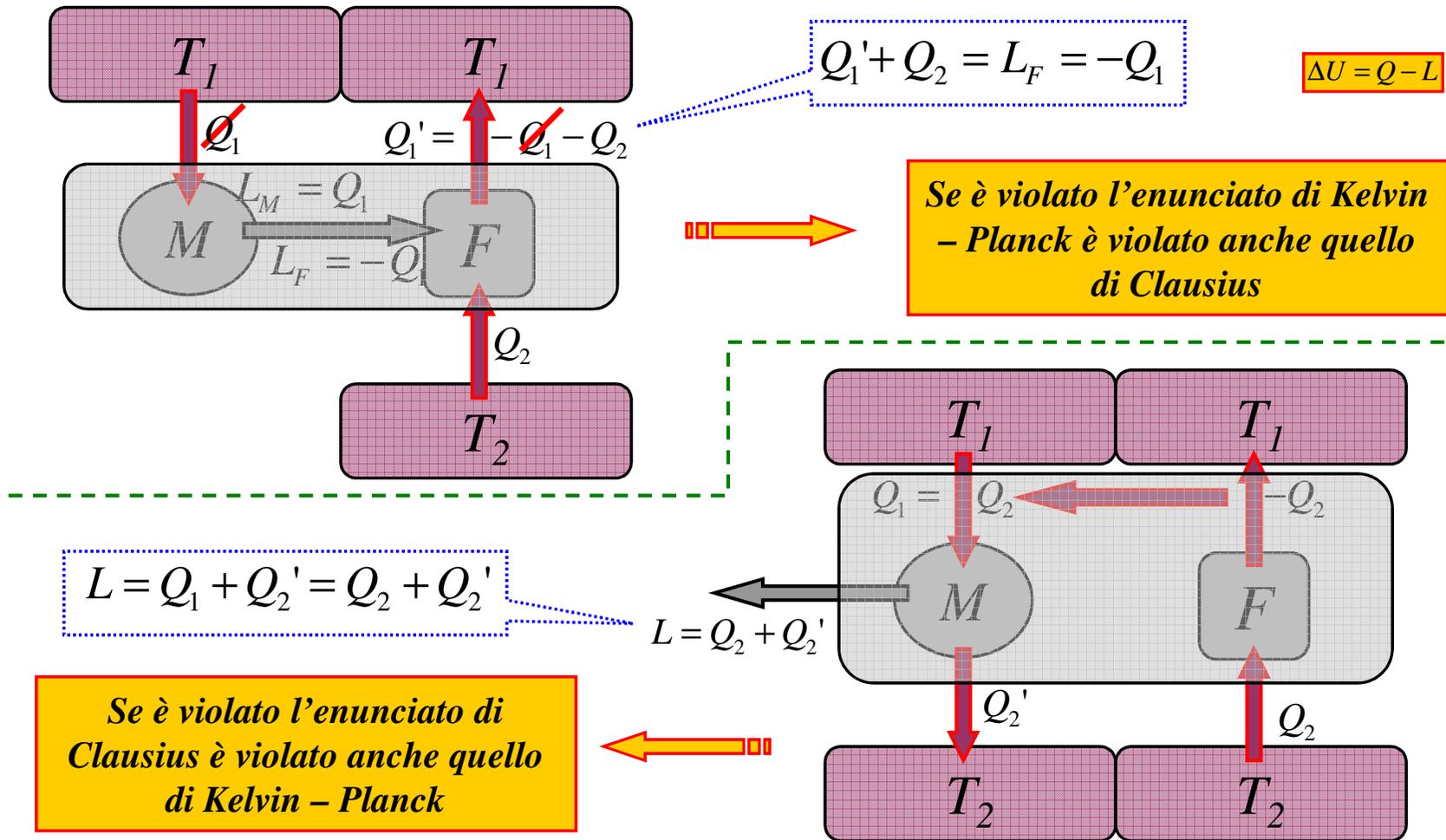


Coefficiente di prestazione di una macchina frigorifera:

$$\omega = \frac{|Q_2|}{|L|} = \frac{|Q_1|}{|L|} - 1$$

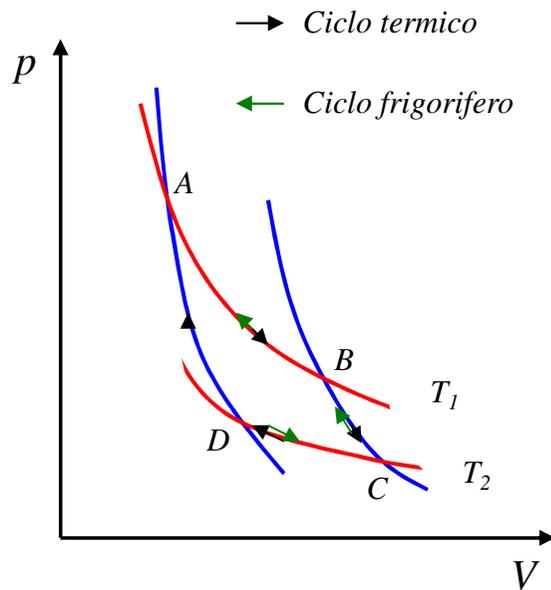
può essere $\omega > 1$

Secondo principio della termodinamica



Ciclo di Carnot

Macchina termica reversibile funzionante con due soli serbatoi: Macchina di Carnot



Esiste un solo tipo di ciclo reversibile che tale macchina può compiere.

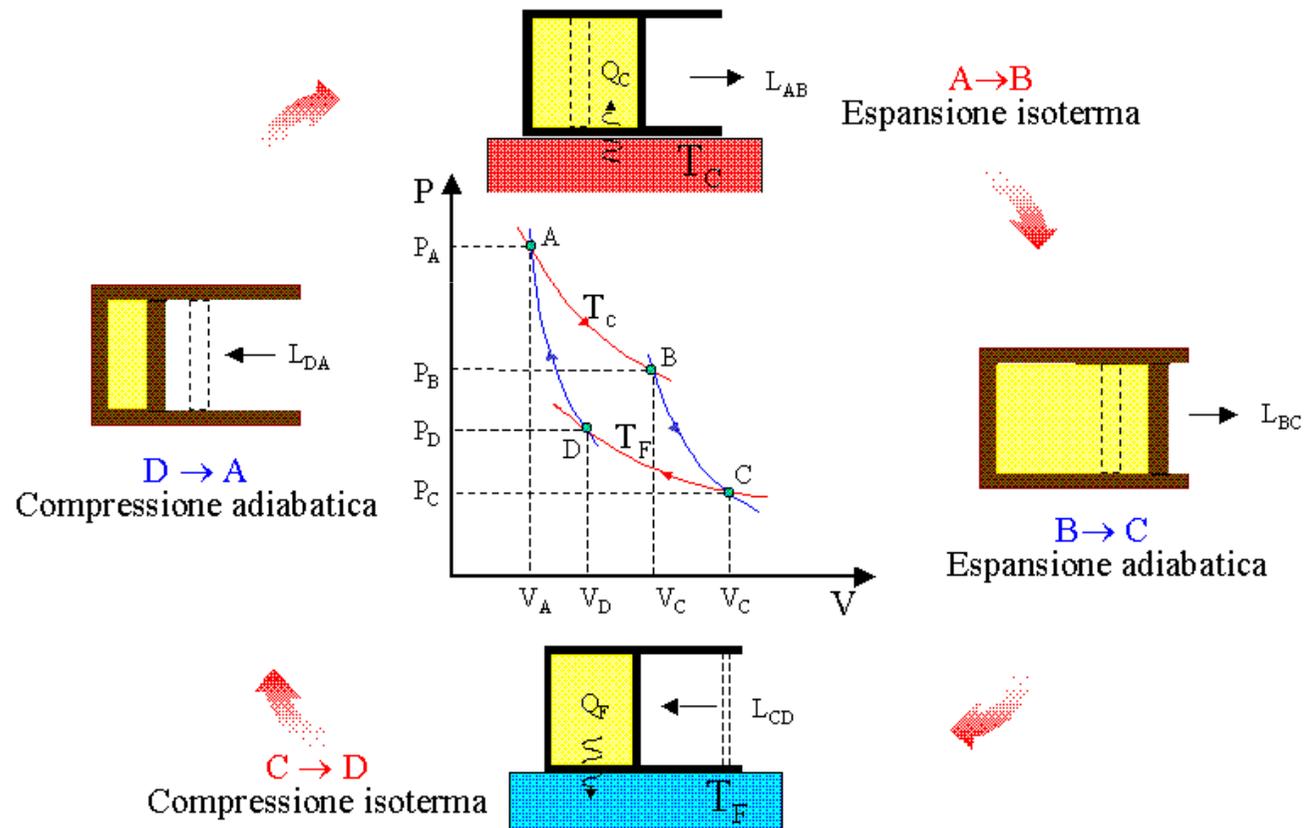
La rappresentazione grafica qui accanto si riferisce a un gas perfetto (in quanto le curve sono quelle del gas perfetto), ma la definizione prescinde dal tipo di fluido.

*Un ciclo termodinamico reversibile che percorre due trasformazioni isoterme e due adiabatiche, quale che sia il fluido contenuto nella macchina viene chiamato **Ciclo di Carnot** (Sadi Nicolas Léonard Carnot 1796 –1832)*

Ciclo di Carnot

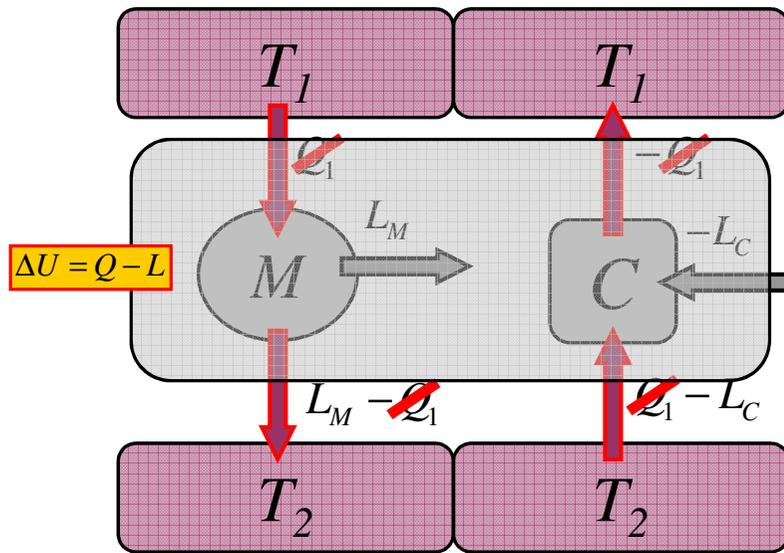
Macchina termica reversibile funzionante con due soli serbatoi

Ciclo reversibile composto da: due isoterme + due adiabatice



Teorema di Carnot

Fra tutte le macchine termiche cicliche che lavorano fra due termostati, quelle reversibili (di Carnot) hanno il rendimento massimo. Tale rendimento è uguale per tutte le macchine reversibili, purché utilizzino gli stessi due termostati.



Per il secondo principio deve essere:

$$L_M - L_C \leq 0 \quad \rightarrow \quad L_M \leq L_C$$

$$\frac{L_M}{Q_1} \leq \frac{L_C}{Q_1} \quad \rightarrow \quad \eta_M \leq \eta_C$$

$$\eta_{C_1} = \eta_{C_2}$$

$$\eta_{C_1} \leq \eta_{C_2}$$

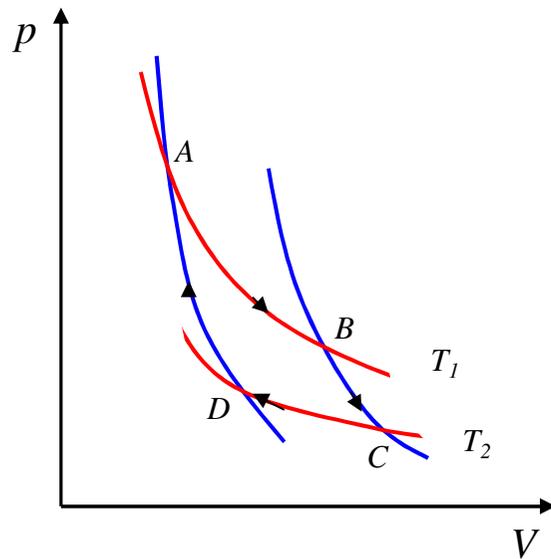
$$\eta_{C_2} \leq \eta_{C_1}$$

Se entrambe le macchine sono di Carnot (reversibili), si può fare il ragionamento prendendo alternativamente l'una (C₁) o l'altra (C₂) come macchina frigorifera.

Macchine di Carnot

Il rendimento di una macchina di Carnot non dipende quindi dal fluido, né da altre caratteristiche del ciclo, ma solo dalle temperature dei termostati.

Conviene allora calcolarlo nel caso in cui il fluido è un gas perfetto.



Isoterme:

$$Q_1 = L_{AB} = nRT_1 \ln \frac{V_B}{V_A} \qquad Q_2 = L_{CD} = -nRT_2 \ln \frac{V_C}{V_D}$$

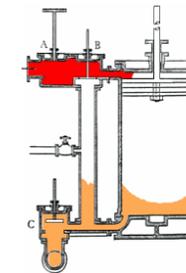
Adiabatiche:

$$\begin{aligned} T_1 V_A^{\gamma-1} &= T_2 V_D^{\gamma-1} \\ T_1 V_B^{\gamma-1} &= T_2 V_C^{\gamma-1} \end{aligned} \Rightarrow \left(\frac{V_B}{V_A} \right)^{\gamma-1} = \left(\frac{V_C}{V_D} \right)^{\gamma-1} \Rightarrow \frac{V_B}{V_A} = \frac{V_C}{V_D}$$

$$\eta = \frac{L}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|}$$



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



Macchine di Carnot

Rendimento: $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$

Coefficiente di prestazione: $\omega = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$

Rendimento di una macchina generica: $\eta = \frac{L}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|}$

$$\eta = 1 + \frac{Q_2}{Q_1} \leq \eta_c = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

$$\frac{Q_2}{Q_1} + \frac{T_2}{T_1} \leq 0$$

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} \leq 0$$

Nel caso di una macchina che opera con N serbatoi:

$$\eta = \frac{L}{Q}$$

dove Q rappresenta la somma di tutti i calori assorbiti dalla macchina.

$$\sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{T_i} \leq 0$$

Teorema di Clausius
(da dimostrare)

Temperatura assoluta

Per una qualunque macchina reversibile (di Carnot) funzionante tra due serbatoi di temperature T_1 e T_2 ...

$$\frac{|Q_2|}{|Q_1|} = \frac{T_2}{T_1}$$

...il calore scambiato è una buona proprietà termometrica, in quanto il rapporto dei calori scambiati è indipendente dal fluido.

Quindi si può definire una **temperatura assoluta**...

$$T = 273.16 \frac{|Q|}{|Q_3|} \text{ K}$$

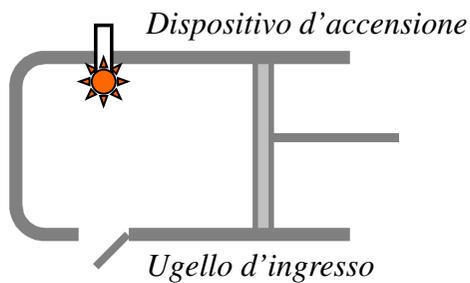
...sfruttando una macchina reversibile che lavori tra due sorgenti: una alla temperatura da misurare, l'altra alla temperatura del punto triplo dell'acqua.

Questa definizione coincide con la temperatura del termometro a gas perfetto alle temperature dove esistono i gas e permette di estendere le misurazioni fino alle temperature più basse.

Il fatto che sperimentalmente lo zero assoluto non sia raggiungibile costituisce un enunciato del Terzo Principio della Termodinamica

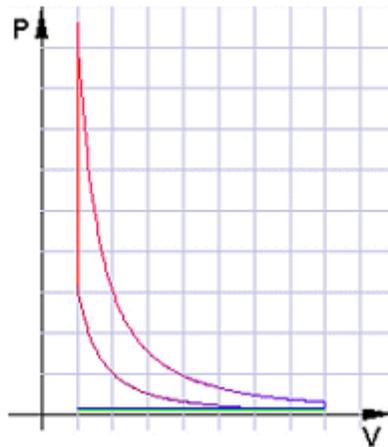
Altre macchine termiche

Motore a scoppio



Le sostanze attive sono l'aria e "l'essenza". Un tale motore si dice a quattro tempi. Il suo ciclo comprende quattro fasi di tipo meccanico ed una fase (ciclo) termodinamica.

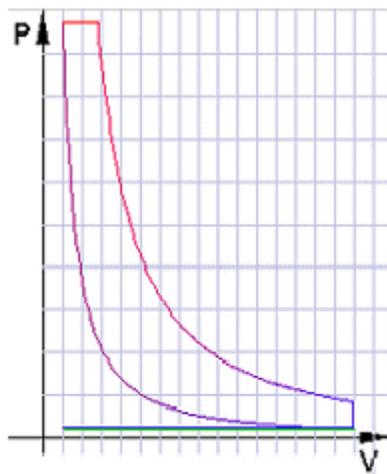
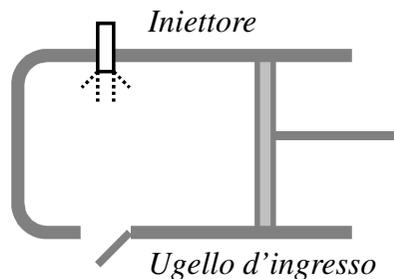
Si rappresenta un tale ciclo in maniera idealizzata (noto come **ciclo di Otto**), poichè, a causa dell'esplosione, le trasformazioni effettuate non sono quasi statiche.



- Le quattro fasi, legate al moto del pistone, riguardano
1. isobara di aspirazione;
 2. compressione adiabatica;
 3. esplosione isocora che comporta aumento di pressione;
 3. dilatazione dell'aria ed isocora di raffreddamento (cessione di calore all'esterno);
 4. espulsione del gas bruciato.

Altre macchine termiche

Motore Diesel



Ciclo Diesel

La combustione della miscela aria-carburante avviene in condizioni di pressione costante anziché di volume costante.

1. Durante la prima corsa, o corsa d'aspirazione, l'aria (non il combustibile) viene aspirata nella camera di combustione attraverso una valvola d'ammissione.
2. Nella fase successiva, o corsa di compressione, viene compressa a una piccola frazione del volume iniziale e si riscalda raggiungendo temperature superiori ai $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Il combustibile vaporizzato viene quindi iniettato nella camera di combustione dove, a causa dell'elevata temperatura (superiore al punto di infiammabilità al quale il carburante si accende spontaneamente), brucia istantaneamente.
3. L'espansione dei gas di combustione della miscela fa retrocedere il pistone, che compie la terza corsa, attiva.
4. Durante la corsa finale vengono evacuati i gas di combustione.

Teorema di Clausius

$$\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{T_i} \leq 0$$

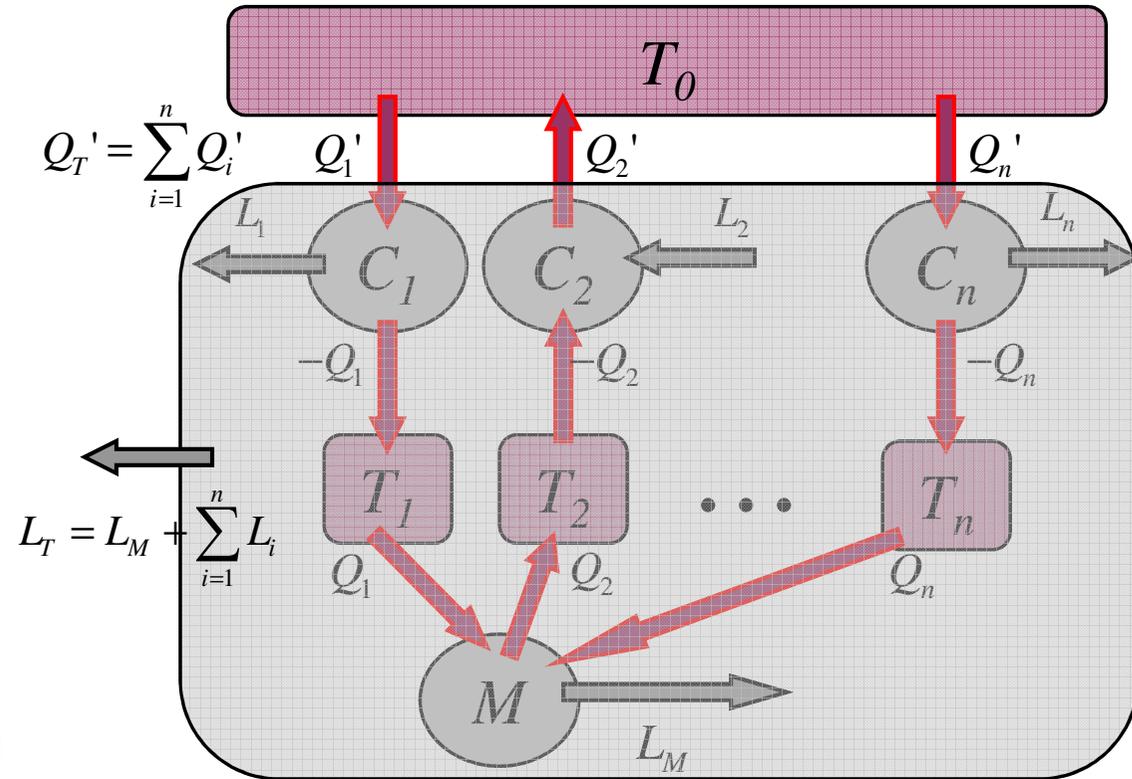
Kelvin - Planck

$$L_T = Q_T' \leq 0$$

$$\forall C_i \quad \frac{Q_i'}{T_0} + \frac{-Q_i}{T_i} = 0$$

$$Q_i' = T_0 \frac{Q_i}{T_i}$$

$$Q_T' = \sum_{i=1}^n Q_i' = T_0 \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{T_i} \leq 0$$



Il segno = vale se M è reversibile.

Teorema di Clausius

... detto anche “disuguaglianza di Clausius”:

In un ciclo durante il quale un sistema termodinamico qualunque scambia le quantità di calore $Q_1, \dots, Q_i, \dots, Q_n$ con un numero qualsiasi n di termostati alle temperature $T_1, \dots, T_i, \dots, T_n$, la somma algebrica dei rapporti tra i calori scambiati e le temperature termodinamiche assolute dei rispettivi termostati non è mai positiva, ed è nulla se e soltanto se tutte le trasformazioni del ciclo sono reversibili.

$$\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{T_i} \leq 0$$

Se nella trasformazione ciclica la temperatura del sistema varia con continuità

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

