

Lezioni di Termodinamica

per LT Informatica

Università di Ferrara

Lucia Del Bianco

Dip.to di Fisica e Scienze della Terra



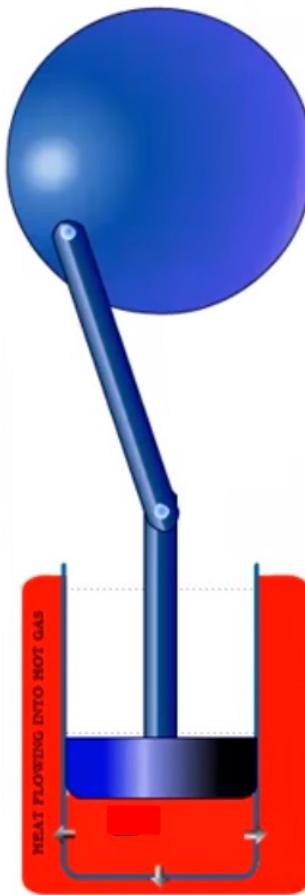
Secondo principio della termodinamica

Esempi di processi che non violano il primo principio ma che non avvengono in natura:

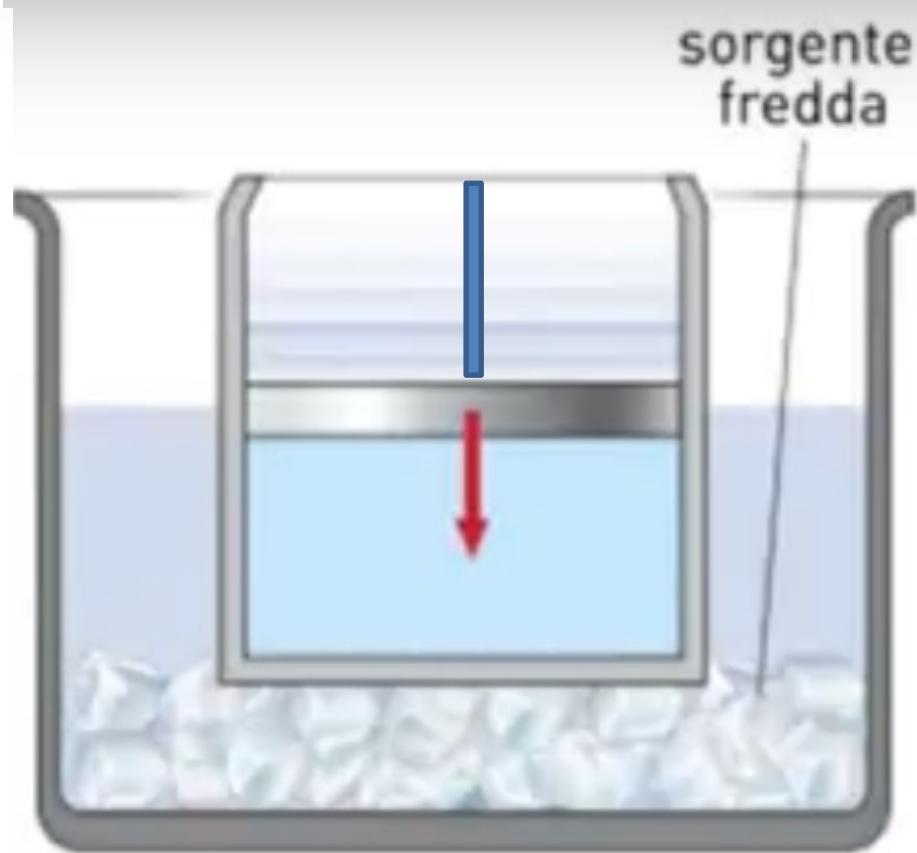
- Il calore si trasferisce sempre da un corpo più caldo a uno più freddo.
- se freno un'auto, il freno si riscalda e l'auto si ferma. Ma per quanto io possa scaldare il freno, l'auto non si rimetterà in moto
- una palla di gomma cade a terra da una certa altezza, rimbalza e alla fine si ferma. La palla e il suolo si scaldano. Ma nessuna quantità di calore ceduto alla palla e al suolo la faranno risalire
- le oscillazioni di un pendolo piano piano si attenuano e alla fine si ferma cedendo energia alle molecole di aria. Non può accadere che l'energia termica delle molecole d'aria si trasformi in energia meccanica del pendolo.

Il secondo principio traduce in una legge fisica
questi fenomeni

Macchine termiche



NOTA: Un **serbatoio** (o **termostato**) di energia è una sorgente di energia interna così grande che il trasferimento di una quantità finita di energia non cambia la sua temperatura



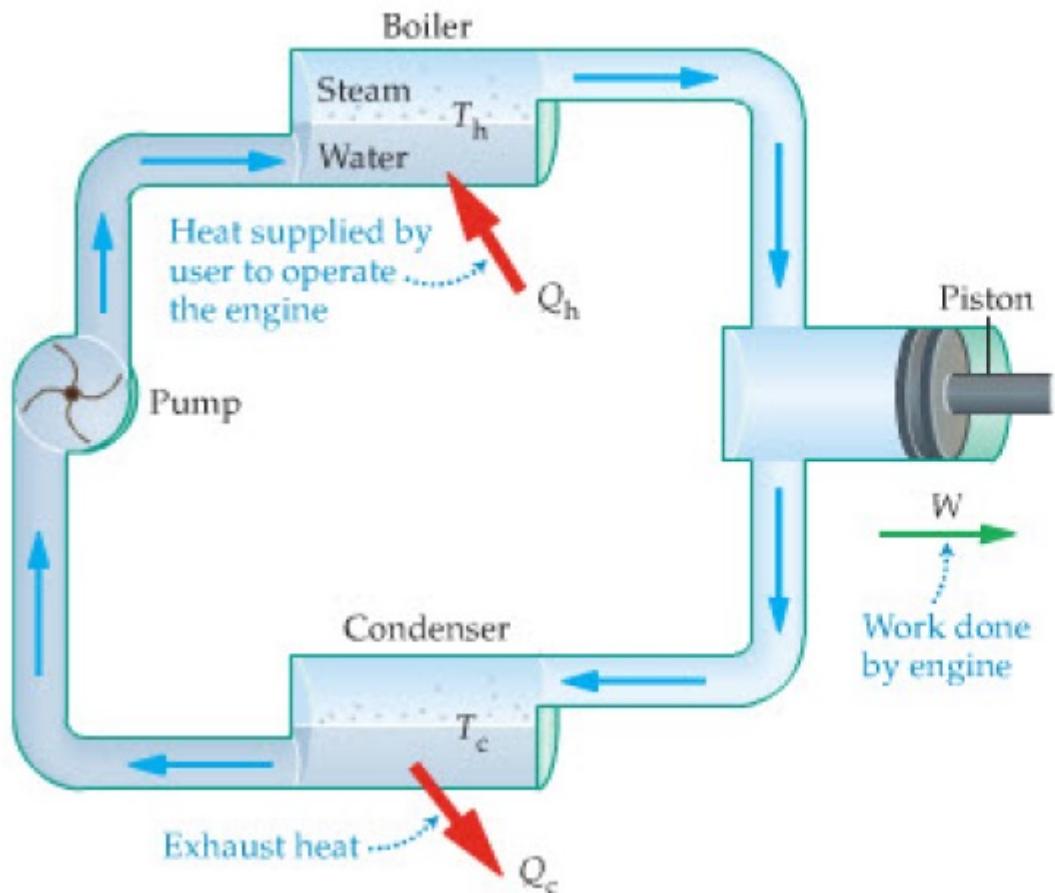
Una macchina termica è un dispositivo che incamera energia sotto forma di calore e, operando in modo ciclico, espelle una parte di quella energia sotto forma di lavoro.

Una macchina termica fa compiere ad una sostanza una trasformazione ciclica durante la quale:

- 1) La sostanza assorbe energia sotto forma di calore da una sorgente ad alta temperatura.
- 2) La macchina compie lavoro.
- 3) Una certa quantità di energia viene ceduta ad una sorgente a temperatura più bassa.

Macchine termiche

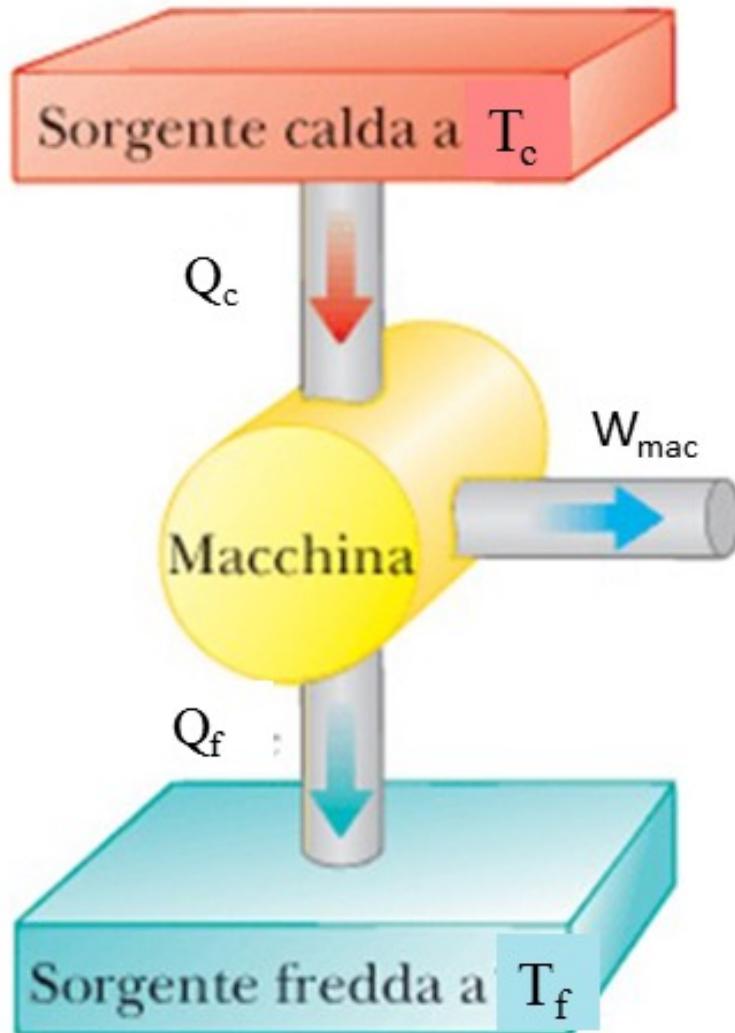
Il motore a vapore



◀ FIGURE 18–15 A schematic steam engine

The basic elements of a steam engine are a boiler—where heat converts water to steam—and a piston that can be displaced by the expanding steam. In some engines, the steam is simply exhausted into the atmosphere after it has expanded against the piston. More sophisticated engines send the exhaust steam to a condenser, where it is cooled and condensed back to liquid water, then recycled to the boiler.

Schema di una macchina termica



Una **macchina termica** è un dispositivo che incamera energia sotto forma di calore e, operando in modo ciclico, espelle una parte di quella energia sotto forma di lavoro.

Nella nostra convenzione, un **lavoro W negativo viene svolto sulla macchina**.

Quindi, un **lavoro positivo (che chiamo $W_{dal\ gas}$ oppure W_{mac}) viene svolto dalla macchina**.

$$\text{Allora, } W_{mac} = -W$$

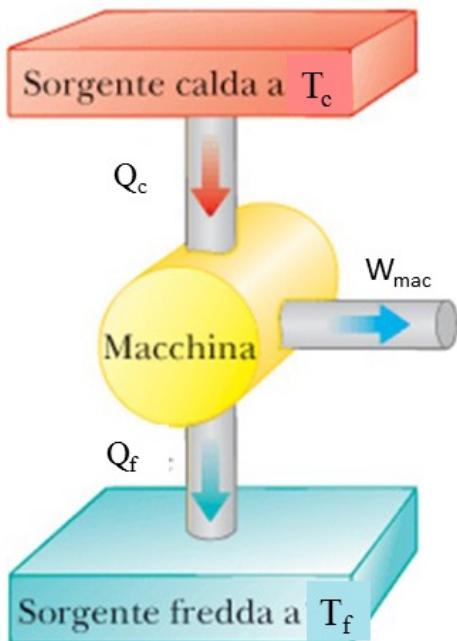
$$\Delta E_{int} = Q + W = Q - W_{mac}$$

$$0 = Q_{netto} - W_{mac}$$

$$Q_{netto} = W_{mac}$$

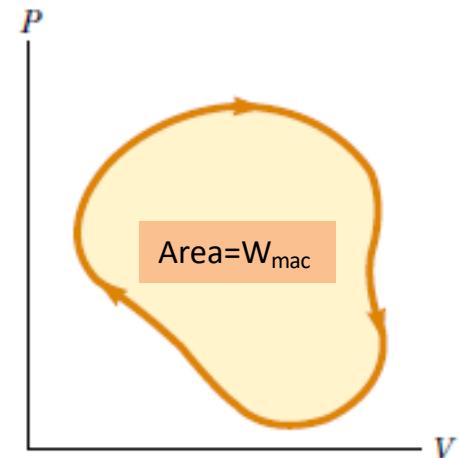
$$W_{mac} = |Q_c| - |Q_f|$$

Rendimento di una macchina termica



Il **rendimento termico** è il rapporto tra il lavoro compiuto e il calore assorbito dalla sorgente calda.

$$e = \frac{W_{mac}}{|Q_c|}$$



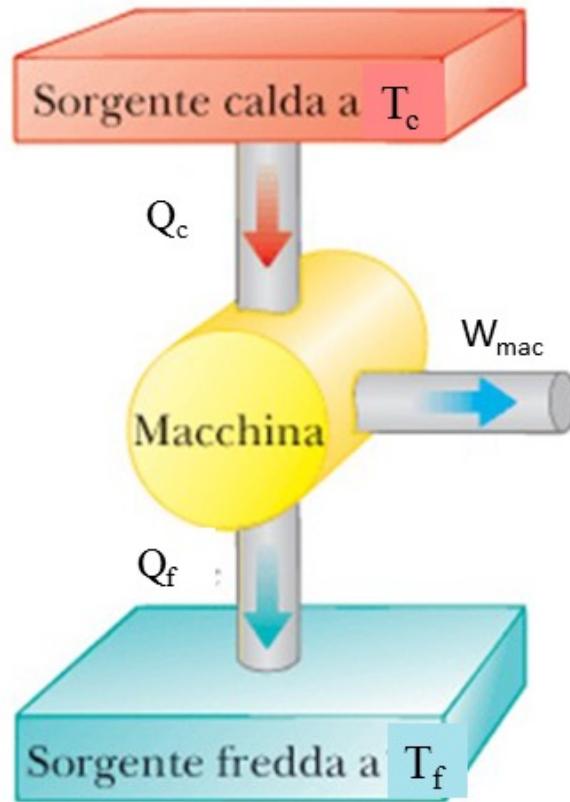
$$e = \frac{W_{mac}}{|Q_c|} = \frac{|Q_c| - |Q_f|}{|Q_c|} = 1 - \frac{|Q_f|}{|Q_c|}$$

Il valore $e = 1$ (100%) si otterrebbe solo se $|Q_f| = 0$, cioè se non ci fosse calore trasferito alla sorgente fredda.

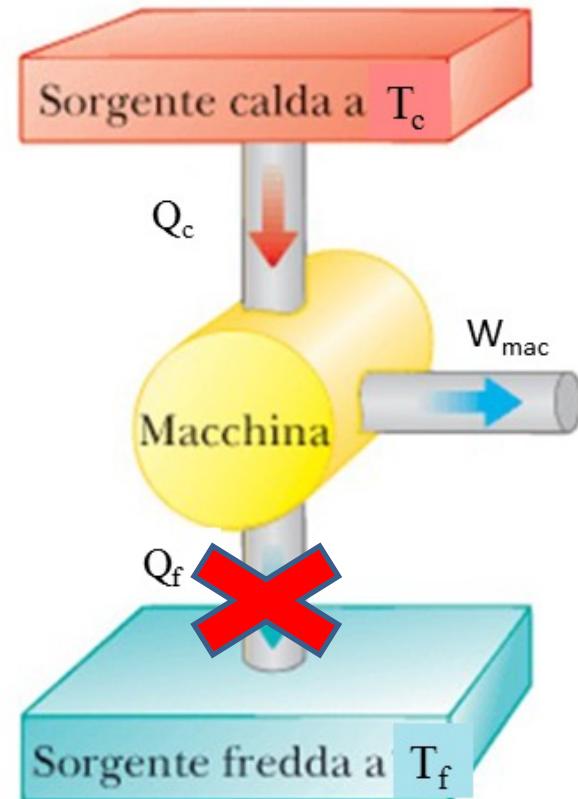
Enunciato di Kelvin-Planck del secondo principio della termodinamica

E' impossibile costruire una macchina termica ciclica che abbia come **unico** risultato quello di assorbire energia da una sorgente e di produrre una uguale quantità di lavoro.

E' impossibile costruire una macchina termica che abbia rendimento uguale a 1.



Permessa
dall'enunciato di
Kelvin-Planck



Proibita dall'enunciato
di Kelvin-Planck.
IRREALIZZABILE

ESERCIZIO

Un motore compie una trasformazione assorbendo 2.00×10^3 J di energia da un termostato caldo durante un ciclo e cedendo 1.50×10^3 J a un termostato freddo.

(A) Trovare il rendimento del motore.

$$e = 1 - \frac{|Q_f|}{|Q_e|} = 1 - \frac{1.50 \times 10^3 \text{ J}}{2.00 \times 10^3 \text{ J}} = 0.250, \text{ o } 25.0\%$$

(B) Quanto lavoro compie questo motore in un ciclo?

Il lavoro svolto è la differenza fra l'energia in entrata e in uscita:

$$\begin{aligned} W_{\text{mac}} &= |Q_e| - |Q_f| = 2.00 \times 10^3 \text{ J} - 1.50 \times 10^3 \text{ J} \\ &= 5.0 \times 10^2 \text{ J} \end{aligned}$$

Trasformazioni reversibili e irreversibili

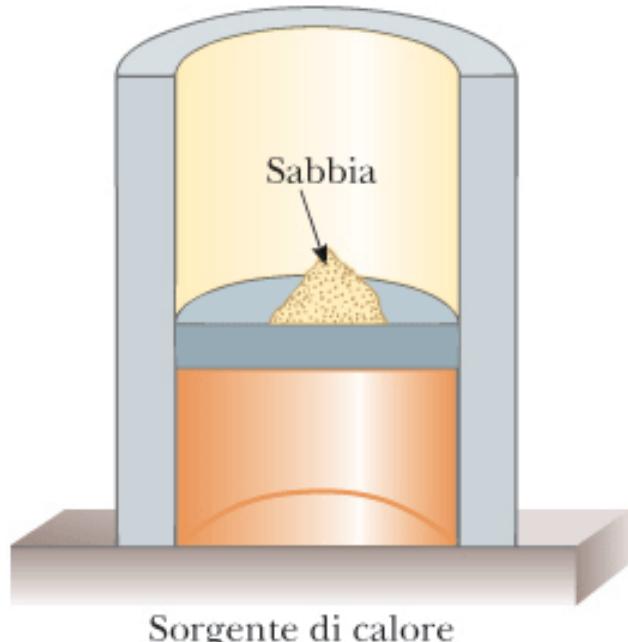
Una trasformazione è detta **reversibile** se è possibile riportare **sia il sistema sia l'ambiente esterno** allo stato iniziale ripercorrendo a ritroso lo stesso cammino.

Affinché una trasformazione sia reversibile deve soddisfare i seguenti requisiti:

- la trasformazione è realizzata da una successione di stati di equilibrio
- ogni stato differisce dal precedente o dal seguente per valori infinitesimi dei parametri termodinamici
- il verso della trasformazione può essere cambiato in ogni istante.

Se la trasformazione **non soddisfa** questi requisiti è detta **irreversibile**.

Se in una trasformazione sono presenti attriti la trasformazione non è reversibile. **Tutte le trasformazioni reali sono irreversibili.**



Se una trasformazione reale avviene **molto lentamente**, in modo che il sistema sia sempre molto vicino all'equilibrio, essa può essere considerata reversibile.

Un gas in contatto termico con una sorgente di calore è compresso lentamente dai granelli di sabbia che via via vengono fatti cadere sul pistone. La compressione è isoterma e reversibile.

La macchina di Carnot

Carnot mostrò che una macchina che operi fra due sorgenti di calore compiendo un ciclo ideale reversibile (detto ciclo di Carnot) è la macchina più efficiente possibile

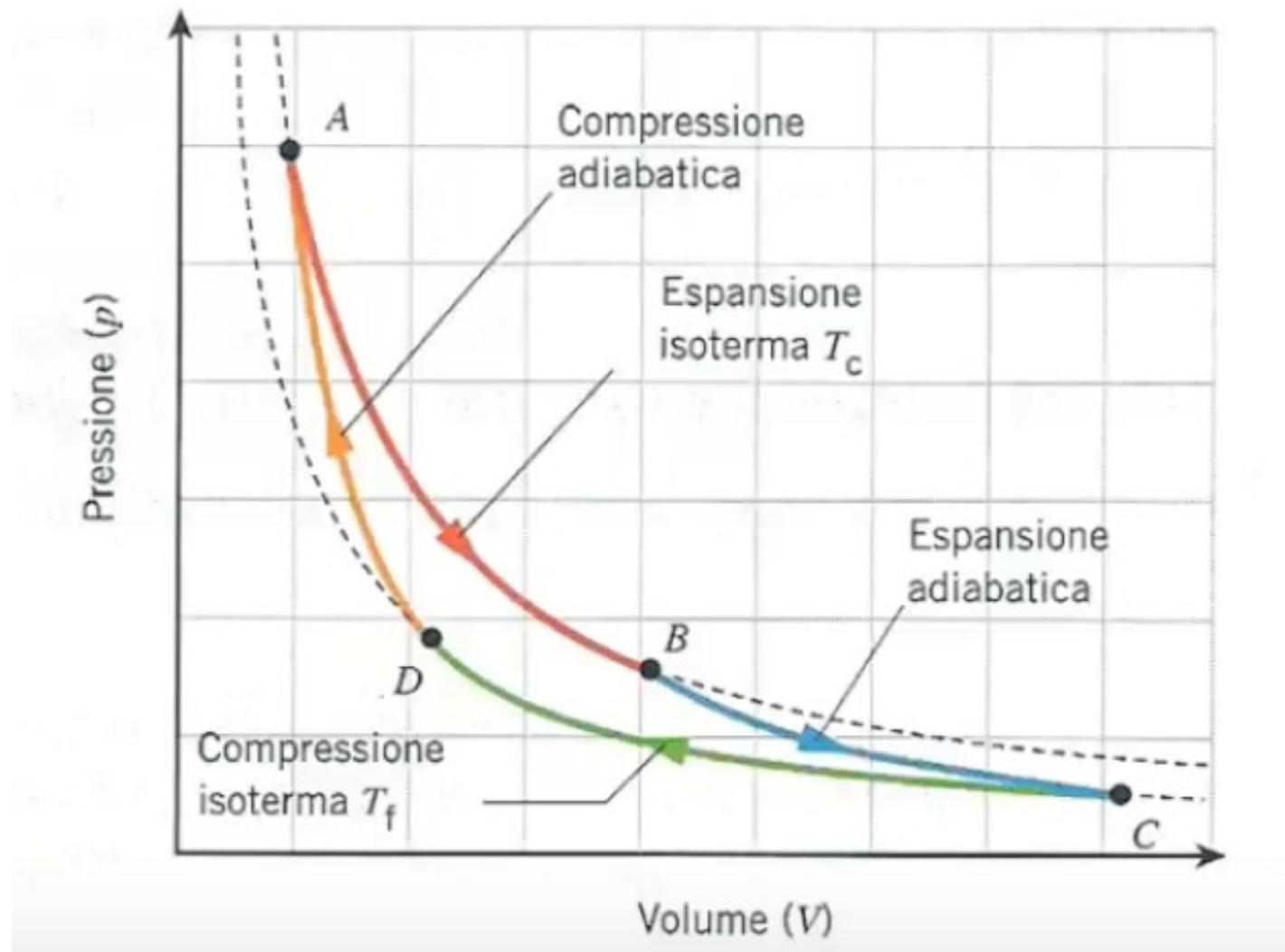
Nessuna altra macchina può avere un rendimento maggiore.

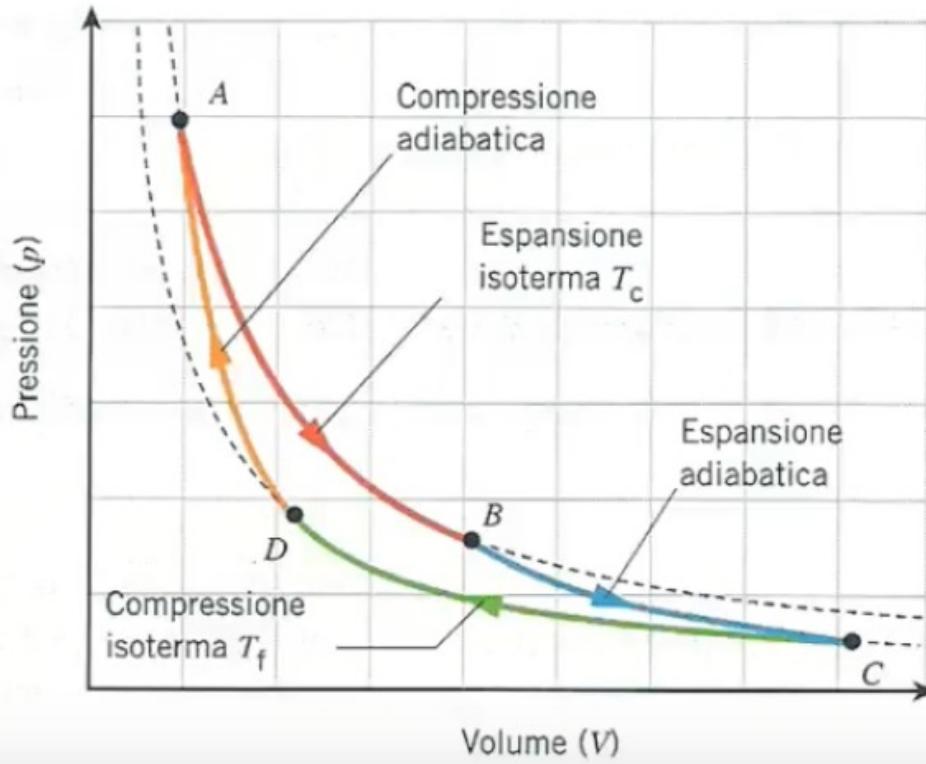


Sadi Carnot
French engineer (1796–1832)

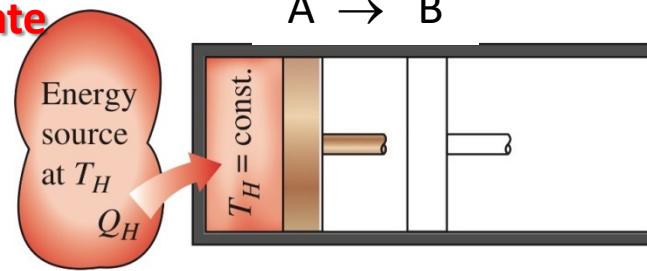
Il ciclo di Carnot

Gas perfetto in un cilindro chiuso da un pistone mobile e privo di attriti.
Le pareti del cilindro e il pistone sono termicamente isolati.

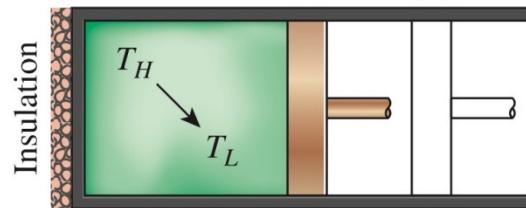




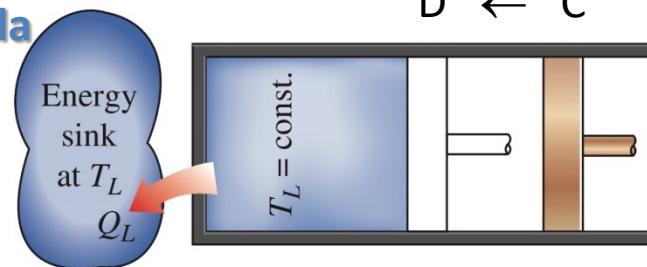
Sorgente calda



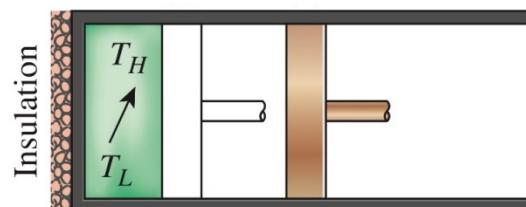
B → C



Sorgente fredda



A ← D

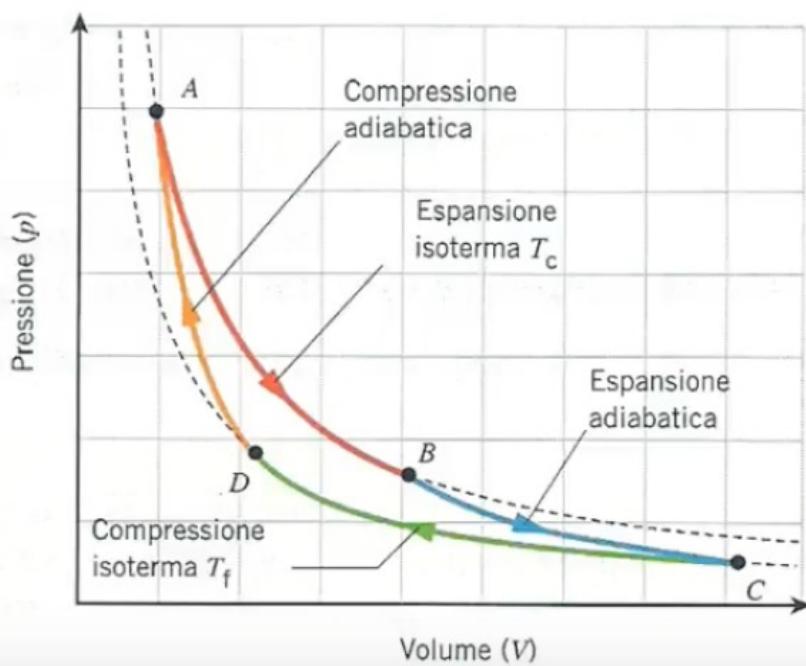


Nota sulla figura

$$T_c = T_H; \quad T_f = T_L$$

H → high

L → low



	ΔE_{int}	Q	W (sul pes)	W_{revc} (del pes)
AB	0	+	-	+
Be	-	0	-	+
CD	0	-	+	-
DA	+	0	+	-

$$|W_{AB}| = \left| uRT_c \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right) \right|$$

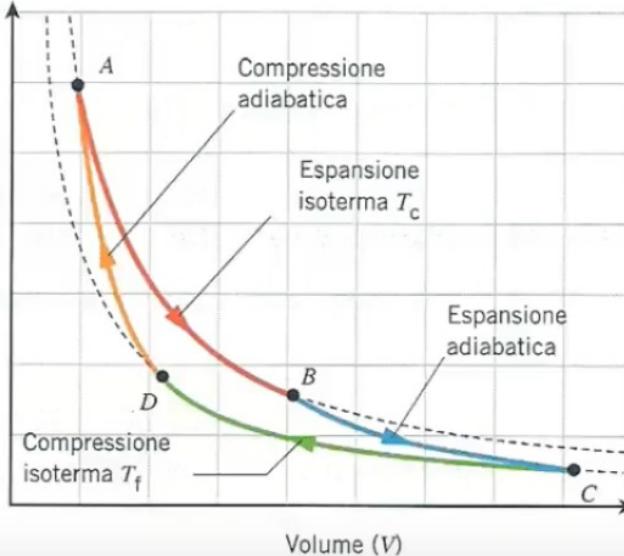
$$|W_{Be}| = \left| n e_v (\bar{T}_f - \bar{T}_c) \right|$$

$$|W_{cd}| = \left| uRT_f \ln\left(\frac{V_d}{V_e}\right) \right|$$

$$|W_{DA}| = \left| n e_v (\bar{T}_e - \bar{T}_f) \right|$$

W_{Be} e W_{DA} → uguali in valore assoluto,
ma opposti in segno

$$W_{MAC} = |W_{AB}| + |W_{cd}| = W_{AB} - W_{cd}$$

Pressione (p)

Il ciclo di Carnot

In questa tabella:

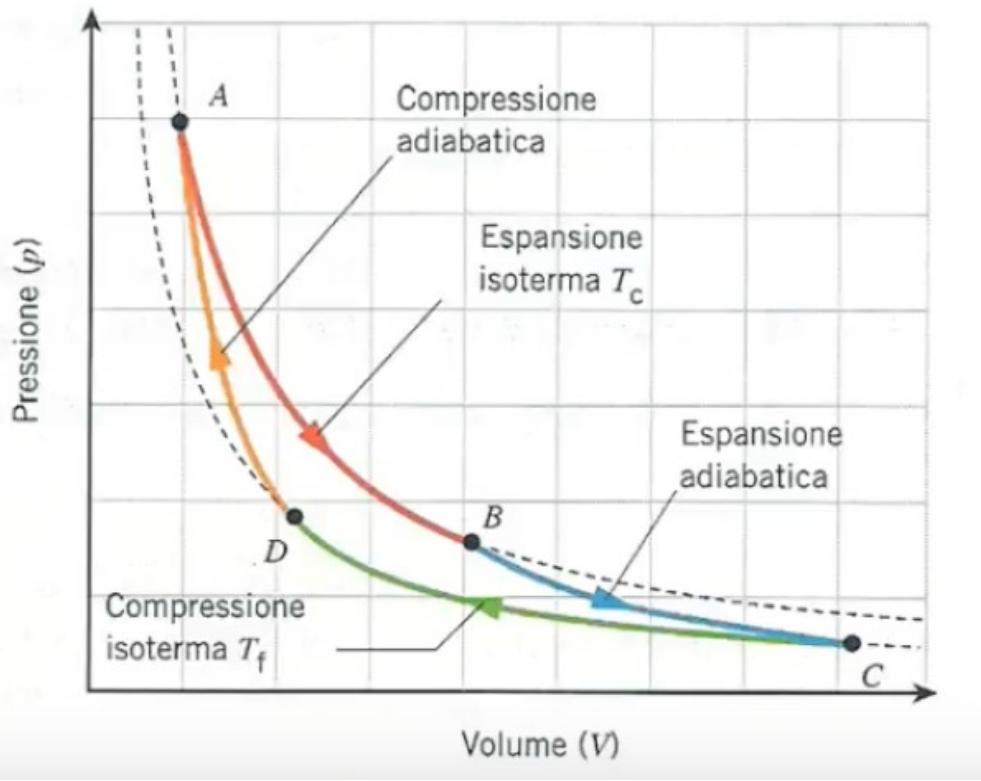
$$T_c = T_2$$

$$T_f = T_1$$

$$Q_c = Q_2$$

$$Q_f = Q_1$$

Trasformazione AB	Trasformazione BC	Trasformazione CD	Trasformazione DA
Isoterma	Adiabatica	Isoterma	Adiabatica
$T_2 = \text{Costante}$	Diminuzione di temperatura da T_2 a T_1	$T_1 = \text{Costante}$	Aumento di temperatura da T_1 a T_2
Calore assorbito Q_2	$Q = 0$	Calore ceduto Q_1	$Q = 0$
Diminuzione di pressione	Diminuzione di pressione	Aumento di pressione	Aumento di pressione
Aumento di volume	Aumento di volume	Diminuzione di volume	Diminuzione di volume
Lavoro di espansione	Lavoro di espansione	Lavoro di compressione	Lavoro di compressione
$\Delta E_{\text{int}} = 0$	Diminuzione della energia interna	$\Delta E_{\text{int}} = 0$	Aumento della energia interna



$$e = 1 - \frac{T_f}{T_c} = \frac{T_c - T_f}{T_c}$$

Temperature espresse in Kelvin!

Carnot ha dimostrato che per questo ciclo

$$\frac{|Q_f|}{|Q_c|} = \frac{T_f}{T_c}$$

$$e = 1 - \frac{|Q_f|}{|Q_c|} = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

Tutte le macchine di Carnot che lavorano tra le stesse due temperature hanno lo stesso rendimento, qualunque sia la sostanza che lavora nel ciclo stesso.

Teorema di Carnot

Affinchè una macchina che opera tra due sorgenti abbia il rendimento massimo, deve eseguire solamente trasformazioni reversibili.

Tutte le macchine reversibili che operano tra le stesse due sorgenti hanno lo stesso rendimento.

$$e = 1 - \frac{T_f}{T_c} = \frac{T_c - T_f}{T_c}$$

Se $T_f = T_c \Rightarrow$ rendimento 0.

Il rendimento aumenta quando T_f diminuisce e T_c aumenta.

Il rendimento sarebbe 1 se $T_f = 0$ K.

E' impossibile raggiungere lo 0 assoluto → **Terza legge della termodinamica**

Tutte le macchine reali operano in maniera irreversibile e perciò sono meno efficienti di una macchina di Carnot.

La necessità di operare in maniera irreversibile scaturisce dalla necessità di completare un ciclo in un breve periodo di tempo.

ESERCIZIO

Una macchina a vapore ha un bollitore che opera a 500 K. L'energia estratta dalla combustione del carburante trasforma l'acqua in vapore, e il vapore fa poi funzionare il pistone. La temperatura del termostato freddo è quella dell'aria esterna, circa 300 K. Qual è il massimo rendimento teorico di questa macchina a vapore?

$$e_C = 1 - \frac{T_f}{T_c} = 1 - \frac{300 \text{ K}}{500 \text{ K}} = 0.400 \quad \text{o} \quad 40.0\%$$

Il rendimento teorico aumenta quando T_f diminuisce e T_c aumenta. Quale delle due possibilità è più efficace? Verifichiamolo numericamente

Aumentando T_c di 50 K, portandola a $T_c = 550$ K, si ottiene un rendimento massimo di

$$e_C = 1 - \frac{T_f}{T_c} = 1 - \frac{300 \text{ K}}{550 \text{ K}} = 0.455$$

Diminuendo T_f di 50 K, portandola a $T_f = 250$ K, si ottiene un rendimento massimo di

$$e_C = 1 - \frac{T_f}{T_c} = 1 - \frac{250 \text{ K}}{500 \text{ K}} = 0.500$$

ESERCIZIO

L'efficienza di un motore di Carnot è del 30%. Il motore estrae $Q_h = 200$ cal di calore per ciclo da un termostato alla temperatura $T_2 = 500$ K.

Determinare la temperatura T_1 del termostato freddo e il calore rilasciato per ciclo al termostato a temperatura più bassa.

$$e = 1 - \frac{T_f}{T_c} = \frac{T_c - T_f}{T_c}$$

**Efficienza è spesso
indicata con η**

Nota l'efficienza del motore di Carnot è possibile calcolare immediatamente la temperatura T_1 :

$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \quad \rightarrow \quad T_1 = T_2 - \eta T_2 = 350 \text{ K}$$

Conoscendo il rendimento e il calore assorbito, posso calcolare il calore ceduto nel ciclo:

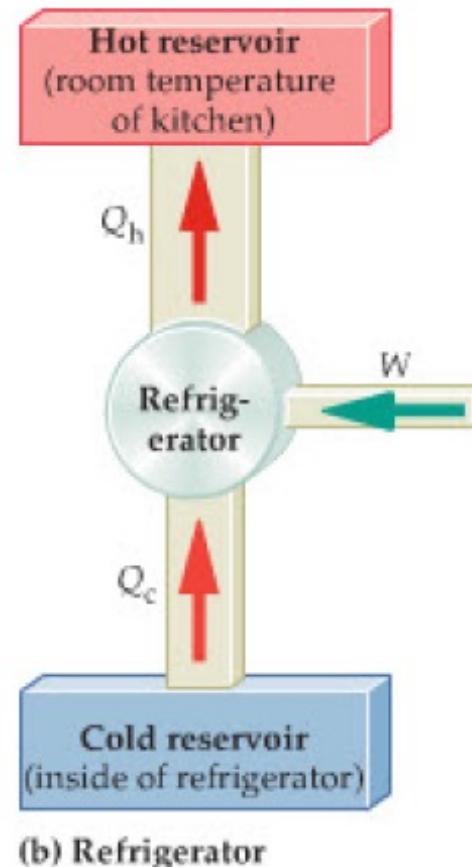
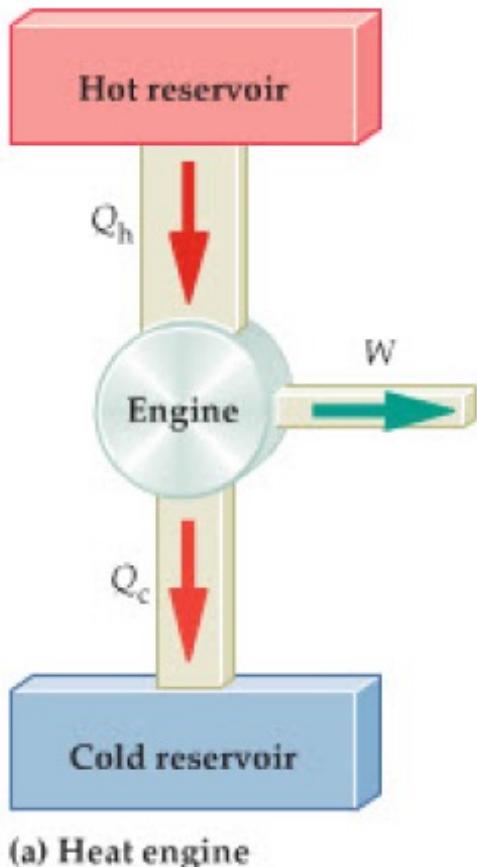
$$\eta = \frac{W}{Q_h} \quad \rightarrow \quad W = \eta Q_h = 60 \text{ cal}$$

Il calore ceduto si ricava da:

$$W = Q_h - |Q_l| \quad \rightarrow \quad |Q_l| = 140 \text{ cal}$$

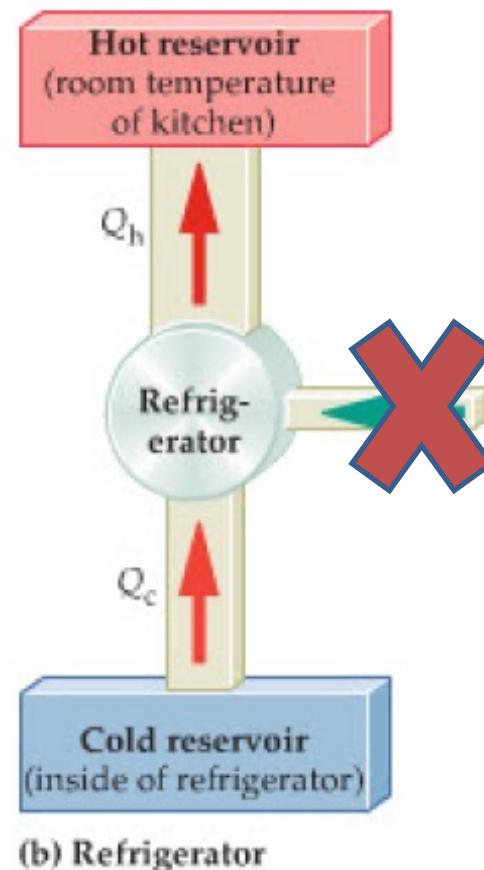
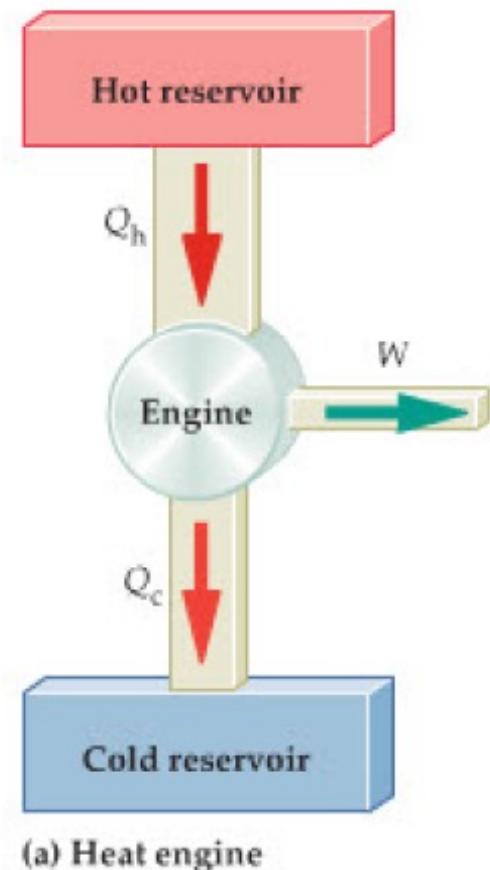
Enunciato di Clausius del secondo principio della termodinamica

Il calore non fluisce mai **spontaneamente** da un oggetto freddo a un oggetto caldo.



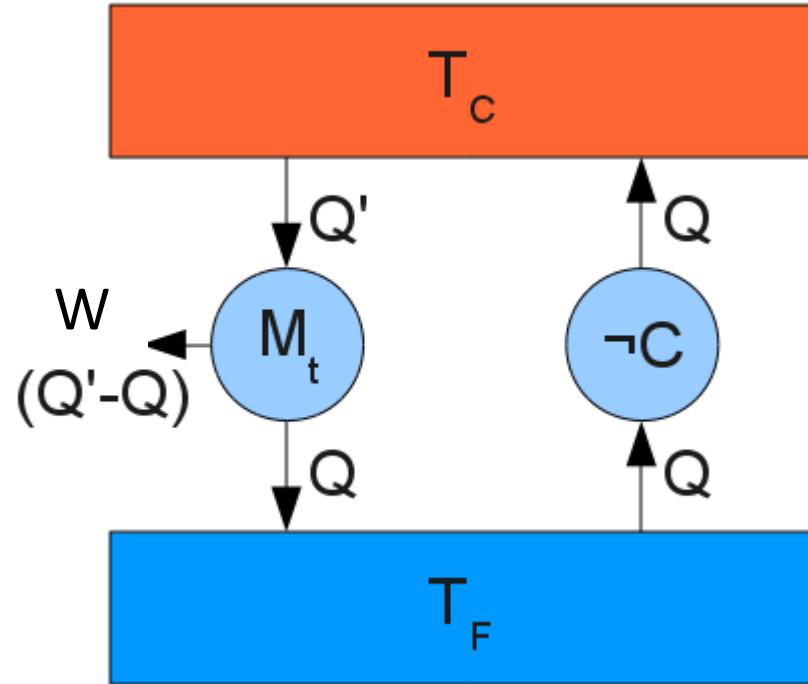
Enunciato di Clausius del secondo principio della termodinamica

Il calore non fluisce mai **spontaneamente** da un oggetto freddo a un oggetto caldo.



Se non c'è lavoro in entrata \Rightarrow VIOLATO il principio di Clausius

Supponiamo che l'enunciato di Clausius sia falso, ossia che esista una macchina frigorifera ciclica in grado di trasferire calore da una sorgente fredda ad una calda, senza apporto di lavoro esterno. Sia Q la quantità trasferita per ogni ciclo della macchina dalla sorgente fredda a quella calda.



Possiamo allora far lavorare una macchina termica tra le due sorgenti, in modo tale che essa sottragga ad ogni ciclo una quantità di calore Q' dalla sorgente calda, trasferendo a quella fredda una quantità Q e convertendo la differenza $Q' - Q$ in lavoro.

La sorgente fredda allora non subisce alcun trasferimento netto di calore e pertanto **il nostro sistema di macchine termiche sta estraendo calore, globalmente, dalla sola sorgente calda, producendo esclusivamente lavoro**, in violazione della formulazione di Kelvin-Planck del secondo principio.

Siccome una violazione dell'enunciato di Clausius implica una violazione dell'enunciato di Kelvin, l'enunciato di Kelvin implica l'enunciato di Clausius.