

Termodinamica

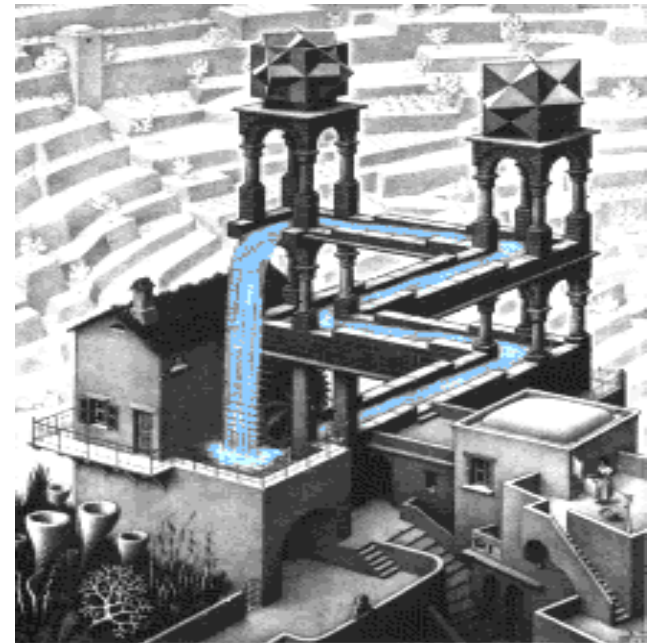
secondo principio

ovvero

principio della impossibilità

Il verso privilegiato delle trasformazioni di energia: non si crea energia dal nulla

- ◆ Il primo principio può essere enunciato sotto forma di divieto che la Natura impone su alcuni processi:
 - ◆ L'energia non può essere né prodotta né distrutta, ma solamente trasformata da una forma in un'altra.
 - ◆ È impossibile costruire una macchina che produca energia dal nulla, o che produca più energia di quella che consuma.
- ◆ Una macchina che, nelle intenzioni dell'inventore, pretenda di creare energia dal nulla, viene chiamata *macchina a moto perpetuo del primo tipo*, perché viola la prima legge della termodinamica.
- ◆ Una macchina del genere, purtroppo, non può esistere.



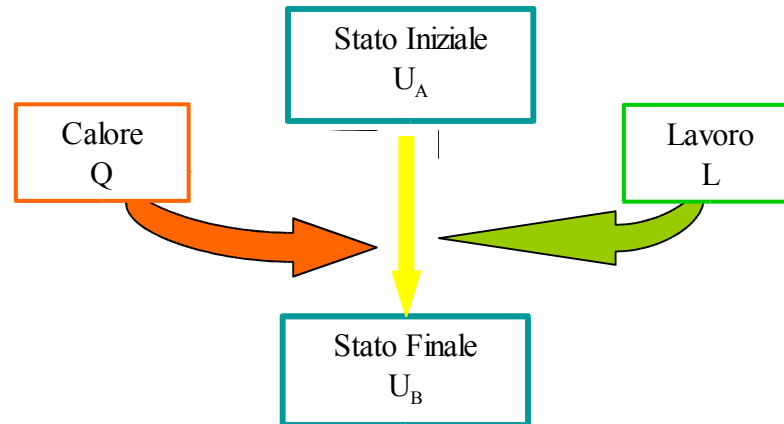
M.C. Escher

Cascata

1961

I Principio della termodinamica

Il primo principio della termodinamica esprime ciò che si conserva: ogni forma di energia può trasformarsi in un'altra forma di energia ma l'energia totale rimane costante.



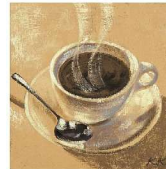
$$\Delta U = Q - L$$

il primo principio non dice nulla sul verso in cui una trasformazione avviene

ma

la natura fissa un verso alle trasformazioni

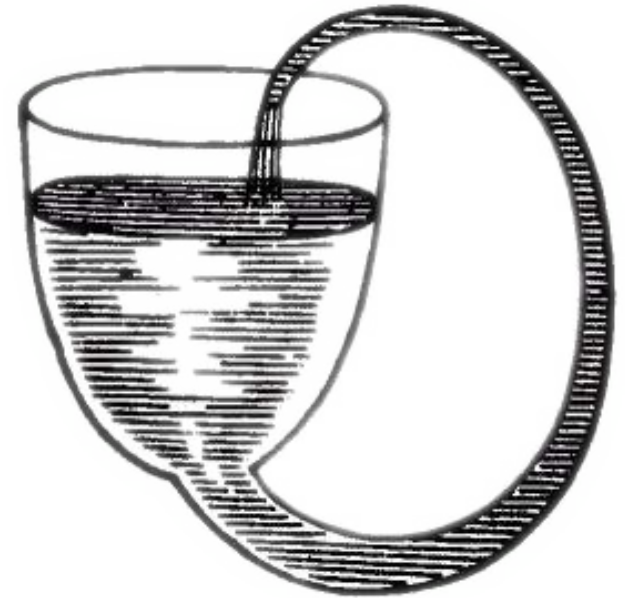
- un gelato, fuori dal frigo, si scioglie
- il caffè bollente si raffredda
- mettendo a contatto due corpi, uno caldo e l'altro freddo, il calore fluisce sempre dal corpo caldo al freddo.
- il tempo scorre sempre in avanti



Il verso privilegiato delle trasformazioni di energia

il calore è una forma di energia degradata o disordinata
il lavoro è una forma di energia ordinata

- ◆ Anche il secondo principio può essere enunciato sotto forma di divieto che la Natura impone su alcuni processi:
 - ◆ È impossibile costruire una macchina che produca energia meccanica pari al calore che la macchina assorbe dall'ambiente esterno.
- ◆ Una macchina che, nelle intenzioni dell'inventore, pretenda di trasformare in lavoro tutto il calore assorbito, viene chiamata *macchina a moto perpetuo del secondo tipo*, perché viola la seconda legge della termodinamica.
- ◆ Anche una macchina del genere, purtroppo, non può esistere.

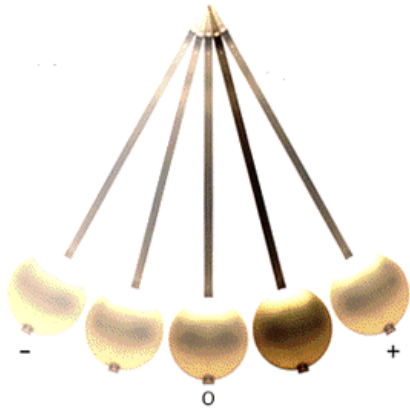


Robert Boyle

Contenitore che si autoriempe 1661

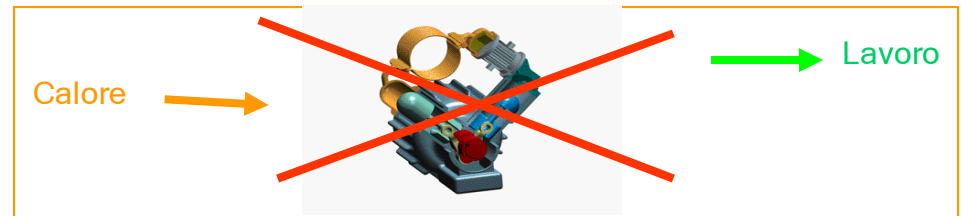
Lavoro e calore

- L'energia meccanica e il lavoro si possono trasformare completamente in energia termica

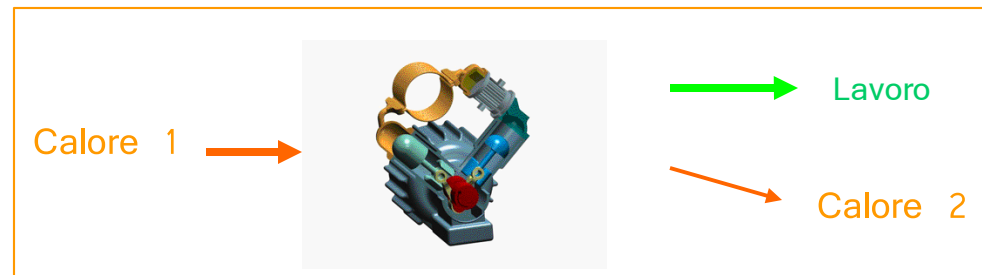


- la trasformazione inversa di energia termica in lavoro può essere ottenuta soltanto mediante una macchina

- ... ma non così



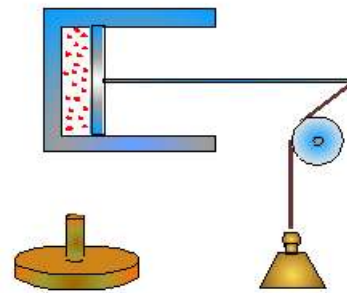
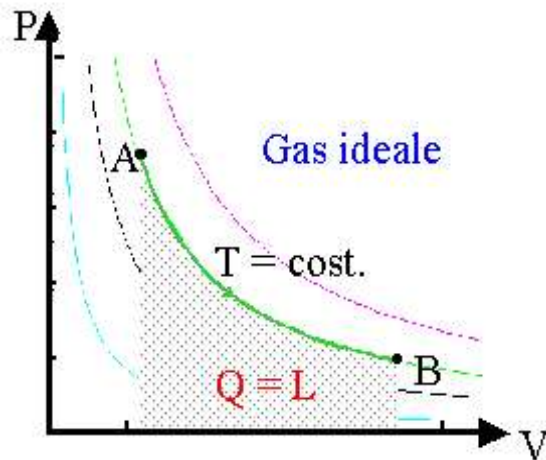
- ... solo così



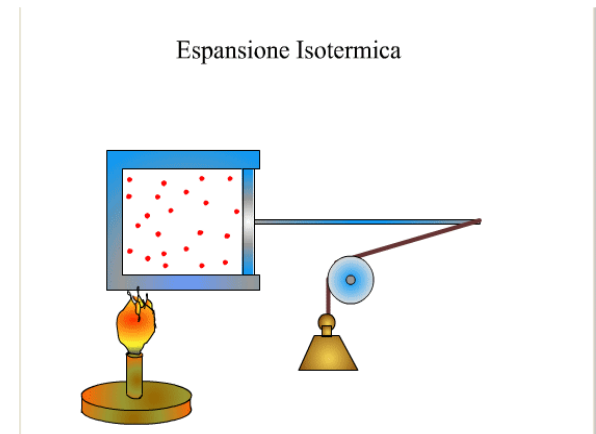
Questa limitazione sembra essere una legge della natura ed è espressa in diversi modi dal secondo principio della termodinamica.

Il funzionamento ciclico garantisce il lavoro continuativo

Attenzione: il secondo principio non dice che è impossibile trasformare completamente il calore in lavoro, infatti questa trasformazione avviene in ogni espansione isoterma come nel dispositivo in figura, ma che **è impossibile trasformare completamente il calore in lavoro in modo continuo (ciclico)**



Stato A

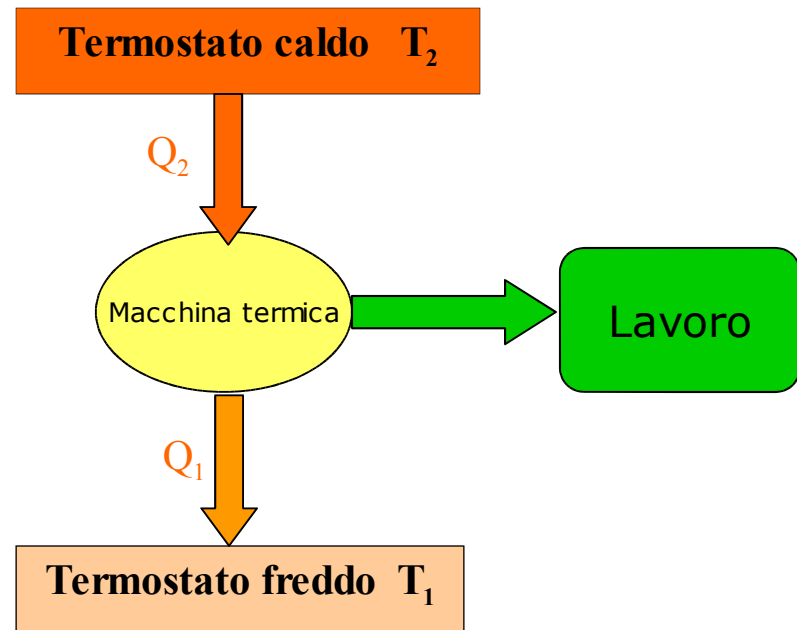


Stato B

Come funziona una macchina termica

Una macchina termica trasforma calore in lavoro meccanico sfruttando una proprietà termodinamica di un fluido:
un fluido riscaldato si espande e compie lavoro

- Durante un ciclo la macchina termica:
 - assorbe il calore Q_2 da una sorgente ad alta temperatura (T_2 temperatura della sorgente calda)
 - cede calore Q_1 ad una sorgente a bassa temperatura (T_1 temperatura del sistema di raffreddamento)
 - Fornisce il lavoro $L=Q_2-Q_1$



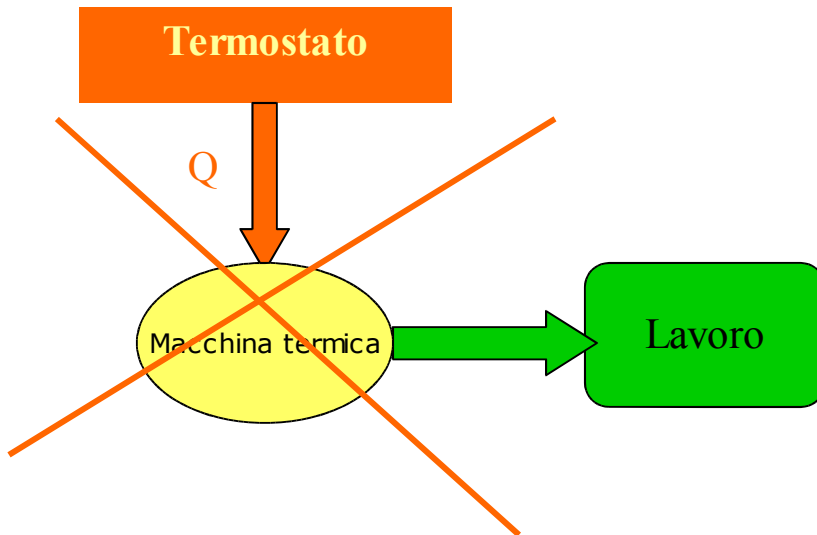
- Il rendimento η misura il rapporto tra lavoro compiuto e calore assorbito, è un numero puro e si può esprimere in percentuale

$$0 < \eta < 1$$

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

Il principio: Enunciato di Kelvin-Planck

- È impossibile realizzare un processo il cui unico risultato sia una trasformazione in lavoro di calore proveniente da una sola sorgente a temperatura uniforme



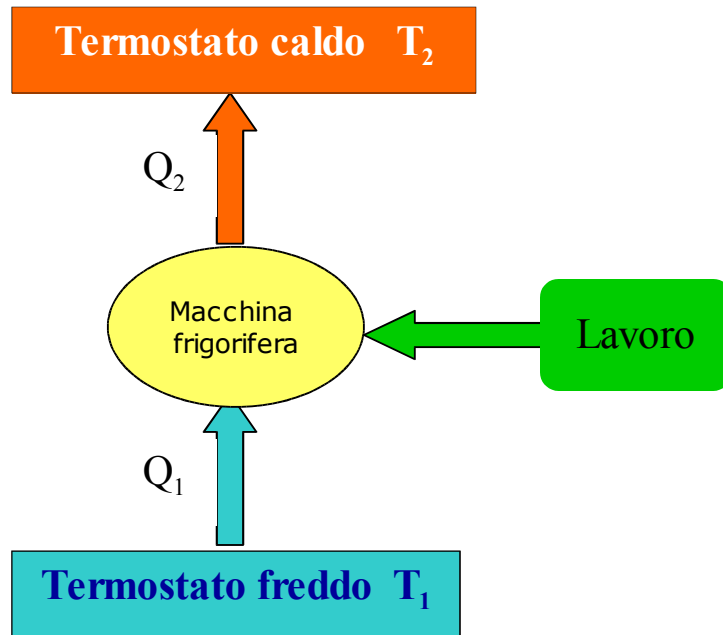
Lord Kelvin - William Thomson Fisico inglese
1824 - 1907.

A 10 anni fu ammesso all'università di Glasgow. Si occupò principalmente di termodinamica e di elettromagnetismo

Max Planck Fisico tedesco 1858 - 1947. I suoi studi sulla radiazione di corpo nero sono all'origine della moderna meccanica quantistica.

Macchina frigorifera

La macchina frigorifera è una macchina che toglie calore a un corpo freddo e lo cede a un corpo più caldo utilizzando energia.



Il rendimento si chiama
“Coefficiente di resa”
e si indica con la sigla COP

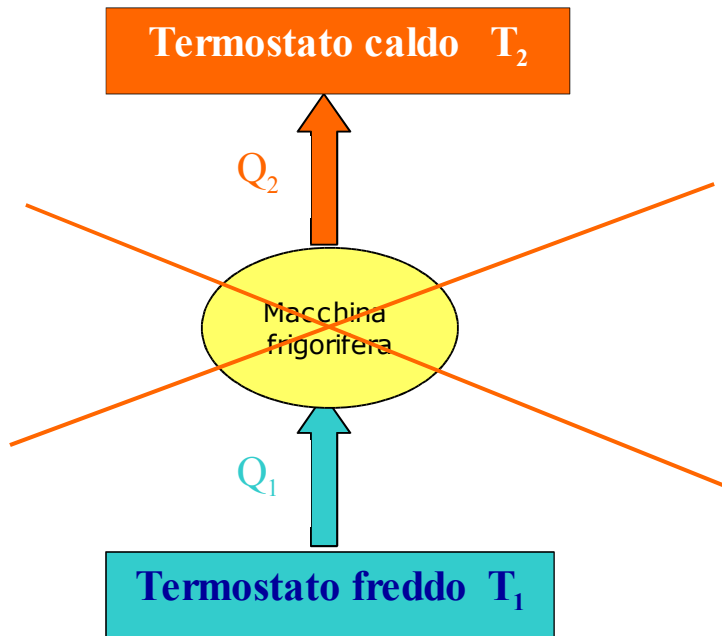
esso misura quanto calore
viene sottratto in relazione al
lavoro speso

$$\text{COP} = \frac{Q_1}{L} \leq \frac{T_1}{T_2 - T_1}$$

$$\text{COP} = \text{da } 2 \text{ a } 6$$

Il principio: Enunciato di Clausius

- E' impossibile che una macchina frigorifera operante in un ciclo produca come solo effetto quello di trasferire in modo continuo calore da un corpo più freddo a un corpo più caldo.

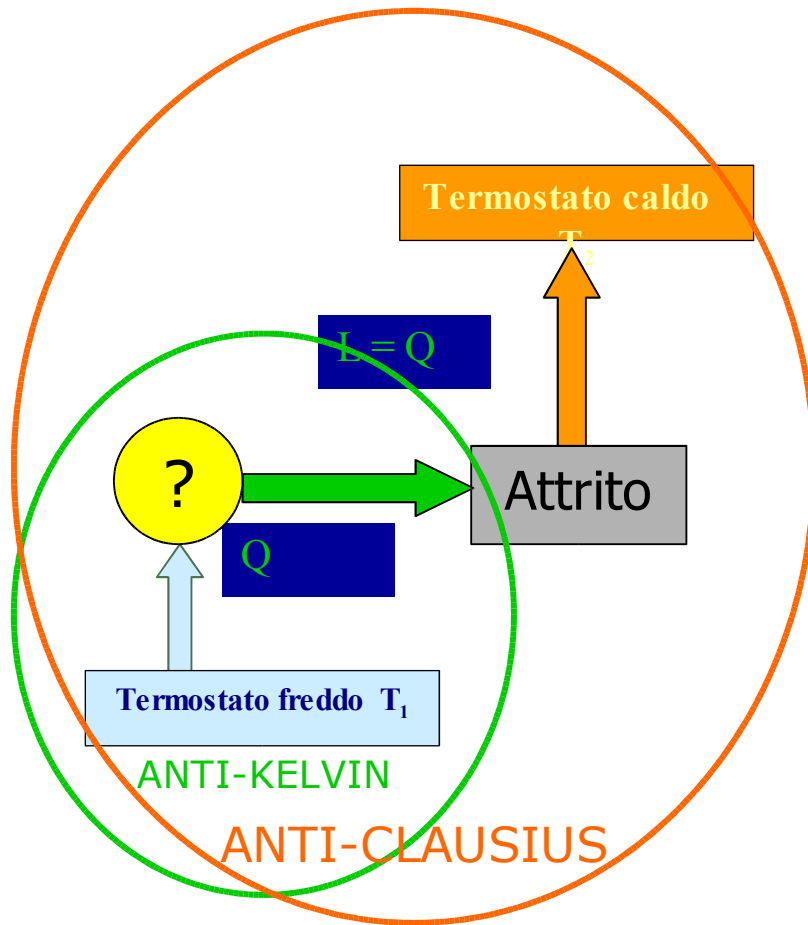


Rudolph Julius Clausius Fisico tedesco
Koslin 1822 - Bonn 1888

Si occupò principalmente di termodinamica,
formulò il II principio della termodinamica e
introdusse il concetto di entropia.

I due enunciati sono equivalenti

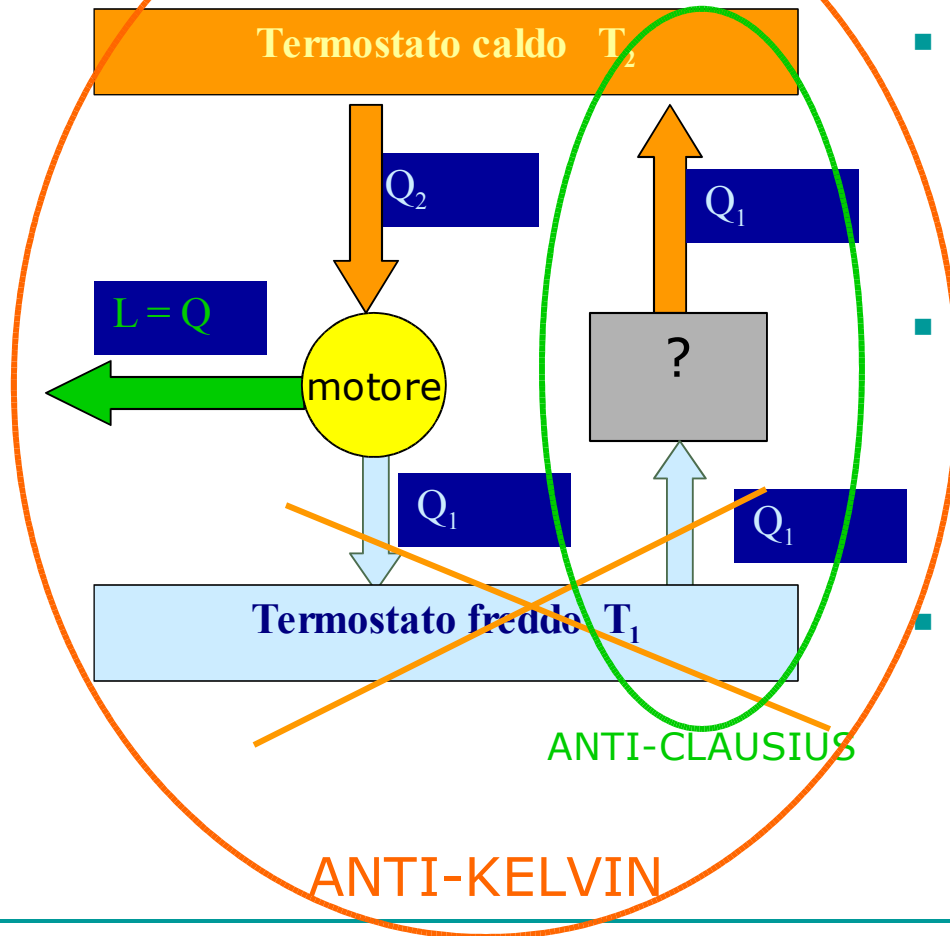
se esistesse una macchina anti-Kelvin allora si potrebbe costruire una macchina anti-Clausius



- Supponiamo che esista una **macchina anti-Kelvin** che prelevi calore Q da una sorgente e lo trasformi tutto in lavoro L
- Allora si puo' aggiungere una seconda macchina che per attrito trasformi il lavoro in calore cedendolo ad una sorgente a temperatura maggiore T_2
- Questi due dispositivi insieme formano una **macchina anti-Clausius**

I due enunciati sono equivalenti

se esistesse una macchina anti-Clausius allora si potrebbe costruire una macchina anti-Kelvin



- Supponiamo che esista una **macchina anti-Clausius** che prelevi calore Q_1 da una sorgente fredda e lo trasferisca tutto ad un corpo più caldo
- Allora si può aggiungere una seconda macchina termica che funzioni regolarmente producendo lavoro $L=Q_2-Q_1$
- Questi due dispositivi insieme formano una **macchina anti-Kelvin** che trasforma in lavoro tutto il calore prelevato da una sola sorgente

Esercizio

9. ESEMPIO SVOLTO

Calore e lavoro



Una macchina termica con un rendimento del 24,0% produce 1250 J di lavoro. Trova:

- il calore assorbito dal serbatoio caldo;
- il calore ceduto al serbatoio freddo.

svolgimento

$$\eta = \frac{L}{Q_2}$$

$$Q_2 = \frac{L}{\eta} = \frac{1250J}{0,24} = 5208J$$

$$Q_1 = Q_2 - L = 5208J - 1250J = 3958J$$

Il 76% dell'energia prelevata dalla sorgente calda viene buttato via !!

Si può fare di meglio? No

Ciclo di Carnot

Sadi Carnot Parigi 1796 - 1832.

Figlio di Lazare Carnot (teoremi di trigonometria)

Ingegnere interessato al miglioramento delle macchine a vapore, ne studiò il rendimento massimo descrivendo un ciclo ideale per le macchine termiche.

Carnot ha ideato un ciclo ideale per macchine termiche dimostrando che il rendimento massimo ottenibile è

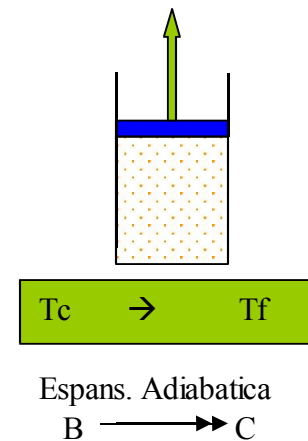
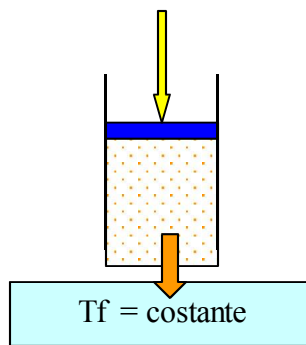
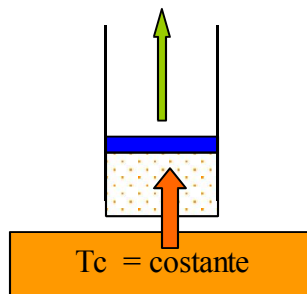
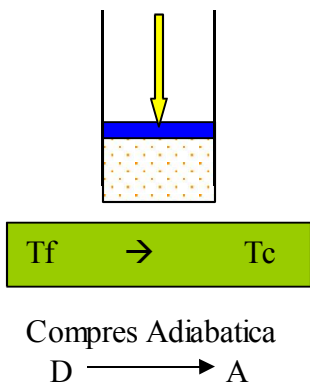
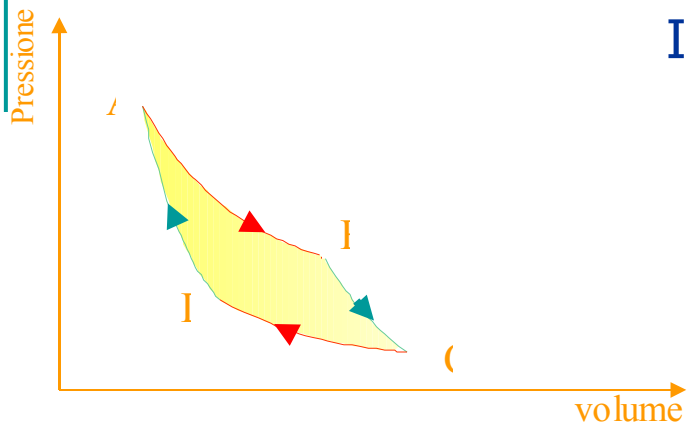
$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

Inoltre ha mostrato anche che $\eta_{\max} < 100\%$

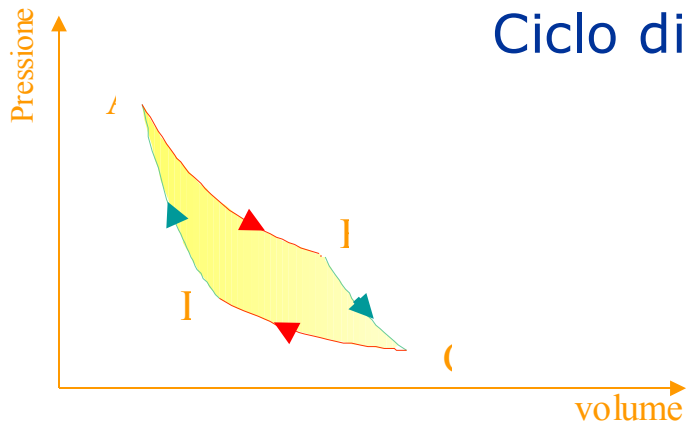
Sembra dunque che il fatto che una macchina abbia rendimento < 1 non sia dovuto solo a limitazioni tecniche della macchina.

La limitazione principale sembra essere dovuta proprio alla natura.

Il ciclo di Carnot



Ciclo di Carnot - Calcolo del Lavoro



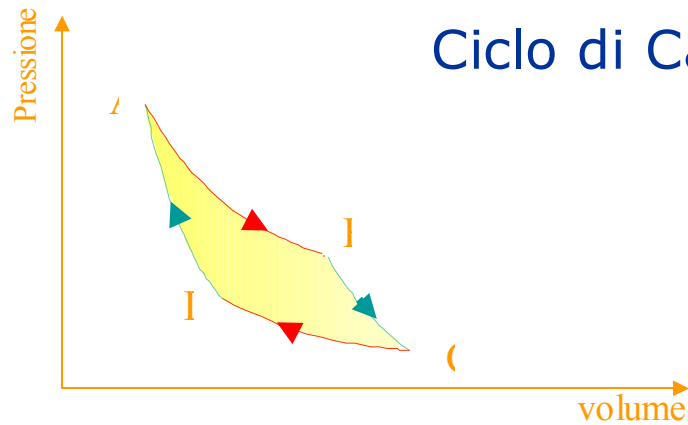
A → B Espansione Isoterma

$$T_A = T_B \Rightarrow \Delta U = 0 \Rightarrow Q_2 = L_{AB}$$

$$L_{AB} = nRT_2 \ln \frac{V_B}{V_A}$$

Tutto il calore si trasforma in lavoro

Ciclo di Carnot - Calcolo del Lavoro



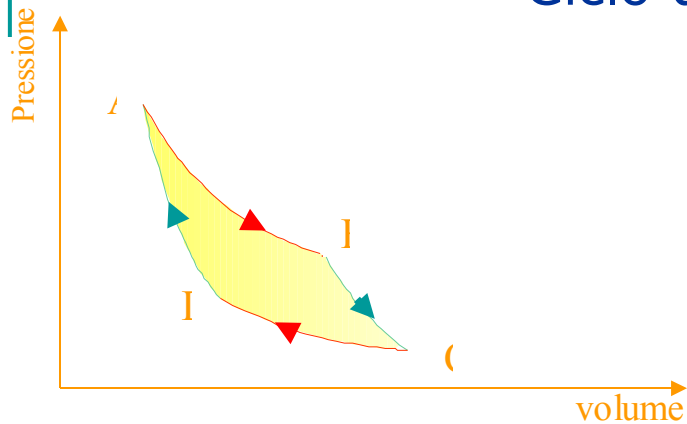
B → C Espansione Adiabatica

$$Q = 0 \quad \Rightarrow \quad \Delta U = -L_{BC}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_C}{V_B} \right)^{\gamma-1}$$

Il gas compie lavoro a spese dell'energia interna e si raffredda

Ciclo di Carnot - Calcolo del Lavoro



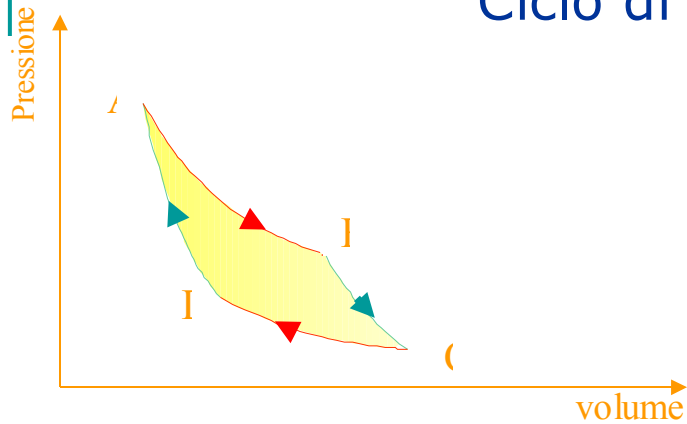
C → D Compressione Isoterma

$$T_C = T_D \Rightarrow \Delta U = 0 \Rightarrow Q_f = L_{CD}$$

$$L_{CD} = nRT_1 \ln \frac{V_D}{V_C}$$

Il lavoro L_{CD} che il gas riceve dall'ambiente si trasforma in calore Q_f che viene ceduto all'ambiente

Ciclo di Carnot - Calcolo del Lavoro



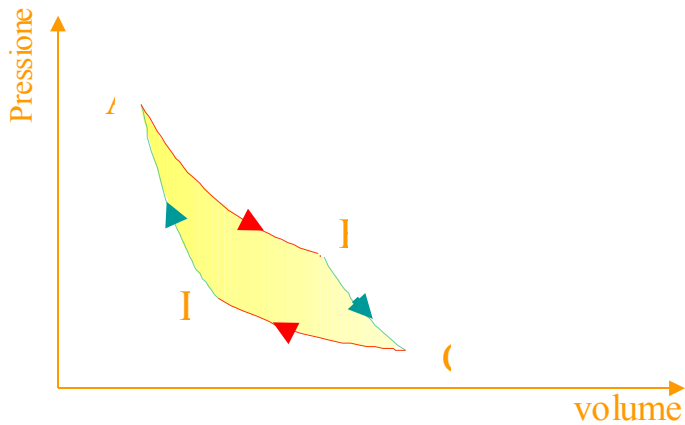
D → A Compressione adiabatica

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_D}{V_A} \right)^{\gamma-1}$$

$$Q = 0 \quad \Rightarrow \quad \Delta U = -L_{DA}$$

Sul gas viene compiuto lavoro per riportarlo nelle condizioni iniziali e il gas si riscalda

Ciclo di Carnot - Calcolo del rendimento



$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_D}{V_A} \right)^{\gamma-1}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_C}{V_B} \right)^{\gamma-1}$$

$$\frac{V_C}{V_D} = \frac{V_B}{V_A}$$

$$Q_1 = L_{CD} = nRT_1 \ln \frac{V_D}{V_C}$$

$$Q_2 = L_{AB} = nRT_2 \ln \frac{V_B}{V_A}$$

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

$$1 - \frac{Q_1}{Q_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \Rightarrow \eta_{rev} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

Quindi il rendimento dipende soltanto dalle temperature dei due termostati
e si chiama "rendimento massimo" di una macchina reale

Un altro enunciato del II principio

Il teorema di Carnot

3. Tutte le macchine reversibili che lavorano tra le stesse temperature hanno lo stesso rendimento
 5. Nessuna macchina irreversibile può avere un rendimento superiore a quello di una macchina reversibile che lavora tra le stesse temperature.
-

Esercizio: Rendimento reale e rendimento ideale

Una macchina termica estrae 200 J di calore da una sorgente calda a 450K, compie un lavoro di 45,0 J e cede 155 J di calore al sistema di raffreddamento che è a 290K. Calcolare il rendimento reale, il rendimento massimo e quanto lavoro in più compirebbe la stessa macchina eseguendo solo trasformazioni reversibili.

svolgimento

- $Q_2=200J$
- $L=45,0J$
- $Q_1=155J$

$$\eta = \frac{L}{Q_2} = \frac{45,0J}{200J} = 0,225 = 22,5\%$$

- $T_2=450K$
- $T_1=290K$

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{290K}{450K} = 0,356 = 35,6\%$$

$$L_{rev} = \eta_{\max} \cdot Q_2 = 0,356 \cdot 200J = 71,2J$$

III principio della termodinamica

Il teorema di Nernst

È impossibile realizzare una successione finita di processi tale da condurre un sistema allo zero assoluto, qualunque sia la natura dei processi e del sistema

In altre parole non si può avere un rendimento del 100% anche considerando solo trasformazioni reversibili o stupefacenti progressi della tecnica.
