

# *Fisica Generale*

*Settimana 11 - Lezioni 29-30*

*Facoltà di Ingegneria*

*Livio Lanceri*



# Introduzione

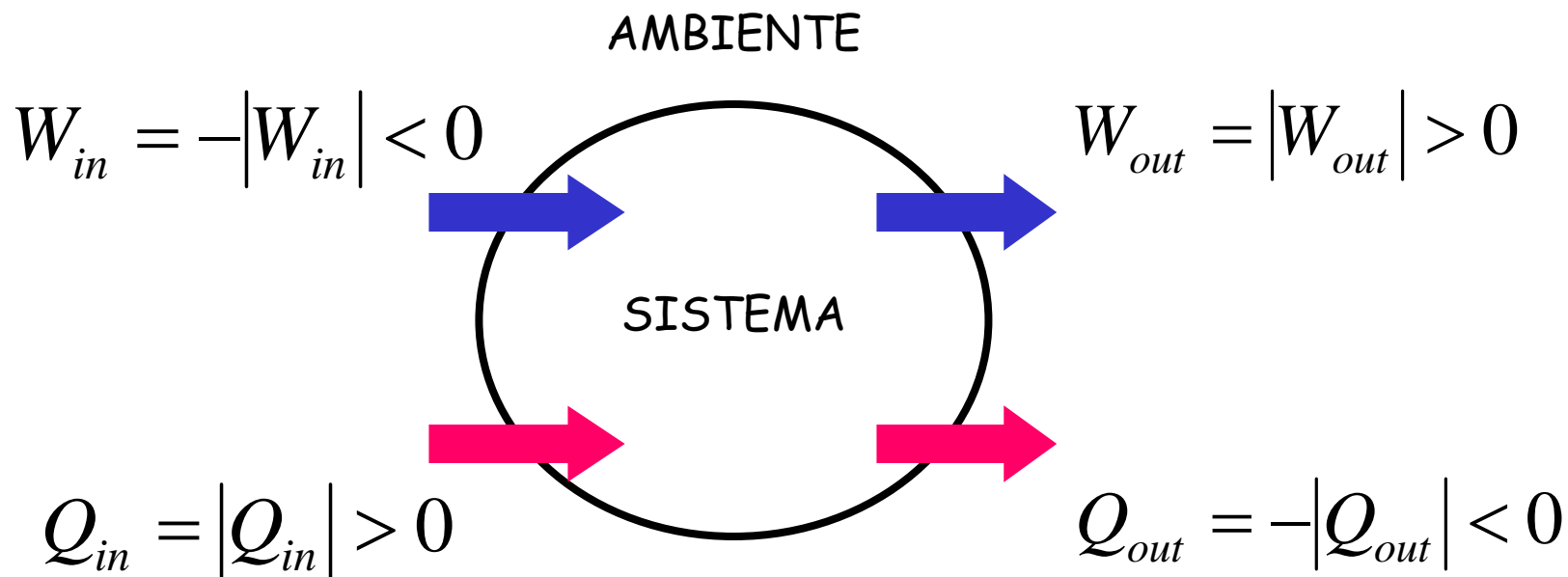
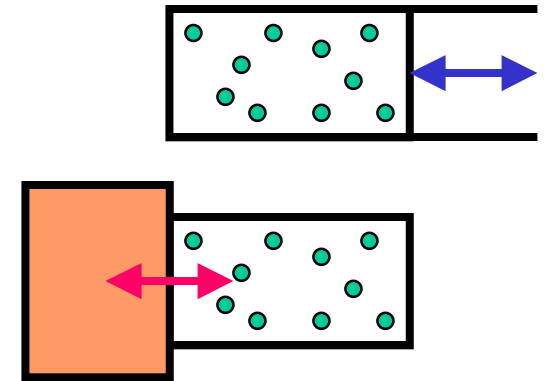
---

- *Trasferimenti di energia tra sistemi:*
  - lavoro  $W$  e calore  $Q$
- *Primo Principio della Termodinamica*
  - Energia interna  $U$  di un sistema, lavoro, calore: bilancio energetico (conservazione dell'energia)
- *Trasformazioni termodinamiche*
  - Sistema e ambiente
  - Trasformazioni reversibili e irreversibili
  - Macchine termiche cicliche, rendimento
- *Il secondo principio della termodinamica*
  - Non tutte le trasformazioni compatibili con il primo principio sono possibili....
  - Enunciato di Kelvin ("macchine termiche")
  - Enunciato di Clausius ("macchine frigorifere")
  - Entropia



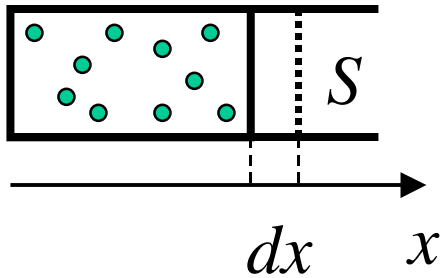
# Trasferimenti di energia tra sistemi

- "ordinati": lavoro  $W$ 
  - p.es.: espansione o compressione di un gas
- "disordinati": calore  $Q$ 
  - p.es.: contatto tra corpi a temperature diverse

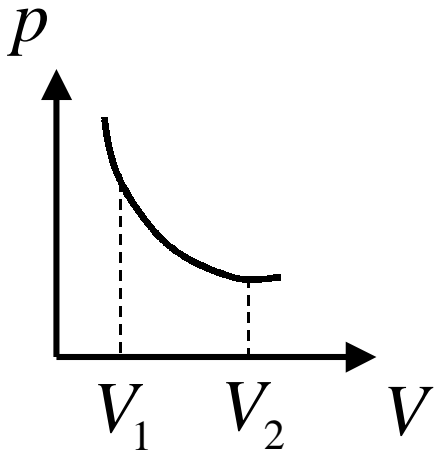


# Lavoro termodinamico

- *P.es. Espansione o compressione di un gas:*



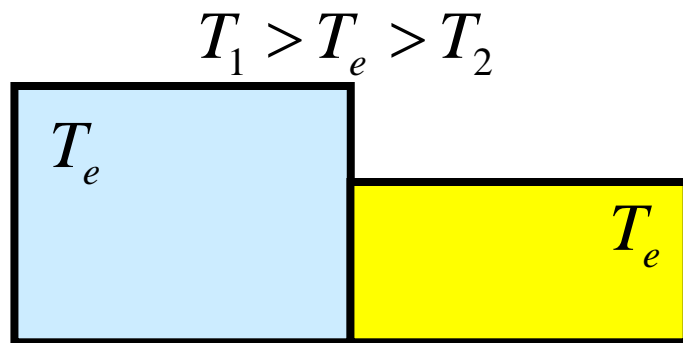
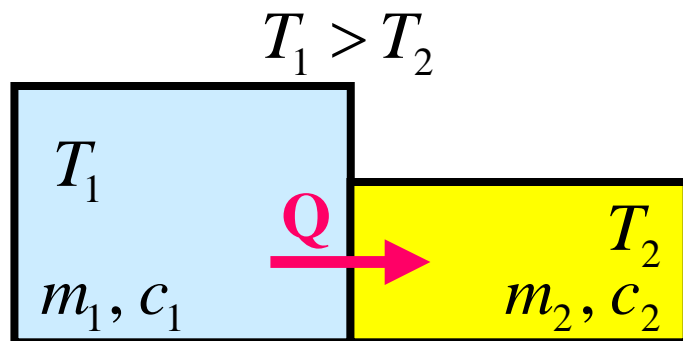
$$\delta W = F dx = p S dx = p dV \quad (dV > 0 \Rightarrow \delta W > 0)$$



$$W = \int_{V_1}^{V_2} p(V) dV$$



# Calore e calori specifici



## • Definizione operativa

- Calore  $Q$  dal corpo più caldo a quello più freddo

- Corpo 1: cede calore  $Q_1 < 0$

$$Q_1 = m_1 c_1 (T_e - T_1) < 0$$

- Corpo 2: acquista calore  $Q_2 = -Q_1 > 0$

$$-Q_1 = Q_2 = m_2 c_2 (T_e - T_2) > 0$$

- Calore specifico di riferimento e unità di misura:

$$c_{H_2O} = 1 \frac{kcal}{kg K}$$



# *Equivalenza tra lavoro e calore*

---

- *La temperatura di un corpo puo` essere aumentata eseguendo una quantita` nota  $W$  (joule) di lavoro meccanico (attrito)*
- *Il corpo puo` essere riportato allo stato iniziale facendogli cedere calore ( $Q$  (calorie), misurabile)*
- *Si trova che il rapporto e` sempre lo stesso:*

$$\frac{W}{Q} = 4.19 \frac{\text{joule}}{\text{calorie}}$$

- *Conclusione:  $W$ ,  $Q$  equivalenti: entrambi sono forme di energia scambiata fra sistemi, misurabili in joule*



# *Calori specifici...*

---

Lo studio dei

"calori specifici" (calore scambiato per unità di sostanza per una variazione unitaria di T)

"calori latenti" (richiesti per ottenere transizioni di fase a T costante)

e' importante perche' fornisce informazioni sulla struttura microscopica e le energie di legame

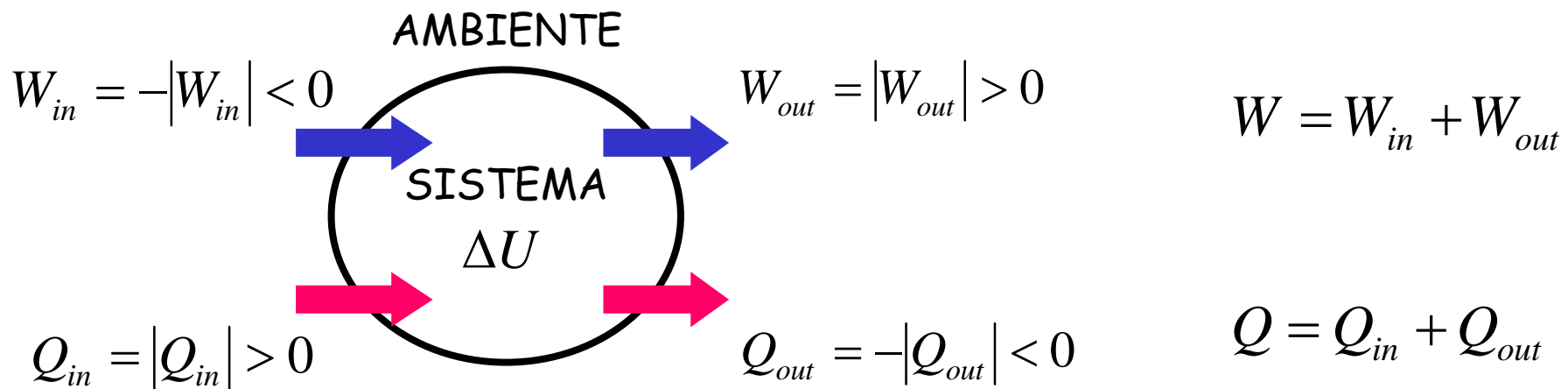


# Primo Principio della Termodinamica

- *Energia interna, lavoro, calore: bilancio energetico (conservazione dell'energia)*

- Se in una trasformazione termodinamica un sistema scambia lavoro totale  $W$  e calore totale  $Q$  con l'ambiente, l'energia interna del sistema subisce una variazione  $\Delta U$ :

$$\Delta U = Q - W \qquad dU = \delta Q - \delta W$$





# *Primo Principio della Termodinamica*

---

- *Alcune affermazioni non banali implicite nell'enunciato:*
  - Lavoro  $W$  e calore  $Q$  sono entrambi "energie scambiate" dal sistema;
  - $W$  e  $Q$  non sono, singolarmente considerate, "funzioni di stato": in generale a trasformazioni diverse tra due stati corrispondono lavori e calori scambiati diversi
  - La combinazione  $Q-W$  e' invece una "funzione di stato", e rappresenta la variazione dell' "energia interna del sistema" tra stato iniziale e finale della trasformazione
  - Se la trasformazione e' ciclica (stato finale = stato iniziale), allora su un ciclo:

$$\Delta U = 0 = Q - W \quad \Rightarrow \quad Q = W$$



# Trasformazioni termodinamiche

- **Trasformazioni reversibili:**

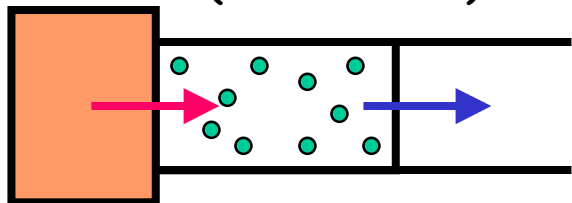
- Se il sistema ed anche l'ambiente possono entrambi essere riportati allo stato iniziale
- (in pratica: approssimabili con trasf. quasi statiche, senza dissipazione di energia meccanica, con piccole differenze di temperatura)

- **Trasformazioni irreversibili:**

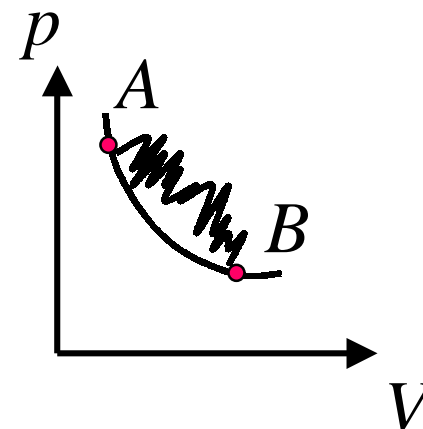
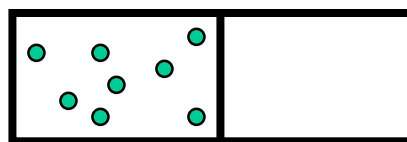
- Se, quando il sistema viene riportato allo stato iniziale, l'ambiente è irrimediabilmente modificato
- (in pratica: tutte le trasformazioni reali)

- **Esempi**

Espansione isoterma  
(reversibile)



Espansione adiabatica  
contro il vuoto (irreversibile)



# Macchine termiche cicliche

## Riconducibili allo schema:

Calore  $Q_H > 0$  prelevato a  $T_H$

Lavoro fornito  $W > 0$

Calore  $Q_C < 0$  ceduto a  $T_C < T_H$

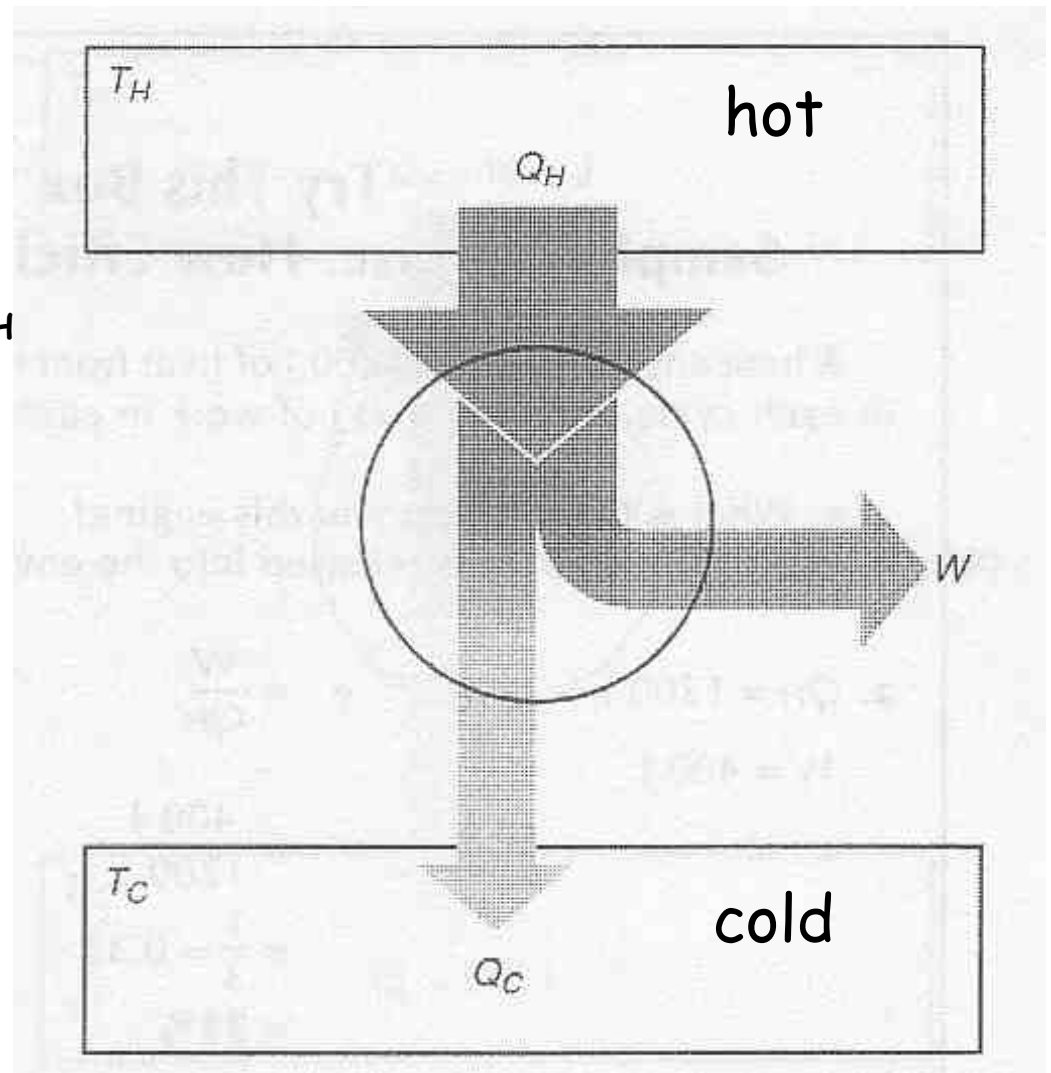
## Rendimento

$$\eta \equiv \frac{W}{Q_H} = \frac{|Q_H| - |Q_C|}{|Q_H|}$$

## Per il Primo Principio:

$\Delta U = 0$  su un ciclo  $\Rightarrow$

$$\Rightarrow W = Q = Q_H + Q_C = |Q_H| - |Q_C|$$



# Ciclo reversibile di Carnot

## Analisi fatta da Carnot:

Ciclo idealizzato con rendimento "massimo"

ab: espansione isoterma reversibile a  $T_1$

bc: espansione adiabatica rev. (da  $T_1$  a  $T_2$ )

cd: compressione isoterma rev. a  $T_2$

da: espansione adiabatica rev. (da  $T_2$  a  $T_1$ )

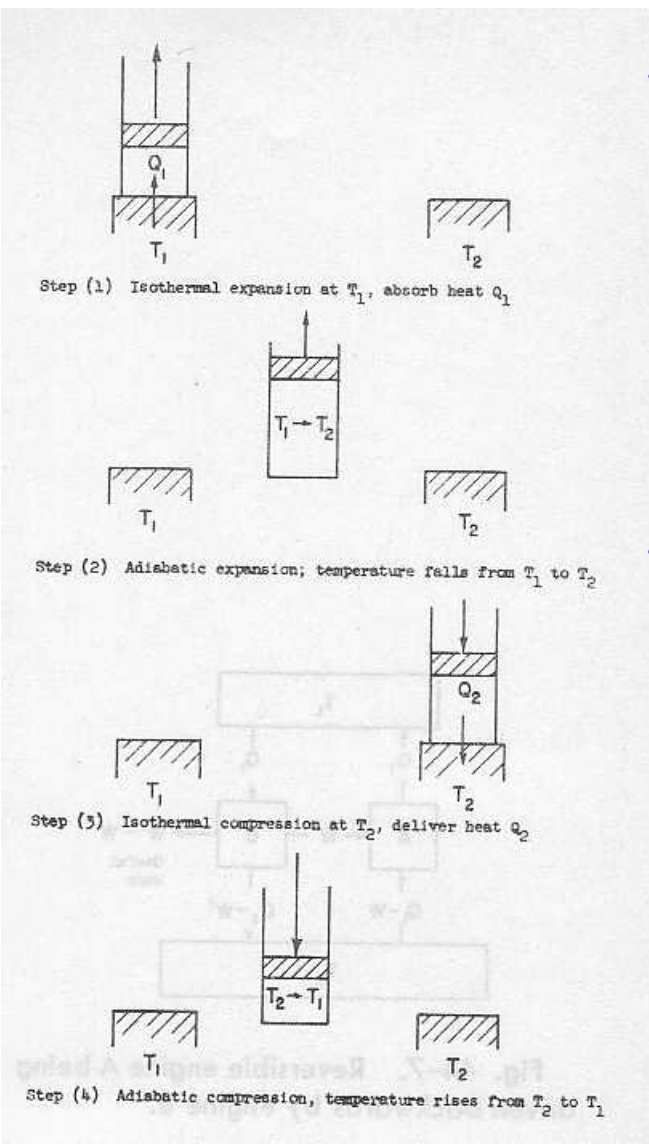
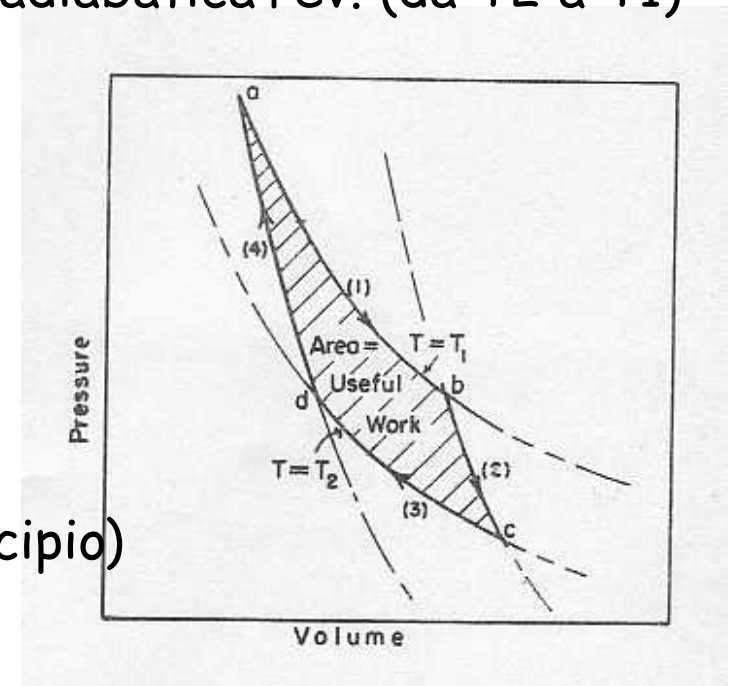
## Risultati:

Rendimento

$$\eta \equiv \frac{W}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Massimo !!!

(dim: Secondo Principio)



# Macchine frigorifere

## Frigoriferi e pompe di calore

Lavoro "assorbito"  $W < 0$

Calore  $Q_L > 0$  prelevato a  $T_L$

Calore  $Q_H < 0$  ceduto a  $T_H > T_L$

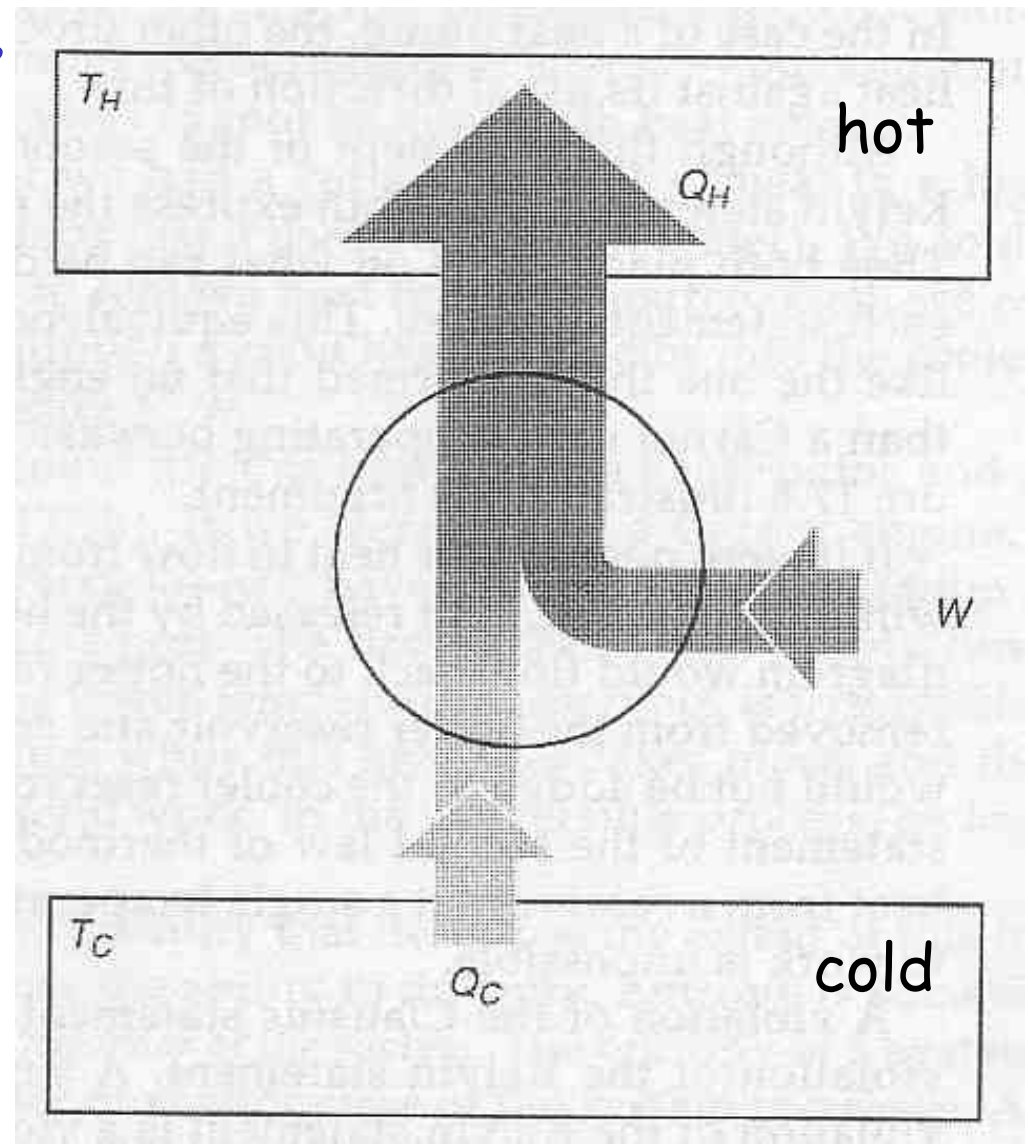
## Per il Primo Principio:

$\Delta U = 0$  su un ciclo  $\Rightarrow$

$\Rightarrow W = Q = Q_H + Q_C < 0 \Rightarrow$

$\Rightarrow Q_H = W - Q_C \Rightarrow$

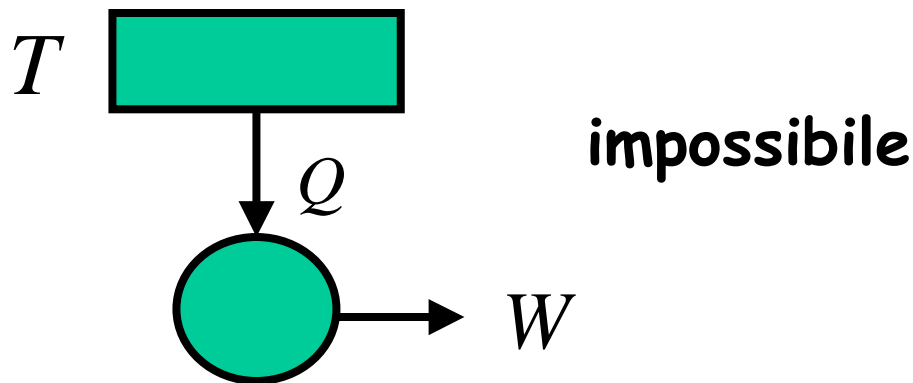
$\Rightarrow |Q_H| = |W| + |Q_C|$



# *Il secondo principio della termodinamica*

---

- *Non tutte le trasformazioni compatibili con il primo principio sono possibili...*
- *Enunciato di Kelvin*
  - Nessuna macchina termica che lavori continuamente (ciclicamente) può prelevare calore  $Q > 0$  da una sola sorgente a una temperatura  $T$  e convertirlo completamente in lavoro  $W > 0$

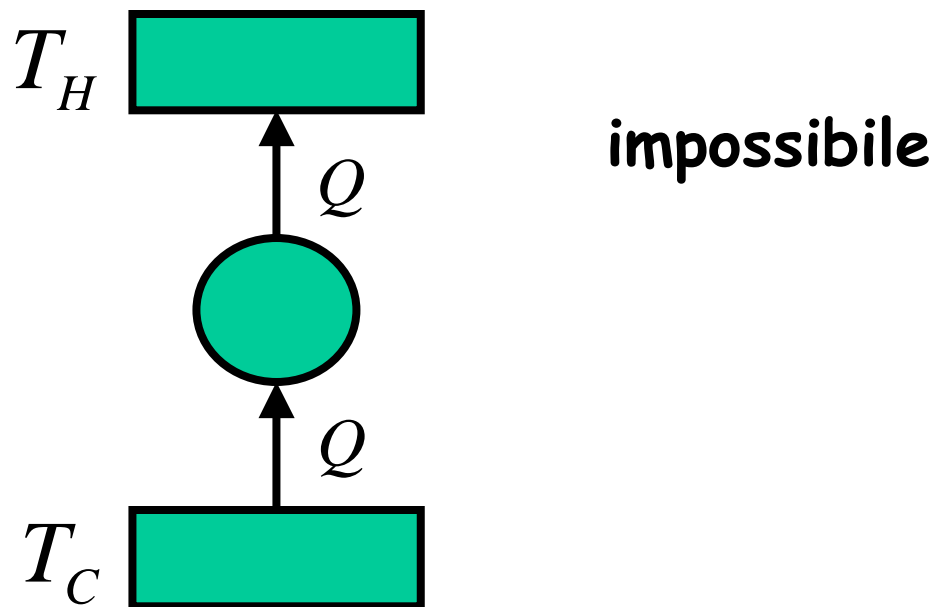


# *Il secondo principio della termodinamica*

---

- *Enunciato di Clausius (equivalente a quello di Kelvin)*

- Del calore non puo` fluire da un corpo piu` freddo a uno piu` caldo se non e` coinvolto qualche altro processo



# L'entropia - 1

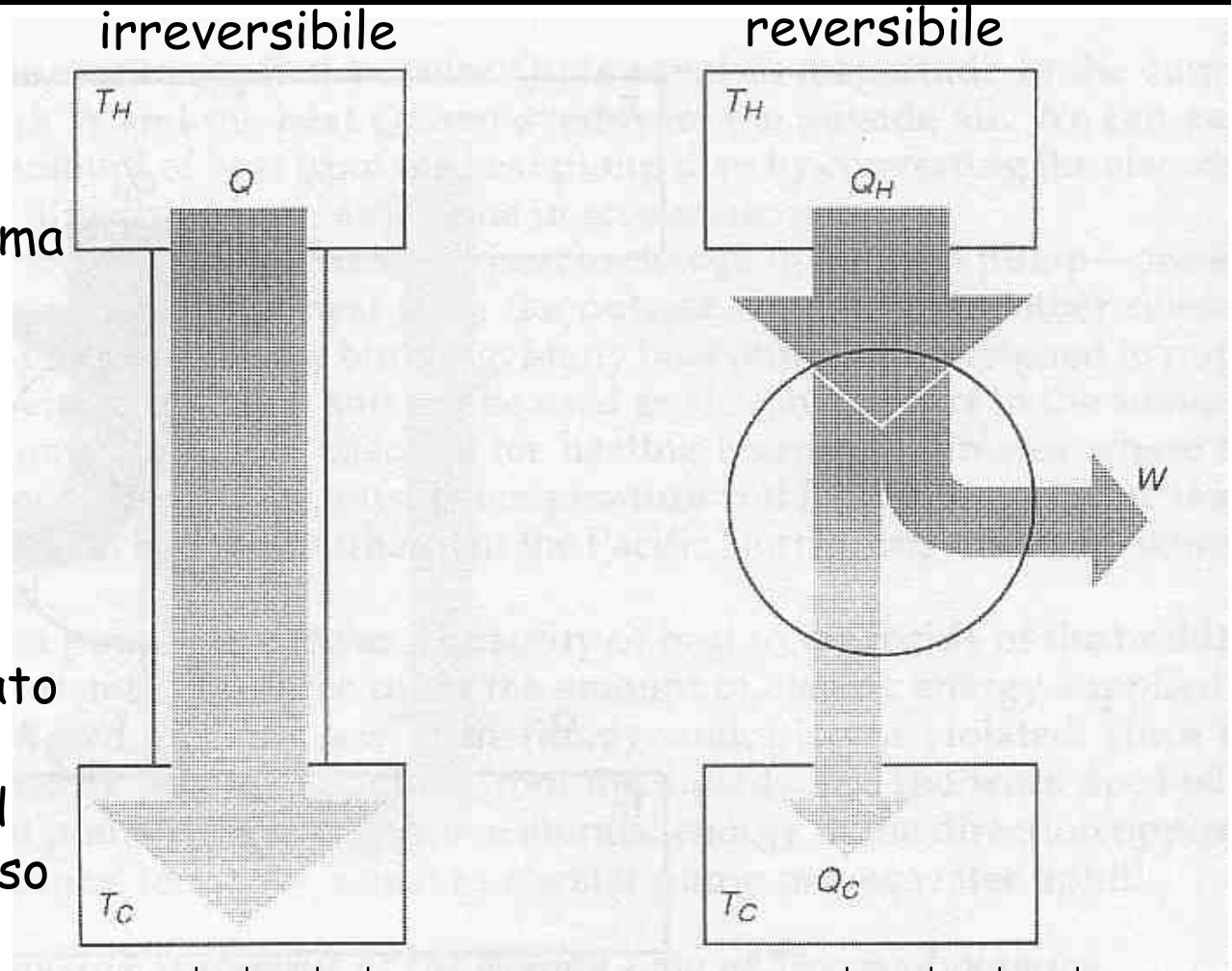
## Funzione di stato $S$ :

La sua variazione per ogni parte del sistema e' definita da:

$$dS = \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{rev}$$

Se l'entropia totale aumenta, non e' stato ottenuto il massimo lavoro possibile... ad esempio: lavoro perso nel primo caso:

$$T_C \Delta S = W_{perso}$$





# L'entropia - 2

---

- *Dal pdv microscopico: "probabilità termodinamica  $w$ " dello stato (misura del "disordine"); entropia:*

$$S = k \ln w$$

- Si dimostra che questa definizione è equivalente alla definizione macroscopica



# *Entropia e Secondo Principio*

---

*Per l'universo o per un sistema isolato, l'entropia totale di tutte le sue parti non cambia per trasformazioni reversibili, aumenta sempre per trasformazioni irreversibili.*

NB se il sistema non e' isolato, la sua entropia puo' diminuire!

Questo enunciato include i precedenti, che possono essere analizzati anche in termini di variazione di entropia

Le "impossibilita'" dichiarate nel Secondo Principio sono di natura statistica: con un elevato numero di molecole, certe trasformazioni sono "estremamente improbabili" (es...)



# Conclusioni

---

## Primo Principio:

Calore scambiato + lavoro scambiato da un sistema = variazione di energia interna del sistema

$$\Delta U = Q - W$$

## Secondo Principio:

Un processo (ciclico) il cui unico risultato sia di prelevare calore da un serbatoio e convertirlo integralmente in calore e' impossibile

## Teorema di Carnot

Nessuna macchina termica che preleva calore  $Q_1$  a temperatura  $T_1$  e cede  $Q_2$  a temperatura  $T_2$  puo' fornire piu' lavoro (avere rendimento piu elevato di una macchina reversibile, per la quale:

$$W = \eta Q_1 = (1 - T_2/T_1)Q_1$$

## Entropia

Se un sistema scambia reversibilmente  $Q$  alla temperatura  $T$ , la sua entropia varia di  $\Delta S = (Q/T)_{rev}$  ; inoltre  $S = 0$  a  $T = 0$  (Terzo Princ.)

Per l'universo o un sistema isolato, l'entropia **totale** di tutte le sue parti non cambia per trasformazioni reversibili, aumenta sempre per trasformazioni irreversibili.



# *Conclusioni*

---

