

# TEOREMA DI CARNOT



SADI CARNOT (1796-1832)

$$m_R \geq m_S$$

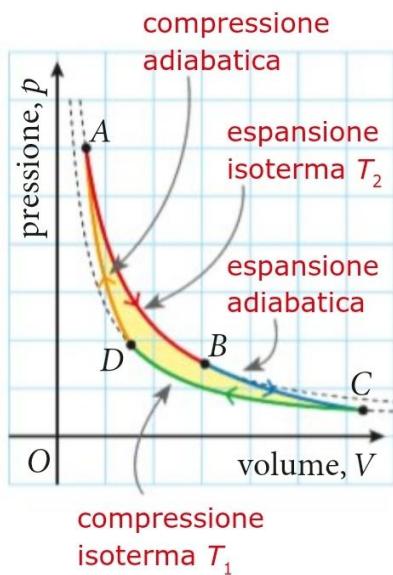
↑  
REVERSIBILE

R e S lavorano  
tra le stesse  
temperature

Vale = se anche S è reversibile

## CICLO DI CARNOT

Il ciclo della macchina di Carnot, o ciclo di Carnot, è composto da quattro fasi consecutive: un'espansione isoterma, un'espansione adiabatica, una compressione isoterma e una compressione adiabatica.



$$T_2 \rightarrow Q_2$$

ASSORBIMENTO DI  
CALORE durante l'espansione  
ISOTERMA

MACHINA  
DI  
CARNOT

$$\Rightarrow W = Q_2 - |Q_1|$$

$$T_1 \rightarrow |Q_1|$$

CESSIONE DI  
CALORE durante la compressione  
ISOTERMA

## RENDSIMENTO DELLA MACCHINA DI CARNOT

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

Ogni altra macchina REVERSIBILE  
che lavora tra le stesse temperature  
ha lo stesso rendimento

Le macchine REALI (IRREVERSIBILI) hanno un rendimento minore

## 3° PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA (NERNST - 1906)

Il teorema di Nernst, detto anche terzo principio della termodinamica, afferma che è impossibile raffreddare un corpo fino allo zero assoluto mediante un numero finito di trasformazioni.

$$\eta_R \neq 1 \Rightarrow T_1 \neq 0$$

### LA DISUGUAGLIANZA DI CLAUSIUS

In un ciclo

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

↑ = se la macchina è reversibile

### DIMOSTRAZIONE CASO N=2

$$\eta \leq \eta_R \quad 1 - \frac{|Q_1|}{Q_2} \leq 1 - \frac{T_1}{T_2} \Rightarrow \frac{|Q_1|}{Q_2} \geq \frac{T_1}{T_2}$$

$$\Rightarrow \frac{|Q_1|}{T_1} > \frac{Q_2}{T_2} \Rightarrow -\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} \geq 0$$

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

# ENTROPIA

Scelta una trasformazione REVERSIBILE tra 2 stati di equilibrio A e B, si definisce VARIAZIONE DI ENTROPIA  $S(B) - S(A)$  nel percorso da A a B

$$S(B) - S(A) = \left( \sum_i \frac{\Delta Q_i}{T_i} \right)_{A \xrightarrow{REV} B}$$

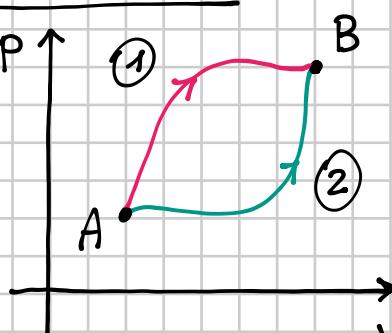
L'ENTROPIA È UNA FUNZIONE DI STATO

Scelgiamo uno STATO DI RIFERIMENTO R in cui l'entropia  $S(R)$  è posta arbitrariamente uguale a 0.

L'entropia  $S(C)$  in ogni altro stato C è uguale alla variazione di entropia da R a C:

$$S(C) = S(C) - S(R) = \left( \sum_i \frac{\Delta Q_i}{T_i} \right)_{R \xrightarrow{REV} C}$$

DIMOSTRAZIONE



(1) (2) REVERSIBILI

Percorriamo in senso inverso la (2), chiamandola (-2)

$$\left( \sum_i \frac{\Delta Q_i}{T_i} \right)_{A \xrightarrow{1} B \xrightarrow{-2} A} = 0$$

DIS. DI CLAUSIUS  
(CICLO REVERSIBILE)

$$\left( \sum_i \frac{\Delta Q_i}{T_i} \right)_{A \xrightarrow{1} B} + \left( \sum_i \frac{\Delta Q_i}{T_i} \right)_{B \xrightarrow{-2} A} = \left( \sum_i \frac{\Delta Q_i}{T_i} \right)_{A \xrightarrow{1} B} - \left( \sum_i \frac{\Delta Q_i}{T_i} \right)_{A \xrightarrow{2} B} = 0$$

$$\Rightarrow \left( \sum_i \frac{\Delta Q_i}{T_i} \right)_{A \xrightarrow{1} B} = \left( \sum_i \frac{\Delta Q_i}{T_i} \right)_{A \xrightarrow{2} B}$$

Nelle trasformazioni REVERSIBILI il cambio di verso nella trasformazione comporta solo il CAMBIO DI SEGNO degli scambi energetici

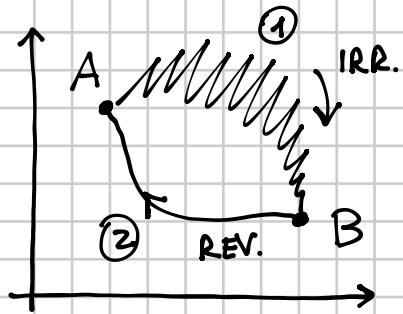
# PRINCIPIO DI AUMENTO DELL'ENTROPIA

L'ENTROPIA DI UN SISTEMA TERMICAMENTE ISOLATO :

- RIMANE COSTANTE se nel sistema è avvenuta una transf. REVERSIBILE
- AUMENTA se nel sistema è avvenuta una transf. IRREVERSIBILE

$$\Delta S = S(B) - S(A) \geq 0$$

DIMOSTRAZIONE



$$\left( \sum \frac{\Delta Q_i}{T_i} \right)_{\substack{A \xrightarrow[IRR]{1} B \\ \xrightarrow[REV]{2} A}} < 0$$

$$\left( \sum \frac{\Delta Q_i}{T_i} \right)_{A \xrightarrow[IRR]{1} B} + \left( \sum \frac{\Delta Q_i}{T_i} \right)_{B \xrightarrow[REV]{2} A} < 0$$

$$\left( \sum \frac{\Delta Q_i}{T_i} \right)_{A \xrightarrow[IRR]{1} B} + S(B) - S(A) < 0$$

$$S(B) - S(A) > \left( \sum \frac{\Delta Q_i}{T_i} \right)_{A \xrightarrow[IRR]{1} B}$$

↑  
in generale  
≥

Se il sistema è TERMICAMENTE ISOLATO, allora  $\Delta Q_i = 0$  per ogni  $i$

$$\Rightarrow S(B) - S(A) \geq 0 \Rightarrow$$

$$S(B) \geq S(A)$$

Un SISTEMA ISOLATO si ottiene considerando un SISTEMA (propriamente detto, ed es. un gas) e il suo AMBIENTE. Tale sistema isolato è detto anche UNIVERSO TERMODINAMICO. Si ha:

$$\Delta S_U \geq 0 \quad \text{con} \quad \Delta S_U = \Delta S_{\text{SIST.}} + \Delta S_{\text{AMB.}}$$

Se l'universo compie una trasf. REVERSIBILE:

$$\Delta S_U = 0 \Rightarrow \Delta S_{\text{SIST.}} = -\Delta S_{\text{AMB.}}$$

Se l'universo compie una trasf. IRREVERSIBILE:

$$\Delta S_U > 0 \Rightarrow \Delta S_{\text{SIST.}} \neq -\Delta S_{\text{AMB.}}$$

L'IRREVERSIBILITÀ è sempre accompagnata da un aumento dell'entropia dell'universo. I processi naturali sono tutti sostanzialmente irreversibili.

OGNI PROCESSO NATURALE SI SVOLGE NECESSARIAMENTE NEL VERSO CHE DETERMINA UN AUMENTO DELL'ENTROPIA DELL'UNIVERSO

In presenza di trasformazioni irreversibili, l'entropia di una o più parti del sistema può anche diminuire, ma c'è almeno un'altra parte in cui aumento in modo da soddisfare  $\Delta S > 0$ .

L'irreversibilità delle trasformazioni reali e l'aumento di entropia che essa comporta assegnano un verso al tempo. La «freccia del tempo» punta nel verso in cui l'entropia dell'Universo aumenta:

In un sistema isolato o nell'Universo, uno stato a entropia minore è sempre il *prima*, uno a entropia maggiore è sempre il *dopo*.

### SECONDO PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA - FORMULAZIONE IN TERMINI DI ENTROPIA

l'evoluzione di un sistema isolato, in particolare quella dell'Universo, porta il sistema verso uno stato di equilibrio a cui corrisponde il massimo aumento di entropia compatibile con la conservazione dell'energia.