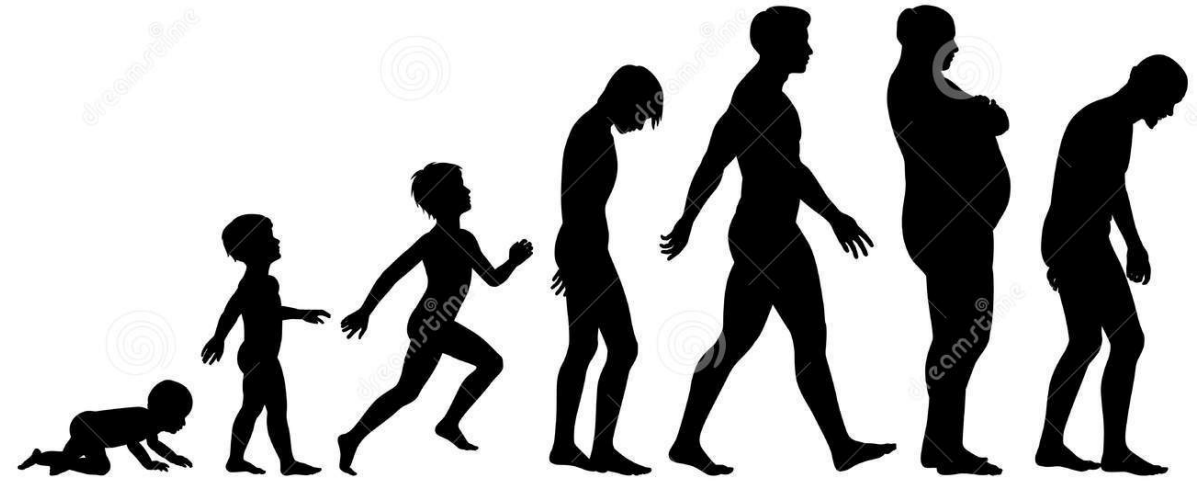
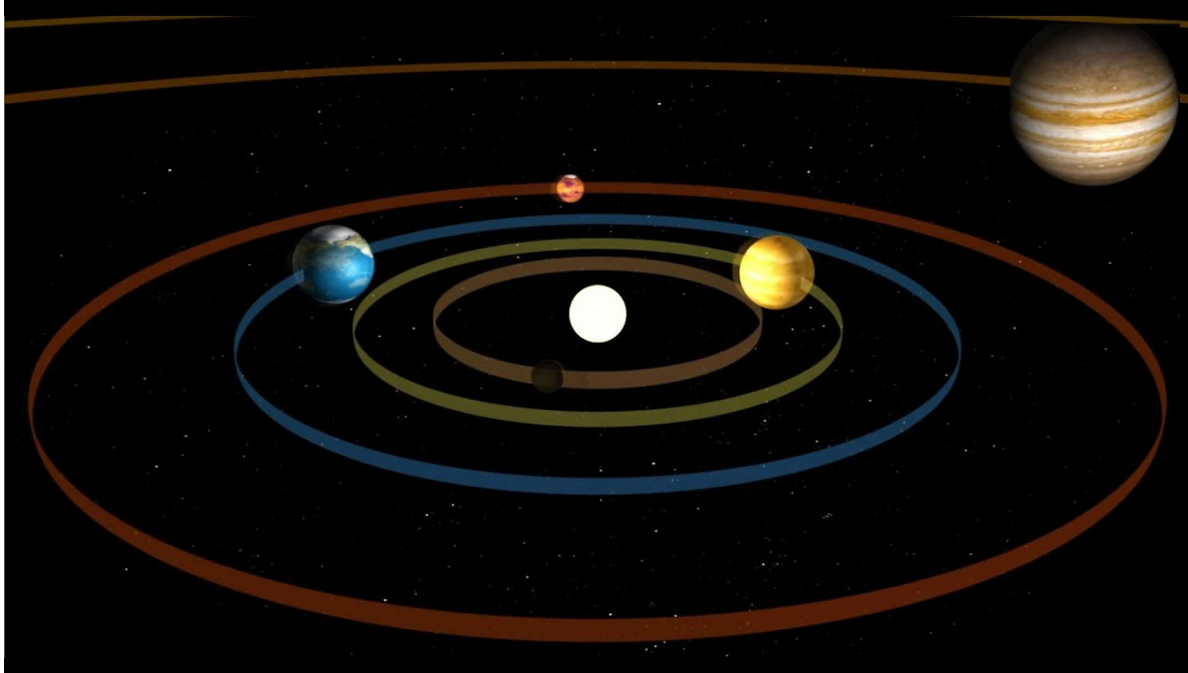
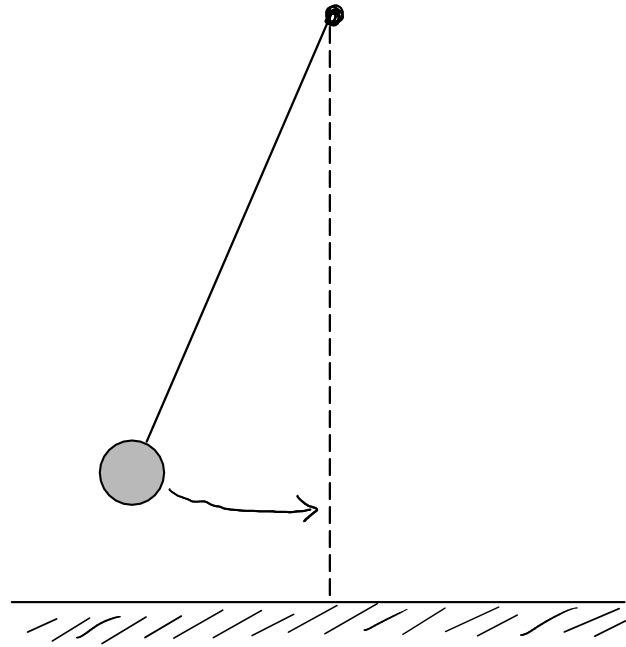


## II PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA



# Reversibilitate și ireversibilitate în dinamica newtoniană

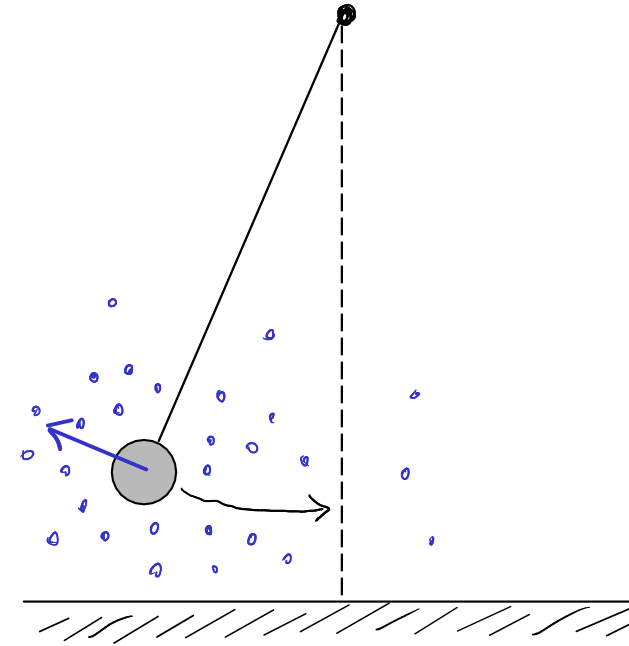


$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 x$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{dx}{dt} \right) = -\omega^2 x$$

$$\frac{d}{d(-t')} \frac{dx}{d(-t')} = -\omega^2 x \quad \frac{d^2x}{dt'^2} = -\omega^2 x$$

$$t \rightarrow t' = -t$$



$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 x - \gamma \frac{dx}{dt}$$

$$\frac{d^2x}{dt'^2} = -\omega^2 x + \gamma \frac{dx}{dt'}$$

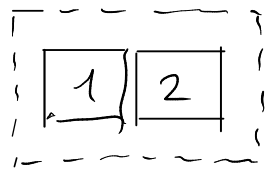
## Reversibilità e irreversibilità in termodinamica



$$\Delta U = Q + W \quad I \text{ pr.}$$

A scuola mi avevano detto che è l'energia che fa girare il mondo. Ma c'è qualcosa che non torna. L'energia si conserva. Se si conserva, che bisogno abbiamo di procurarcene di nuova? Perché non usiamo sempre la stessa? Non è di energia che abbiamo bisogno, è di bassa **entropia**. Senza bassa entropia, l'energia si diluirebbe in un calore uniforme e il mondo andrebbe al suo stato d'equilibrio, dove non c'è distinzione tra passato e futuro. [“L'ordine del tempo”, C. Rovelli, p.137]

Una ricerca dell'entropia...



↔

I pr.:  $dU_1 + dU_2 = 0$

$\delta Q_1 + \delta Q_2 = 0$

$(U_{\{1,2\}} = U_1 + U_2)$

$(\delta Q_1 = -\delta Q_2)$

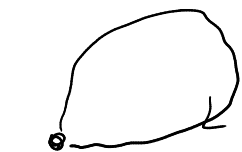
$T_1 > T_2 : \delta Q_1 < 0 \quad \delta Q_2 > 0$

$T_1 < T_2 : \delta Q_1 > 0 \quad \delta Q_2 < 0$

$\frac{\delta Q_1}{T_1} + \frac{\delta Q_2}{T_2} = \delta Q_1 \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$

$< 0 \quad < 0 \quad > 0 \quad T_1 > T_2$

$> 0 \quad > 0 \quad > 0 \quad T_1 < T_2$



$\oint = f$

$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0 \Rightarrow \frac{\delta Q}{T}$  è differenziale esatto!



Sadi Carnot  
~ 1820



Rudolph Clausius  
~ 1850 - 1860

Enunciato: ogni sistema macroscopico è caratterizzata da una variabile di stato,  $S$ , entropia, additiva ed estensiva tale che

$$dS \geq 0$$

se il sistema è isolato.

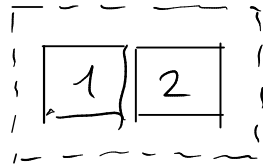
Motto: l'entropia dell'universo non può diminuire!

Espressione di  $dS$  per sistema non isolato lungo trasformazione  $QS$

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \quad \text{SI: } \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

### Osservazioni

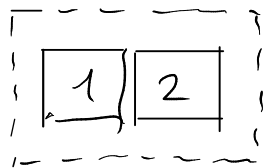
•  $dS = 0 \rightarrow$  equilibrio



$$dS_{\text{tot}} = dS_1 + dS_2 = \frac{\delta Q_1}{T_1} + \frac{\delta Q_2}{T_2}$$

$$= \delta Q_1 \underbrace{\left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}_{T_1 = T_2} = 0$$

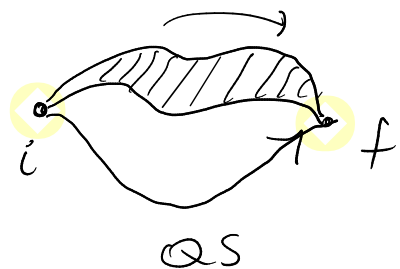
•  $dS > 0 \rightarrow$  trasformazione irreversibile



$$dS_{tot} = dS_1 + dS_2 = \frac{\delta Q_1}{T_1} + \frac{\delta Q_2}{T_2} = \delta Q_1 \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) > 0$$

$dS = 0 \rightarrow$  trasformazione reversibile

- $\Delta S$  da  $i$  a  $f$  ,  $S$  variabile di stato  $\rightarrow dS$  esatto



$$\Delta S = \int_i^f \frac{\delta Q}{T}$$

## Equatione fondamentale

$$S = S(U, V, N) \quad N = \text{cost} \quad QS$$

$$\left\{ \begin{array}{l} dU = \delta W + \delta Q = -P dV + \delta Q \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} ds = \frac{\delta Q}{T} \end{array} \right.$$

$$dU = -P dV + T ds$$

$$\delta Q = dU + P dV$$

$$ds = \frac{1}{T} dU + \frac{P}{T} dV$$

$$\rightarrow S = S(U, V) \text{ eq. fondamentale}$$

Es.: eq. fondamentale di un gas perfetto

$$\left\{ \begin{array}{l} PV = Nk_B T \\ U = C_V T \end{array} \right.$$

$$U = C_V T \quad (\text{es. monoatomico } U = \frac{3}{2} Nk_B T)$$

$$\frac{P}{T} = \frac{Nk_B}{V}$$

$$\frac{1}{T} = = \frac{C_V}{U}$$

$$dS = C_V \frac{dU}{U} + Nk_B \frac{dV}{V} \quad i. \rightarrow f.$$

$$\int_i^f dS = C_V \int_i^f \frac{dU}{U} + Nk_B \int_i^f \frac{dV}{V}$$

$$S_f = C_V \ln\left(\frac{U_f}{U_i}\right) + Nk_B \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right) + S_i$$

$$S = C_V \ln\left(\frac{U}{U_i}\right) + Nk_B \ln\left(\frac{V}{V_i}\right) + S_i$$

$$S = C_V \ln(U) + Nk_B \ln(V) + S_0$$



I principio

$$dU = 0$$

isolato

II principio

$$dS \geq 0$$

$$dU = \delta W + \delta Q$$

non isolato

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \quad (QS)$$

III principio

$$\lim_{T \rightarrow 0} S = \text{cost}$$