

# La termodinamica: prospettive tra storia, scienza ed epistemologia

|

Francesco Gonella  
gonella@unive.it  
Facoltà di Scienze MM FF e NN  
Università Ca' Foscari di Venezia

L'importanza della Termodinamica

Breve excursus storico sul calore

Il 2° principio della Termodinamica  
(e un po' di epistemologia)

L'entropia

Il diavoleto di Maxwell

Un'ipotesi di didattica per la Termodinamica

La Termodinamica fuori dalla Fisica

L'econofisica

I sistemi complessi

Le scienze ambientali

# Perché la termodinamica?

*Perché il 2° principio è al centro della nostra rappresentazione del mondo!*

- ✓ Perché val la pena di approfondire i significati del 2° principio?
- ✓ Quali sono i suoi aspetti interessanti da un punto di vista epistemologico?
- ✓ Come può essere usata per provare a insegnare qualcosa al di fuori della “cultura scientifica” propriamente detta?
- ✓ Che ruolo ha lo sviluppo storico nella sua presentazione didattica standard?
- ✓ Perché può essere interessante provare a ripensarne la didattica?

## Fisica

- Natura e assiomatizzazione dei contenuti
- Articolazione dei diversi settori disciplinari

## Storia della Fisica

- Sviluppo del pensiero scientifico
- Collocazione storica e culturale

## Epistemologia

- La conoscenza scientifica in sé
- La trasmissione della conoscenza scientifica

## Didattica della Fisica

- Teorie e modelli di apprendimento
- Natura interdisciplinare

## Il concetto di calore

Galileo,  
Il Saggiatore,  
1623

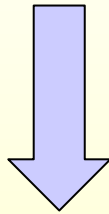


*“...dico che inclino assai a credere che il calore sia di questo genere [qualità con esistenza solo in noi e fuori di noi solo nomi], e che quelle materie che in noi producono e fanno sentire il caldo, le quali noi chiamiamo con nome generale fuoco, siano una moltitudine di corpicelli minimi, in tal modo figurati, mossi con tanta e tanta velocità; li quali incontrando il nostro corpo, lo penetrino con la loro somma sottilità, e che il lor toccamento, fatto nel loro passaggio per la nostra sostanza e sentito da noi, sia l’affezione che noi chiamiamo caldo”*

## La teoria dei gas

Boyle (seconda metà '600)

Daniel Bernoulli (prima metà '700)

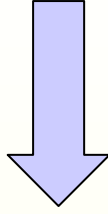


## La macchina a vapore

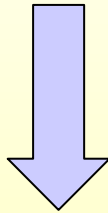
Thomas Savery (1695) → pompa termica per l'acqua

Thomas Newcomen (1705) → macchina termica a pistone

James Watt (circa 1770) → prima macchina a vapore moderna



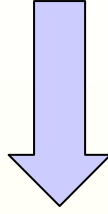
Il problema della misura quantitativa delle variabili in gioco nel funzionamento delle macchine: **lavoro**, **calore**, **potenza**, **efficienza**



**Il problema della natura del calore**

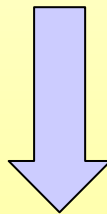
**F. Bacone e Keplero:**

Il calore è uno **stato del corpo** dovuto all'agitazione delle molecole



Idea soppiantata fino dal '700 dall'ipotesi del **calorico**, fluido imponderabile responsabile di tutti i fenomeni termici, liberato quando l'ossigeno dell'aria si combinava con un "radicale qualunque"

Prima critica: **Benjamin Thompson** (1799), studiando l'alesatura dei cannoni



**Lazare Carnot** (fine '700) comincia a discutere efficienze congegni meccanici



**Sadi Carnot** (prima metà '800) studia le macchine a vapore

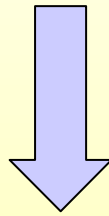


Si sviluppa la scienza che studia l'efficienza della conversione di calore in lavoro, prima ancora che si definisse il **Q** come forma di energia (**Joule** 1847)

Carnot: *“per produrre lavoro, una macchina termica deve necessariamente ricevere calore dalla sorgente calda e cederne alla sorgente fredda”* (1824)

**Rudolph Clausius**  
(circa 1850)

Riprende il lavoro di Carnot e sistematizza matematicamente la teoria meccanica del calore



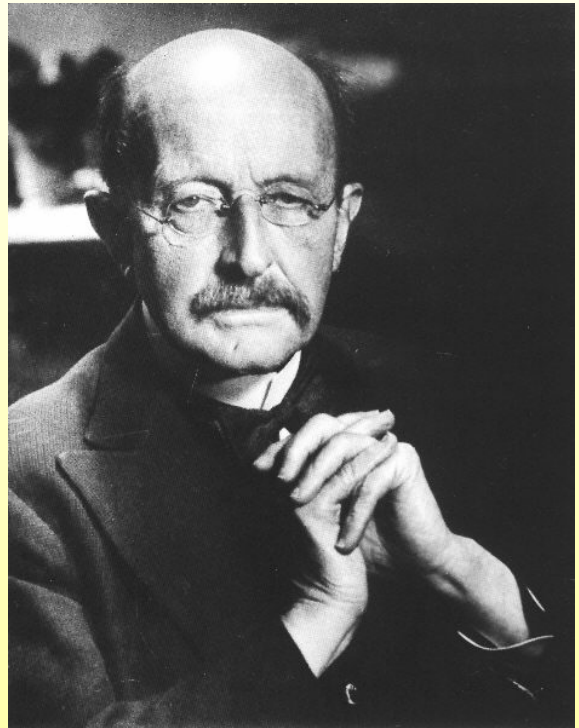
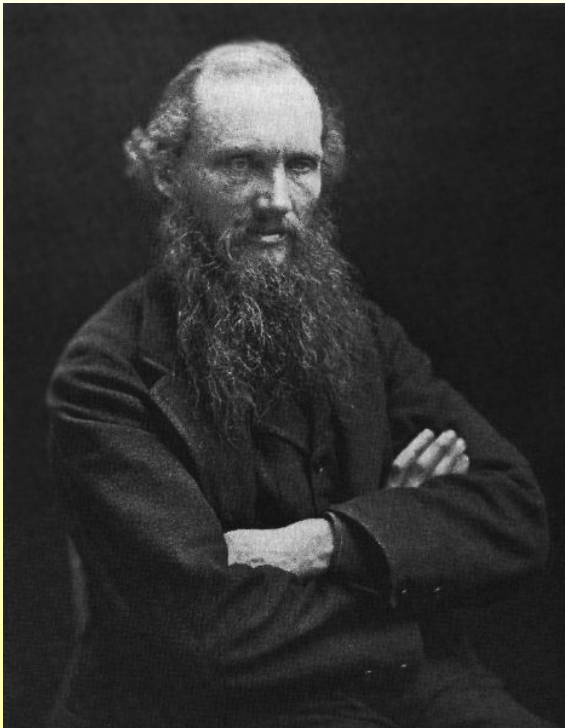
## Il 2° principio della Termodinamica

### Enunciato di Clausius

E' impossibile realizzare un processo che abbia come unico risultato il trasferimento di una quantità di calore da un corpo ad un altro a temperatura maggiore

## Enunciato di Kelvin-Planck

E' impossibile realizzare un processo che abbia come unico risultato la trasformazione in lavoro del calore fornito da una sorgente a temperatura uniforme



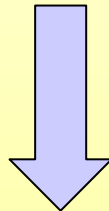
I due enunciati sono logicamente equivalenti...

...ma epistemologicamente non equivalenti

Due prospettive diverse

**Clausius**: centralità del concetto di direzionalità  
intrinseca dei processi naturali

**Kelvin**: centralità del concetto di ineluttabilità  
della dissipazione energetica

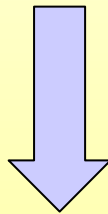


Diversità del modo di intendere il  
concetto di **calore**

Scuola inglese (**Kelvin**): il calore è una forma di energia, convertibile solo in modo limitato in forme “utilizzabili”

Per **Clausius**, il calore è un “elemento naturale” il cui comportamento riflette la direzionalità “naturale” dei processi

Comunque sia, il cambiamento spontaneo, irreversibile, delle cose è suscettibile di una misura



La funzione  
**ENTROPIA**

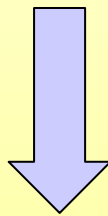


# PASSATO vs. FUTURO

Percepiamo la loro differenza in senso biologico, geologico, fisico, astronomico, storico, psicologico

Irreversibilità dei fenomeni osservati →  
fenomeni macroscopici

- bicchiere di grappa
- zolletta di zucchero nel caffè
- stella cadente



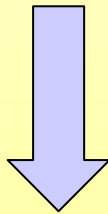
Il “film rovesciato” non viene mai osservato

A livello microscopico, uso le leggi della fisica  
→ I fenomeni sono **simmetrici** → **reversibili**

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}$$

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

- urti tra particelle
- reazioni chimiche
- emissione o assorbimento di luce (fotoni)



**Il “film rovesciato” è osservato tanto quanto**

*La nostra intuizione (derivata dall'esperienza sensibile) di un mondo "irreversibile" (freccia del tempo) collide con una descrizione meccanica del mondo "reversibile" (reversibilità della microfisica + riduzionismo)*

Un piccolo approfondimento didattico:

un po' di **EPISTEMOLOGIA**

termine, costruito sulle parole greche *epistème* (scienza) e *logos* (discorso), indicante quella parte della teoria generale della conoscenza che tratti problemi come i **fondamenti**, la **natura**, i **limiti** e le **condizioni di validità** della conoscenza scientifica

L'epistemologia è perciò lo studio dei criteri generali che consentono di distinguere le asserzioni scientifiche dalle opinioni tipiche della metafisica, religione, etica, politica, etc.



## TRE LIVELLI EPISTEMICI FONDAMENTALI...

...nella pratica scientifica di acquisizione di nuova conoscenza

- 1) **MODELLO** (*Modell*)
- 2) **IMMAGINE DEL MONDO** (*Weltbild*)
- 3) **INTUIZIONE DEL MONDO** (*Weltanschauung*)

Ciascun livello ha i suoi propri strumenti d'indagine

# MODELLO

**Artefatto mentale** costruito ad hoc per rendere più semplice lo studio di un “pezzo di natura”

Si sa a priori che il modello è falso. Rappresenta uno strumento operativo con funzioni euristico-pratiche, senza valenza teoretica

## Esempi

- sistema meccanico senza attrito
- sistema isolato
- gas ideale (gas perfetto)

1) **M** ci parla di qualcosa *che non esiste...*

2) ...ma che è facile da studiare

3) **M** riproduce “sufficientemente bene” il comportamento di qualcosa che esiste

# IMMAGINE DEL MONDO

Insieme di definizioni, assiomi e teoremi che hanno la pretesa di dirci com'è la realtà

E' vera o falsa, è falsificabile dall'esperimento, che gli dona un valore di verità epistemico

## Esempi

- la teoria dell'evoluzione di Darwin
- la legge di gravità  $\rightarrow$  WB (parte di)  
2 corpi isolati  $\rightarrow$  M
- $PV=nRT \rightarrow$  WB (parte di)  
Gas ideale  $\rightarrow$  M

È il livello epistemico più importante. Le **Weltbilder** sono le teorie scientifiche. Devono essere caratterizzate da:

*Consistenza interna* (accettabilità logica)

*Consistenza esterna* (accordo con esperimenti)

# INTUIZIONE DEL MONDO

**Costrutto concettuale** che dona un senso alla natura (realtà). Contiene i principi metafisici, etici, estetici, ontologici ecc. Con i quali descriviamo la realtà

Non è falsificabile dall'esperienza. Non ha a che fare con l'indagine scientifica...

*...ma la può influenzare!*

## Esempi

- ✓ **Spazio e tempo assoluti** di Newton vengono dalla fede in un Dio creatore
- ✓ La fede di Einstein nella **simmetria di spazio e tempo** ha portato alla teoria della relatività

## Secondo principio della Termodinamica

E' la sola legge fisica (assioma) che distingue tra passato e futuro

✓ *Il calore non può essere trasferito da un corpo a una certa temperatura a uno a temperatura più alta come solo risultato di un processo*

✓ *Il calore non può essere trasformato in lavoro come solo risultato di un processo*

$$\Delta S_i \geq 0 \rightarrow \Delta S_U > 0$$

Definisce una **Freccia del tempo**

Freccia del tempo → termodinamica

≠ storica

≠ psicologica

*Domanda: se le leggi della fisica che regolano le interazioni microscopiche sono sempre reversibili nel tempo (cioè non distinguono tra passato e futuro), cos'è che rende irreversibili processi macroscopici, che sono solo manifestazioni di un numero enorme di processi microscopici reversibili che accadono nello stesso momento?*

Per capirlo, è necessario approfondire il concetto di **Entropia**

$$\Delta S_{AB} = \int_A^B \left( \frac{dQ}{T} \right)_{rev}$$

$$\Delta S_i \geq 0 \rightarrow \Delta S_U > 0$$

Le cose vanno in direzione di un aumento  
(globale) di entropia

irreversibilità  $\leftrightarrow$  evoluzione nel tempo  $\leftrightarrow \Delta S > 0$

$S$  cresce se il sistema è isolato  $\rightarrow$

qualcosa che avviene internamente (*en-tropé*)

$S$  può decrescere per un sistema, ma a spese di un più grande aumento di  $S$  per il suo ambiente, poiché  
Universo = sistema + suo ambiente

$\Delta S_i \geq 0$  è valido per qualsiasi sistema, abbiamo solo bisogno di capire quale può essere una forma analitica maneggiabile per il linguaggio formale che deve descrivere il sistema

- ✓ Disintegrazione atomica
- ✓ Esplosione di una supernova
- ✓ Abbronzatura
- ✓ Cottura della pasta
- ✓ Metabolismo dei corpi viventi

Per i sistemi termodinamici

$$\Delta S_{AB} = \int_A^B \left( \frac{dQ}{T} \right)_{rev}$$

S è una **funzione di stato**

*Ma che cos'è l'entropia?*



# Gas in una scatola

macrostato  $\rightarrow (P, V, T)$

microstato  $\rightarrow (\mathbf{r}_1, \mathbf{v}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{r}_n, \mathbf{v}_n)$

*Ciascun macrostato può corrispondere a molti microstati diversi*

Esistono configurazioni **più probabili** (e.g. molecole omogeneamente distribuite) e altre **meno probabili** (e.g. molecole concentrate in un angolo della scatola)

$N$  = numero di configurazioni microscopiche che danno luogo allo stesso macrostato  $X$

$N$  è chiamata la **probabilità termodinamica** del macrostato  $X$

Mettiamo  $n$  molecole in una scatola

Definiamo due possibili macrostati (legati alla variabile termodinamica  $V$ ):

$X_1$  = tutte le molecole sono in mezza scatola (destra oppure sinistra )

$X_2$  = metà delle molecole sono nella parte destra, metà nella sinistra

	$n=4$ (numero di molecole)	$N$ (numero di configurazioni possibili)
$X_1$	0-4	2
$X_2$	2-2	6

AB-CD, AC-BD, AD-BC, BC-AD, BD-AC, CD-AB

	n=6 (numero di molecole)	N (numero di configurazioni possibili)
$X_1$	0-6	2
$X_2$	3-3	20

	n=10 (numero di molecole)	N (numero di configurazioni possibili)
$X_1$	0-10	2
$X_2$	5-5	252

	n=30 (numero di molecole)	N (numero di configurazioni possibili)
$X_1$	0-30	2
$X_2$	15-15	$115 \times 10^6$

	n=60 (numero di molecole)	N (numero di configurazioni possibili)
$X_1$	0-60	2
$X_2$	30-30	$118 \times 10^{15}$

$118 \times 10^{15} \rightarrow$  circa l'età dell'universo in sec!

Per numeri molto più alti (e.g.,  $10^{23}$ ),  
La probabilità di  $X_1$  è virtualmente **zero**

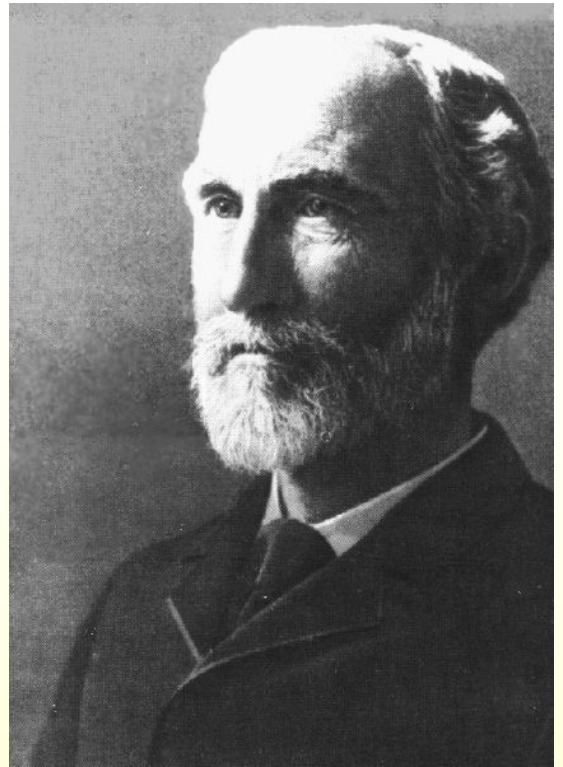
(N.B.: quanta sabbia è  $10^{23}$  granelli, cioè il n. di  
atomi in una bottiglia d'acqua?)

Qual è la causa?

Moto disordinato e collisioni “casuali”  $\rightarrow$   
**caos molecolare**

Per ottenere  $X_1$ , dobbiamo “prepararlo”. Da lì, il  
sistema evolverà spontaneamente verso un  
macrostato ad alta probabilità  $N$ , fluttuando tra  
microstati “vicini”. Come descrivere tutto ciò?

Un approfondimento didattico:  
**LO SPAZIO DELLE FASI**  
(J.W.Gibbs, 1901)

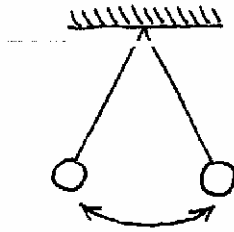


Spazio n-dimensionale le cui coordinate sono le variabili da specificare per definire lo stato di un sistema

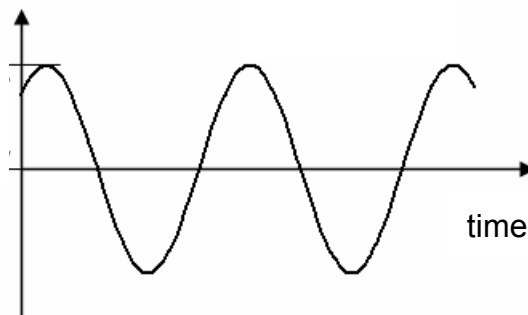
- ✓ 1 particella puntiforme  $\rightarrow (x, y, z, v_x, v_y, v_z) \rightarrow$  spazio 6-dimensionale
- ✓ 2 particelle puntiformi  $\rightarrow$  spazio 12-dimensionale
- ✓ N particelle puntiformi  $\rightarrow$  spazio 6N-dimensionale
- ✓ n moli di gas ideale  $\rightarrow (P, V) \rightarrow$  spazio 2-dimensionale

- Ogni **punto** nello SF rappresenta (“è”) uno stato dinamico del sistema
- La **dinamica** (la “storia”) del sistema è la **traiettoria** (la curva) nello SF. Una traiettoria nello SF non può mai autointersecarsi, poiché le leggi sono comunque deterministiche
- La forma di una traiettoria dipende dalle condizioni iniziali e dalle condizioni al contorno, i.e. le forze agenti, i campi, le interazioni con il resto dell’ambiente, ecc.
- Date le condizioni iniziali e i parametri, la traiettoria è univocamente determinata
- Una sequenza di valori nel tempo è trasformata in un oggetto nello spazio → **embedding**
- La descrizione dell’evoluzione di un sistema può utilizzare un diagramma nello SF invece che un diagramma spazio-tempo

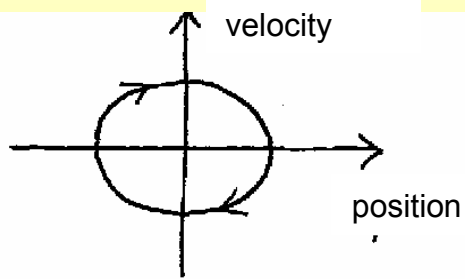
## il pendolo senza attrito



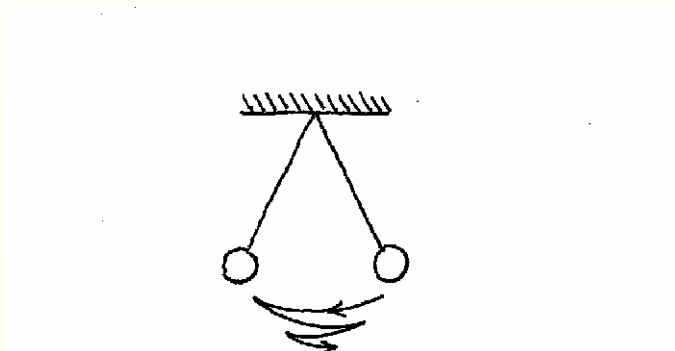
position



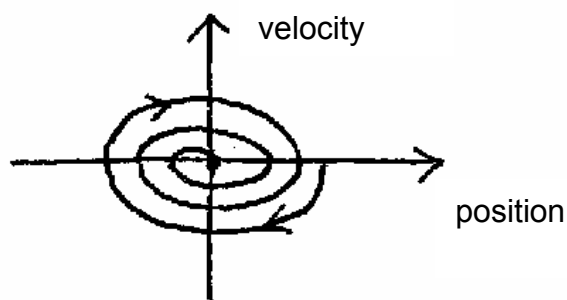
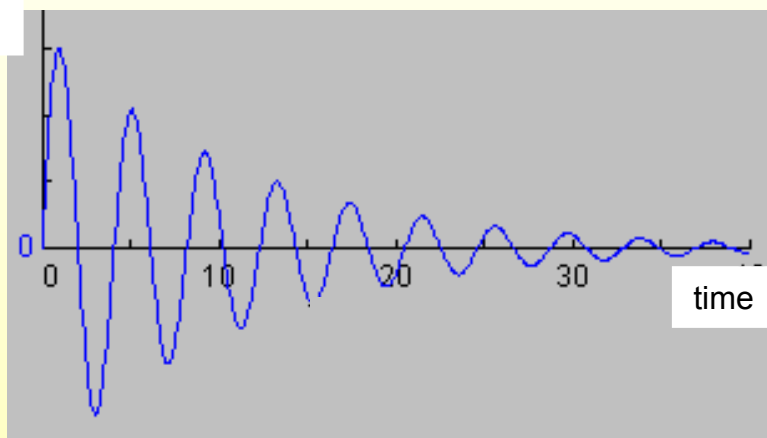
velocity



## il pendolo con attrito



position





- Per ogni condizione iniziale, il moto del pendolo con attrito evolve verso un punto → **attrattore**
- Anche per il pendolo senza attrito si parla di attrattore, l'orbita nello SF → **attrattore di 2° tipo**

L'evoluzione di un sistema può essere caratterizzata da molti attrattori. A seconda delle condizioni iniziali, il sistema può evolvere verso un attrattore piuttosto che verso un altro.

Esempio: la pendola a molla

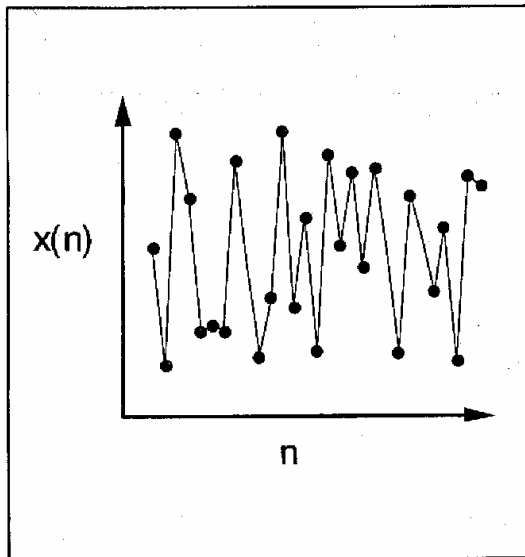
- Insieme di punti nello SF corrispondenti all'insieme di stati iniziali che evolvono verso un certo attrattore → **bacino di attrazione** di quell'attrattore

## Commento

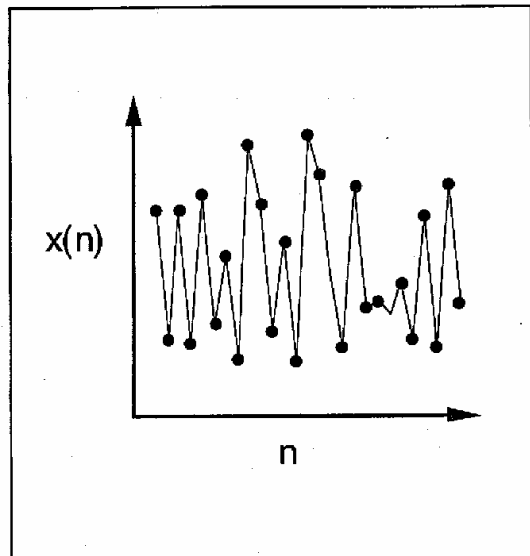
- ✓ Per sistemi deterministici, non c'è bisogno di usare lo SF. Possiamo usare  $x$  vs.  $t$ ,  $v$  vs.  $t$ ,  $E$  vs.  $t$ , ecc.

## Sistema caotico

Data 1



Data 2



These two sets of data have the **same**:

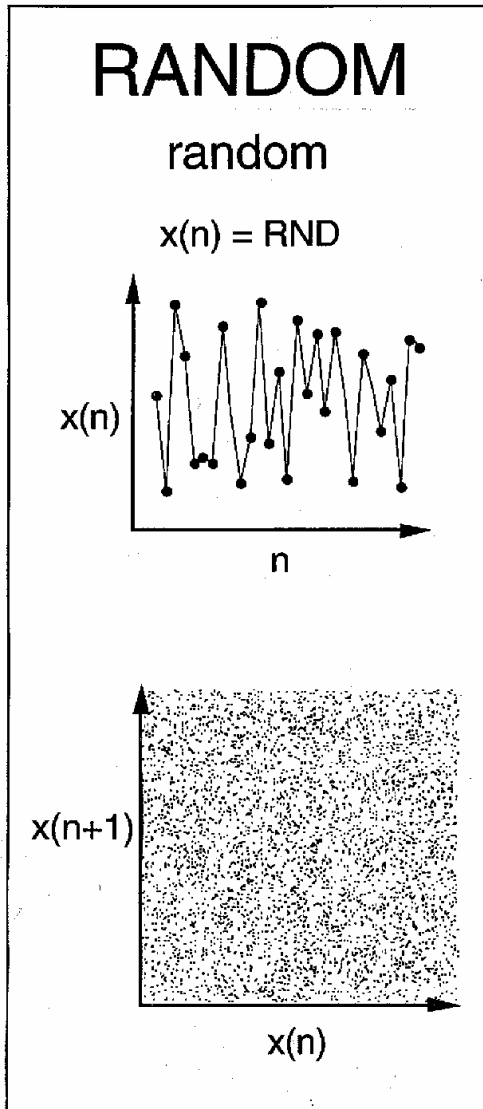
mean

variance

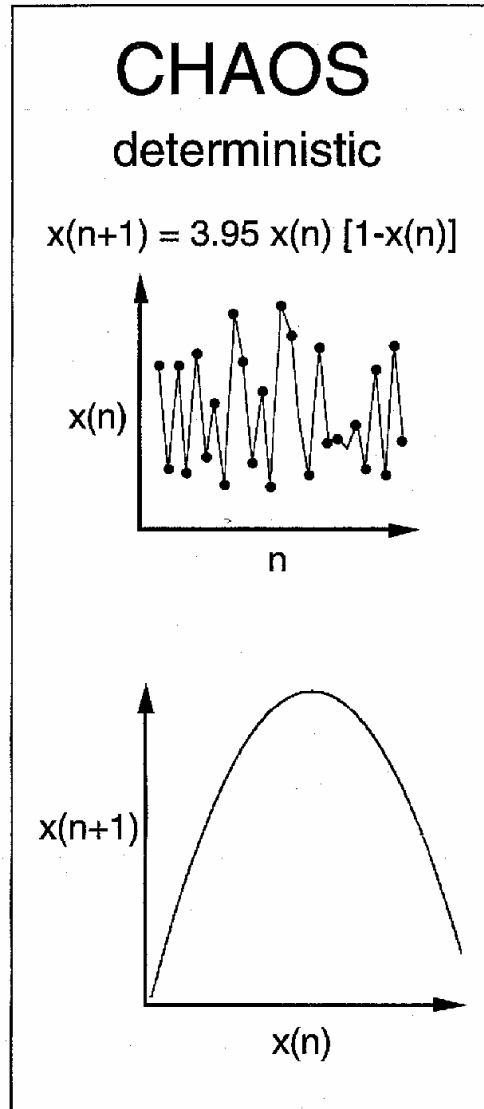
power spectrum

# Sistema caotico

Data 1

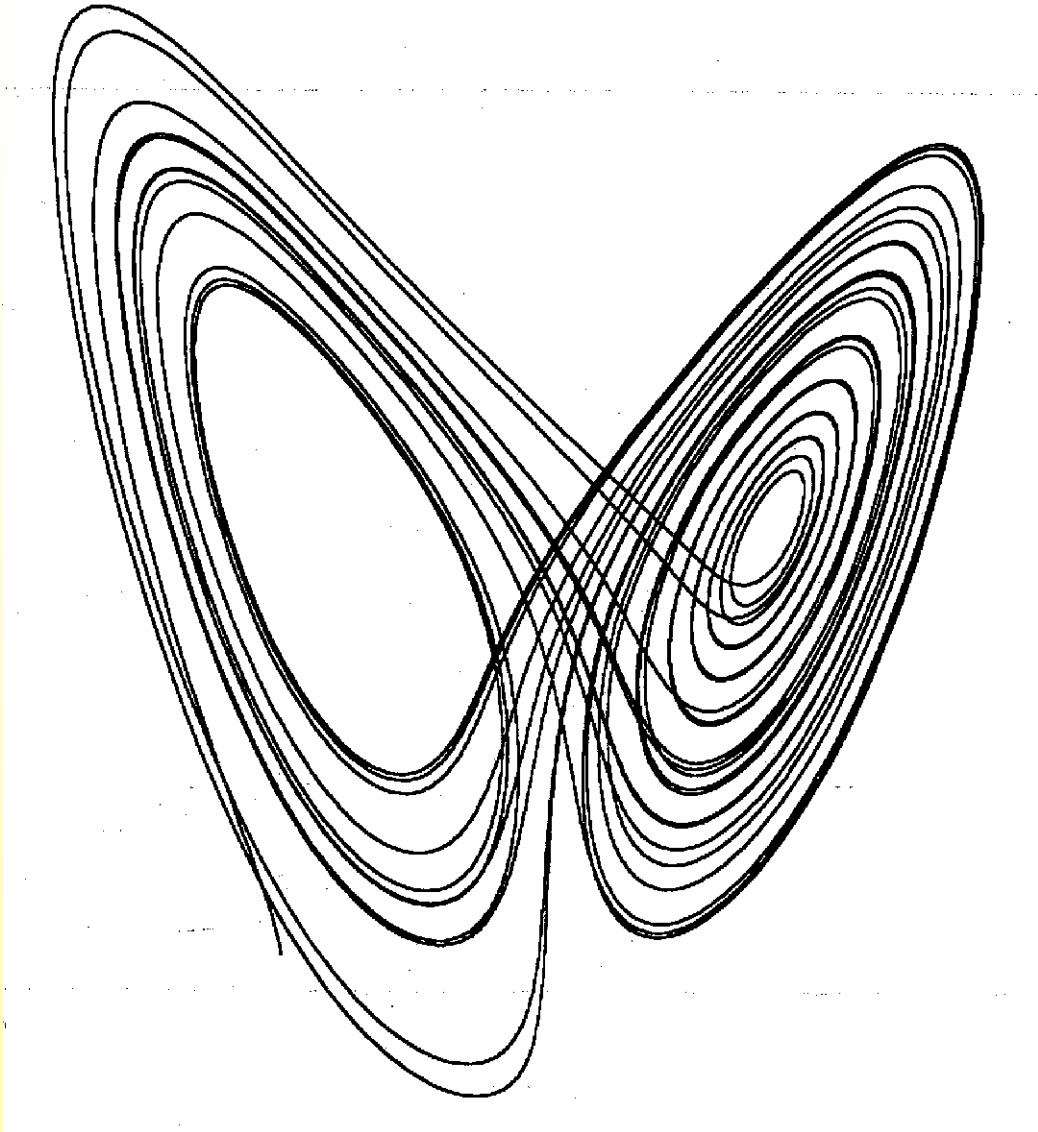


Data 2



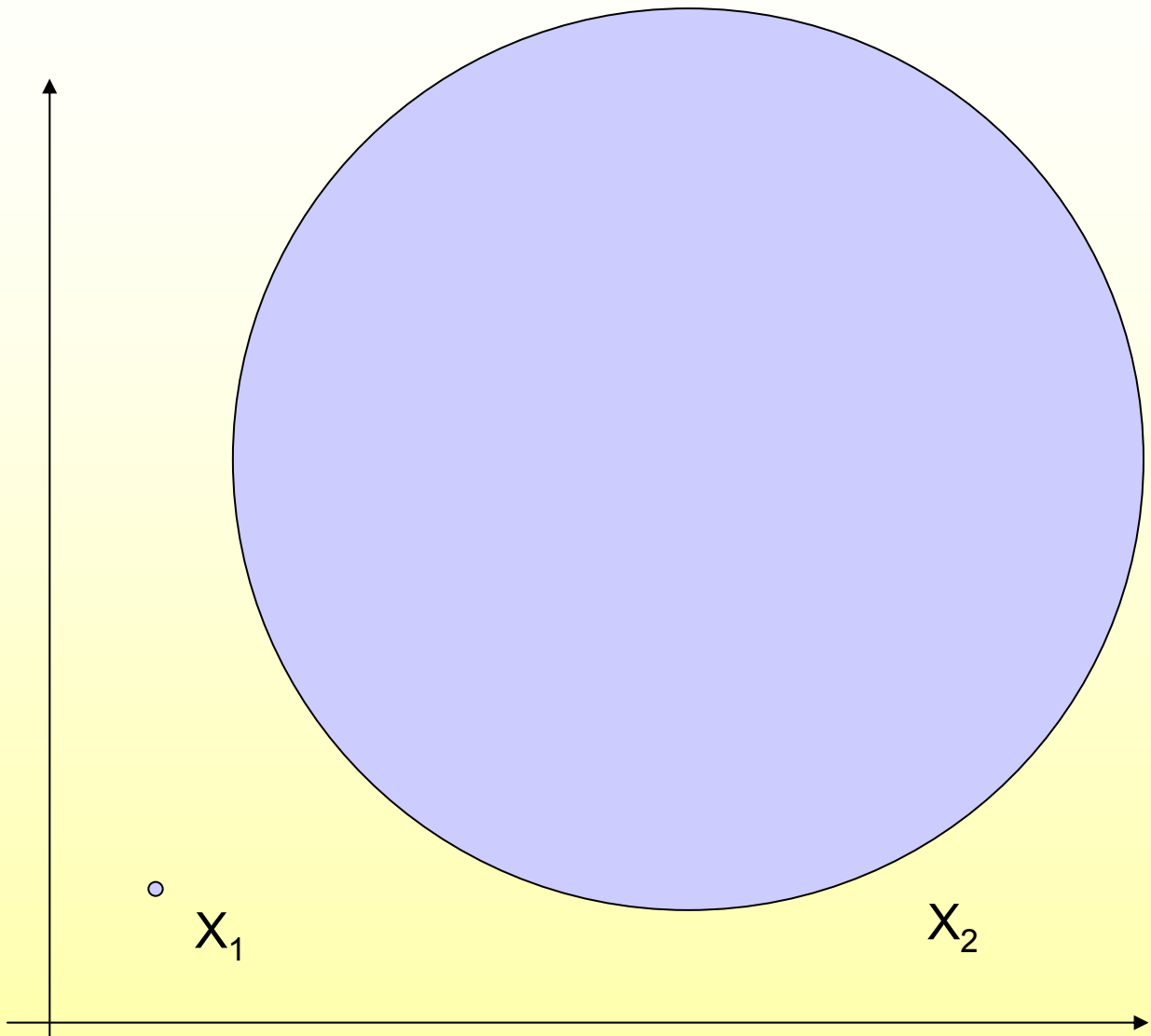
Una trasformazione opportuna di insiemi di dati che sembrano “simili” dà luogo a oggetti che appaiono diversi, permettendo di distinguere tra dati casuali e deterministici

# Lorenz Attractor



Gli attrattori strani hanno dimensione frattale!

Tornando al gas nella scatola...  
nello spazio delle fasi (**assolutamente non in scala!**):



Le traiettorie nello SF passeranno più probabilmente attraverso le (iper)sfere più grosse!

Avvertimento: attenzione alla differenza tra **evento** e **classe di eventi** (**microstato** e **macrostato**)

Un giochino:

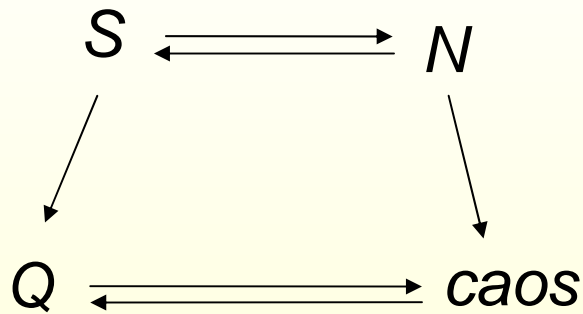
A♥, K♥, Q♥, J♥, 10♥

J♥, 7♣, 10♦, 8♠, K♣

Qual è la mano più probabile?

Di solito prestiamo attenzione alla **classe**,  
non ai singoli **eventi**!

Caos molecolare + collisioni → agitazione termica → trasmissione del calore



ENTROPIA → trasmissione del calore

ENTROPIA → irreversibilità, evoluzione

ENTROPIA → probabilità

ENTROPIA → caos (grande numero di costituenti)

probabilità → quantità moltiplicativa

entropia → quantità additiva

**Modello:** Sistema formato da due parti, 1 e 2

$$S_1, S_2, N_1, N_2$$

**Entropia** del sistema intero

$$S = S_1 + S_2$$

**Probabilità** di uno stato per il sistema intero

$$N = N_1 \times N_2$$

→ *il legame deve essere logaritmico*

$$S = k_B \ln N + \text{costante}$$

$$S_1 = k_B \ln N_1$$

$$S_2 = k_B \ln N_2$$

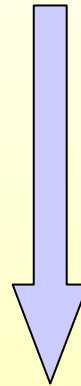
$$\begin{aligned} S &= k_B \ln N = k_B \ln(N_1 \times N_2) = k_B \ln N_1 + k_B \ln N_2 \\ &= S_1 + S_2 \end{aligned}$$



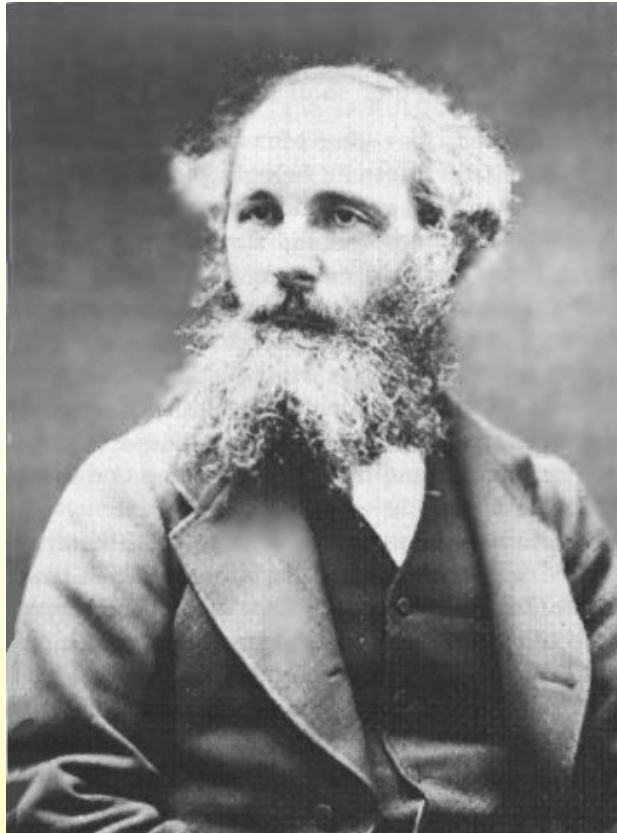


*Ludwig Boltzmann*

$$S = k_B \ln N$$



*È la risposta alla domanda “se le leggi della fisica che regolano le interazioni microscopiche sono sempre reversibili nel tempo (cioè non distinguono tra passato e futuro), cos’è che rende irreversibili processi macroscopici, che sono solo manifestazioni di un numero enorme di processi microscopici reversibili che accadono nello stesso momento?”*



*“Orbene la più piccola porzione di materia che noi riusciamo a sottoporre all’esperimento consiste di milioni di molecole, nessuna delle quali diventa mai individualmente sensibile... allora siamo obbligati ad abbandonare il metodo storico e ad adottare il metodo statistico di trattare con grandi gruppi di molecole” (J.C. Maxwell, 1860)*

## Esempio

Probabilità che 1 J di Q passi spontaneamente da un corpo a  $T=300$  K a un corpo a  $T=301$  K

1. calcoliamo  $\Delta S_U$

$$\Delta S_U = \int_i^f \left( \frac{dQ}{T} \right)_{T_F} + \int_i^f \left( \frac{dQ}{T} \right)_{T_C} = \frac{|Q|}{T_F} - \frac{|Q|}{T_C} \cong 10^{-5} \frac{J}{K}$$

2. calcoliamo  $N_f/N_i$

$$\Delta S_U = (k_B \ln N_f + \text{costante}) - (k_B \ln N_i + \text{costante}) = k_B \ln(N_f / N_i)$$

$$\rightarrow \ln(N_f / N_i) = \Delta S_U / k_B \approx 10^{18} \rightarrow N_f / N_i \approx \exp(10^{18})$$

3. La probabilità del processo inverso è perciò  $\approx \exp(-10^{18})$