

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

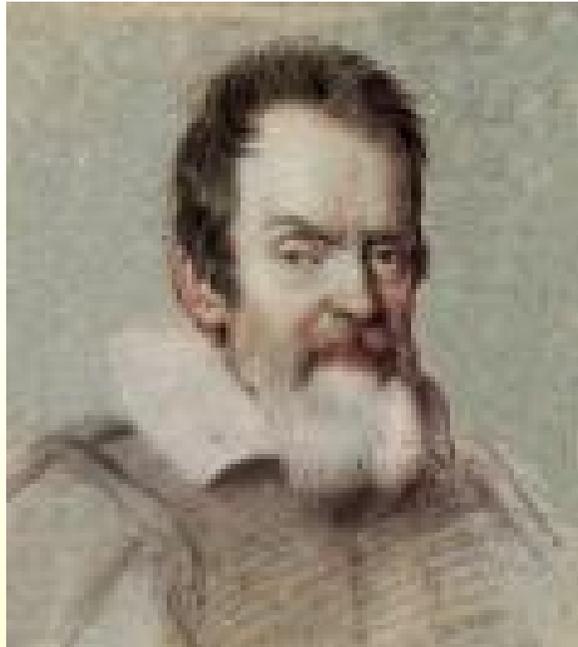
- La conoscenza scientifica in sé
- La trasmissione della conoscenza scientifica

Didattica della Fisica

- Teorie e modelli di apprendimento
- Natura interdisciplinare

Il concetto di calore

Galileo,
Il Saggiatore,
1623

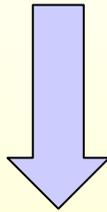


“...dico che inclino assai a credere che il calore sia di questo genere [qualità con esistenza solo in noi e fuori di noi solo nomi], e che quelle materie che in noi producono e fanno sentire il caldo, le quali noi chiamiamo con nome generale fuoco, siano una moltitudine di corpicelli minimi, in tal 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)

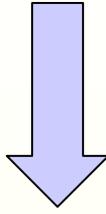


La macchina a vapore

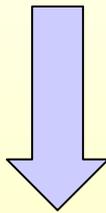
Thomas Savery (1695) → pompa termica per l'acqua

Thomas Newcomen (1705) → macchina termica a pistone

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



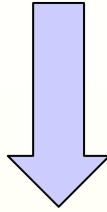
Il problema della misura quantitativa delle variabili in gioco nel funzionamento delle macchine: **lavoro**, **calore**, **potenza**, **efficienza**



Il problema della natura del calore

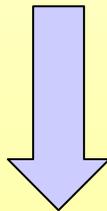
F. Bacone e Keplero:

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

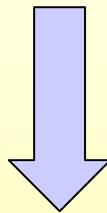


Si sviluppa la scienza che studia l'efficienza della conversione di calore in lavoro, prima ancora che si definisse il **Q** come forma di energia (**Joule** 1847)

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



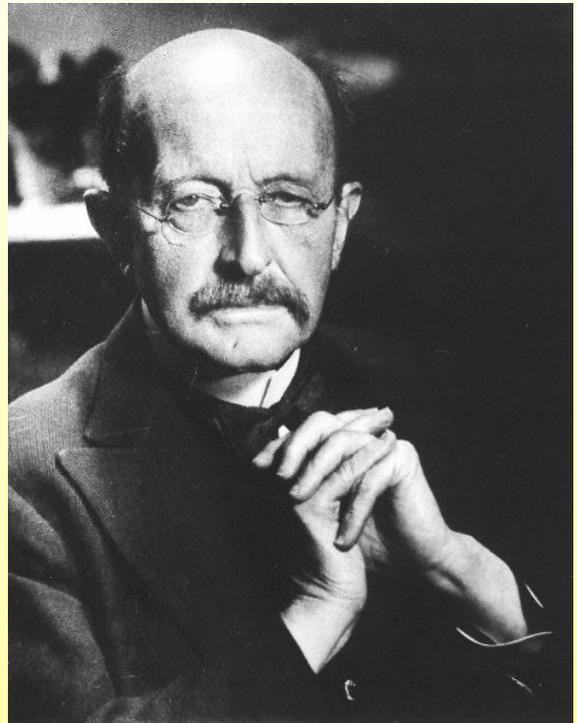
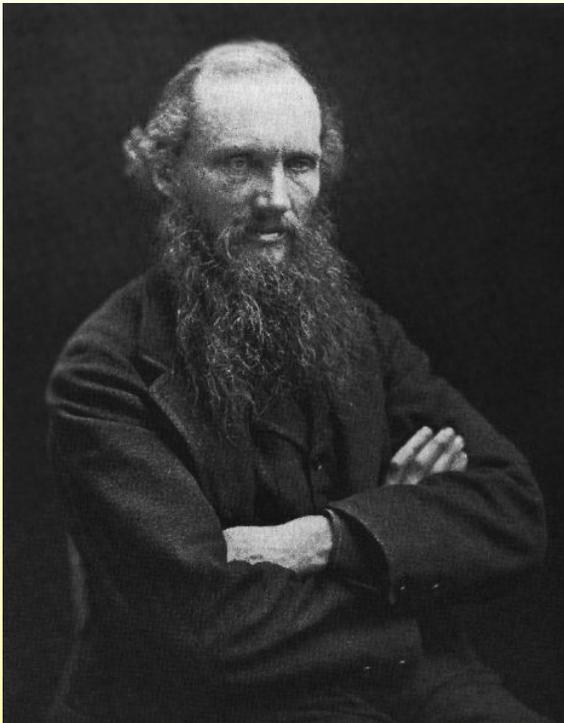
Il 2° principio della Termodinamica

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



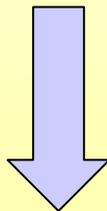
I due enunciati sono logicamente equivalenti...

...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

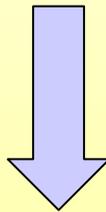


Diversità del modo di intendere il concetto di **calore**

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

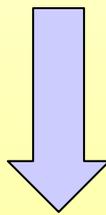


PASSATO vs. FUTURO

Percepriamo 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

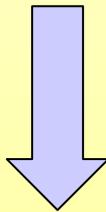


Il “film rovesciato” non viene mai osservato

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

$$\mathbf{F=ma} \qquad \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

- 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 → WB (parte di)
2 corpi isolati → M
- $PV=nRT$ → WB (parte di)
Gas ideale → 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	115×10^6

	n=60 (numero di molecole)	N (numero di configurazioni possibili)
X_1	0-60	2
X_2	30-30	118×10^{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**

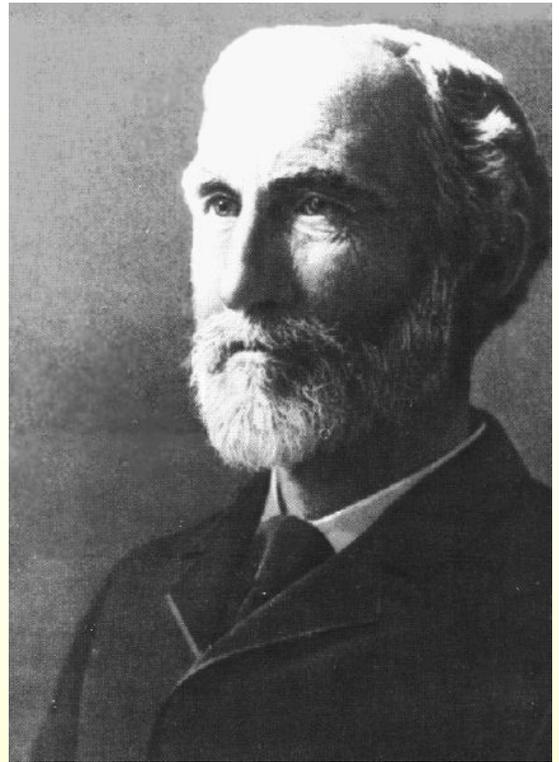
(N.B.: quanta sabbia è 10^{23} granelli, cioè il n. di
atomi in una bottiglia d'acqua?)

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)

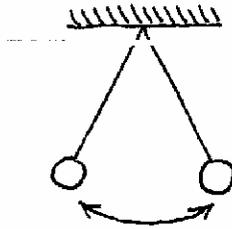


Spazio n-dimensionale le cui coordinate sono le variabili da specificare per definire lo stato di un sistema

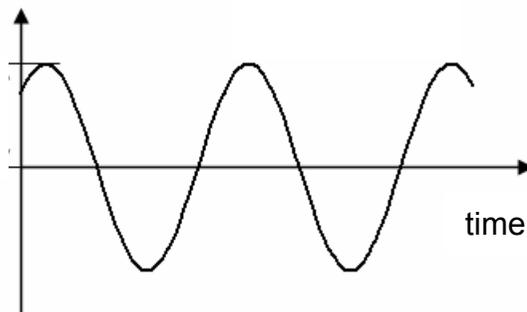
- ✓ 1 particella puntiforme $\rightarrow (x, y, z, v_x, v_y, v_z) \rightarrow$ spazio 6-dimensionale
- ✓ 2 particelle puntiformi \rightarrow spazio 12-dimensionale
- ✓ N particelle puntiformi \rightarrow spazio 6N-dimensionale
- ✓ n moli di gas ideale $\rightarrow (P, V) \rightarrow$ spazio 2-dimensionale

- 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

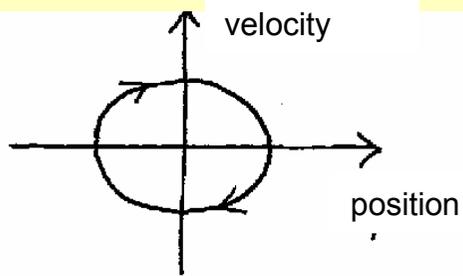
il pendolo senza attrito



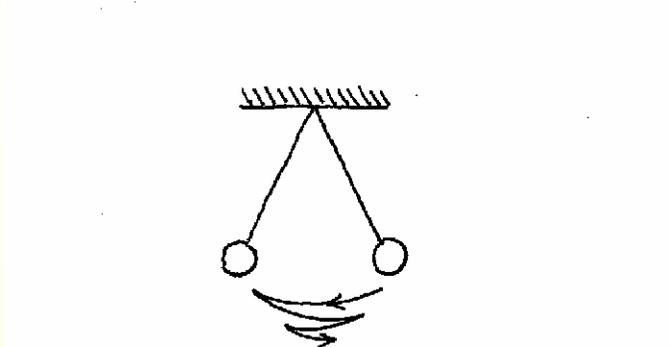
position



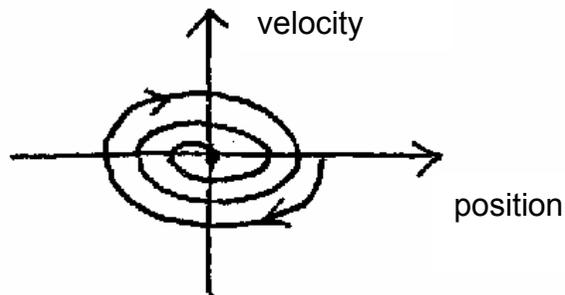
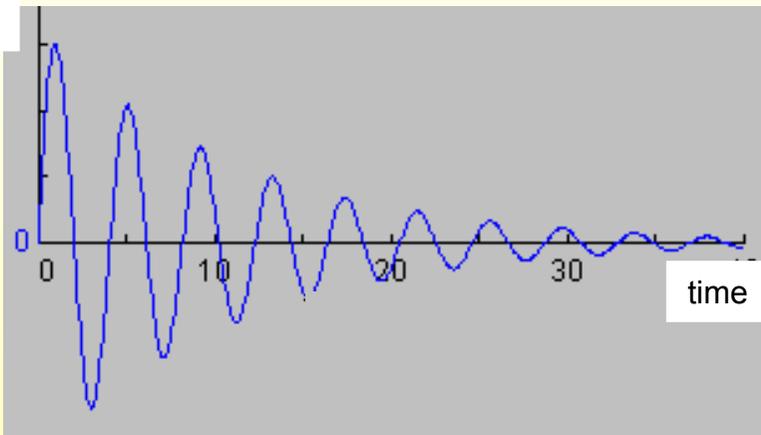
velocity



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

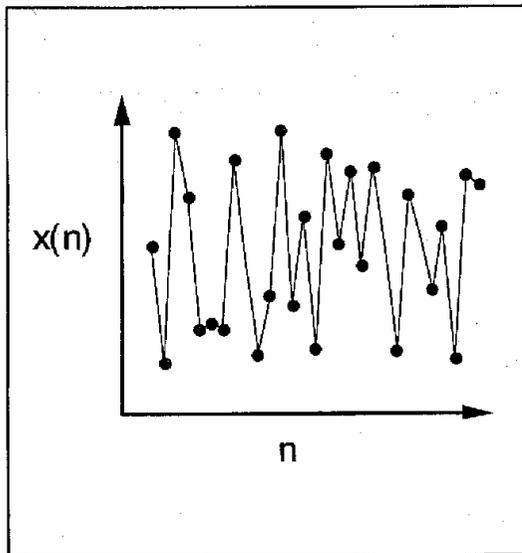
- Insieme di punti nello SF corrispondenti all'insieme di stati iniziali che evolvono verso un certo attrattore → **bacino di attrazione** di quell'attrattore

Commento

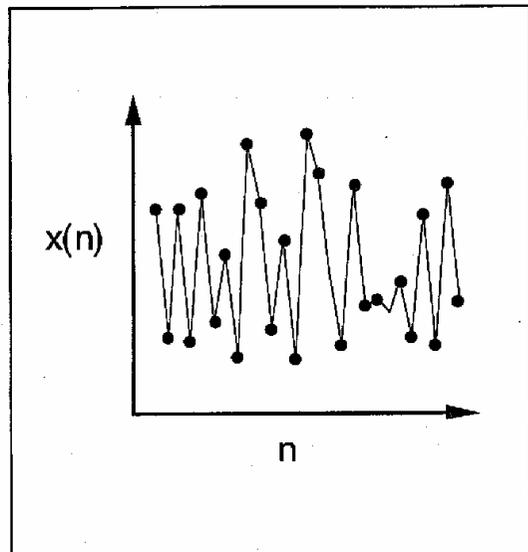
- ✓ Per sistemi deterministici, non c'è bisogno di usare lo SF. Possiamo usare x vs. t , v vs. t , E vs. t , ecc.

Sistema caotico

Data 1



Data 2



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

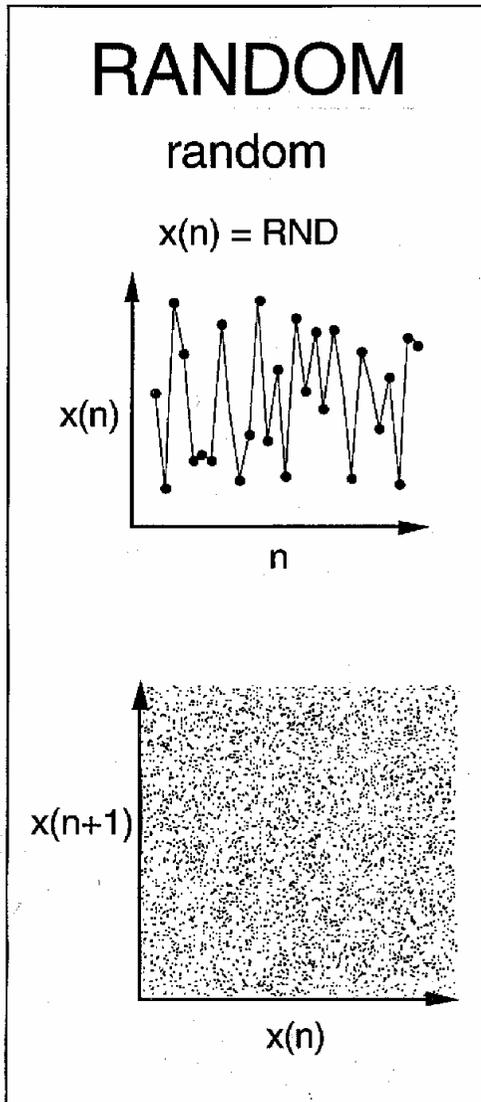
mean

variance

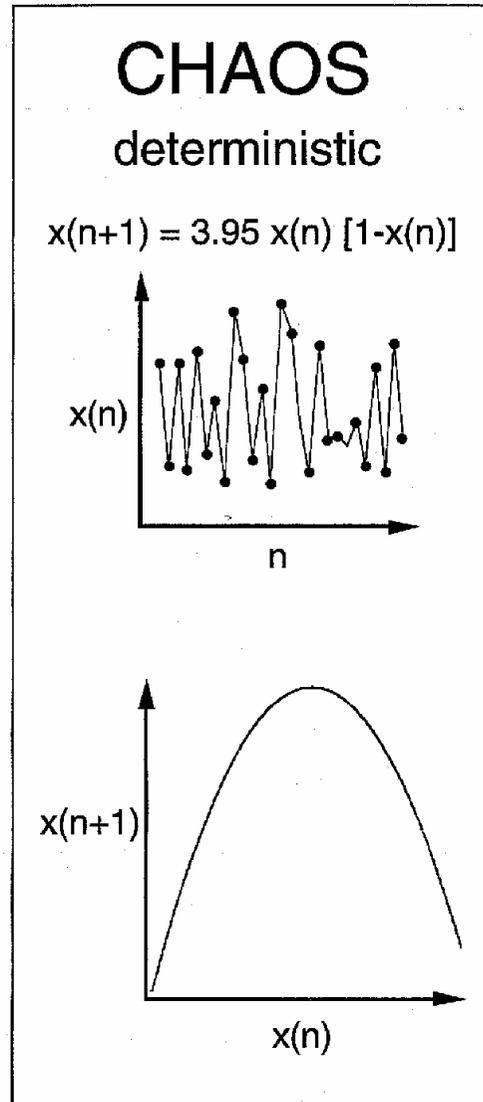
power spectrum

Sistema caotico

Data 1

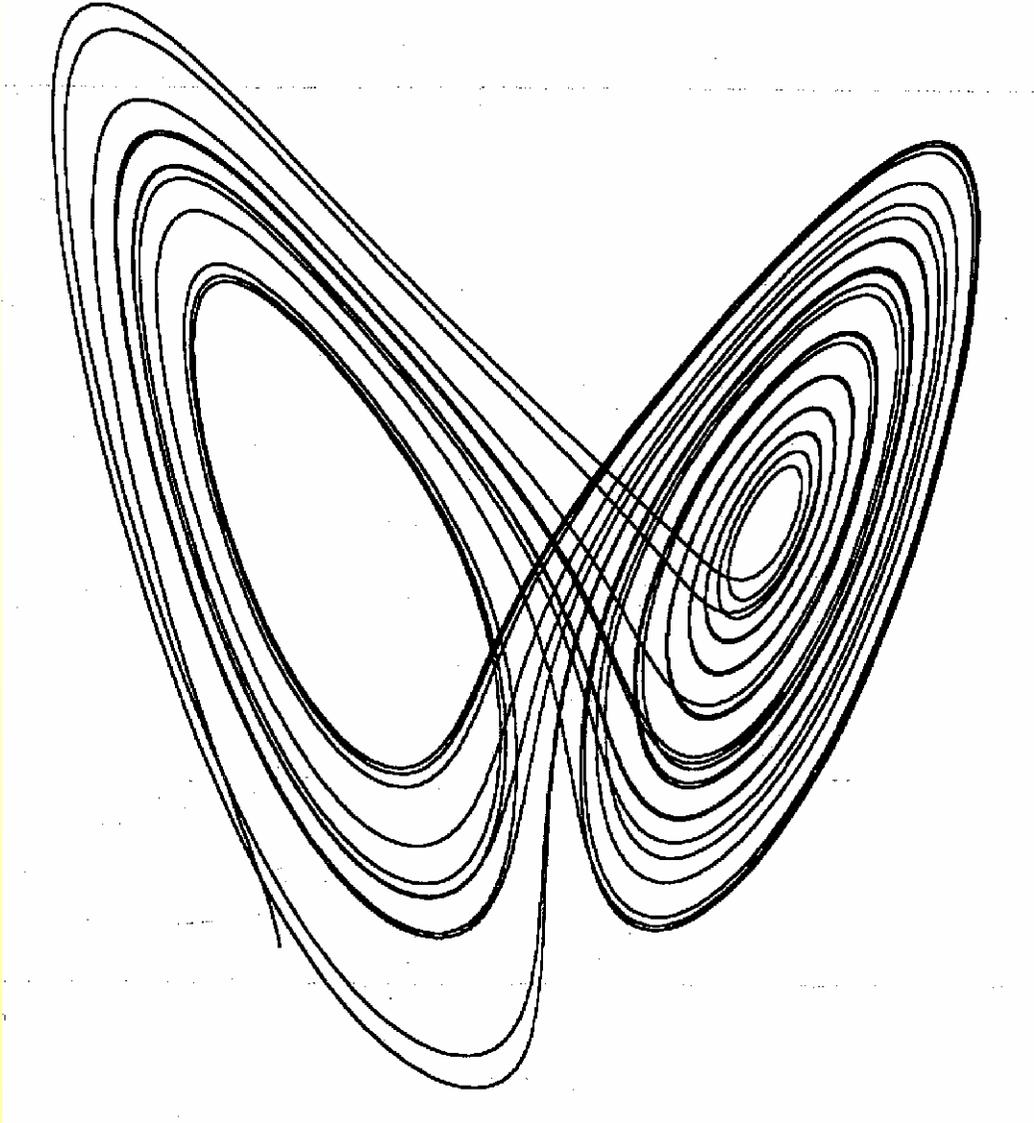


Data 2



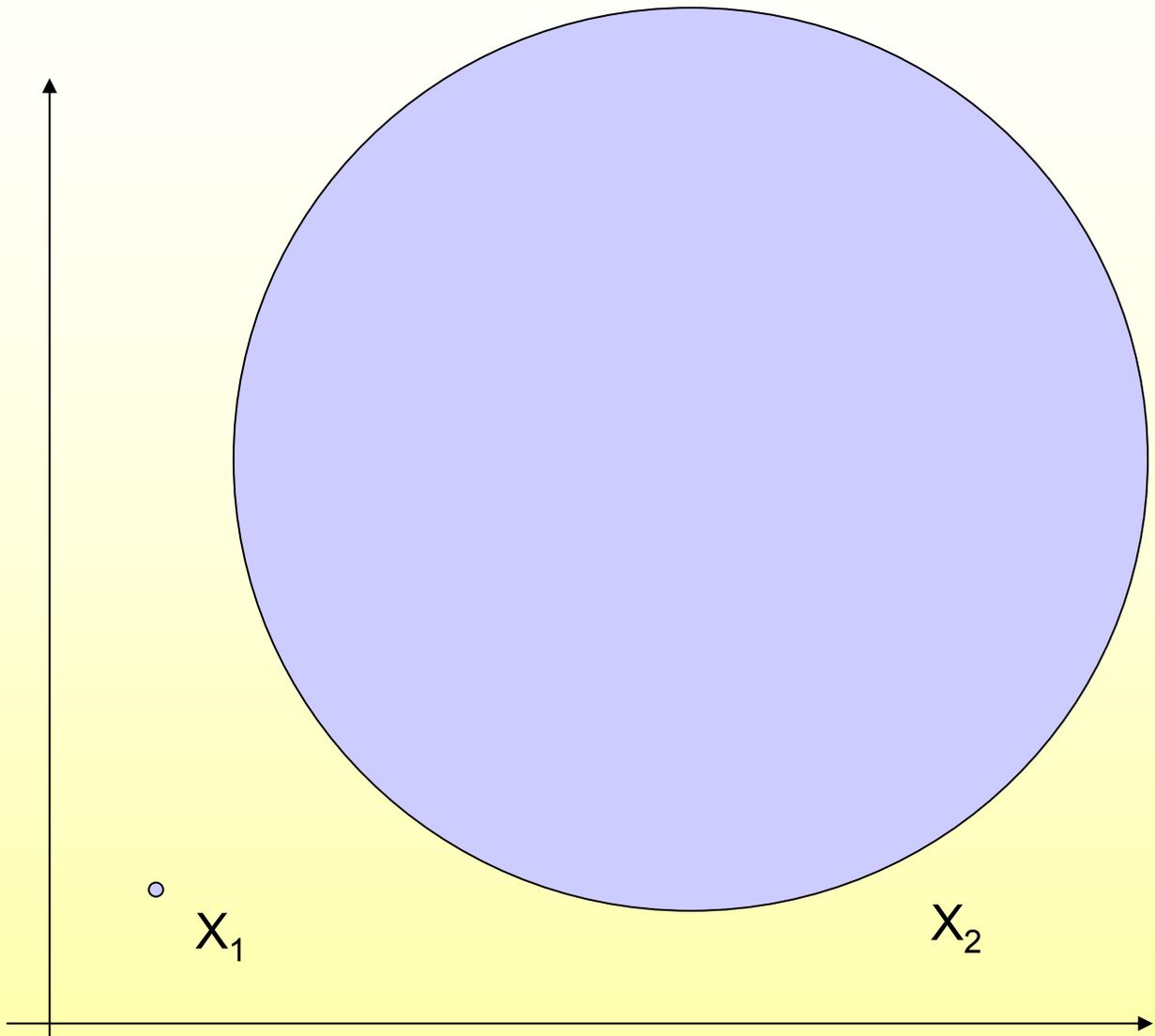
Una trasformazione opportuna di insiemi di dati che sembrano "simili" dà luogo a oggetti che appaiono diversi, permettendo di distinguere tra dati casuali e deterministici

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:

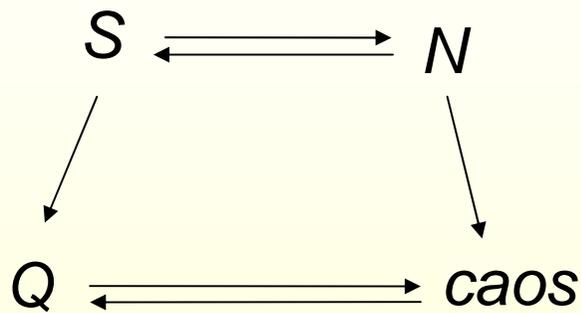
A♥, K♥, Q♥, J♥, 10♥

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*

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

$$S_1 = k_B \ln N_1$$

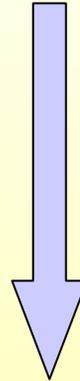
$$S_2 = k_B \ln N_2$$

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

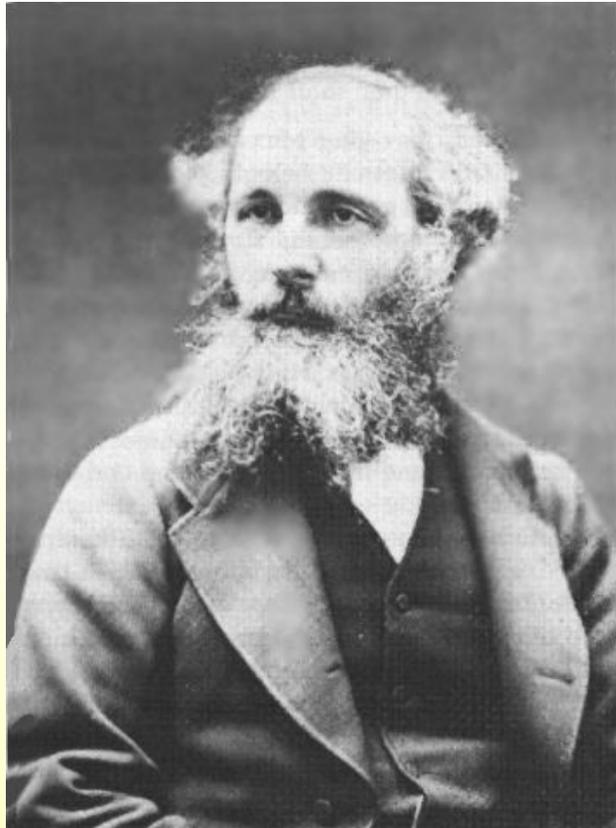


Ludwig Boltzmann

$$S = k_B \ln N$$



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 ΔS_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 $\approx \exp(-10^{18})$