

La termodinamica: prospettive tra storia, scienza ed epistemologia

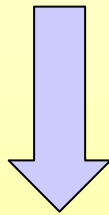
II

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

ENTROPIA → disordine

Più un macrostato è probabile, più alta è la sua entropia, maggiore è il suo disordine

Un sistema è ordinato nella misura in cui abbiamo la possibilità di definire numericamente con la minor incertezza possibile delle quantità microscopiche (e.g. posizione e velocità delle particelle, vedi molecole in un angolino della scatola)



Quando uno stato è disordinato, dobbiamo usare quantità "mediate" → variabili macroscopiche (e.g., $\langle E_k \rangle = 3/2 kT$ per un gas ideale monoatomico)

ordine ↔ informazione

Passando da uno stato più ordinato a uno più disordinato, la descrizione microscopica che possiamo fornire è più "povera", diventa "solo" macroscopica (quantità mediate)

Nella descrizione dell'evoluzione di un sistema, va perduta dell'informazione

$\Delta S > 0$ corrisponde alla perdita irreversibile di informazione

L'informazione (in bits) può essere vista come una proprietà dei sistemi stessi, una misura del loro livello di organizzazione

$$\Delta S_i \geq 0 \rightarrow \Delta I_i \leq 0$$

$$(I + S)_i = \text{costante}$$

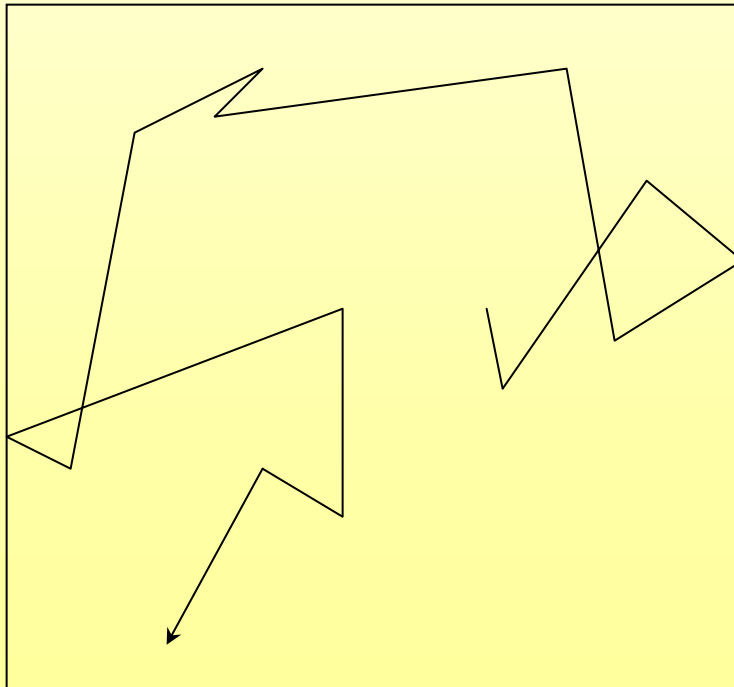
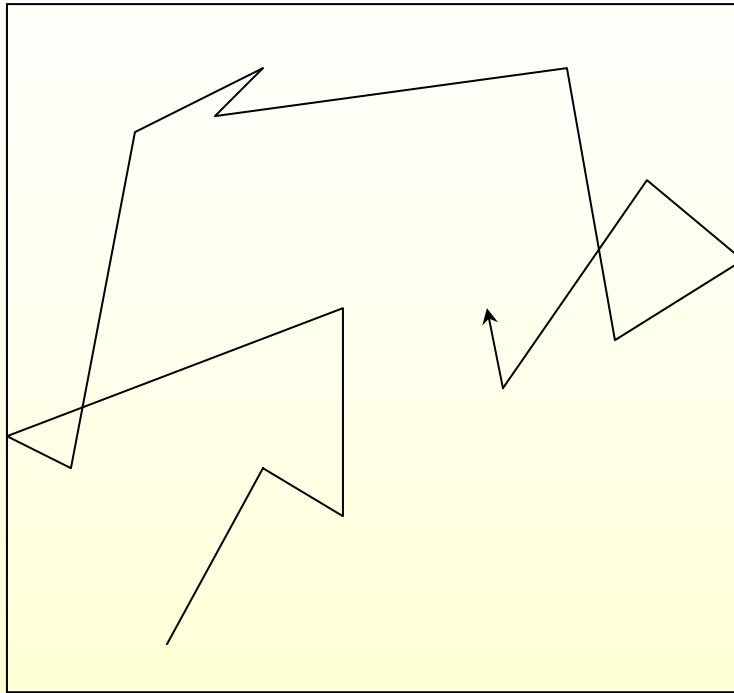
Commento: ci siamo spostati di livello linguistico: da una descrizione legata al sistema a una legata all'osservatore del sistema!

Un piccolo approfondimento didattico: il LINGUAGGIO

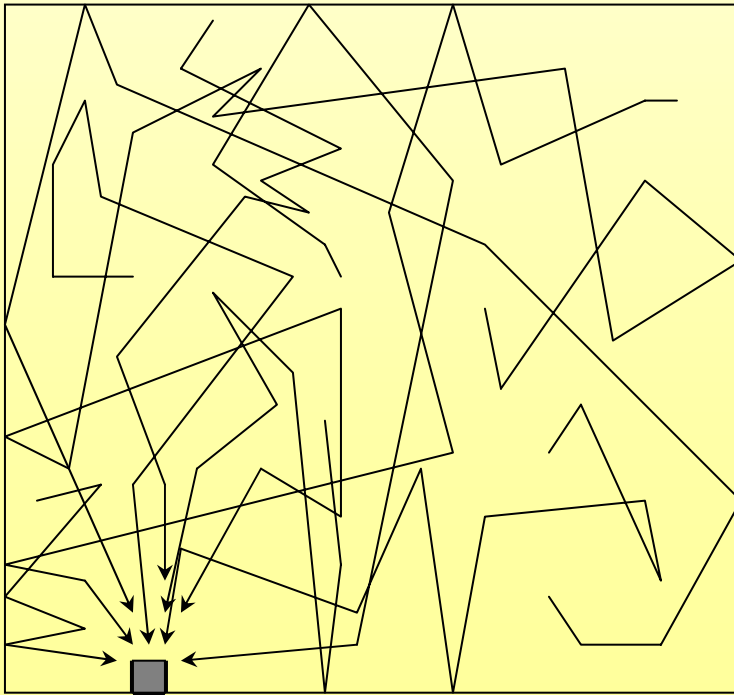
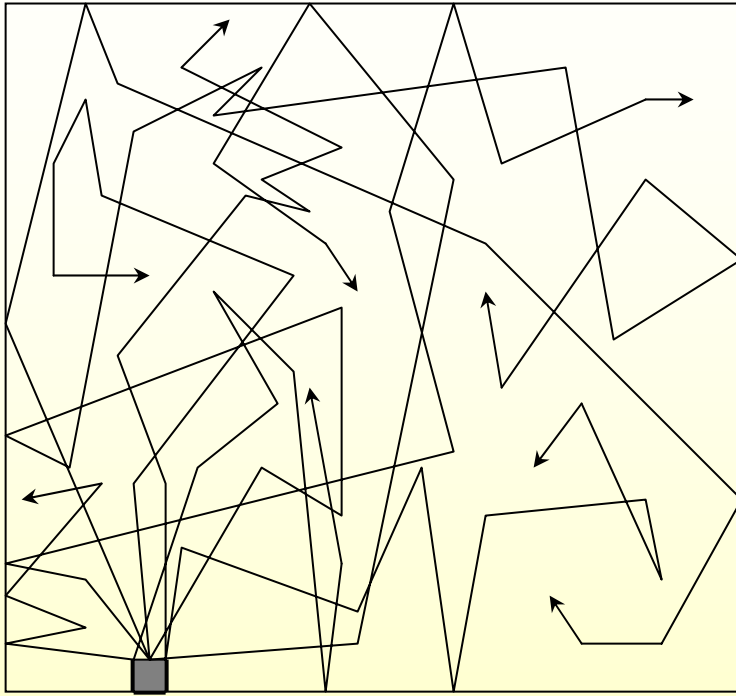
Livelli differenti

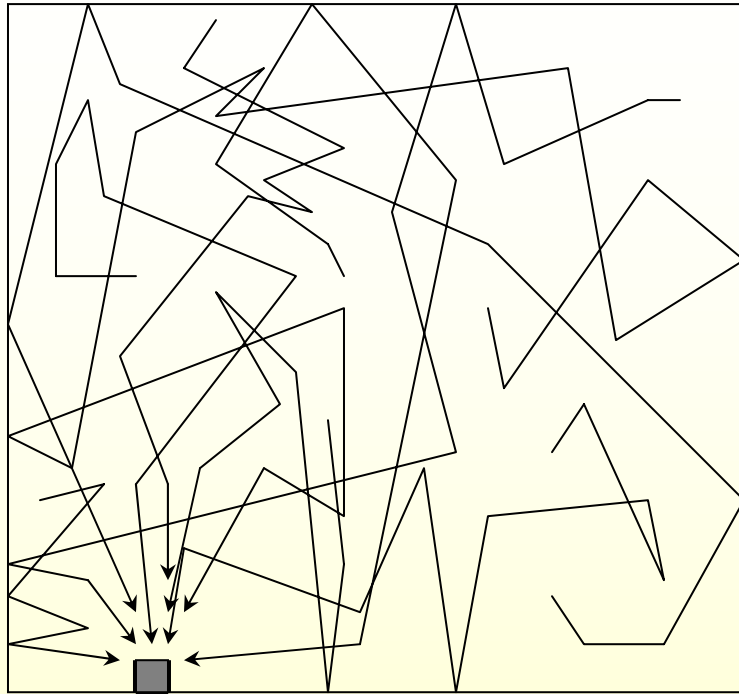
- 1) *denominativo*: nomi di pezzi di realtà, nomi di pezzi di conoscenza su di essi
- 2) *funzionale*: il linguaggio (tramite la *logica*) fornisce criteri specifici di obiettività, che definiscono le forme linguistiche nelle quali è strutturata la conoscenza. A seconda del livello di organizzazione della conoscenza, ci sono livelli linguistici diversi
- 3) *comunicativo*: utilizzo di analogie, *metafore* (che celano *isomorfismi* → *globalità* della conoscenza)

Ma torniamo al "film rovesciato": il caso di una "molecola di grappa"



il caso di molte "molecole di grappa"





La differenza nel film rovesciato è che il sistema si muove verso un macrostato che è **enormemente più improbabile** di quello da cui è partito

Nel caso di una singola molecola, gli stati iniziale e finale hanno invece la stessa probabilità

Sistema isolato con n particelle interagenti

Il suo stato dinamico è **un punto** nello spazio delle fasi $6n$ -dimensionale

E' uno stato deterministico, ma l'informazione (conoscenza) a cui abbiamo accesso è parziale → possiamo solo individuare una "bolla" (ipersfera $6n$ -dimensionale) nello SF, che raccoglie tutti gli N microstati corrispondenti all'effettivo (noto) macrostato

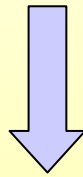
Sappiamo che la "molecola di grappa" sta nel bicchiere, ma non sappiamo dove!

Il sistema di fatto "parte" da un punto e disegna una traiettoria nello SF, che lo porta da una bolla piccola (→ bassa probabilità, piccolo N) a una più grande (→ alta probabilità, grande N , "volume" più grande nello SF)

Spostiamo l'attenzione da quello che succede allo stato (in termini di traiettoria) a quello che sappiamo su di lui (in termini di accesso all'informazione)

Non conosciamo lo stato iniziale, possiamo solo individuare una (piccola) bolla → come "evolverà" la bolla nello SF?

Come evolverà l'insieme delle possibili traiettorie dall'insieme dei possibili stati iniziali?



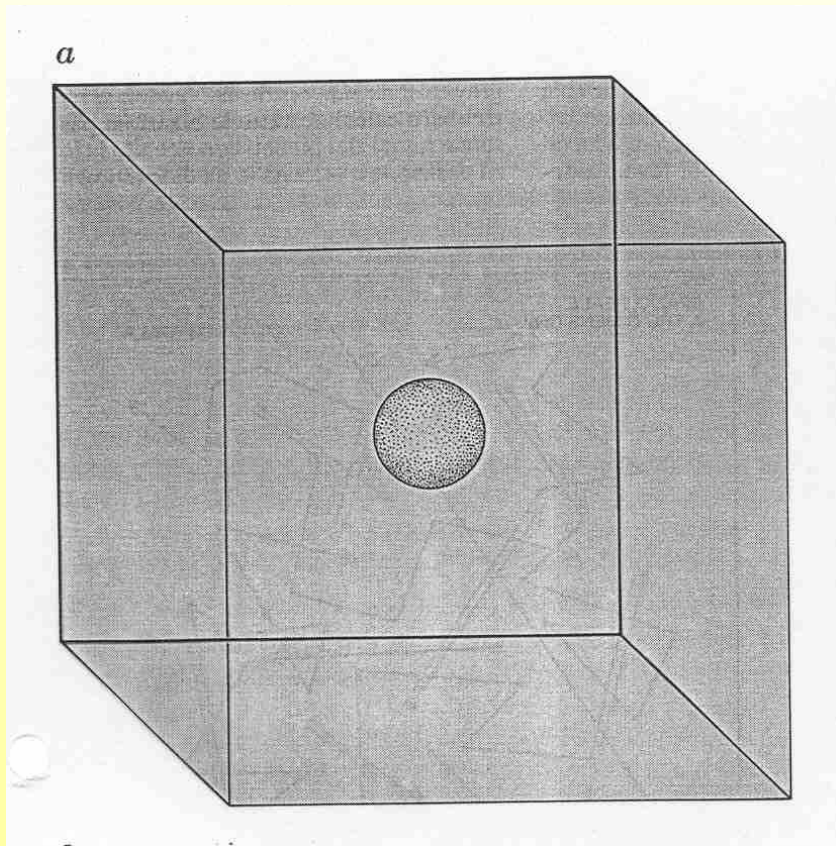
Studio del moto di bolle probabilistiche nello SF

Si comportano proprio come un fluido reale incompressibile nello spazio reale!

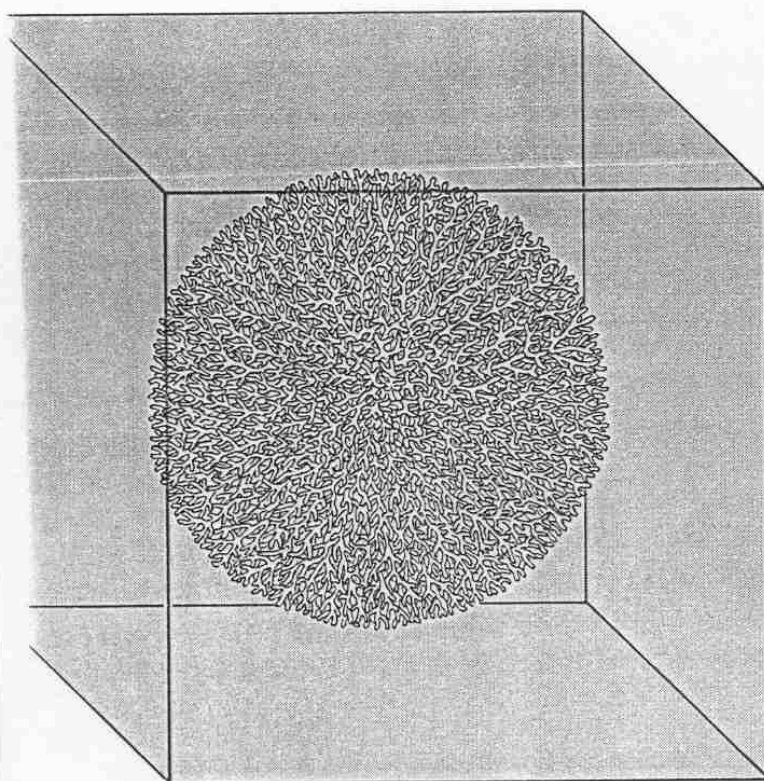
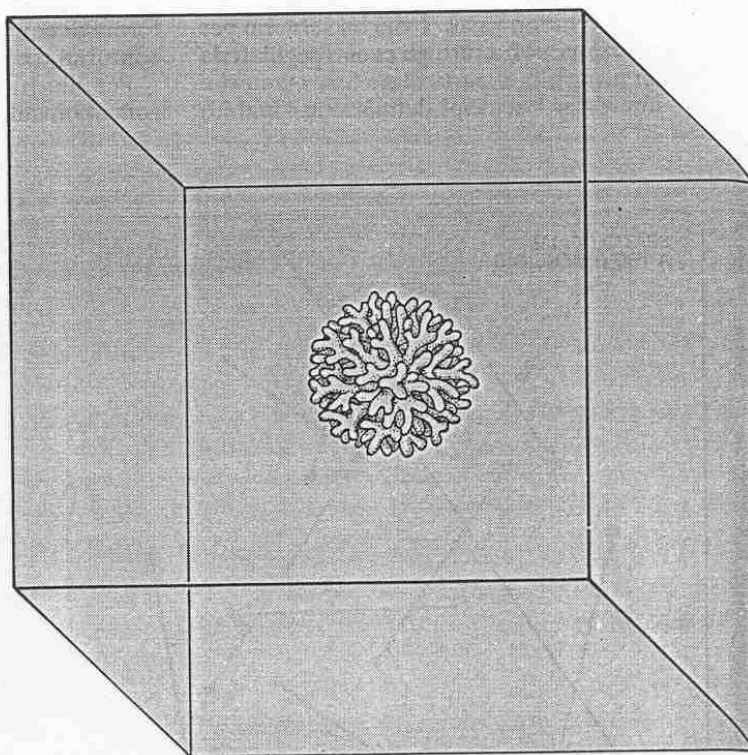
fluido probabilistico

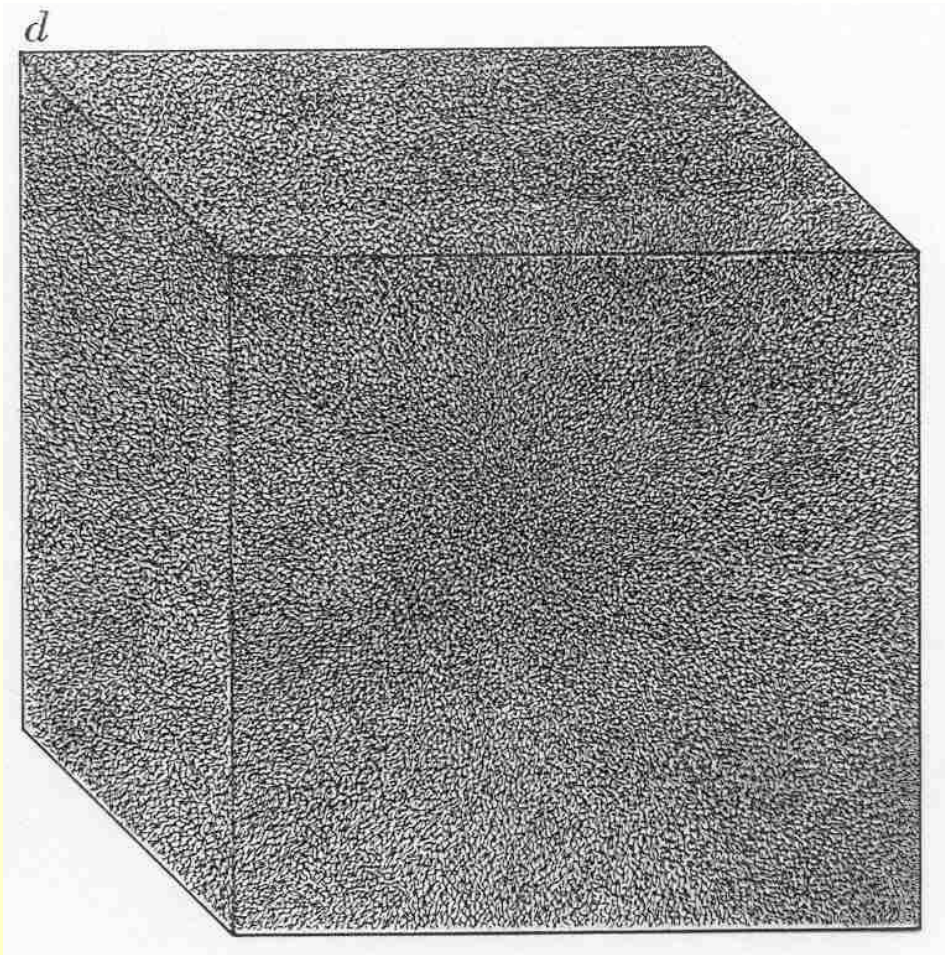
Potenza degli isomorfismi analitici

Mentre un **punto** (stato ben determinato) segue una traiettoria, una **bolla** estroflette dei tentacoli, assumendo l'aspetto di una spugna (spugna probabilistica) che riempie l'ipervolume dello SF "corrispondente" al volume della stanza nella quale sta il bicchiere di grappa



b

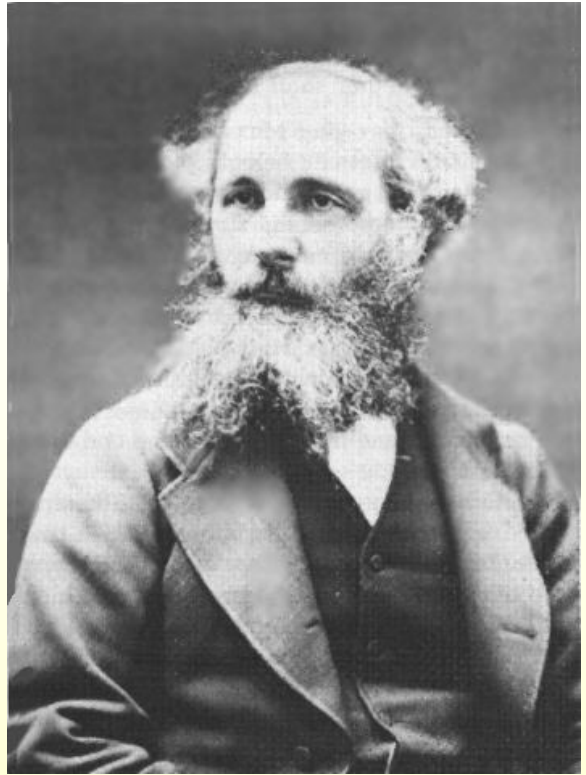




Perdita di **informazione** → crescita
di **entropia**

Un Gedanken- experiment

Il diavoletto di Maxwell



J.C. Maxwell, 1871

"If we think of a microscopic being who could follow each molecule in its motion, he could do things that we cannot. In a box full of air at uniform temperature, molecules have not the same speed. Now let's imagine that the box is divided in two parts, A and B, by a wall with a small hole, and that the being, who can see the single molecules, opens and closes the hole allowing only the fastest molecules to pass from A to B, and only the slowest ones to pass from B to A. He could therefore, without spending any work from the external environment, raise the temperature of B and lower that of A, so contradicting the second principle of thermodynamics"

Lettura del 2° principio da parte di Maxwell

Il calore consiste nel "moto interno" delle sue parti

Non possiamo farlo diventare "moto ordinario"...

...perché non ne siamo capaci

Le "parti del corpo" sono così piccole che non abbiamo modo di "manipolarle"!

Non esiste comunque impossibilità fisica di principio alla violazione della seconda legge della termodinamica

Maxwell influenzato da **Kelvin** (1851):

"E' impossibile impiegare un agente materiale inanimato per ottenere effetto meccanico utilizzabile da una qualsiasi porzione di materia raffreddandola fino a una temperatura più bassa del più freddo degli oggetti che la circondano"

Ancora **Kelvin**:

"Il corpo animale non agisce come una macchina termica. ... Ogni individuo è soggetto alla direzione della sua volontà. Sembra che le creature animate abbiano il potere di applicare immediatamente a certe particelle in moto nei loro corpi forze tramite le quali il moto di queste particelle è diretto a produrre gli effetti meccanici desiderati"

Sembra quindi che sia solo un problema di dimensioni! Se l'uomo fosse abbastanza piccolo...

Validità del 2° principio legata a distinzione tra mondo microscopico e mondo macroscopico

Il diavoletto di Maxwell...

...mette in evidenza dicotomia tra descrizione meccanica e descrizione termodinamica

Chiarisce il significato del concetto di calore

Mette in luce l'interpretazione statistica del 2° principio

Permette di introdurre alcune questioni fondamentali sui fondamenti concettuali della Termodinamica:

Ha senso parlare di 2° principio a livello microscopico?

L'irreversibilità è solo del mondo macroscopico? Se sì, perché?

Che ruolo possono avere le entità coscienti?

In che modo il 2° principio riguarda la conoscenza che l'uomo ha della natura?

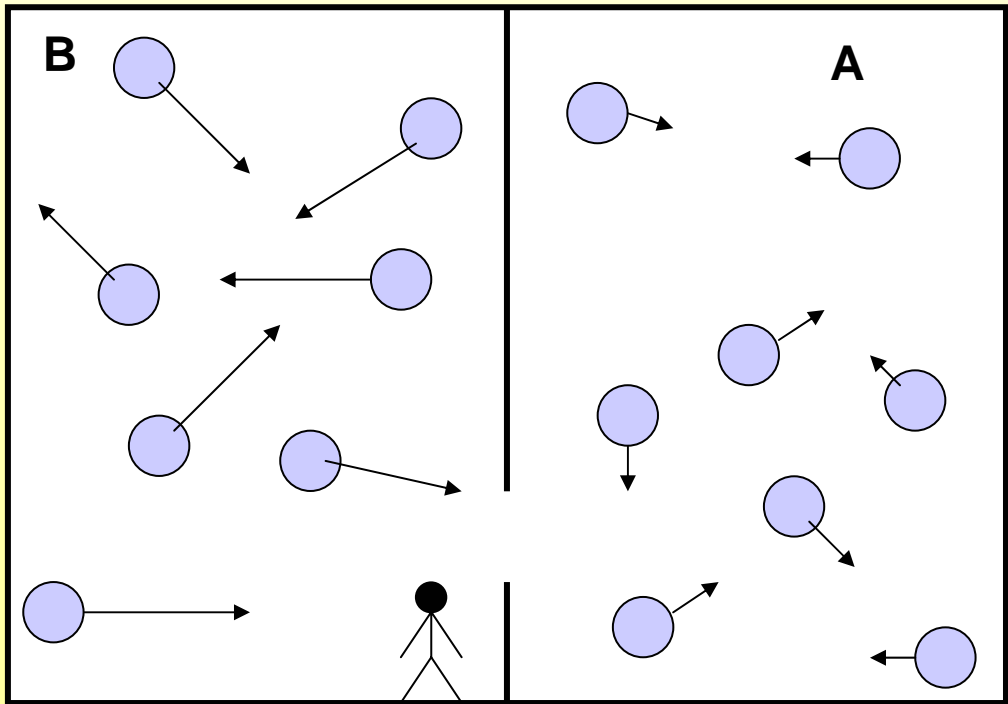
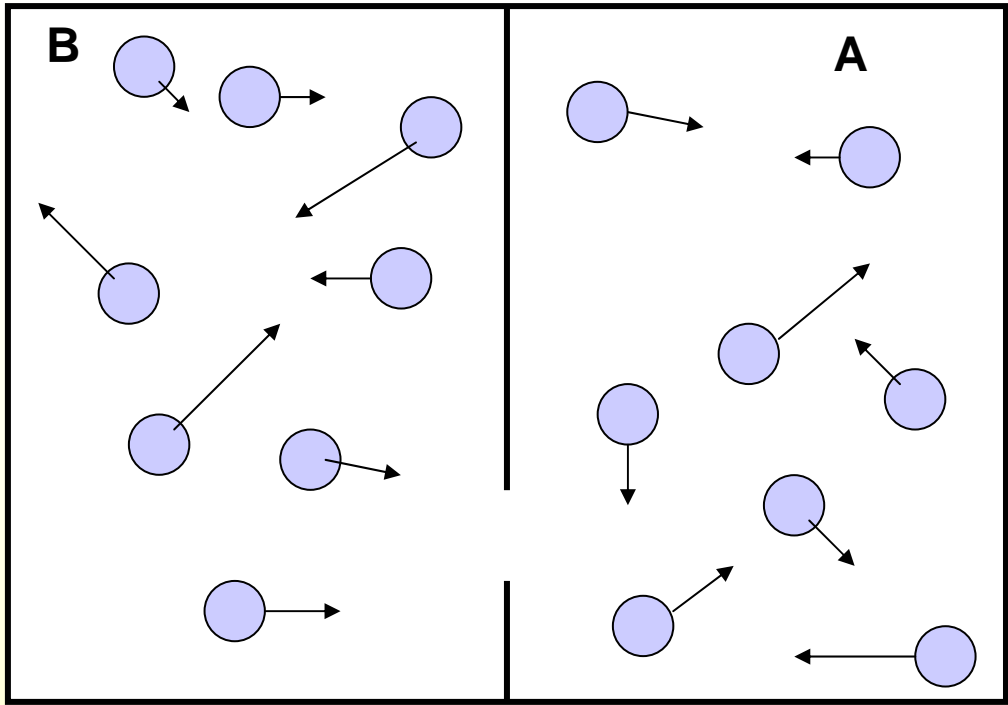
Il concetto di probabilità

Il concetto di entropia

Problemi

Prima contraddizione epistemologica: Maxwell presuppone implicitamente che il sistema lasciato a se stesso tenda "naturalmente" verso una situazione di equilibrio. Costruisce quindi una situazione in cui il demone viola il 2° principio solo se i sistemi su cui "lavora" non lo violano

Seconda contraddizione epistemologica: nella descrizione del Gedankenexperiment, vengono utilizzati linguaggi pertinenti ad ambiti diversi. In Fisica, non è definito il comportamento "intelligente" (riferimento a volizione) → incommensurabilità dei linguaggi (T. Kuhn)



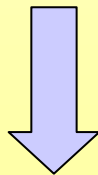
Altra versione: il diavoletto lascia che tutte le molecole passino in B, producendo così "gratis" uno stato a minor entropia

la violazione del secondo principio della termodinamica appare evidente anche in termini di **probabilità, ordine, informazione**, ecc..

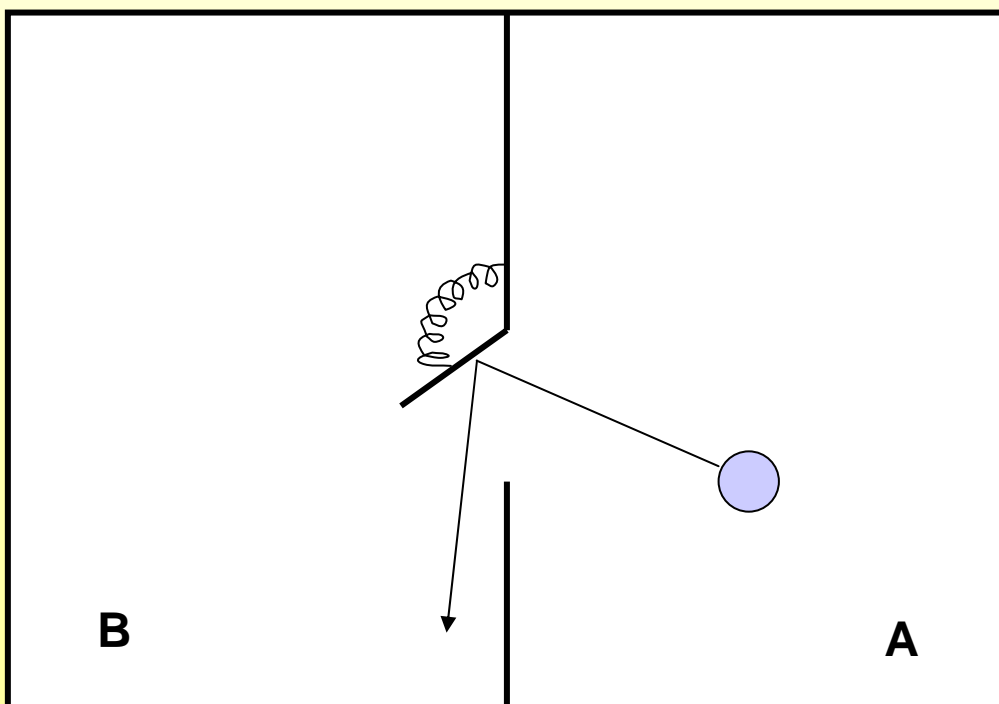
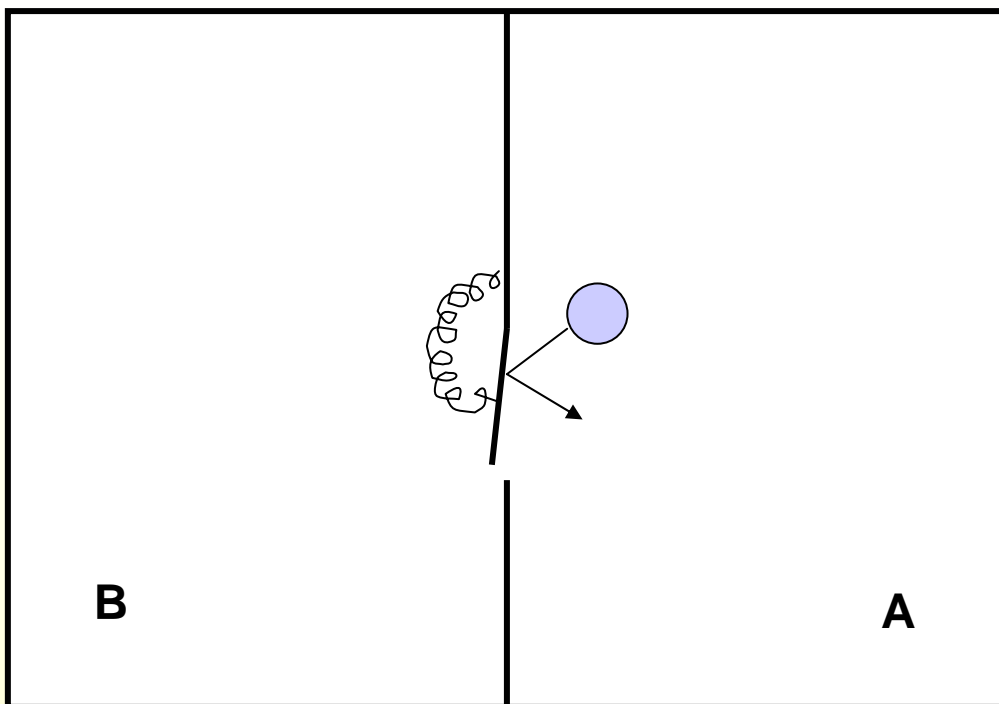
il diavoletto non viola alcuna altra legge fisica

Per capire perché il diavoletto effettivamente non può violare il 2° principio, dobbiamo capire meglio il 2° principio stesso

Passiamo a una versione realistica del diavoletto di Maxwell, costruendone la sua versione meccanica

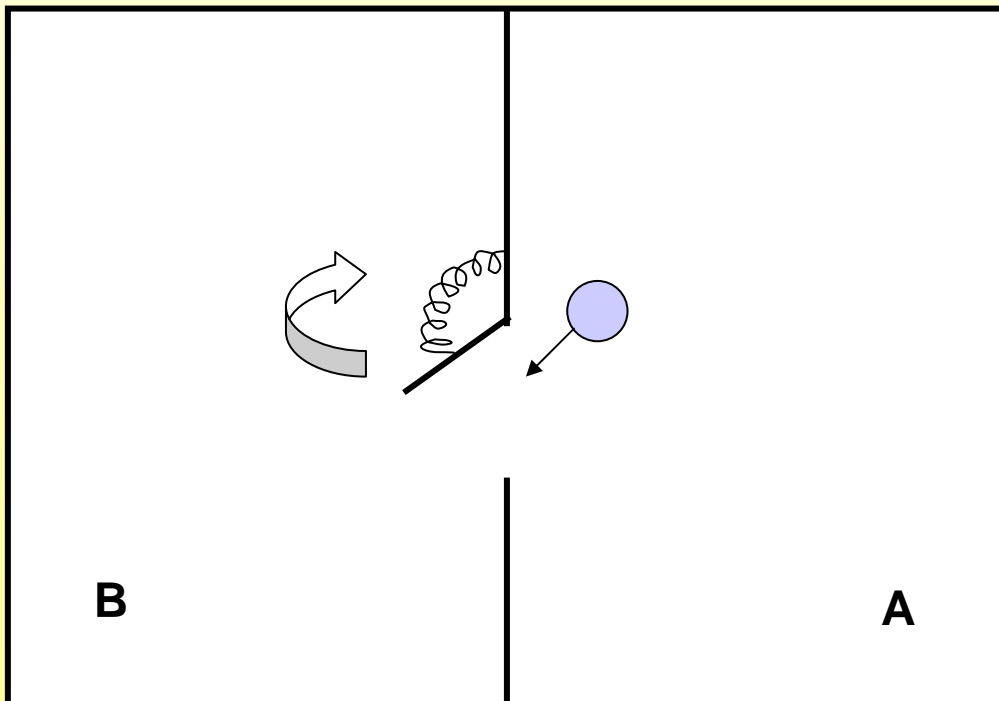
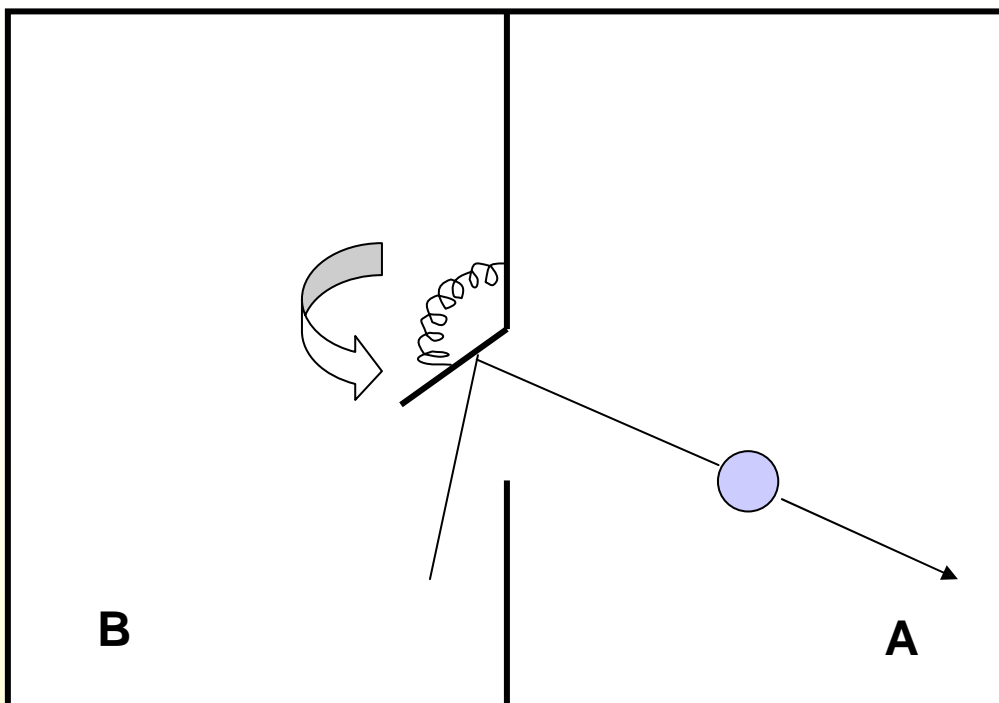


Passiamo cioè da **Gedankenexperiment** a **modello**



Analisi

1. Per poter funzionare, la molla deve essere molto "debole", poiché il **lavoro** necessario ad aprirla deve essere $W \approx \langle E_k \rangle = 3/2 kT$ (energia cinetica media di una singola molecola)
2. La porta, colpita ripetutamente, acquisterà un'energia (**energia termica**) dello stesso ordine di quella delle molecole (\rightarrow la porta "termalizza")
3. Poiché la molla deve essere debole, l'energia termica della porta stessa la farà aprire e chiudere da sola spontaneamente
4. Quando è aperta, può "spingere" una molecola veloce da B ad A, o far passare una lenta da A a B



5. Quando è chiusa, la porta funziona come il diavoleto. Quando è aperta, funziona al contrario
6. E' possibile calcolare come questi due processi avvengano con la stessa frequenza → nessuna violazione!

E se il diavoleto fosse **intelligente**?

*C'è bisogno di inquadrare la parola "intelligente" nel contesto corretto → c'è bisogno di un **trasferimento linguistico***

Ad esempio (semplificando, per mettere in luce una metodologia):

Una idealizzazione "fisica" di un diavoleto intelligente è quella di un **computer** che registra nella sua memoria l'informazione che una molecola arriva da A oppure da B, insieme alla sua velocità₂₄

7. Così, il computer "vede" la prima molecola, registra il suo stato, e la lascia passare o no
8. Prima di far lo stesso con la molecola successiva, il computer deve inizializzare la sua memoria
9. Questo corrisponde a cancellare alcuni bits che prima erano ordinati
10. Perdendo informazione, l'entropia dell'Universo cresce

Il diavoletto è parte di un **modello** (falso) che mette alla prova la validità di una **immagine del mondo** (2° principio della termodinamica)

Commenti

1. Uso di **concetti astratti** per acquisire conoscenza di oggetti reali → **spazio delle fasi, probabilità**
2. **Universalità** dei concetti
→ **entropia, probabilità, informazione**

Il concetto di entropia può essere esportato

- fisica
- informatica
- biologia
- economia
- scienze politiche

3. Il comportameto dei sistemi nasconde degli **isomorfismi** → astrazione
4. Uso di **modelli** → sistema isolato
5. **Immagine del mondo** → **determinismo, statistica, caos**

6. **Intuizione del mondo** → necessità di distinguere passato e futuro

7. Uso di **linguaggi complessi** → attenzione al lessico e ai significati ("osservatore", "conoscenza", "informazione" vs. "entropia", "probabilità")

Uso di linguaggi da discipline differenti

8. **Impossibilità** vs. **improbabilità** → il 2° principio ha a che fare con l'improbabilità → non c'è incompatibilità tra immagine reversibile del mondo e freccia del tempo

9. **Gedankenexperimente**

10. **Il libero arbitrio**

Termodinamica insegnata
indipendentemente dalla (e dopo la)
Meccanica

Grande enfasi è data alle macchine
termiche...

...per motivi storici

...anche se sorprendentemente non
viene (quasi) mai toccato né il dibattito
(storico) sul calorico né quello
sull'interpretazione probabilistica
dell'entropia

*"Nell'era in cui un singolo atomo può
essere intrappolato e manipolato,
l'insegnamento della termodinamica a
partire dalle leggi empiriche della
termologia è uno scandalo pedagogico"*
(K.-C. Lee)

Una ipotesi didattica

Combinare l'approccio empirico classico...

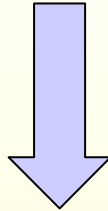
Pressione, temperatura, calore →
percezioni sensoriali macroscopiche

...con un approccio strutturale-statistico

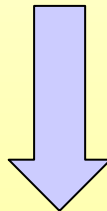
Proprietà termiche di un sistema
↔ proprietà delle particelle che
lo compongono

*Questo approccio combinato può
descrivere sia sistemi in equilibrio che no,
mentre la termodinamica classica si occupa
solo di sistemi in (quasi) equilibrio*

Termodinamica: ha a che fare con relazioni tra T , Q , U , W riguardanti corpi estesi



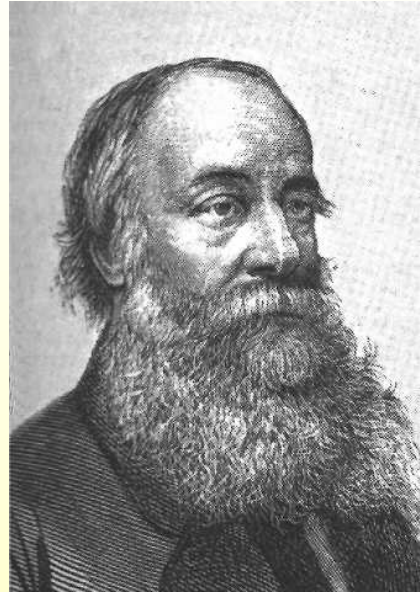
Ha a che fare con gli scambi di energia tra le particelle di un sistema formato da un gran numero (e.g. 10^{23}) di unità (atomi, molecole...) e le particelle del suo ambiente



Punto di partenza: la natura statistica delle variabili "termodinamiche" (P , T , W_{mecc} , Q , S)

L'esempio dell'energia interna

1849, esperimenti di **Joule**:
lo stesso cambiamento
dello stato termico
dell'acqua in un recipiente
adiabatico può essere
ottenuto con procedimenti
diversi (mulinello,
resistenza elettrica,
strofinio): viene speso lo
stesso **W**



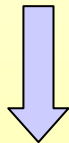
*N.B.: adiabatico
= che impedisce
il raggiungimento
dell'equilibrio
termico*

Esiste perciò U , funzione di stato, tale che

$$W_{\text{ad}} = -\Delta U$$

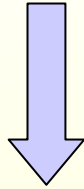
E' una definizione operativa

Posso ottenere lo stesso risultato senza compiere lavoro, rimuovendo le pareti adiabatiche e tramite contatto con un corpo più caldo

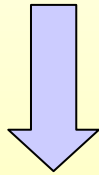


Esiste uno scambio di energia che non comporta lavoro

Definizione operativa di **calore**



Postulato dell'equivalenza **calore-lavoro**



Primo principio della termodinamica: si verifica sperimentalmente che esiste una funzione di stato U tale che, per trasformazioni qualunque di un sistema,

$$Q - W = \Delta U$$

Un approccio alternativo

$$U = \sum_i E_k(i) + \sum_{ij} E_p(ij) + \sum_i E_{part}(i)$$

Energia cinetica
interna: somma
delle energie
cinetiche delle
particelle misurate
rispetto al centro
di massa

Energia potenziale
interna: associata
all'interazione tra le
particelle del
sistema

Energia particellare
interna: se le
particelle non sono
puntiformi, contributi
rotazionali,
vibrazionali, ecc.

U è una proprietà del sistema

Il suo valore cambia a seguito di
traferimento di energia alle (o dalle)
particelle all'ambiente...

...compiendo del lavoro dall'esterno sulle
particelle del sistema → **W**

...o trasferendo energia mediante
urti tra le particelle del sistema e
quelle dell'ambiente esterno senza
che vi siano spostamenti
macroscopici → **Q**

Entrambi i meccanismi sono
descrivibili a partire dalle leggi
della meccanica classica...

...ma poiché ho una moltitudine di
eventi microscopici, uso le variabili
macroscopiche: **$Q - W = \Delta U$**

Il 1° principio è una legge che permette di descrivere il variare dell'energia interna di un sistema senza dover fare riferimento alla sua struttura interna

Mentre il 2° principio è un principio (assioma), il 1° è un teorema!

Un piccolo approfondimento didattico:
l'**ASSIOMATICA**

Teoria (i.e. **immagine del mondo**) = sistema ipotetico-deduttivo che procede da un insieme di ipotesi

Principi per definire una teoria deduttiva:

1) Un certo insieme di espressioni viene usato senza "dar loro significato" → *termini di base (primitivi)*

2) Un certo insieme di proposizioni viene posto senza argomentare sulla loro validità, assunta a priori → *assiomi*

$1 + 2 =$ *idee principali*

assiomatizzare = esplicitare
in modo ordinato le idee principali

Tutte le altre idee (→ *teoremi*)
vengono derivate attraverso mezzi
puramente *logici*

Euclide fu il primo a farlo. La geometria euclidea è il primo sistema assiomatico. Spinoza e Newton ci hanno solo provato. David Hilbert nel 1899 sviluppò il concetto di *teoria astratta* (→ isomorfismi tra teorie)

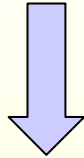
Tuttora, molto poche teorie sono assiomatizzate → ...problemi!

Un'idea può essere importante e "centrale" senza essere fondamentale da un punto di vista logico-assiomatico. La distinzione fondamentale/derivato è puramente logica, dipende dal contesto, ma aiuta a mettere in luce le idee logicamente più forti, evitando circolarità

Es., il principio di conservazione dell'energia (così come il 1° principio della Termodinamica) non è un assioma

Un passo ulteriore:

Esiste un altro meccanismo di trasferimento energetico: la **radiazione** (al sole, un corpo si scalda...)



Perché non introdurla nel 1° principio?
1^ legge?

$$Q - W + R = \Delta U$$

Include fenomeni termici di cui abbiamo diretta esperienza, e permette di introdurre concetti di radiazione, o di fotone...

...contribuendo a una visione integrata delle sotto-discipline della Fisica

In generale, un approccio "atomistico"
...è unificante, mettendo in luce la complementarità tra descrizioni micro e macro
...è moderno, non essendo ancillare agli aspetti ingegneristici e proponendo concetti e prospettive nuove
...è più interessante per gli studenti

Una considerazione interessante: nella descrizione di un sistema macroscopico, l'elemento statistico di natura epistemica che emerge in Termodinamica, dovuto al gran numero di unità interagenti, compare assieme a un elemento statistico di natura non epistemica, quello quantistico, che attesta la natura intrinsecamente probabilistica dei fenomeni microscopici

Questi due aspetti statistici hanno statuto epistemologico diverso, ma hanno un aspetto che li accomuna, nel senso che entrambi emergono nel modo in cui le entità microscopiche intervengono in operazioni di misura effettuate con apparati macroscopici

1835: Adolphe Quetelet conia
l'espressione *Social Physics*

Studia l'emergere di regolarità (già
note e osservate in fenomeni fisici)
in fenomeni "sociali"

→ *frequenze dei diversi modi
di commettere un assassinio*

→ *grossezza del busto degli
uomini scozzesi*

Modelli di fluttuazione dei prezzi
descritta usando il *random walk* (1900,
Louis Bachelier)

Ettore Majorana (circa 1930)

*"... è importante quindi che i principi della
meccanica quantistica abbiano portato a
riconoscere il carattere statistico delle
leggi ultime dei processi elementari.*

*Questa conclusione ha reso sostanziale
l'analogia tra fisica e scienze sociali, tra
le quali è risultata un'identità di **valore** e
di **metodo**"*

R.S. Berry (1972)

"Mano a mano che le questioni ambientali diventeranno via via più importanti nelle decisioni politiche di pianificazione, emerge la forte necessità di indici di utilizzo ambientale affidabili e duraturi. Questo è particolarmente importante quando si deve scegliere tra politiche alternative, scelta che richiede l'identificazione di variabili che possano essere quantificate, che siano abbastanza generali da consentire la comparazione tra tipi di processi molto diversi, che forniscano misure e indici chiave, e che diano una reale stima dello sfruttamento ambientale. In questa prospettiva, le quantità termodinamiche sono la scelta più ovvia e naturale, e soddisfano a tutti questi criteri"

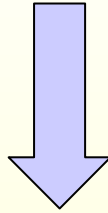
Daly and Cobb (1989)

"Le leggi della Termodinamica sono importanti per l'Economia perché l'attività economica è entropica. Le risorse naturali (materia energetica a bassa entropia) vengono messe insieme e manipolate per separare le parti utili dal resto, manufatte in beni e trasportate ai punti di vendita. Ad ogni stadio del processo, vengono prodotti rifiuti e un po' di energia viene usata (e perciò resa meno disponibile). La quantità di materie prime è uguale alla quantità di rifiuti (più i prodotti, che però prima o dopo diventano a loro volta rifiuti), ma le due quantità sono qualitativamente differenti...

*...la misura di questa differenza si chiama **entropia!**...*

...La produzione economica dipende dalla disponibilità di entrate a bassa entropia"

Si tratta in realtà di isomorfismi



Terminologia comune, ad es.

→ Sistemi aperti vs.
sistemi chiusi

→ Stati di equilibrio vs.
stati di non-equilibrio

termodinamica

economia

P (pressione)

λ (valore del denaro)

V (volume)

M (quantità di denaro)

N (numero di
particelle)

N (beni)

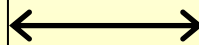
μ (potenziale chimico)

p (prezzo)

F (energia libera)

W (ricchezza)

$$F = -PV + \mu N$$



$$W = \lambda M + pN$$

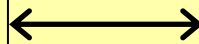
TS

Ψ (surplus, ≥ 0)

E (energia)

U (funzione utilità per
le scelte di acquisto)

$$TS = F - E$$



$$\Psi = U - W$$

