

IRREVERSIBILITÀ E OGGETTI FISICI

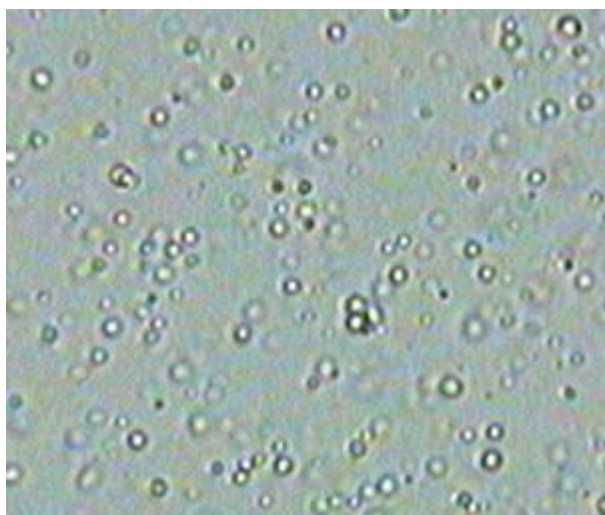
Ledo Stefanini

Il concetto di *irreversibilità* (e di *reversibilità*) è componente essenziale del comune modo di guardare ai fenomeni. Se un film viene proiettato al contrario – come talvolta accade per certe scene elaborate alla moviola – chiunque è in grado di distinguere, dopo poche immagini, se la scena è proiettata al dritto o al contrario. Cominceremmo quindi dalla proiezione di un video al contrario, tra quanti se ne trovano in internet [[www.youtube.backward](http://www.youtube.com/watch?v=backward) videos]. L'ilarità che scaturisce dalla visione di questi filmati – realizzati in gran parte da studenti – testimonia del fatto che nozione di *irreversibilità* dei fenomeni è una delle più fondate nella mente umana. Si tratta della consapevolezza che il tempo ha un unico verso di scorrimento. Se riprendiamo la scena di una palla che rimbalza sul pavimento, e se poi la proiettiamo al contrario, vedremo l'ampiezza dei rimbalzi aumentare progressivamente e giudicheremo immediatamente la cosa come impossibile.

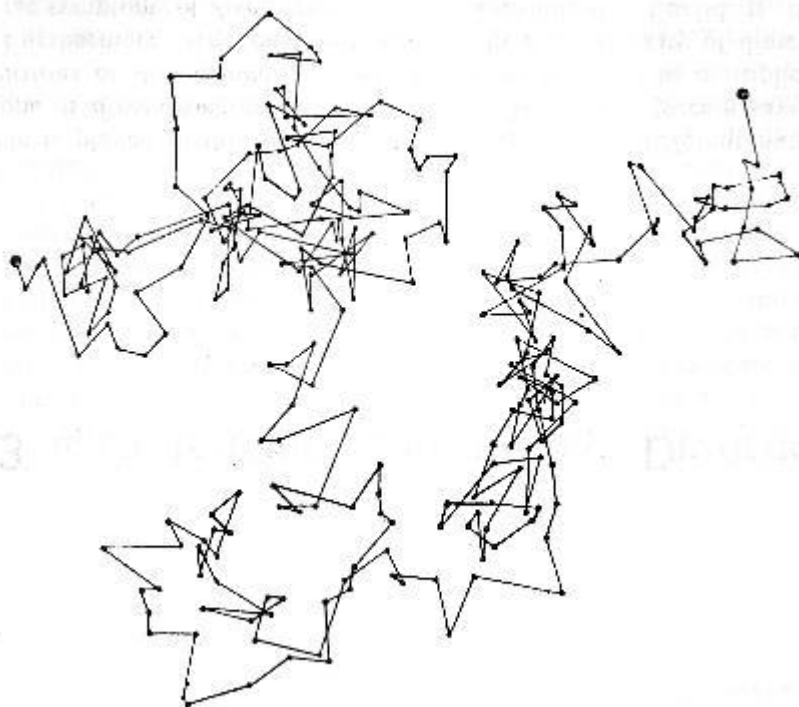
Vi è un caso, tuttavia, in cui risulta impossibile distinguere la «freccia del tempo».

Se si osserva al microscopio una goccia d'acqua che contenga, in sospensione, ad esempio, delle sferule di polistirene (che hanno un diametro di qualche micron, ma sono visibili al microscopio) si vede che queste sono animate da un movimento incessante e caotico. Si tratta del *moto browniano* (da Robert Brown) : le sferule si muovono (in maniera imprevedibile) a causa degli urti delle molecole del fluido in cui sono immerse. In altre parole, il moto browniano è una manifestazione del moto caotico e incessante delle molecole del fluido. Conviene mostrare agli studenti un breve filmato scaricabile da Internet all'indirizzo: *physics to go bi-monthly magazine, issue 47*.

L'immagine delle sferule in acqua è la seguente:



Si può quindi seguire il moto caotico di una delle sferule in acqua (o di una particella di fumo in aria). Ciò che ci interessa, di un film del genere, è che non è possibile dire se è proiettato «dritto» o «alla rovescia».



SPOSTAMENTI DI UNA SFERULA DI POLISTIRENE IN ACQUA

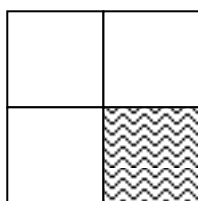
Il moto di Brown ci insegna tre cose fondamentali:

- 1) i corpi sono aggregati di particelle piccolissime. Tipicamente, in un bicchier d'acqua ce ne sono 10^{24} , in un grammo d'aria 10^{22} ;
- 2) queste particelle sono animate da un moto caotico e incessante;
- 3) un corpo che, macroscopicamente, ci appare immutabile (cioè sempre uguale a se stesso) in realtà muta continuamente: ad un unico stato macroscopico, corrisponde un numero enorme di microstati tra loro diversi.

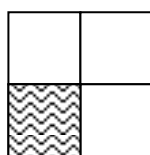
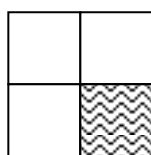
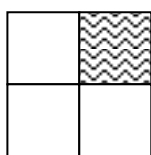
È proprio sull'impossibilità di distinguere un "prima" e un "dopo" nel moto delle particelle che si basa la possibilità di attribuire al corpo uno *stato di equilibrio*. Un gas chiuso in una bombola termicamente isolato è un esempio di corpo in stato di equilibrio: i suoi parametri fisici macroscopici (pressione, temperatura, volume, massa), infatti, non mutano nel tempo. E, tuttavia, a quest'unico macrostato corrisponde un numero enorme di microstati diversi.

Un buon modo di studiare i sistemi complessi è quello di apportare drastiche semplificazioni, costruendo modelli che siano abbastanza semplici da comprendere: costruiremo pertanto un modello elementare di *oggetto fisico*. Non si pensi che si tratti di un inutile giochetto: si chiama *Solido di Einstein*.

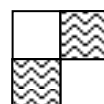
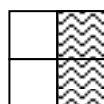
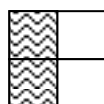
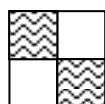
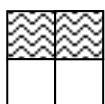
Si immagini una tavola coperta da quattro fogli di carta che hanno una pagina bianca e un dorso nero. Supponiamo che siano disposti in modo che tre di essi presentino la pagina bianca e uno solo la nera.



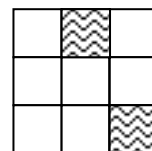
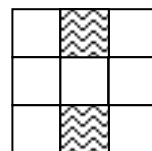
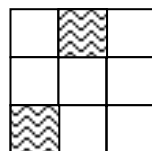
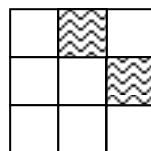
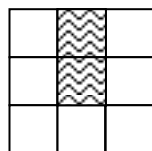
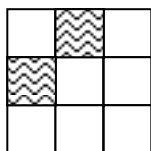
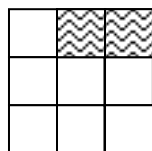
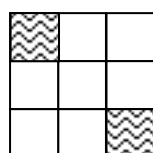
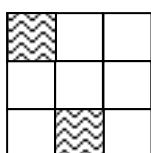
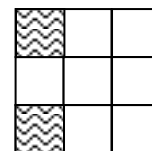
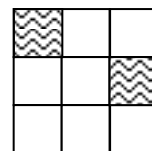
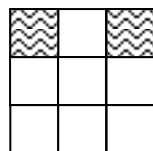
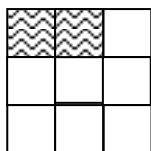
Questa configurazione si può ottenere in quattro modi diversi:

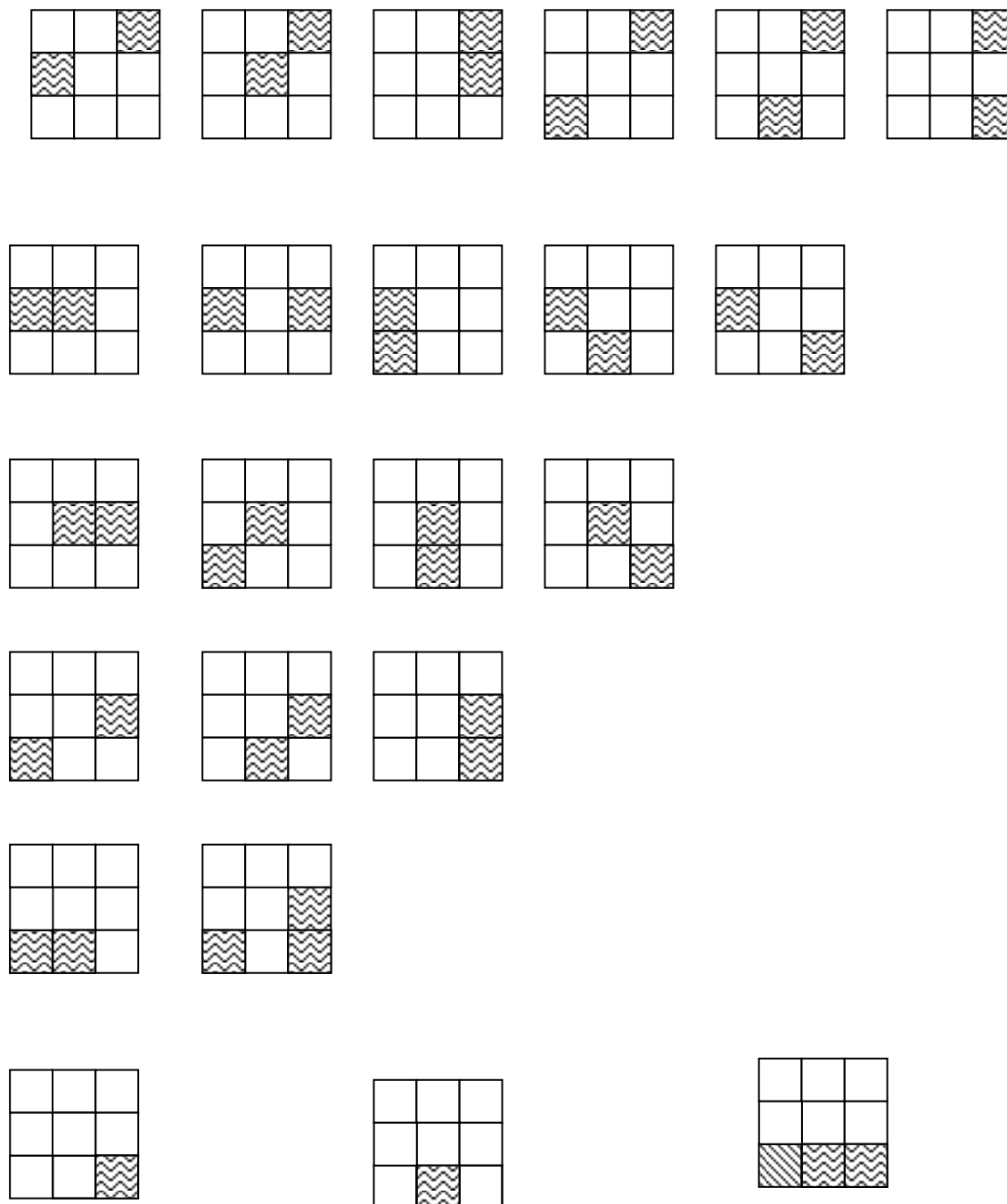


Se ammettiamo due fogli neri, il numero delle possibilità è più alto.



Se, invece di quattro fogli di carta ne abbiamo 9, il gioco si fa più vario:





Si tratta di 36 possibilità. In generale, se ho N fogli e voglio realizzare una configurazione con n pagine bianche, il numero dei modi che ho a disposizione è

$$\binom{N}{n} = \frac{N \cdot N-1 \cdot N-2 \cdot \dots \cdot N-n+1}{n!}$$

Per esempio, se le carte sono 16 e voglio che le facce nere siano quattro, il numero dei modi in cui posso realizzare questa configurazione è

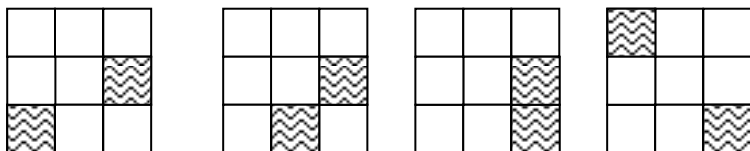
$$\binom{16}{4} = \frac{16 \times 15 \times 14 \times 13}{4!} = 1820.$$

Se voglio fare metà facce bianche e metà nere, il numero dei modi che ho a disposizione è

$$\binom{16}{8} = \frac{16 \times 15 \times 14 \times 13 \times 12 \times 11 \times 10 \times 9}{8!} = 12870$$

che è più grande del precedente.

Per leggere il numero delle facce (bianche o nere) possiamo servirci di un fotometro (che misura la luminosità della tabella). Il fatto essenziale è che la luminosità della tabella è indipendente dalla disposizione delle facce nere: dipende solo dal loro numero. Significa che, se trasformo una faccia bianca in una nera e, contemporaneamente, una nera in una bianca, il fotometro fornisce la stessa lettura. Questa quindi è, in qualche modo, anche una misura della nostra carenza di informazione: il fotometro giudica come identiche configurazioni diverse come le seguenti:



Per il fotometro, la tavola può essere coperta con quattro carte in quattro modi diversi:

1 carta nera, 2 carte nere, 3 carte nere, 4 carte nere.

Se la vogliamo coprire con 16 carte, ci sono solo 16 configurazioni possibili, per il fotometro. Il numero dei modi diversi in cui si può realizzare una configurazione riconosciuta dal fotometro si chiama **MOLTEPLICITÀ**.

Per esempio, nel caso delle 16 carte, lo stato con 4 carte nere (e 12 bianche) è caratterizzato da una molteplicità di 1820; lo stato caratterizzato da 8 carte nere da una molteplicità pari a 12870.

Tuttavia, se vogliamo costruire una funzione additiva, conviene prendere il logaritmo delle molteplicità; per cui definiamo una nuova funzione che chiameremo **ENTROPIA**:

$$S \propto \ln N$$

essendo N il numero delle configurazioni che corrispondono ad un determinato stato. Prendiamo, ad esempio, un solido costituito da 16 carte. La molteplicità dello stato [8 carte B, 8 carte N] è 12870; la molteplicità dello stato [6 carte B, 10 carte N] è 8000; con un rapporto 1,6. La differenza delle entropie che caratterizzano i due stati macroscopici è $\ln 12870 - \ln 8000 = 0,47$.

L'uomo, dotato di sensori macroscopici, si comporta come il fotometro del nostro esempio: cataloga come STATO UNICO (MACROSCOPICO) una collezione di stati microscopici diversi tra loro. Supponiamo di avere una bombola di gas. Ne misuriamo la pressione, il volume, la temperatura: grandezze che caratterizzano lo stato macroscopico di questo oggetto. Ma dal punto di vista microscopico, questo stato macroscopico è una collezione di un numero enorme di stati microscopici diversi tra loro. L'entropia dello stato è la misura del numero di microstati che corrispondono ad un solo macrostato. La sua MOLTEPLICITÀ.

Prendiamo ad esempio un litro d'elio a pressione normale e temperatura ambiente. È formato da

$$N = 2,4 \times 10^{22} \text{ molecole.}$$

La sua molteplicità è

$$\Omega = 10^{2 \times 10^{23}}.$$

L'entropia – come misura del numero di microstati ai quali corrisponde un solo stato macroscopico – è un concetto di importanza fisica e matematica fondamentale. L'idea chiave è la seguente: *l'entropia misura la quantità di caso presente in un sistema*. In particolare, l'entropia è una *grandezza estensiva* (come la massa, per esempio), il che significa che l'entropia di 2 litri di elio è il doppio dell'entropia di 1 litro, l'entropia di 10 litri d'elio è dieci volte maggiore.

Per come l'abbiamo introdotta, quindi, l'entropia è un *numero puro*. Tuttavia, allo scopo di raccordare questa definizione – dovuta a Boltzmann – di entropia con quella termodinamica – dovuta a Clausius – si introduce nella definizione un fattore dimensionale (costante di Boltzmann):

$$k \equiv 1,38 \times 10^{-23} \frac{J}{K} = 1,38 \times 10^{-23} Ct$$

per cui la definizione di entropia di un sistema diventa:

$$S \equiv k \ln \Omega.$$

Si tratta di una scoperta importante: ciò che l'uomo coglie non è la "realtà". Egli registra come identiche, ovvero *indistinguibili*, situazioni fisiche che, dal punto di vista microscopico, non lo sono. Si badi, tuttavia, che questa non è una limitazione della nostra capacità di conoscenza, poiché, se ci fosse accessibile la realtà microscopica, il mondo ci apparirebbe come un ammasso caotico del tutto inconoscibile. La facoltà stessa di poter distinguere degli *oggetti* discende da questa impossibilità di cogliere il mondo microscopico. Quindi, a noi – e ai nostri strumenti macroscopici – è dato di cogliere come uno stato unico un grande numero di microstati tra loro diversi. Quando diciamo "un gran numero di microstati" intendiamo un numero veramente grande. Il numero di microstati accessibili ad un litro di elio a temperatura ambiente è

$$\Omega = 10^{1,8 \times 10^{23}}.$$

Abbandoniamo la speranza di dare un'idea umana della grandezza di questo numero. L'entropia che corrisponde a questa molteplicità è

$$S \equiv k \ln \Omega = 1,38 \times 10^{-23} \times \ln 10^{1,8 \times 10^{23}} = 6 Ct$$