

## ENTROPIA E FRECCIA DEL TEMPO

### Il tempo nella formulazione delle leggi fisiche a livello fondamentale.

Da Galilei in poi il tempo compare come un parametro non dissimile dalle tre coordinate spaziali. In un certo senso, il tempo è stato immaginato omogeneo allo spazio e ciò ha consentito a Galilei e poi a Newton di dividere una lunghezza per un tempo e di arrivare chiaramente al concetto di velocità, cosa inconcepibile per i Greci. E' questo il motivo per cui Aristotele, pur avendo il concetto di velocità, non lo seppe quantificare, ragion per cui la sua cinematica restò a livello qualitativo. Inoltre, rotto il ghiaccio, Galilei e Newton insistono nel processo di rapporto tra grandezze a rigore non omogenee, e il rapporto tra (variazione di) velocità e (intervallo di) tempo li conduce al concetto di accelerazione e alla legge fondamentale della dinamica: la forza causa di accelerazione e non di velocità. Ora, questa legge fondamentale,  $F=m \cdot a$ , è una legge che collega l'accelerazione, cioè la derivata seconda dello spazio rispetto al tempo, alla forza, che nei casi più semplici dipende solo dalla posizione, per esempio nel caso della forza gravitazionale, anche se può essere presente la velocità: in generale, per un'unica particella di massa  $m$ ,

$$(1) \quad x'' = \frac{1}{m} F(x, x', t)$$

ed equazioni analoghe per le altre due coordinate spaziali,  $y$  e  $z$ . Gli apici denotano derivazione rispetto al tempo  $t$ .

( $x''$  è la componente  $x$  dell'accelerazione,  $x'$  la componente  $x$  della velocità).

Nel caso particolarmente semplice della forza gravitazionale, la (1) si scrive, almeno nel caso di una massa  $m$  piccola rispetto a quella  $M$  del corpo centrale, (in prima approssimazione è il caso di un pianeta e del Sole):

$$(2) \quad x'' = -GM \frac{x}{r^3} \quad \text{e formule analoghe per } y \text{ e } z. \quad (r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \text{ è la distanza tra il corpo centrale e la particella}).$$

Nella (2) non compare esplicitamente il tempo, perciò è abbastanza evidente che, se il parametro temporale  $t$  è cambiato di segno, le velocità sono cambiate di segno, ma l'accelerazione resta immutata, perciò si ottiene un processo inverso del primo, ma con la stessa legge; se il primo evolve al crescere di  $t$ , o, come si dice, dal passato verso il futuro, il secondo evolve dal futuro verso il passato, passando a ritroso per gli stessi stati: il tempo, a livello di leggi fondamentali, è reversibile. Ciò implica che a livello fondamentale, non ha senso parlare di causalità ma solo di relazioni funzionali tra grandezze. La causalità richiede infatti non solo la contiguità tra causa ed effetto, se non direttamente, almeno mediante una catena di eventi intermedi, ma anche il soddisfacimento del principio di antecedenza: la causa deve precedere temporalmente l'effetto.

E' possibile rendersi conto intuitivamente della reversibilità del tempo a livello fondamentale, osservando il moto di un pianeta intorno al Sole o, più semplicemente, il moto di un pendolo. **Trascurando gli attriti**, (l'attrito non è un processo a livello fondamentale, coinvolge infatti un numero immenso di molecole, e qui sta il punto), il moto del pendolo è periodico, del resto come il moto di un pianeta intorno al Sole, e perciò, se si guardano due istantanee del moto pendolare, non si può dire quale è stata scattata *prima* e quale *dopo*. *Il prima* e *il dopo* non hanno senso per un moto periodico. Certamente, se si segue con gli occhi o con un altro strumento di registrazione il moto del pendolo, possiamo dire quale posizione è stata occupata prima e quale dopo, il tempo acquista carattere di irreversibilità, ma ciò richiede per l'appunto un paio d'occhi e dietro di essi un cervello, cioè un sistema estremamente complesso, e proprio questo fa la differenza.

In ultima analisi, per un sistema semplice, un elettrone o anche un atomo di idrogeno, un pendolo, un pianeta, il tempo è reversibile e non c'è differenza tra passato e futuro, anzi non ha senso fare questa distinzione. Per esempio, il premio Nobel Richard Feynman considera un'antiparticella, per

esempio un positone, come un elettrone che viaggia all'indietro nel tempo <sup>1</sup>. Naturalmente, l'essere una particella o un'antiparticella è puramente convenzionale, perciò chi è che viaggia in avanti e chi all'indietro nel tempo, l'elettrone o l'antielettrone?

Se è vero che il tempo è reversibile per i sistemi semplici, come mai abbiamo considerato reversibile il tempo per un pendolo, che è formato da miliardi di miliardi di molecole e che quindi semplice, cioè costituito di poche particelle, non è? Perché quei miliardi di miliardi di molecole si muovono come un tutto unico, e perciò il loro moto collettivo è *ordinato*. Qui è la chiave del mistero.

### Sistemi dinamici e sistemi termodinamici.

Una particella è un semplicissimo sistema dinamico, cioè un sistema che obbedisce a una legge deterministica, espressa da un'equazione differenziale lineare (del 2° ordine).

Una coppia di particelle interagenti è un semplice sistema dinamico; l'evoluzione di tale sistema si riduce al moto di una sola particella nel campo di forza dovuto all'altra particella, introducendo il

concetto di massa ridotta  $\mu$  definita, come è noto, da 
$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}.$$

Un sistema di tre particelle è un sistema dinamico molto difficile da trattare esattamente; anche nel caso più favorevole di una massa piccola rispetto a due altre confrontabili (un pianeta e due Soli), il moto diventa al passare del tempo sempre meno prevedibile e finisce con l'esibire un comportamento caotico. E' il celebre problema dei tre corpi studiato nella seconda metà dell'800 da Henry Poincaré.

Come mai, si potrebbe obiettare, la meccanica celeste ci permette di determinare con grande accuratezza il moto dei corpi del sistema solare, che pure è costituito da ben più che tre corpi, con un'accuratezza tale, in verità, da prevedere con anticipo di secoli eventi molto delicati come le eclissi di Sole, situati invero non solo nel nostro futuro ma anche nel nostro passato? (Si pensi all'eclissi di Sole testimoniata da Erodoto durante una battaglia tra Lidi e Persiani).

Il fatto è che il caso del sistema solare è particolarmente fortunato perché c'è un corpo, il Sole, la cui massa prevale fortemente su tutte le altre. Ciò fa sì che si possono applicare metodi matematici di approssimazione successiva, che vanno sotto il nome di metodi perturbativi e che consistono nello studiare il moto di un pianeta come se fosse unicamente sotto l'influenza del Sole e di aggiungere poi il campo gravitazionale degli altri pianeti come una correzione, una perturbazione, del campo principale del Sole.

Per inciso, vorrei ricordare che metodi perturbativi analoghi si applicano in fisica atomica allo studio, questa volta quantistico, degli atomi con molti elettroni, perché la massa del nucleo è preponderante rispetto a quella degli elettroni; che tali metodi danno invece risultati deludenti in fisica nucleare perché i nucleoni hanno masse praticamente uguali tra loro. E' questo il motivo, come sottolinea Carlo Rubbia, del fatto che ancora sappiamo così poco del comportamento della materia nucleare.

Ma che succede se un sistema è costituito da miliardi di particelle? Una bombola di gas, un bicchiere d'acqua, un pezzo di ferro.

In questo caso lo studio dinamico del sistema è praticamente impossibile, anche a voler restare nell'ambito della meccanica classica. A parte il fatto irrealizzabile di dover acquisire i dati iniziali, posizioni e velocità di miliardi di miliardi di molecole (in un cm-cubo d'aria a pressione e temperatura ordinarie ce ne sono  $10^{19}$ ), resterebbe il compito sovrumano di dover integrare un sistema di miliardi di miliardi di equazioni differenziali. Non basterebbe un computer grande quanto la Galassia e non basterebbe l'età dell'universo. E poi, chi consulterebbe i dati? Chi ci capirebbe qualcosa? Quando la volpe non poté raggiungere l'uva, disse che non era matura; noi faremo lo stesso.

---

<sup>1</sup> R. Feynman, QED La strana teoria della luce e della materia, Adelphi. (QED è l'acrostico di Quantistic Electro Dynamics).

Un sistema dinamico di una miriade di particelle lo chiameremo sistema termodinamico; non potendo seguire l'evoluzione nel tempo delle posizioni e delle velocità delle singole molecole, ci contenteremo di studiare il loro comportamento medio. Per far ciò abbiamo bisogno di poche variabili, per un gas confinato in un recipiente: volume, pressione, temperatura, massa delle specie chimiche presenti. Lo stato dinamico è caratterizzato dalla conoscenza delle coordinate e delle velocità delle singole molecole; volume, pressione, temperatura, massa costituiscono lo stato detto termodinamico. Del resto, a chi interessa la sorte di ogni singola molecola? Alle società d'assicurazione non interessa la sorte dei singoli assicurati, che pure sono esseri umani, ma solo l'andamento medio della mortalità e simili parametri; i fisici fanno lo stesso per una folla di molecole.

La drastica semplificazione ottenuta passando da una descrizione dinamica a una termodinamica comporta non solo una diminuzione di conoscenza, che però tanto era irrealizzabile e inutile, quanto, cosa molto importante e in un certo senso inaspettata, il passaggio da una descrizione deterministica a una probabilistica, e insieme il passaggio da un tempo reversibile a un tempo irreversibile.

### **L'entropia.**

Storicamente la termodinamica è sorta dallo studio delle macchine a vapore, quando ancora solo i chimici cominciavano a parlare timidamente di atomi. Ancora non era neanche chiaro il concetto di energia, ecco perché il cosiddetto secondo principio della termodinamica secondo i celebri enunciati di Kelvin e di Clausius precede storicamente l'enunciazione del primo principio, che qualifica essenzialmente il calore come una forma di energia. La successiva teoria cinetica, che in seguito divenne la meccanica statistica, essenzialmente per merito di Maxwell e di Boltzmann, chiarisce che la temperatura è l'energia cinetica media delle molecole, in moto disordinato e caotico (il disordine e il caos sono una conseguenza della perdita di informazione dovuta al passaggio dalla descrizione dinamica "completa" a quella termodinamica "incompleta e impoverita" . Ciò fa sì che uno stesso stato termodinamico o macroscopico, caratterizzato da quattro o cinque parametri (pressione, temperatura, eccetera) è realizzato da innumerevoli stati dinamici microscopici (posizione e velocità di una miriade di molecole), perché uno stesso valore medio compete a un'immensità di casi singoli. Perciò, osservando un sistema macroscopico, lo si trova praticamente sempre nello stato termodinamico che è realizzato dal massimo numero di stati microscopici corrispondenti a quello stato termodinamico. Faccio un solo semplice esempio chiarificatore. Se tre persone si aggirano in un salone, è possibile trovarli a volte concentrati in un particolare angolo, a volte uno lontano dall'altro. Ma se le persone sono molte, e si muovono a caso, in media si trova lo stesso numero di persone in ogni equivalente area del salone. Se sono 4 persone, la probabilità che siano tutte e 4 nella prima metà del salone è  $1/16$ , ma se le persone sono 10, questa probabilità scende a meno di 1 millesimo ( $1/1024$ ). Il caso più probabile è che siano equamente divise tra le due metà. Nel caso di 1 cm cubo d'aria, il numero di molecole è tale che la probabilità di trovare le molecole non equamente divise è praticamente zero. Da qui la legge empirica: un gas confinato in una parte di un recipiente, quando è reso libero di muoversi, si espande in modo da riempire uniformemente il recipiente. Si capisce che questa uniformità è solo statistica, ma le fluttuazioni sono praticamente inaccessibili, a meno che il gas non sia estremamente rarefatto. Una volta che il gas si è distribuito in modo uniforme, avendo la pazienza di aspettare, c'è speranza di vederlo di nuovo confinato nell'angolo iniziale? La probabilità di un tale evento è così piccola che in pratica non lo si vedrà mai realizzato, anche se nessuna legge fisica lo vieta. L'espansione di un gas è, a tutti gli effetti, spontaneamente irreversibile. E' chiaro, invece, che le 4 persone distribuite a un certo istante uniformemente nel salone, aspettando un po' le vedremo concentrate vicino alla finestra, in media una volta ogni 16 unità di tempo: il moto casuale di 4 persone o di 4 molecole è perfettamente reversibile.

L'entropia è una grandezza che i fisici hanno inventato per misurare quantitativamente il grado di irreversibilità di un processo che coinvolge un numero stragrande di particelle. L'entropia misura perciò di quanto cresca il disordine rispetto all'ordine iniziale.

L'entropia di un sistema isolato dall'ambiente esterno cresce al passare del tempo; il sistema evolve verso lo stato di massima entropia.

Boltzman ha trovato che l'entropia è proporzionale al logaritmo del numero degli stati microscopici associati a un dato stato macroscopico; pertanto, dire che il sistema evolve verso lo stato di massima entropia, come si dimostra in termodinamica classica, equivale a dire che il sistema evolve verso lo stato di massima probabilità e quindi di massimo disordine: l'entropia aumenta, la probabilità aumenta, il disordine aumenta. Che uno stato disordinato è più probabile di uno stato ordinato, si può capire con la seguente similitudine: per avere un televisore funzionante, occorre collegare i moduli in un ordine ben preciso, è pertanto altamente improbabile che un incompetente come me ci riesca collegando i pezzi a casaccio, quasi altrettanto improbabile di vedere spuntar fuori l'*Infinito* di Leopardi lasciando una scimmia battere sulla tastiera di un computer. E tuttavia è molto probabile che io distrugga quell'ordine e ottenga un mucchio disordinato di bobine e di transistor, basta che mi consegniate un martello. Ancora, un vaso di cristallo è un sistema che si trova in uno stato altamente ordinato e fortemente improbabile (improbabile che si faccia da solo); se però cade dal tavolo e va in mille pezzi, otteniamo un sistema fortemente disordinato e di elevata probabilità (lo stato di vaso rotto può realizzarsi in tanti modi diversi). Perciò è vano aspettarsi che i frammenti saltino sul tavolo e ricostituiscano il vaso, anche se nessuna legge fisica lo vieta.

### **La freccia del tempo.**

Stephen Hawking nel suo best-seller scientifico *Dal big bang ai buchi neri (breve storia del tempo)*<sup>2</sup> enuclea tre frecce del tempo: la freccia cosmologica, la freccia termodinamica, la freccia psicologica.

La freccia cosmologica è quella di verso concorde con l'espansione dell'universo; il legame con le altre due è molto suggestivo, ma qui non ce ne occuperemo.

La freccia termodinamica è quella tratteggiata in questo articolo, è quella che va nel verso dell'entropia crescente, ovvero del disordine crescente (ricordiamo che il disordine è più probabile dell'ordine).

La freccia psicologica è quella per cui sentiamo il tempo scorrere irreversibilmente e irresistibilmente dal passato verso il futuro. Il cervello umano è certamente la struttura più complessa formata in tre miliardi di anni di evoluzione biologica, è quindi un sistema fortemente organizzato che è in grado di registrare l'evoluzione di un sistema macroscopico verso stati di maggiore probabilità, di maggiore disordine, dunque di maggiore entropia.

La freccia psicologica è guidata dalla freccia termodinamica, il passato e il futuro sono la rappresentazione mentale del passaggio da uno stato più ordinato a uno stato più disordinato. Passato e futuro non hanno senso a livello dinamico, per processi elementari per i quali il tempo è reversibile.

### **Nota.**

Secondo alcuni esperimenti di fisica sub\_nucleare riguardanti il decadimento del mesone  $K^0$  in pioni, pare che la simmetria per inversione temporale non sia rispettata<sup>3</sup>. Questo significherebbe che c'è una irreversibilità temporale anche a livello elementare, almeno per quanto riguarda le cosiddette *interazioni deboli*. Questo però non infirma le considerazioni fatte in questo articolo, perché a livello macroscopico l'interazione da considerare è quella elettromagnetica (e quella gravitazionale su scala astronomica); ma per queste due interazioni valgono tutti i principi di simmetria finora noti. Certamente, non è possibile ipotecare il futuro (e già: noi esseri macroscopici ricordiamo il passato, ma non il futuro); ciò che accadrà nel futuro è nel grembo di Giove.

Ottavio Serra

---

<sup>2</sup> Biblioteca universale Rizzoli

<sup>3</sup> Emilio Segrè: *Personaggi e scoperte della fisica contemporanea*, Tullio Regge: *"Infinito, viaggio ai limiti dell'universo"*; Mondadori