

# **Boltzmann. Il genio del disordine**

(di Giuseppe Mussardo)



*Ludwig Boltzmann (1844-1906)*

Il tema più ricorrente del *De Rerum Natura* di Lucrezio è quello degli atomi, chiamati *rerum primordia*. All'inizio del poema, Lucrezio dichiara apertamente di voler spiegare a Memmo la natura delle cose. I corpi non sono serrati e compatti, afferma Lucrezio, al contrario, nel loro interno vi sono infatti grandi spazi vuoti: qualsiasi sostanza è formata da atomi ma, quando essa si disgrega, essi ritornano nel loro stato libero e volano via, invisibili e indistruttibili, immutabili ed indivisibili. A dispetto della forza suggestiva dei versi di Lucrezio, l'ipotesi atomistica della materia ha dovuto attendere quasi duemila anni per imporsi e per trovare una solida conferma scientifica. Una vittoria tutt'altro che facile, frutto di diversi colpi di scena e di repentini cambiamenti di fronte, nonché di acerrime polemiche accademiche. Al suo successo contribuì in modo rilevantissimo un grande fisico austriaco, Ludwig Boltzmann. Nato nella Vienna di Francesco Giuseppe tratteggiata dalla penna mirabile di Robert Musil nel suo capolavoro *L'Uomo senza Qualità*, di quel mondo -- al tempo stesso fine di un'epoca ed inizio di un'altra -- Boltzmann rappresenta forse uno degli esempi più emblematici. In effetti, Boltzmann fu il tramite tra la grande tradizione della meccanica classica del XIX secolo e gli sviluppi straordinari della meccanica quantistica del XX secolo.

Boltzmann era un eccellente insegnante. Aveva una memoria sorprendente e spesso teneva lezione senza consultare nessun appunto. Era un insegnante nato e le sue lezioni erano cristalline, argute e spiritose, ricche di aneddoti stimolanti. Egli vivacizzava le sue lezioni con espressioni insolite, quali "gigantesco piccolo". Nelle sue lezioni filosofiche egli parlava di argomenti che allora erano esotici, quali spazi multidimensionali e curvi. Inoltre era un eccellente pianista, con una grande passione per Beethoven, e un brillante conversatore. Eppure...

Per coloro che sono sempre pronti a trovare una realtà simbolica nascosta dietro ogni cosa, non vi è forse esempio migliore che la data di nascita di questo grande fisico mitteleuropeo: il 20 Febbraio del 1844, notte di Martedì Grasso, giorno di confine tra la baldoria del carnevale e l'inizio della Quaresima. Durante tutta la sua vita, Boltzmann oscillò infatti tra questi due estremi, passando velocemente da momenti di grande felicità a periodi di profonda depressione. E fu proprio in uno di quei periodi bui che decise di porre fine tragicamente alla sua vita, tormentato com'era dall'asma e dall'aggravarsi della sua cecità, nonché dall'acuirsi della frustrazione per l'avversione feroce alle sue idee da parte di molti ambienti scientifici. Era il 5 settembre 1906. Tutto questo accadeva in un albergo del piccolo villaggio di Duino, borgo marino

ai confini dell'impero, una fine atroce, a dispetto dell'incantevole luccichio della baia di Duino e dei versi di Rilke che ne elogiavano la bellezza. Ironia della sorte, il lavoro che da lì a poco avrebbe convinto tutti della validità dell'ipotesi atomistica -- tesi per cui Boltzmann si era battuto animosamente tutta la vita -- era stato scritto appena l'anno prima dal più famoso impiegato di un ufficio brevetti che la storia ricordi, Albert Einstein.

La tragedia e la grandezza dell'opera scientifica di Ludwig Boltzmann non si possono capire senza tener conto degli importanti sviluppi scientifici che ebbero luogo nell'800, uno dei periodi più ricchi di eventi che la storia della scienza annoveri. Infatti, se da un lato l'alto grado di perfezionamento raggiunto dalla meccanica e dall'astronomia aveva permesso la costruzione di un'interpretazione unitaria della Natura, dall'altro vi era una moltitudine di fenomeni quali il calore, la luce, l'elettricità, il magnetismo e i processi della vita, che sembravano sfuggire a questa sintesi teorica. Fu questo il motivo per cui, durante tutto l'800, le indagini sulle trasformazioni reciproche di questi fenomeni e le loro relazioni con gli stessi processi meccanici assunsero un'importanza fondamentale. Un impulso decisivo a questi studi venne dalla rivoluzione industriale che ebbe inizio in quegli stessi anni, specialmente in Inghilterra. E fu proprio in Inghilterra che, alla metà dell'800, il concetto di energia trovò la sua piena valorizzazione. Accanto alla materia, l'energia assunse così il ruolo di categoria fondamentale a cui ricondurre tutti i fenomeni naturali: era l'atto di nascita di una nuova scienza, la Termodinamica, su cui fondare lo studio di tutti i fenomeni naturali. Grazie anche ad alcune osservazioni fondamentali fatte precedentemente dal medico tedesco Robert von Mayer (1814-1878) e soprattutto dall'ingegnere francese Sadi Carnot (1796-1832), furono infatti gli scienziati inglesi William Thompson (1824-1907) (futuro Lord Kelvin) e James Joule (1818-1889) a porre le fondamenta di questo nuovo edificio scientifico. La Termodinamica è quindi una scienza con molti padri ma pochi principi.

Il primo principio della termodinamica afferma che l'energia, intesa come somma di lavoro meccanico e di calore, è una quantità che si conserva in ogni processo fisico. Per i materialisti dell'epoca, questo appariva come la garanzia che la natura è eterna e dava validità, una volta di più, al motto di Lavoisier *Nulla si crea o si distrugge, tutto si trasforma*. Ma lo studio della macchina a vapore, che aveva contribuito in modo decisivo alla scoperta del primo principio, doveva anche rivelare una tendenza patologica di come vanno le cose nel mondo. Ovvero, che la parte meccanica dell'energia ha la cattiva abitudine di dissiparsi costantemente, divenendo poco a poco inutilizzabile. Questa osservazione portò a scoprire una legge profonda e generale di tutti i fenomeni, una legge promossa subito al rango di secondo principio della termodinamica. Esso indica la direzione del fluire del tempo, che è poi quella del decorso irreversibile nei processi naturali. Poiché è buona norma in fisica cercare di essere quantitativi, per la misura di tale irreversibilità si introdusse una nuova entità astratta, l'entropia, quantità che aumenta (o meglio, che non diminuisce) in ogni trasformazione termodinamica. Con la formulazione del secondo principio si poneva fine, una buona volta, alla chimera di poter realizzare una macchina che effettuasse un moto perpetuo, producendo energia a costo nullo. Ma esso conduceva anche alla sconcertante conclusione che l'universo – inteso come un tutto – è destinato inevitabilmente ad una morte termica, ovvero all'arresto di ogni trasformazione che non fosse puro scambio di calore tra tutte le sue particelle.

Contro questa sentenza di morte dell'universo e contro l'irreversibilità assoluta dei processi fisici, ci si doveva di nuovo appellare alla meccanica e all'antica teoria dell'atomismo, questa volta riformulate però in chiave probabilistica. Le gravi difficoltà che sembravano contrapporre in modo irrimediabile la tradizionale concezione meccanica dei fenomeni alla nuova scienza della termodinamica, furono infatti risolte da un nuovo indirizzo di ricerca, la Fisica Statistica e, in

particolare, la teoria cinetica dei gas (Vedere il Box). Già' utilizzata nel 1739 da Daniel Bernoulli per spiegare la pressione di un gas mediante gli innumerevoli urti contro le pareti del recipiente delle molecole che lo costituiscono, nell'800 la fisica statistica ebbe i suoi massimi interpreti in James Clerk Maxwell (1833-1879) e in Ludwig Boltzmann.

La teoria cinetica aprì una nuova prospettiva teorica nella conoscenza dei fenomeni naturali: infatti, se il calore era ora interpretato come movimento caotico delle molecole, la temperatura e la pressione di un corpo altro non erano che semplici manifestazioni fenomenologiche di tale movimento. Proseguendo le ricerche di Maxwell, Boltzmann dimostrò che qualsiasi sia la distribuzione iniziale delle velocità delle varie molecole di un gas, tali velocità per effetti delle collisioni tendono a distribuirsi secondo una legge probabilistica universale. Nel corso di questi studi egli introdusse una funzione delle velocità che non può mai diminuire e che quindi risulta analoga in tutto e per tutto all'entropia. Il concetto di entropia poteva in tal modo significare che grandi quantità di molecole tendono a passare da uno stato di minore probabilità ad uno di maggiore probabilità: la misteriosa entropia, nella formulazione di Boltzmann, diveniva quindi la misura del disordine nel moto delle molecole. Il legame preciso tra l'entropia di un corpo e la probabilità del suo stato macroscopico venne espressa dal grande fisico viennese dalla famosa formula  $S = k \log W$ , incisa sulla sua tomba nel cimitero di Vienna: in questa espressione,  $S$  è l'entropia,  $W$  è la probabilità in questione e  $k$  una costante (detta, in suo onore, costante di Boltzmann).

L'aumento dell'entropia di un fenomeno irreversibile, che sembrava sfuggire ad ogni comprensione di tipo meccanico tradizionale, venne così ricondotto ad una variazione delle proprietà meccaniche di un sistema di particelle in interazione. L'introduzione di queste nuove categorie di ordine e di disordine cambiò le carte in tavola: alla luce della meccanica statistica, si poteva ora ammettere una reciproca convertibilità tra uno stato ordinato (matematicamente meno probabile) e uno stato disordinato (o più probabile). In tal modo diveniva più comprensibile il carattere non assoluto ma probabilistico del secondo principio della termodinamica. La Fisica Statistica portò, inoltre, ad una profonda modifica della concezione tradizionale sulla conoscenza fisica della natura, in quanto veniva a distinguere, ed in un certo senso, ad opporre tra loro, una visione macroscopica e una concezione microscopica dei processi fisici. Essa evidenziava come il comportamento meccanico delle molecole, che a miliardi si muovevano nella più piccola porzione di materia sensibile, non poteva più essere trattato in modo individuale ma solo statisticamente.

Tale differenza tra piano microscopico e piano macroscopico, per cui lo stato visibile di quiete di un corpo è il risultato di un movimento invisibile, comportava una sorta di dicotomia tra conoscenza sensibile e conoscenza concettuale, dicotomia che alcuni autori, in nome di una concezione strettamente empiristica o fenomenologica della conoscenza fisica, tendevano a respingere violentemente. Tra i più accesi fautori del programma di una fisica puramente fenomenologica vi furono Ernst Mach (1838-1916) e Wilhelm Ostwald (1853-1932), che opposero il loro convinto rifiuto dell'atomismo ed ostracizzarono l'opera di Boltzmann in ogni possibile occasione. Ma, secondo Boltzmann, la scienza non deve limitarsi ad una semplice trascrizione di questi dati. Lasciando a lui la parola, "Nessuna equazione può tradurre esattamente un evento, quale esso sia. Essa idealizza necessariamente e va al di là dell'esperienza. Il fatto che ciò sia inevitabile deriva dal processo stesso del nostro pensiero, che consiste nell'aggiungere qualcosa all'esperienza e nel formulare un'immagine mentale. La fenomenologia non dovrebbe dunque vantarsi di non superare l'esperienza ma al contrario incitarci a farlo quanto più possibile".

Lo sviluppo successivo della scienza ha mostrato tutte le falle insite nel programma di una fisica su basi puramente fenomenologiche. La scoperta del carattere discontinuo dell'energia, il riconoscimento della massa dell'elettrone, lo sviluppo di sempre più raffinati modelli dell'atomo, la realizzazione in laboratorio di fenomeni affascinanti come la condensazione degli atomi a temperature vicino allo zero assoluto, non hanno fatto altro che confermare la validità di molte delle posizioni per cui Boltzmann si era battuto coraggiosamente, e in estrema solitudine, contro la scienza ufficiale del suo tempo.

### **Ulteriori approfondimenti**

Carlo Cercignani, *Ludwig Boltzmann e la meccanica statistica*, La Goliardica Pavese, 1997

Ludwig Boltzmann, *Viaggio di un professore tedesco in Eldorado*, Ibis Como 1993

Ludwig Boltzmann, *Modelli matematici, fisica e filosofia. Scritti divulgativi*, Bollati-Boringhieri (Torino), 1999.

David Lindley, *L'atomo di Boltzmann*, Bollati-Boringhieri (Torino), 2002

Stephen Brush, *The Kind of Motion we call Heat: A History of the Kinetic Theory of Gases in the 19th Century*.

North-Holland Pub. Co., Amsterdam, 1976

Giuseppe Mussardo, Enrico Agapito e Petra Scudo, *Ludwig Boltzmann, Il genio del disordine*, DVD, MediaScienza 2007.

Bernard H. Lavanda, *Il moto browniano da Einstein ad oggi*, Le Scienze Febbraio 1983

### **La Fisica Statistica, ovvero la Termodinamica dietro le quinte**

La termodinamica considera solo variabili macroscopiche, quali pressione, volume, temperatura, etc. Le sue leggi fondamentali, espresse in termini di tali quantità, non dicono nulla riguardo al fatto che la materia è costituita da atomi. La Fisica Statistica, che si occupa dello stesso ambito dei fenomeni, presuppone invece l'esistenza degli atomi: le sue leggi sono quelle della meccanica, ma applicate in modo probabilistico. Infatti, ai fini di dedurre le proprietà macroscopiche di un corpo, è irrilevante seguire il moto individuale di ogni singola particella poiché esse possono essere espresse in termini dei valori medi statistici relativi al moto di un gran numero di atomi. Per esempio, la temperatura di un gas è legata all'energia cinetica media delle particelle. La pressione, invece, è espressa in termini del numero di urti degli atomi sulle pareti di un recipiente che li contiene (e dell'impulso da loro trasferito). Tra due successive collisioni, le molecole di un gas si muovono con velocità costante secondo traiettorie rettilinee. La distanza media tra due urti successivi è detta *cammino libero medio*.

Se le molecole fossero dei punti, non si scontrerebbero mai e il cammino libero medio sarebbe infinito. Ma le molecole hanno un'estensione finita e si urtano quindi tra loro. Se fossero così grande e numerose da occupare tutto lo spazio a loro disposizione, il loro cammino libero medio sarebbe zero. Da questo semplice ragionamento, ne consegue che il cammino libero medio è in stretta relazione con le dimensioni molecolari e con il numero di particelle per unità di volume. Questa fu l'osservazione fondamentale fatta da Einstein nel 1905, che lo condusse alla spiegazione del moto browniano (ovvero il moto incessante di granelli di polline immersi in un

liquido) e alla sua predizione del numero di atomi (e delle loro dimensioni) in un volume unitario, conferma spettacolare dell'ipotesi atomica di Boltzmann.

In un gas, le particelle non hanno tutte la stessa velocità. Se così fosse, questa condizione non potrebbe durare a lungo, dato che le velocità molecolari cambierebbero in seguito agli urti. Fu James Clerk Maxwell che risolse il problema di trovare la legge di distribuzione delle velocità di un gas costituito da un gran numero di particelle. Mediante argomenti estremamente eleganti, egli giunse alla seguente formula

$$P(v) = 4\pi \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 e^{-mv^2/(2kT)}$$

dove  $P(v)$  esprime la probabilità che una particella di massa  $m$  abbia una velocità compresa nell'intervallo infinitesimo  $v$  e  $v + dv$ . In questa formula,  $T$  è la temperatura mentre  $k$  è la costante di Boltzmann. Al variare della temperatura, tutte queste curve hanno una tipica forma a campana, come quelle mostrate in Figura 1.

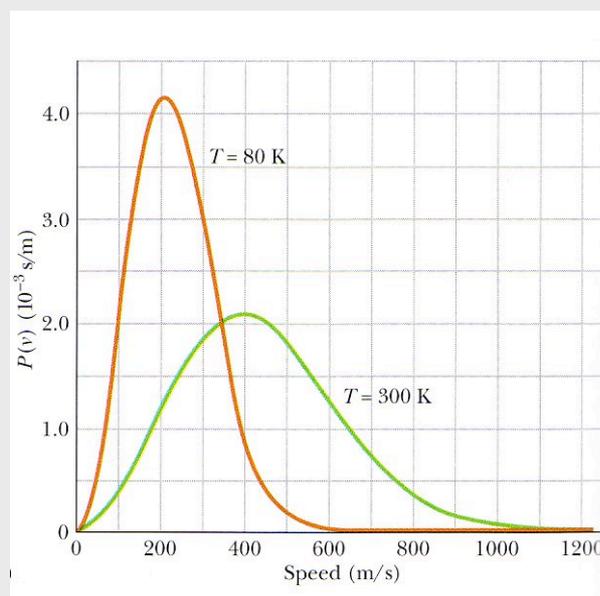


Figura 1. *Distribuzione di probabilità delle velocità delle particelle di un gas*

Notare che all'aumentare della temperatura, il picco della distribuzione si sposta a valori più alti della velocità, in accordo con l'interpretazione macroscopica della temperatura. L'intervallo delle velocità tipiche (ovvero quelle per cui  $P(v)$  è sensibilmente diversa da zero) diviene più esteso, così che la distribuzione si allarga. Poiché l'area sotto la curva resta costante (essa è sempre uguale ad 1, ovvero al valore della somma di tutte le probabilità), la distribuzione deve necessariamente appiattirsi all'aumentare della temperatura. Quindi il numero di particelle aventi velocità maggiori di un determinato valore aumenta all'aumentare della temperatura. Ciò spiega in maniera semplice molti fenomeni, come l'aumento della quantità di reazioni chimiche all'aumentare della temperatura.

La distribuzione delle velocità delle molecole di un liquido ha caratteristiche simili. Questo spiega perché a temperature molto al di sotto del normale punto di ebollizione alcune molecole

di un liquido possano sfuggire dal recipiente. Infatti, solo quelle piu' veloci possono vincere l'attrazione delle molecole alla superficie e sfuggire per evaporazione. L'energia cinetica media delle rimanenti molecole corrispondentemente si abbassa, lasciando il liquido ad una temperatura piu' bassa. Questo e' il motivo per cui l'evaporazione da' luogo ad un processo di raffreddamento, come accade per esempio soffiando sopra una tazza di caffè'.

Calcolando, infine, a titolo di esempio, la velocita' media delle molecole di idrogeno a 0° C e alla pressione di 1 atm, si ha il sorprendente valore  $v = 7200 \text{ km/h}$ . Il cammino libero medio e' pero' estremamente piccolo, dell'ordine di  $10^{-5} \text{ cm}$ . Ciascuna particella subisce, in media, infatti cinque miliardi di urti al secondo! E' il piccolo valore del cammino libero medio e la frequenza di queste collisioni che danno l'illusione che il gas sia un fluido continuo, mentre in realta' esso e' fatto da un numero enorme di particelle in costante moto.