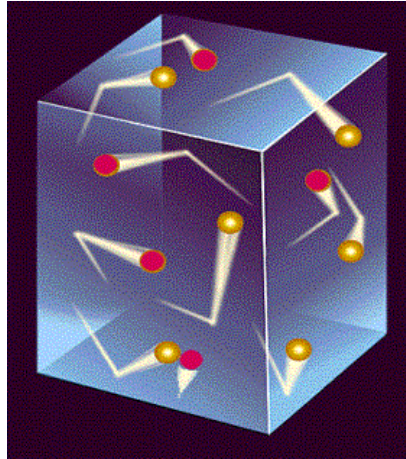
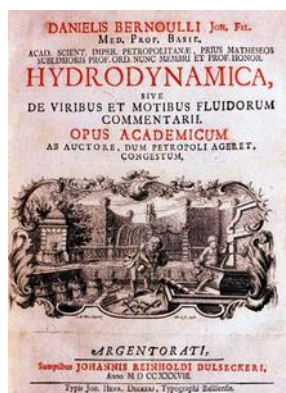


L'atomismo e Ludwig Boltzmann

terza e ultima parte



Boltzmann nel 1866 concluse il dottorato di ricerca con una tesi sulla teoria cinetica dei gas, secondo la quale i gas sono composti da particelle che si muovono in continuazione. Maggiore è il moto di agitazione delle particelle, maggiore è la temperatura del gas. L'ipotesi alternativa che convinceva invece molti altri scienziati era che la temperatura fosse la densità del calorico, un fluido che scorreva dai corpi più caldi a quelli più freddi; secondo questa congettura la temperatura aumentava con l'aumentare della densità del calorico. I primi passi importanti nella teoria cinetica furono compiuti da un genio della fisica, Daniel Bernoulli¹, che nel 1738 dimostrò che la pressione di un gas dipende dagli urti delle molecole che lo compongono.



Hydrodinamica di Daniel Bernoulli

¹ Daniel Bernoulli (1700 –1782), matematico e fisico svizzero. Il *principio di Bernoulli* è uno dei più importanti della fluidodinamica, per il suo ampio campo di applicazione: afferma che nelle zone dove la velocità di un fluido è maggiore, diminuisce la pressione.

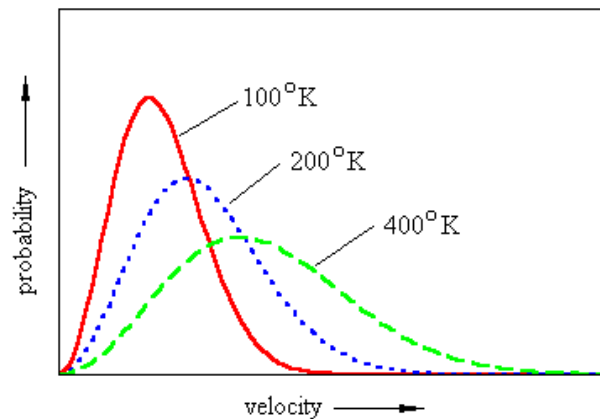
Una trattazione più sistematica fu elaborata un centinaio di anni più tardi, nel 1857, da Clausius, nel suo lavoro *die Art der Bewegung, welche wir Wärme nennen* (Sulla natura del movimento che chiamiamo calore) e nel 1859 il matematico e fisico scozzese James Clerk Maxwell² ipotizzò che le molecole dei gas avessero volume trascurabile rispetto a quello del recipiente in cui erano contenute e che interagissero tra loro senza variazioni di energia, così che il loro comportamento poteva essere descritto solo in termini della massa del gas, del numero di molecole contenute nel gas e della velocità media delle molecole. Mentre i primi due elementi potevano essere determinati grazie al numero di Avogadro³, per quanto riguarda il calcolo della velocità media suppose che esistesse una distribuzione di velocità; ipotizzò cioè che una percentuale di molecole fosse lenta, un'altra percentuale un po' più veloce, altre molecole fossero più veloci ancora. Maxwell, supponendo che una percentuale avesse una velocità v_1 , un'altra percentuale una velocità v_2 e così via, calcolò la velocità quadratica media con la radice quadrata del valore medio dei quadrati delle singole velocità. Boltzmann generalizzò i risultati di Maxwell alle energie delle molecole e dal connubio tra la teoria cinetica e la termodinamica generò una nuova branca della fisica: la meccanica statistica. Le velocità si distribuiscono attorno alla velocità media secondo la *legge delle distribuzione delle velocità di Maxwell-Boltzmann*: su N particelle, il numero probabile di quelle con una velocità compresa tra v e $v+dv$ è $Nf(v)dv$, dove l'espressione di $f(v)dv$ è

$$f(v)dv = 4\pi \left(\frac{m\beta}{2\pi} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{\beta m v^2}{2}} v^2 dv$$

² James Clerk Maxwell (1831 –1879). Mostrò che l'ipotesi di Avogadro poteva essere dedotta dalla teoria cinetica dei gas. Nel 1864 pubblicò *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*, in cui comparvero per la prima volta le equazioni che presero il suo nome. Nella loro reinterpretazione relativistica e quantistica descrivono completamente tutti i fenomeni che riguardano elettricità e magnetismo.

³ Nel Sistema Internazionale la quantità di sostanza è una grandezza fisica fondamentale che si misura in moli. Una mole è una quantità di sostanza che contiene tante unità elementari (atomi, molecole, ioni, elettroni, gruppi di tali particelle.., da definirsi di volta in volta a seconda del tipo di sostanza) quanti sono gli atomi contenuti in 12 g esatti di carbonio-12, cioè $6.022 \cdot 10^{23}$ atomi; il numero $6.022 \cdot 10^{23}$ è detto numero di Avogadro. Il fisico italiano Amedeo Avogadro (1776-1856) fu il primo a pensare (*ipotesi di Avogadro*) che in un dato volume, nelle stesse condizioni di temperatura e pressione, ogni specie di gas contiene lo stesso numero di molecole. Il numero fu determinato sperimentalmente una cinquantina di anni dopo da J.J. Loschmidt.

m è la massa di una molecola e $\beta=1/kT$ dipende dalla temperatura assoluta e dalla *costante di Boltzmann* $k= 1.38066 \cdot 10^{-23}$ J/K. La distribuzione è riportata nella figura seguente, in cui la velocità più probabile è quella corrispondente al massimo della funzione. All'aumentare della temperatura la curva si abbassa e si amplia, in accordo con l'aumentare della velocità delle particelle all'aumentare della temperatura.



C'è da evidenziare il fatto che questi risultati furono ottenuti da Maxwell e Boltzmann solo matematicamente, in seguito a studi teorici e supponendo che le particelle del gas interagissero solo con urti perfettamente elastici. La prima verifica sperimentale della legge fu effettuata solo cento anni più tardi. Furono anche questi i motivi per i quali molti scienziati contemporanei avevano ritenuto le teorie di Boltzmann inaccettabili: come ritenere valida una teoria fisica in assenza di prove sperimentali? Come dare credito a una teoria che si basava sull'esistenza di atomi che non erano mai stati visti? Ma Boltzmann era un genio e la sua mente aveva saputo vedere quello che gli esperimenti scientifici non erano ancora in grado di mostrare⁴.

“A new scientific truth does not triumph by convincing its opponents and making them see the light, but rather because its opponents eventually die” scrisse Max Planck⁵ per spiegare come la

⁴ Non è l'unico caso nella storia della fisica in cui l'intuizione precede le conferme sperimentali. Einstein prevede l'esistenza delle onde gravitazionali oltre mezzo secolo prima che la loro esistenza fosse confermata sperimentalmente. Tuttavia si sa che esistono, ma nessun rilevatore è stato ancora in grado di rilevarle.

⁵ Planck, Max. (1949). *Scientific Autobiography, and Other Papers* (pgs. 33-34). Trans. by Frank Gaynor. Philosophical Library.

termodinamica statistica e l'ipotesi atomica trionfarono sulle teorie di Ernst Mach e le altre degli energitisti, guidati da Ostwald. Le lezioni di Boltzmann, che sostituì Mach nel corso di filosofia naturale, ebbero un successo straordinario. Nonostante si tenessero nell'aula magna, i posti a sedere venivano tutti occupati e molti uditori dovevano assistere in piedi alle lezioni che spesso si concludevano con ovazioni. La fama di Boltzmann si diffuse velocemente, tuttavia molti scienziati continuarono a essere scettici sulle sue teorie o addirittura a rifiutarne del tutto la validità. Può darsi che sia stato questo uno dei motivi che spinsero Boltzmann a suicidarsi, oppure la depressione fu solo una conseguenza del suo carattere irrequieto e insoddisfatto.



Ludwig Boltzmann a 31 anni

Sulla sua tomba, nel cimitero di Vienna, è stata incisa la formula

$$S = k \log W,$$

scritta da Planck ma intuita da Boltzmann. S rappresenta l'entropia di un sistema, una funzione che aumenta man mano che il sistema passa da uno stato ordinato a uno più caotico, k è la costante di Boltzmann e W è la probabilità di uno stato microscopico. Per capirne il significato è necessario notare che in natura molte trasformazioni avvengono secondo un verso stabilito e mai al contrario. Ad esempio una tazzina di caffè lasciata sul tavolo cede energia all'ambiente circostante e si raffredda, ma non accade mai che una tazzina di caffè freddo prelevi calore dall'aria circostante per

scaldarsi. Anche un'auto che frena per fermarsi riscalda l'asfalto e non può succedere che acquisisca energia dall'asfalto per ripartire. Eppure questi fenomeni sarebbero in accordo con il primo principio della termodinamica, secondo il quale l'energia è una grandezza che si mantiene complessivamente costante: basterebbe che la quantità di calore ceduto fosse la stessa di quella ricevuta. Ma non succede. Il secondo principio della termodinamica fu scritto proprio per colmare l'inadeguatezza del primo principio nello spiegare l'irreversibilità di alcuni fenomeni e l'entropia, introdotta da Clausius, dà una misura del grado di irreversibilità. L'entropia di un sistema isolato non diminuisce mai (principio dell'aumento dell'entropia), al più resta costante se la trasformazione è reversibile, ma in caso di irreversibilità aumenta fino a raggiungere un valore massimo, situazione in cui il sistema ha raggiunto uno stato di equilibrio. In sostanza le trasformazioni reali avvengono spontaneamente solo nel verso che sia in accordo con il principio dell'aumento dell'entropia. Boltzmann ebbe l'intuizione di esprimere l'entropia in funzione della probabilità, nel senso che la reversibilità, nel caso di un numero grandissimo di molecole come quelle di un gas, non era impossibile, ma solo altamente improbabile. Ad esempio se prendiamo un mazzo di carte nuovo e cominciamo a mescolare, non è impossibile che le carte dopo un po' tornino ad essere tutte ordinate in scala, ma la probabilità che questo evento si verifichi è molto piccola. «Le persone efficienti, altamente organizzate, conducono una vita a bassa entropia: hanno un posto per tutto ciò che possiedono (minima incertezza) e impiegano poca energia per localizzare ogni cosa. Le persone inefficienti, disorganizzate, conducono, invece, una vita ad alta entropia: trovare qualcosa di cui hanno bisogno porta loro via del tempo prezioso con la probabilità che durante le ricerche il disordine aumenti, dal momento che anche la ricerca sarà condotta in maniera disorganizzata»⁶.



⁶ Cfr. [6] pag 287

La consapevolezza dell'esistenza di una funzione che cresceva sempre di più, assieme alla scoperta che gli scambi di energia tendevano inesorabilmente verso un equilibrio universale in cui tutto avrebbe avuto la stessa temperatura e non avrebbero più potuto verificarsi scambi termici, portarono alle nuove e temute cognizioni che scossero lo scenario scientifico a cavallo tra il XIX e il XX secolo: la «morte termica» e la «morte entropica» dell'universo. Il clima di instabilità attraversò tutto il mondo intellettuale. Ne *La Porta Santa*, inno scritto nel 1900 in occasione del Giubileo di passaggio secolo tra Otto e Novecento, anche Giovanni Pascoli trascrive in versi il diffuso timore che il Sole termini di illuminare la Terra:

*« Non ci lasciar nell'atrio
del viver nostro, avanti
la Porta chiusa, erranti
come vane parole;
ad aspettar che l'ultima
gelida e fosca aurora
chiuda alle genti ancora
la gran porta del Sole;
quando la Terra nera
giererà vuota, e ch'era
Terra s'ignorerà... ».*

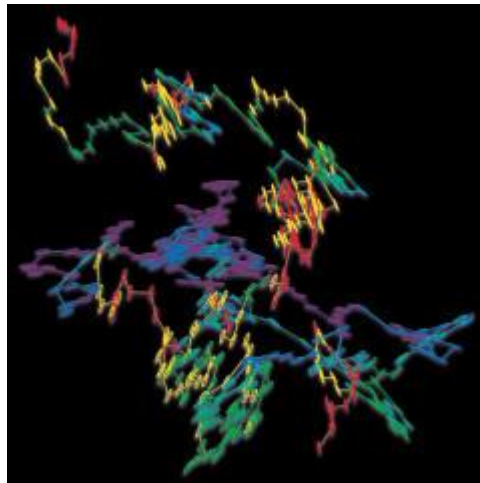
Il ponte ingegnoso che Boltzmann aveva costruito tra il punto di vista macroscopico di Clausius e Kelvin e il mondo microscopico, le sue straordinarie intuizioni e nuove interpretazioni della termodinamica in termini statistici, non furono sufficientemente resistenti da sostenere il peso dell'agguerrita opposizione dei suoi contemporanei e della tragedia per la morte del suo primogenito. Boltzmann si tolse la vita a Duino, in provincia di Trieste, il 5 settembre 1906: «sono consapevole di essere solo un individuo che lotta debolmente contro la corrente del tempo»⁷.

***«Ma gli amanti l'esausta natura in sé li riprende
di nuovo, come non ci fosse più altra forza per
questo compito»***

Rainer Maria Rilke , Elegie Duinesi, 1923

⁷ Cfr [5] pag. 62

Nel 1905 Einstein dette la conferma della fondatezza del modello atomico e molecolare. Lo studio del moto browniano, cioè del moto di particelle in sospensione in un liquido o in un gas, mostrò che il rapido movimento delle molecole non poteva essere dovuto a correnti che si creavano nel fluido a causa di differenze di temperatura, perché se così fosse stato, particelle vicine avrebbero dovuto avere una traiettoria simile. Invece i moti delle particelle erano del tutto indipendenti.



Moti browniani

Einstein calcolò lo spostamento quadratico medio dei corpuscoli: ne ottenne una funzione che dipende dalla costante dei gas perfetti, dal numero di Avogadro, dalla temperatura assoluta, dal tempo in cui avviene lo spostamento quadratico medio dei corpuscoli, dalla viscosità del liquido in cui i corpuscoli sono immersi, dal raggio dei corpuscoli supposti di forma sferica.

I passi compiuti da Boltzmann per spiegare il comportamento della materia non più secondo le leggi deterministiche di Newton, ma seguendo un'ottica probabilistica, contribuirono ad aprire un nuovo, imponente scenario della fisica: la meccanica quantistica.

«E' proprio perché tutto tende verso la morte

che la vita è un'eccezione che è necessario spiegare»

H. Poincaré, 1911⁸

⁸ Cfr. [8] pag. 139

Fonti

[1] AA.VV. - *An historical note on Ernst Mach*

<http://www.physics.umd.edu/~einstein/HONR228K/MachBoltzmann.pdf>

[2] AA.VV. – *Lucrezio*,

<http://www2.classics.unibo.it/Didattica/LatBC/IntroLucr.pdf>

[3] AA. VV. – *Testi integrali tradotti: Lucrezio*

www.latinovivo.com/Testintegrali/Lucrezindex.htm

[4] S. W. Angrist, L. G. Helper - *Order and Chaos – Laws of Energy and Entropy* (pg. 215). New York: Basic Books, 1967.

[5] A. Baracca, M. Fischetti, R. Rigatti - *Fisica e realtà 3: il mondo della fisica moderna*, Cappelli ed. 1999.

[6] Y. A. Cengel - *Termodinamica e trasmissione del calore*, McGraw-Hill 1997

[7] N.C. Datta - *The Story of Chemistry*, University Press, 2005

https://books.google.it/books?id=IIZkAvdFJhMC&pg=PA289&lpg=PA289&dq=maxwell+boltzmann+velocities+story&source=bl&ots=VNNY1J-zep&sig=oHiS2NEkCfY-gH_wlatG5z7zsqw&hl=it&sa=X&ved=0ahUKEwiH4-7EssPKAhVCLg8KHQcyAKgQ6AEILzAC#v=onepage&q=maxwell%20boltzmann%20velocities%20story&f=false

[8] A. Di Meo - *Circulus aeterni motus*, Piccola biblioteca Einaudi, 1996

[9] A. Eftekhari – *Ludwig Boltzmann*

http://philsci-archive.pitt.edu/1717/2/Ludwig_Boltzmann.pdf

[10] Enciclopedia Treccani

[http://www.treccani.it/enciclopedia/boltzmann-ludwig_\(Dizionario-delle-Scienze-Fisiche\)/](http://www.treccani.it/enciclopedia/boltzmann-ludwig_(Dizionario-delle-Scienze-Fisiche)/)

[11] M. Falcioni, A. Vulpiani – *Boltzmann: un tributo per i suoi 170 anni*,

<http://tnt.phys.uniroma1.it/twiki/pub/TNTgroup/AngeloVulpiani/Bolt-PRISTEM.pdf>

[12] D. Lindley - *Boltzmann's Atom: The Great Debate That Launched A Revolution In Physics*, The Free Press New York, 2001

<https://books.google.it/books?id=l3DkCgAAQBAJ&pg=PT181&lpg=PT181&dq=boltzmann+beethoven&source=bl&ots=Q000P2isJU&sig=2cOvV8cojxt0vHGiq4b-e9Rntj0&hl=it&sa=X&ved=0ahUKEwi0qaD98qnKAhXCGg4KHSHWAIQQ6AEIMDAD#v=onepage&q=boltzmann%20beethoven&f=false>

[13] G. Mussardo – *Boltzmann, il genio del disordine*,

http://people.sissa.it/~mussardo/Professional_web/History_of_science_files/Boltzmann-Pages.pdf

[14] M. Planck - *Scientific Autobiography, and Other Papers* (pgs. 33-34). Trans. by Frank Gaynor. Philosophical Library, 1949.

[15] K. R. Popper - *La ricerca non ha fine. Autobiografia intellettuale*, Armando ed., 1997.

https://books.google.it/books?id=atf72oHyeXgC&pg=PA173&lpg=PA173&dq=boltzmann+mach+vienna+filosofia&source=bl&ots=yU1S2r50Ln&sig=bh5Ws-gHMxWJmCUtIjglKMwN8CM&hl=it&sa=X&ved=0ahUKEwinx__A1lvKAhXGvA8KHcRGBqAQ6AEILzAD#v=onepage&q=boltzmann%20mach%20vienna%20filosofia&f=false

[16] H. C. von Baeyer - *Informazione. Il nuovo linguaggio della scienza*, Ed. Dedalo, 2003

<https://books.google.it/books?id=exq9ni9rEZEC&pg=PA117&lpg=PA117&dq=la+fama+di+boltzmann&source=bl&ots=L5XS904rPL&sig=648S6S5HYbwAnGPEQBNh8VmResk&hl=it&sa=X&ved=0ahUKEwjSzsQu5jKAhUL2ywKHxeKB-0Q6AEIRTAH#v=onepage&q=la%20fama%20di%20boltzmann&f=false>

[17] R. Zingales – *Il dibattito sull'atomismo e la struttura atomica*, 2008

http://math.unipa.it/~grim/dott_HD_MphCh/3_Struttura%20atomica_zingales.pdf