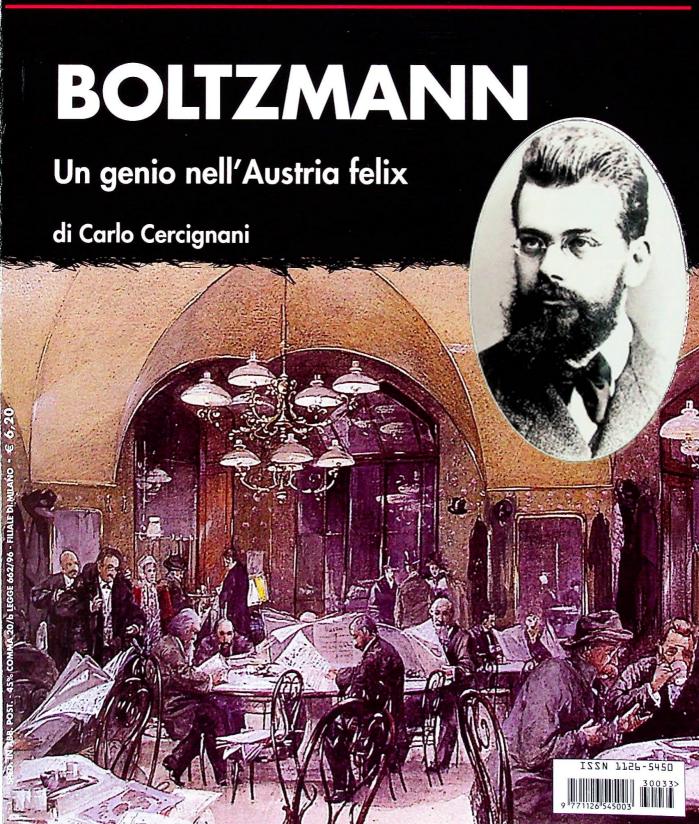
anno VI, n. 33, maggio 2003 LE SCIENZE

cdizione italiane di SCIENTIFIC

AMIERICAN

i grandi della scienza



Ludwig Boltzmann

sorprendente come la figura di Ludwig Boltzmann, geniale scienziato austriaco, sia meno nota di quella di altri fisici teorici del passato; e non parliamo soltanto di Einstein o Maxwell, ma anche di Planck, che, per varie ragioni, non si può considerare superiore a Boltzmann. Eppure a lui la scienza (e la filosofia) devono la spiegazione di come ci possa essere differenza tra passato e futuro in un mondo retto da leggi simmetriche rispetto all'inversione della direzione del tempo.

La sua fama resterà sempre ancorata a due contributi alla scienza: l'interpretazione della nozione di entropia come una misura matematicamente ben definita di quello che può chiamarsi il «disordine» degli atomi, e l'equazione detta, appunto, «di Boltzmann».

Questa equazione descrive le proprietà statistiche di un gas di molecole ed è storicamente la prima equazione che regola l'evoluzione di una probabilità. Dalla sua equazione Boltzmann ricavò, appunto, anche una dimostrazione dell'irreversibilità dei fenomeni macrosco-

È la diversità di scala fra gli oggetti, che osserviamo nella vita di tutti i giorni, e le molecole a spiegare l'irreversibilità attraverso le leggi del calcolo delle probabilità. Infatti un numero enorme di molecole ha un numero incredibile di interazioni (urti) in una dinamica che si svolge a distanze piccolissime (un milionesimo di millimetro, diciamo). Non osserviamo mai certe strane cose non perché sono vietate da qualche legge fisica, ma solo perché sono estremamente improbabili.

Nella fisica del tempo di Boltzmann il fatto che non si osservassero certi fenomeni era ascritto alla loro impossibilità, sancita dal famoso Secondo Principio della termodinamica. Al giorno d'oggi, seguendo Boltzmann, riteniamo che questo principio affermi solo l'improbabilità estrema di questi eventi.

La misura termodinamica del livello di probabilità di uno stato macroscopico è descritta dalla variabile entropia, legata alla probabilità dello stato microscopico da una relazione trovata da Boltzmann (da non confondere con l'equazione di Boltzmann, a cui si è fatto cenno) che si trova incisa sul suo monumento funebre

Invece che di probabilità si può parlare di misura del disordine degli atomi, perché gli stati disordinati equivalenti sono tanti e quindi è altamente probabile che uno di essi si realizzi.

Carlo Cercignani



Ludwig Boltzmann nel 1884, durante il periodo di insegnamento a Graz.

i grandi della scienza n. 33, maggio 2003

Boltzmann

i grandi della scienza

direttore Enrico Bellone Boltzmann: un genio nell'Austria felix

di Carlo Cercignani

Progetto grafico Marco Cattaneo Redazione Mara Venturini

Impaginazione e copertina Arti Grafiche New Litho

Stampa
Arti Grafiche Amilcare Pizzi S.p.A.
via A. Pizzi 14, Cinisello Balsamo (MI).
Marchio e denominazione SCIENTIFIC
AMERICAN e relativo logotipo sono
di esclusiva proprietà della società
Scientific American, Inc.

Copyright © 2003 by Le Scienze S.p.A. Piazza della Repubblica 8, 20121, MILANO

Printed in Italy - maggio 2003.

Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte dell'opera può essere riprodotta in qualsiasi forma o rielaborata con l'uso di sistemi elettronici o diffusa senza l'autorizzazione scritta dell'editore.

> Direttore Responsabile: Carlo Caracciolo; Registrazione del Tribunale di Milano n. 39 del 24 gennaio 1998.

LE SCIENZE SCIENTIFIC

Piazza della Repubblica, 8 - 20121 MILANO Telefono: (02) 29001753 r.a. Fax: 6552908

Direttore
Enrico Bellone
Redazione
Marco Cattaneo (vicedirettore),
Adriana Giannini (caporedattore),
Elena Bernacchi, Gianbruno Guerrerio.
Giovanna Salvini (grafica)
Massimo Scaglione

Segreteria di redazione Luisa Degli Esposti (responsabile) Giovanna Corona

Responsabile dei servizi pubblicitari Luigi Costa

Pubblicità: A. Manzoni & C. S.p.A. Via Nervesa, 21 - 20139 MILANO Telefono: (02) 574941.

Distribuzione per l'Italia SO.DI.P. Società di Diffusione Periodici «Angelo Patuzzi» S.p.A. Via Bettola, 18 20092 Cinisello Balsamo (MI).

Copyright © 2003 by Le Scienze S.p.A. Piazza della Repubblica 8, 20121 M1LANO

1. Ludwig Boltzmann

4. I processi irreversibili

Ludwig Boltzmann fu il primo scienziato a trovare una teoria convincente per spiegare l'irreversibilità di taluni fenomeni

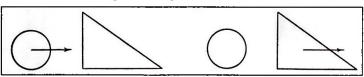
10. Breve storia della teoria cinetica dei gas

La prima teoria si deve a Democrito (V secolo a.C.), ma solo con Daniel Bernoulli, nel Settecento, vennero poste le basi della moderna conoscenza



17. L'equazione di Boltzmann

Quella che porta il nome dello scienziato è la prima equazione che sia stata scritta per descrivere l'evoluzione nel tempo di una probabilità



23. Il giovane Boltzmann e l'Austria imperiale

I primi incarichi e il matrimonio: vita di un professore universitario tra Vienna e Graz nella società austriaca all'epoca di Francesco Giuseppe

34. Boltzmann a Graz: le prime pubblicazioni

Con i primi testi dedicati ai gas, alla fine degli anni settanta, lo scienziato pose le basi della sua futura notorietà internazionale



un genio nell'Austria felix

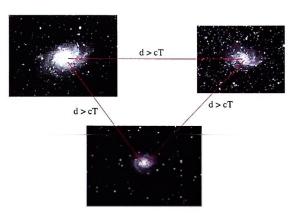
i grandi della scienza n. 33, maggio 2003

41. L'inizio della crisi

Tensioni, dispiaceri e troppe responsabilità nell'ateneo di Graz condussero Boltzmann a Berlino, mentre la morte del figlio lo precipitava nello sconforto

47. Nuovi anni viennesi

Il trionfale ritorno in patria non placò le inquietudini dello scienziato: una nuova partenza per Lipsia, il secondo ritorno a Vienna e le polemiche con Zermelo



54. Il Boltzmann «filosofo»

Lo stretto legame tra scienza, matematica e filosofia ispirò il lavoro negli ultimi due decenni della vita dello scienziato

64. I viaggi e gli incontri

Nel corso della sua carriera di scienziato, Boltzmann venne conosciuto e apprezzato da studiosi del calibro di Max Planck e Albert Einstein

72. L'Austria negli ultimi anni di vita di Boltzmann

Il periodo a cavallo tra XIX e XX secolo vide a Vienna il fiorire delle arti e della cultura, ma svelò anche l'esistenza di alcuni profondi malesseri sociali

84. Nella mente di un genio

Boltzmann fu apprezzato come insegnante, come scienziato e come filosofo, ma quali erano le sue idee politiche e che cosa, infine, lo portò al suicidio?

92. Note biografiche

94. Letture consigliate Crediti fotografici

Carlo CERCIGNANI è ordinario di meccanica razionale al Politecnico di Milano, socio nazionale dell'Accademia Nazionale dei Lincei, membro effettivo dell'Istituto Lombardo e membro straniero dell'Accademia delle Scienze di Parigi. Medaglia d'oro dei benemeriti della Scienza e della Cultura, è noto in Italia all'estero per i suoi studi sull'equazione di Boltzmann e le sue applicazioni. È autore di oltre 250 lavori a stampa e di numerose monografie. E membro dei comitati di redazione di varie riviste scientifiche.



In copertina

Ludwig Boltzmann professore a Graz e, sullo sfondo, un tipico caffe viennese in una stampa del secondo Ottocento.

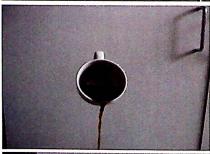
L'editore si scusa per eventuali involontarie omissioni o errori di attribuzione delle illustrazioni e dichiara la propria disponibilità nei confronti degli aventi dintto.

I processi irreversibili

Ludwig Boltzmann fu il primo scienziato a trovare una teoria convincente per spiegare l'irreversibilità di taluni fenomeni









Caduta di una tazzina di caffè: gli eventi non possono svolgersi a ritroso nel tempo.

esistenza di processi irreversibili è ben nota dalla vita di tutti giorni. Il tempo scorre e non può essere «percorso» all'indietro. Questo vale non solo per gli esseri viventi, ma anche per gli oggetti di dimensioni macroscopiche. Tutte le volte che si proietta un film a rovescio si suscita ilarità: e non solo perché le persone camminano all'indietro. Pensiamo infatti a un film che mostra una tazzina di caffè che cade per terra e si rompe sparpagliando per terra il suo aromatico e fumante contenuto e a che cosa vedremmo proiettando il film all'indietro.

Ora, il fatto strano è che tutte le leggi fondamentali della fisica sono simmetriche rispetto all'inversione dello scorrere del tempo: la tazzina che si ricompone e va verso l'alto non viola nessuna legge della meccanica.

Non è il caso di insistere ulteriormente su questo esempio, ma possiamo leggerne un altro, che risale al 1874 ed è dovuto alla penna di William Thomson (Lord Kelvin). In un lavoro del 1874, che contiene una parte sostanziale della teoria fisica moderna dell'irreversibilità, Thomson nota, infatti, che nella dinamica delle molecole l'inversione istantanea del moto di tutte le particelle fa sì che il sistema si muova all'indietro ripercorrendo il cammino precedente e che ogni molecola riprenda in ogni punto la stessa velocità con cui vi era passata precedentemente: «Cioè, in linguaggio matematico, ogni soluzione rimane tale quando si cambia t in -t»! Anche senza invocare la termodinamica, si assisterebbe a fenomeni paradossali dal punto di vista del senso comune: «La bolla di schiuma che sta scoppiando ai piedi d'una cascata si riunirebbe e ricadrebbe nell'acqua; i moti termici riconcentrerebbero la loro energia e la rimanderebbero su per la cascata in gocce a rigenerare una colonna compatta d'acqua che sale». Il calore (che era stato generato dall'attrito ed era stato dissipato per conduzione e radiazione) si riconcentrerebbe nel punto dove ha battuto un corpo caduto in terra e fornirebbe tutta l'energia necessaria a far rimbalzare il corpo fino al punto da cui aveva cominciato a cadere. «I massi recupererebbero dal fango i materiali richiesti a ricostruire se stessi nelle loro precedenti forme seghettate e si riunirebbero sul picco della montagna, da cui si erano precedentemente staccati. E se anche l'ipotesi materialistica della vita fosse vera, le creature viventi procederebbero all'indietro, con una conoscenza cosciente del futuro, ma senza memoria del passato, e diverrebbero di nuovo non nati».

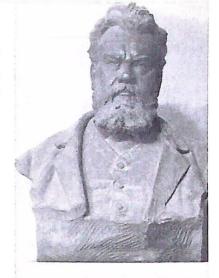
Nota però il futuro Lord Kelvin, che «se nessuna influenza selettiva [...] guida le singole molecole, il risultato netto dei loro moti liberi e degli urti deve essere tale da ripartire l'energia in maniera grosso modo eguale fra di esse...» e l'impossibilità di osservare macroscopicamente fenomeni che scorrono al contrario di quelli effettivamente osservati è, in ultima analisi, dovuta al grande numero delle molecole presenti anche in volumi macroscopicamente piccoli.

Il contributo di Boltzmann

Il primo a dare una spiegazione quantitativa convincente di questo apparente paradosso fu appunto (due anni prima dell'articolo di Thomson che abbiamo



A sinistra: William Thompson, ovvero Lord Kelvin of Largs (1824-1907). A destra: il busto dello scienziato esposto all'Università di Vienna tra i grandi della scienza.



Ludwig Boltzmann
geo 1811 gest 2006
Processor der Mathematik

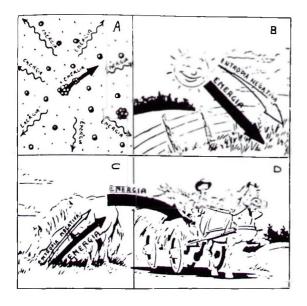
appena citato) Ludwig Boltzmann, uno dei maggiori protagonisti dello sviluppo della teoria atomica.

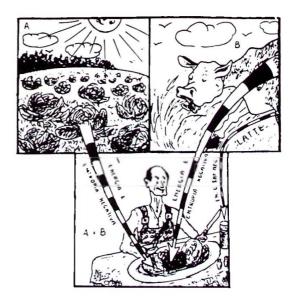
La teoria di Boltzmann ci dice che l'entropia, cioè il disordine, dell'Universo tende sempre ad aumentare. Queste cose hanno a che fare con la nostra vita più di quanto si possa pensare. Il nostro metabolismo (dal greco μεταβαλλειν) ovvero il nostro scambio con l'esterno, era inteso (e lo è, grossolanamente!) come uno scambio di materiale. Successivamente si è pensato all'energia (le famose calorie). In effetti per un bambino che cresce o per una persona che, ahimè, ingrassa, lo scambio materiale è importante; e lo scambio energetico è importante per farci camminare e compiere altre attività fisiche (come per esempio mangiare e digerire).

Ma che cosa scambiamo per mantenerci in vita? Non l'energia, che viene consumata in lavoro o sudore (spesso insieme), ma entropia. Più esattamente entropia negativa: ovvero cediamo entropia per mantenere ordinato il nostro stato. Da dove viene questa entropia negativa? Dai cibi, che sono tutti di origine vegetale o animale (escludiamo per semplicità inedicine e cibi prodotti artificialmente, in cui evidentemente l'ordine viene introdotto dal processo di fabbricazione). E da dove viene l'entropia negativa dei cibi? Da altri cibi, se sono di origine animale. Ma alla fine si arriva sempre alle piante. Da dove viene l'entropia negativa delle piante? La risposta è: dal Sole, attraverso la fotosintesi clorofilliana (che è il modo di «mangiare» delle piante).

Il Sole, questa energia concentrata ad alta temperatura, invia luce con entropia molto bassa che viene sfruttata dalle piante. Nelle parole di Boltzmann stesso: «La lotta universale per l'esistenza degli esseri animati non è quindi una lotta

Sotto, da sinistra a destra: il Sole fornisce energia ed entropia negativa ai vegetali, e quindi anche agli erbivori; l'energia ed entropia negativa passano dai vegetali e dagli erbivori all'uomo.

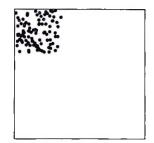


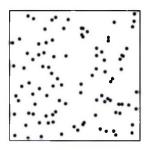


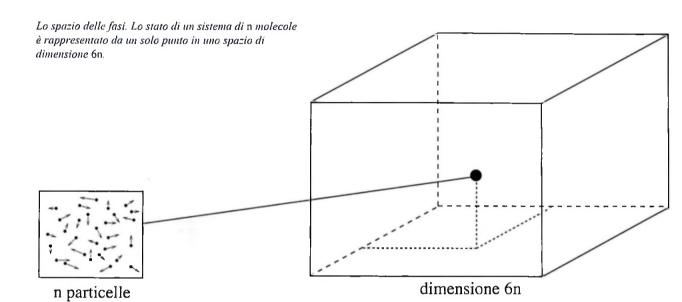
Ludwig Boltzmann: un genio nell'Austria felix

Sequenze temporali probabili e improbabili. In due istanti di tempo diversi le molecole di un gas dentro un recipiente si trovano nelle posizioni indicate nei due quadrati.

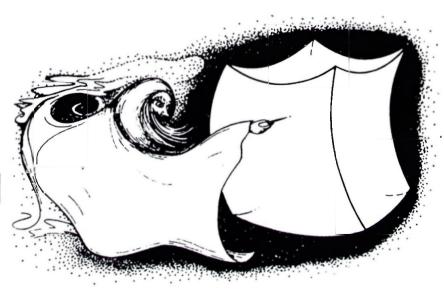
La probabilità che l'istante a cui si riferisce la prima figura sia anteriore a quello a cui si riferisce la seconda è enorme.







Il problema dell'estrema improbabilità dello stato iniziale dell'universo è raffigurato da questo disegno, pubblicato da Roger Penrose in un suo libro. per i materiali grezzi... né per l'energia che esiste in abbondanza in ogni corpo in forma di calore (per quanto sfortunatamente non trasformabile), ma una lotta per l'entropia, che diviene disponibile attraverso il trasferimento dell'energia dal sole caldo alla terra fredda. Per sfruttare al massimo questo trasferimento, le piante aprono la superficie immensa delle loro foglie e forzano l'energia solare, prima che scenda alla temperatura della terra, a effettuare... sintesi chimiche... I prodotti di questa cucina chimica sono oggetto della lotta del mondo animale.».



Ma, si dirà, se l'entropia continua ad aumentare nell'universo, doveva essere molto bassa al momento del grande *big bang* che ha dato inizio a ogni cosa.

Sembra proprio che le cose stiano così. Quando l'universo era una piccola sfera di fuoco primordiale, in cui è improbabile ci fosse, come immagina invece Calvino nella novella Tutto in un punto delle Cosmicomiche, una signora Ph(i)Nk° che esclamava: «Ragazzi, avessimo un po' di spazio, come mi piacerebbe farvi le tagliatelle!», l'ordine doveva essere molto elevato, l'entropia molto bassa.

Roger Penrose ha calcolato che la probabilità di uno stato così ordinato sia l'inverso di un numero, il cui numero di cifre è dato da 1 seguito da 123 zeri!

Benché le concezioni di Boltzmann siano alla base della nostra comprensione dell'universo, tutte le volte che dobbiamo collegare la descrizione microscopica con quello che vediamo a occhio nudo e sperimentiamo nella vita d'ogni giorno, c'è ancora una sorprendente confusione anche tra gli scienziati sul livello di rigore di queste idee. Questa confusione, indubbiamente dovuta all'originalità della visione che Boltzmann ha creato (e anche a qualche oscurità dei suoi primi lavori), perpetua al giorno d'oggi le obiezioni sollevate dai suoi contemporanei. In effetti queste obiezioni si sono dimostrate tutte infondate e basate su incomprensioni di quel che viene affermato. Al giorno d'oggi si possiedono rigorosi teoremi matematici che dimostrano il significato e la correttezza della visione di Boltzmann.

Studiando questioni come quelle affrontate da Boltzmann, ci rendiamo conto di come capire le leggi che regolano gli aspetti microscopici della fisica non sia equivalente a comprendere le cose significative del mondo, a cui assistiamo nella vita di tutti i giorni. Le dimensioni ridottissime dei costituenti fanno sì che non si possa dedurne immediatamente un'immagine del mondo a livello macroscopico. Ci sono gerarchie di strutture e occorrono nuovi concetti a ogni livello. Anche se la realtà è fatta di atomi (o di cose ancora più piccole) è troppo difficile descrivere quel che avviene nel mondo in questi termini. Quello che possiamo fare è stabilire un ponte tra i vari livelli per formare un quadro coerente; tutto il lavoro di Boltzmann è un esempio magistrale di questo modo di procedere, di costruire, cioè, partendo dagli atomi, una descrizione valida per la vita di tutti i giorni.

Dall'infanzia all'equazione famosa

Non sappiamo perché Gottfried Ludwig Boltzmann, nato a Berlino nel 1770, si sia trasferito a Vienna da giovane per divenirvi orologiaio e costruttore di carillon. Nella capitale austriaca si sposò ed ebbe un figlio, Ludwig Georg, che divenne un impiegato delle imposte, e sposò Maria Pauernfeind, figlia di un mercante di Salisburgo, nel 1837.

Il primo figlio di Ludwig Georg, Ludwig Eduard Boltzmann, nacque il 20 febbraio 1844 a Vienna. Sarebbe diventato il grande fisico di cui ci occupiamo. La notte della sua nascita segnava proprio il passaggio tra il Martedì Grasso e il Mercoledì delle Ceneri. Boltzmann era solito dire che la sua data di nascita era la ragione per cui il suo temperamento poteva passare così improvvisamente da una grande gioia a una depressione profonda.

Due anni più tardi gli nacque un fratello, Alberto, che però morì di polmonite mentre faceva le scuole medie. Ebbe anche una sorella, Hedwig. Tutti e tre i figli furono battezzati nell'ambito della religione cattolica della madre, mentre gli antenati dal lato paterno erano protestanti.

L'educazione di Boltzmann a livello di scuola elementare venne effettuata da un tutore privato in casa dei suoi genitori. Lo stipendio non elevato del padre era infatti compensato dalla ricchezza della madre, che proveniva da una famiglia di condizioni assai agiate (a Salisburgo c'è ancora una Pauernfeindgasse e anche una Pauernfeindstrasse).

Suo padre fu trasferito a Wels e in seguito a Linz, dove Boltzmann iniziò il Ginnasio, risultando quasi sempre il primo della classe e dimostrando grande entusiasmo per la matematica e altre scienze. È alle lunghe sere passate a studiare a uno scarso lume di una candela di sego che più tardi Boltzmann attribuirà il deterioramento della vista di cui soffrì negli ultimi anni di vita. A Linz prese anche lezioni di piano da Anton Bruckner (nientedimeno!); le lezioni cessarono quando la madre del futuro scienziato fece un'osservazione sfavorevole sul fatto che il maestro aveva appoggiato il suo impermeabile bagnato su un letto. Comunque Boltzmann continuò a suonare il piano per tutta la vita, perfezionandosi, e in seguito accompagnava regolarmente il figlio Arthur Ludwig, che suonava il violino.

Quando Boltzmann aveva quindici anni, suo padre morì di tubercolosi; il tragico evento lasciò un'impronta indelebile sul ragazzo. A diciannove anni il futuro scienziato si iscrisse all'Università di Vienna come studente di matematica e fisica. L'Istituto di fisica era stato fondato solo 14 anni prima da Christian Doppler (lo scopritore dell'effetto Doppler) e godeva di un'ampia autonomia nell'ambito dell'ateneo viennese.



ll maestro di Boltzmann, Josef Stefan (1835-1893) e, sotto: l'Imperial Regio Istituto di fisica a Erdberg.





Boltzmann nel 1868, assistente a Vienna.

Andreas von Ettingshausen (1796-1878) aveva appena lasciato la direzione a Josef Stefan (1835-93). Boltzmann apprezzava particolarmente il contatto stretto che quest'ultimo aveva con gli studenti. Su questo punto scrisse una frase, che viene spesso citata: «Quando strinsi maggiormente i miei contatti con Stefan, la prima cosa che avvenne fu che mi dette una copia del trattato di Maxwell e, dato che, a quel tempo, non conoscevo l'inglese, mi dette anche una grammatica di questa lingua». Boltzmann aveva già un dizionario, ereditato dal padre.

Più tardi Boltzmann avrebbe preso lezioni di pronuncia inglese da una certa Miss O'Callaghan, e questo gli dette successivamente il coraggio di tenere lezioni in inglese, quando venne invitato in America. Sapeva abbastanza bene il francese, che era la lingua principalmente usata dall'aristocrazia viennese; leggeva correntemente l'italiano e lo parlava in maniera sufficiente a farsi capire.

Tre anni dopo l'iscrizione, Boltzmann otteneva il dottorato (dopo aver già pubblicato due lavori), e l'anno successivo (1867) diveniva assistente. Fece così amicizia con Josef Loschmidt, che già lavorava all'Istituto di fisica. Questo istituto aveva solo un piccolo laboratorio in una casa al numero 15 di Erdbergerstrasse, ma i suoi membri erano pieni di idee.

In seguito Boltzmann scrisse alcune considerazioni su questo gruppo:

«Erdberg è rimasta per tutta la mia vita un simbolo del lavoro sperimentale onesto e ispirato. Quando riuscii a insufflare un po' di vita nell'Istituto di Graz, lo chiamavo per scherzo Piccola Erdberg. Non che intendessi dire che lo spazio fosse poco, perché era anzi probabilmente il doppio di quello dell'Istituto di Stefan; ma non ero riuscito ancora a eguagliare lo spirito di Erdberg. Anche a Monaco, quando i giovani laureati venivano a dirmi che non sapevano su che cosa lavorare, pensavo: Com'eravamo diversi ad Erdberg! Oggi ci sono delle belle apparecchiature sperimentali e la gente va in cerca di idee per usarle. Noi avevamo sempre idee in abbondanza e ci preoccupavamo solo della mancanza di apparecchiature.».

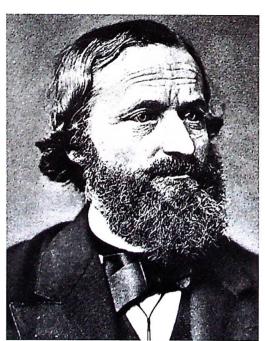
In effetti, l'istituto diretto da Stefan doveva essere all'avanguardia, come risulta da una lettera di Maxwell a Loschmidt.

All'età di soli venticinque anni, nel 1869, Boltzmann ottenne la Cattedra di fisica matematica all'Università di Graz. Questo ateneo era in un periodo di sviluppo impetuoso, tanto da raggiungere i livelli delle maggiori università europee del tempo. A Graz Boltzmann era infatti divenuto collega di August Toepler, il direttore dell'istituto, arrivato lì un po' prima di lui. Toepler, una persona molto cordiale e attiva nell'amministrazione, divenne grande amico e consigliere di Boltzmann.

Fin dal suo arrivo a Graz, Toepler pianificò, lavorò e lottò per avere un nuovo edificio, che divenne presto una realtà e anche piuttosto famoso, dotato com'era di nuove apparecchiature e finanziato con fondi molto maggiori rispetto a quanto fatto sino a quel momento. Cominciò così per il giovane scienziato un periodo di intensa attività, che culminò nel 1872 nella pubblicazione sugli «Atti dell'Accademia Imperiale delle Scienze» di Vienna dell'articolo dal titolo poco informativo di *Ulteriori ricerche sull'equilibrio termico delle molecole d'un gas.* È in questo lavoro che viene introdotta la celebre equazione, detta, appunto, di Boltzmann.

In quegli anni, oltre alle sue idee teoriche, egli sviluppava anche uno studio sperimentale sulla relazione tra la costante dielettrica e l'indice di rifrazione, che pubblicò nel 1873. Nel suo discorso in memoria di Josef Loschmidt, Boltzmann racconta il seguente aneddoto collegato a quel periodo: «A quel tempo avevo in mente di fare esperimenti con sfere di cristalli di zolfo. Poiché non c'era nessuno che potesse

smerigliare queste sfere, [Loschmidt] propose di farlo insieme mentre facevamo la coda per comprare i biglietti al Burgtheater. Sperava anche che il solfuro di carbonio, che volevamo usare, riuscisse a far fuggire le persone in coda.».



Gustav Kirchhoff (1811-1899), con cui il giovane Boltzman s'incontrava a Berlino e parlava di scienza.

Grazie ai fondi ottenuti da Toepler, Boltzmann aveva l'abitudine di prendere brevi congedi per lavorare col famoso chimico Robert Wilhelm Bunsen (1811-99) e con il matematico Leo Königsberger (1837-1921) a Heidelberg e con Gustav Kirchhoff (1824-87) e Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-94) a Berlino. Nel gennaio 1872 Ludwig Boltzmann scrisse a sua

madre:

«leri ho parlato alla Società di Fisica di Berlino. Puoi immaginare come abbia cercato di fare del mio meglio per non mettere sotto cattiva luce la mia Patria. Quindi, nei giorni precedenti, la mia testa era piena di integrali... Tra parentesi non c'era bisogno di un tale impegno, perché la maggior parte degli ascoltatori non avrebbero comunque capito il mio discorso. Era presente però anche Helmholtz e tra me e lui si è sviluppata una discussione interessante. Dato che sai quanto mi piacciano le discussioni scientifiche, puoi immaginarti la mia felicità. Soprattutto perché Helmholtz non è molto accessibile altrimenti. Benché abbia sempre lavorato nel laboratorio vicino a me, non avevo ancora parlato molto con lui».

Da un punto di vista scientifico aveva una grande stima di Helmholtz, anche se i modi del Consigliere Segreto prussiano lo raffreddavano alquanto. Una volta Boltzmann disse: «Su certi problemi posso parlare solo con una persona e questa è Helmholtz, ma sta troppo lontano.». Però scrive anche: «A quel tempo non sospettavo che fosse sconveniente che un visitatore, uno che era lì per imparare, si unisse alla discussione col normale tono di voce. Proprio il primo giorno nel laboratorio di Berlino quando parlai innocentemente al mio solito modo, un solo sguardo di Helmholtz mi spiegò la situazione. Quando cercai di descrivere quello sguardo a Glan, che era lì allora come assistente, mi rispose orgogliosamente: "Oui sei a Berlino!"».



Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894).



Nelle due immagini vedute della città di Berlino: sopra la Porta di Brandeburgo e a sinistra il Teatro dell'Opera. Boltzmann, appassionato di musica classica, lo frequentava assiduamente.

Breve storia della teoria cinetica dei gas

La prima teoria si deve a Democrito (V secolo a.C.), ma solo con Daniel Bernoulli, nel Settecento, vennero poste le basi della moderna conoscenza

in dal 1738 Daniel Bernoulli avanzò l'idea che i gas sono formati da molecole elastiche che corrono qua e là a grande velocità, urtandosi e rimbalzando secondo le leggi della meccanica più elementare. Naturalmente, questa idea non era completamente nuova perché diversi filosofi greci avevano asserito che tutti i corpi sono fatti di particelle in movimento anche quando i corpi stessi appaiono mantenere uno stato di quiete.

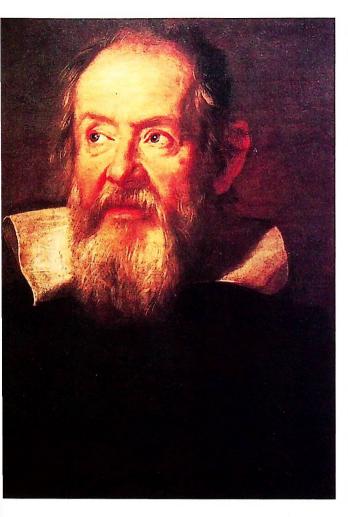
La prima teoria atomica è in effetti attribuita a Democrito di Abdera, che visse nel V secolo a.C. Venne in seguito sostenuta da altri filosofi come Leucippo (vissuto nello stesso secolo) e, attraverso Epicuro (341-270 a.C.), venne trasmessa ai Romani. L'esposizione più completa delle idee degli antichi è il famoso poema di Lucrezio (99-55 a. C.), De Rerum Natura (Sulla natura delle cose).

Nel Medioevo alcuni pensatori arabi accettarono la teoria atomica, che venne, al contrario, combattuta duramente dai teologi della Scolastica, in quanto ritenuta in contrasto col dogma della transustanziazione.

Da sinistra a destra: Daniel Bernoulli (1700-1782) pose le basi d''una teoria cinetica quantitativa, dimostrando che la pressione d'un gas perfetto era dovuta all'energia cinetica delle molecole; il filosofo greco Democrito, atomista dell'antichità.









Durante il Rinascimento, idee collegate all'atomismo ricorrono negli scritti di Giordano Bruno (1548-1600), Galileo Galilei (1564-1642) e Francesco Bacone (1561-1626).

Successivamente il filosofo francese Petrus Gassendi (1592-1655) considerò l'idea della costituzione atomica della materia un punto fondamentale della sua filosofia.

Come abbiamo detto, però, fu solo con Daniel Bernoulli (1700-1782) che l'idea penetrò nell'ambito della scienza, con una spiegazione dell'origine della pressione, e dette origine alla teoria cinetica dei gas. L'idea nuova era che l'effetto meccanico delle molecole in moto quando colpiscono una parete solida coincide, appunto, con quella che viene comunemente chiamata pressione del gas. In effetti, se fossimo guidati soltanto dall'ipotesi atomica, potremmo pensare che la pressione sia prodotta da una forza repulsiva delle molecole.

Benché lo schema di Bernoulli sia in grado di render conto delle proprietà elementari dei gas (compressibilità, tendenza a espandersi, aumento della temperatura in una compressione e sua diminuzione in un'espansione, tendenza verso l'uniformità o verso l'omogeneità spaziale), non si poteva averne un'opinione definita finché non ne fosse stato fatto uno studio quantitativo. Lo sviluppo effettivo della teoria cinetica dei gas ebbe luogo, di conseguenza, molto più tardi, nel XIX secolo.

Quando non specificheremo altrimenti, in questa esposizione penseremo, per semplicità, alle molecole di un gas come a sfere perfettamente omogenee, rigide ed elastiche, che si muovono secondo le leggi della meccanica classica. Così, se sulle molecole non agiscono forze esterne come, per esempio, la gravità terrestre esse si muoveranno in linea retta, a meno che si urtino tra loro o colpiscano una parete solida. Sistemi di questo tipo sono spesso chiamati biliardi, per ovvie ragioni. Supporremo anche che le sfere siano perfettamente lisce, cosicché il

Da sinistra a destra: anche Galileo Galilei (1564-1642) riteneva discreta la struttura della materia; il filosofo inglese Francesco Bacone (1561-1626).

loro eventuale moto rotatorio intorno a un asse passante per il centro sia trascurabile (in quanto immutabile); la velocità del centro sarà chiamata velocità della molecola, senza ulteriori precisazioni.

Solo quando si parla di molecole poliatomiche, ci si allontana in maniera significativa da questo modello di gas.

Benché le regole che generano la dinamica di questi sistemi siano facili da descrivere, i fenomeni associati con questa dinamica non sono così semplici; sono anzi piuttosto difficili da capire, specialmente se si è interessati al comportamento asintotico del sistema su tempi molto lunghi (proprietà ergodiche) o nel caso in cui il numero delle sfere sia assai grande (limiti cinetico e fluidodinamico). Ambedue questi aspetti della dinamica di un sistema di sfere rigide sono importanti quando si ha a che fare con un gas, ma di solito saremo più interessati al problema del comportamento del sistema quando il numero delle molecole è molto grande, a causa del fatto che ci sono, come è noto, all'incirca 2,7·10¹9 molecole in un centimetro cubo di gas alla pressione atmosferica e alla temperatura di 0°C.

Dato il numero enorme di particelle da considerare, è, naturalmente, insensato tentare di descrivere il gas specificandone il cosiddetto stato microscopico, cioè la posizione e la velocità di ogni singola sfera, e dobbiamo fare ricorso a metodi statistici. Questo tipo di descrizione è reso possibile dalla circostanza pratica seguente: ciò che tutte le nostre osservazioni tipiche possono misurare sono cambiamenti dello stato macroscopico del gas, descritto da grandezze come la densità, la velocità (per esempio del vento), la temperatura, gli sforzi di pressione e viscosi, le correnti termiche, che si possono collegare a opportuni valori medi delle grandezze che descrivono lo stato microscopico. Un esempio semplice, la cui idea di base è contenuta nel lavoro di Bernoulli, di cui abbiamo parlato, è fornito da un calcolo elementare della pressione di un gas contenuto in un recipiente in uno stato di quiete a temperatura costante. Questo calcolo è il prototipo dei calcoli che si possono fare in teoria cinetica.

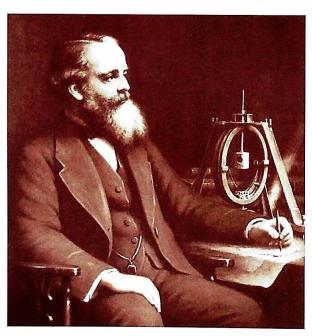
A questo punto, però, si deve considerare una prima questione di principio. Se conoscessimo esattamente la posizione e la velocità di ogni molecola del gas a un certo istante di tempo, la successiva evoluzione del sistema sarebbe completamente determinata, secondo le leggi della meccanica; ma, anche se facciamo

l'ipotesi (lecita) che in un certo momento le posizioni e le velocità delle molecole soddisfino certe leggi statistiche, non siamo affatto autorizzati a ritenere che lo stato del gas si mantenga conforme alle stesse ipotesi statistiche.

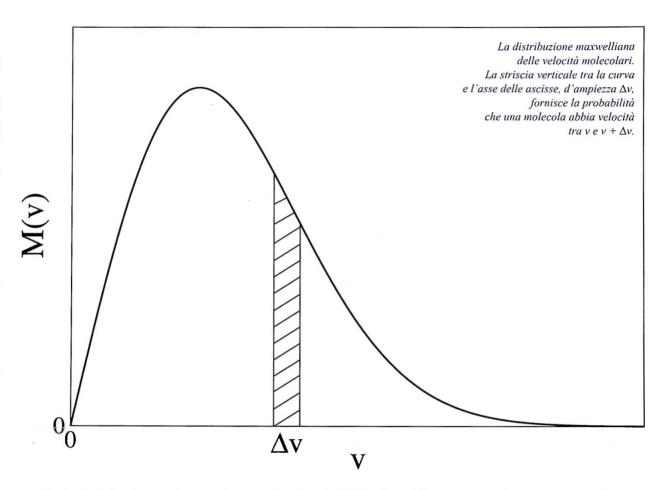
Questioni di questo tipo sono sorte fin dagli albori della codificazione della materia; oggi questi argomenti sono abbastanza ben capiti e sta emergendo una teoria cinetica dei gas matematicamente rigorosa. L'importanza di questi sviluppi nasce non solo dalla necessità di dare un fondamento accurato a una teoria fisica così fondamentale, ma anche da quella di fornire un prototipo delle strutture matematiche basilari per una teoria dei fenomeni di non equilibrio in sistemi di dimensioni macroscopiche.

Ritornando alla preistoria della teoria cinetica dei gas, possiamo osservare che la teoria proposta da Bernoulli venne poco dopo riproposta indipendentemente dal ginevrino George Louis Lesage (1724-1803), che, però, dedicò la maggior parte del suo lavoro alla spiegazione della gravitazione universale in termini d'urti tra gli atomi. Poi John Herapath (1790-1869), nel suo *Mathematical Physics*, pubblicato nel 1847, fece un'applicazione più estesa della teoria, e James Prescott Joule (1818-1889) fece una prima stima della velocità di una molecola d'idrogeno. Un lavoro di K. Krönig (1822-1879) ebbe il ruolo importante di attira-

re l'attenzione di Rudolf Clausius (1822-1888) sull'argomento. Con lui la teoria cinetica entrò in uno stadio più avanzato, con la spiegazione del primo principio della termodinamica in termini cinetici e l'introduzione del concetto di libero cammino medio (il cammino percorso, in media, da una molecola fra due urti successivi). Nello stesso anno, facendo uso dello stesso concetto, James Clerk Maxwell (1831-1879) sviluppò una teoria preliminare dei fenomeni di trasporto



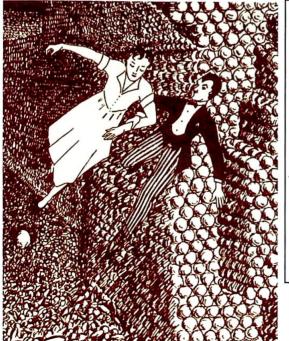
Il grande fisico scozzese James Clerk Maxwell (1831-1879), molto noto per le equazioni che stanno alla base dell'elettromagnetismo, fece fare grandi passi avanti alla teoria cinetica, arrivando molto vicino all'equazione di Boltzmann.

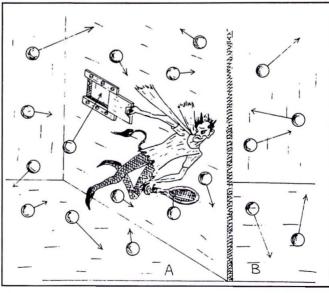


e fornì una derivazione molto euristica della funzione di distribuzione delle velocità che porta il suo nome.

Maxwell, però, si rese immediatamente conto che il metodo del libero cammino medio era inadeguato come fondamento della teoria cinetica e nel 1867 scoprì un metodo molto più accurato, basato sulle equazioni di trasferimento (transfer equations), e si accorse delle proprietà particolarmente semplici di un modello molecolare, secondo il quale le molecole sono punti materiali (non quindi sfere rigide) che interagiscono con una forza repulsiva inversamen-

Sotto: due versioni del famoso «diavoletto di Maxwell», a sinistra mentre trascina Maud alla superficie di un bicchiere di whisky e a destra dotato di racchetta da tennis. Entrambe le raffigurazioni si devono al noto fisico teorico e divulgatore scientifico George Gamow.







Un ritratto giovanile del geniale fisico francese Sadi Carnot, che scoprì il secondo principio prima della formulazione del primo.

Il fisico Peter Guthrie Tait (1831-1901).

te proporzionale alla quinta potenza della loro distanza (tali molecole fittizie si chiamano comunemente molecole di Maxwell).

Nello stesso lavoro Maxwell dette anche una giustificazione migliore della sua formula per la funzione di distribuzione delle velocità per un gas in equilibrio.

Con le sue equazioni di trasferimento, egli era giunto a un passo da un'equazione di evoluzione per la funzione di distribuzione, ma quest'ultimo passo deve essere senz'altro attribuito a Boltzmann, come vedremo ben presto. L'equazione in questione viene perciò chiamata di solito equazione di Boltzmann, ma talvolta anche di Maxwell-Boltzmann, per riconoscere il ruolo importante giocato da Maxwell nella sua scoperta.

Rimaneva, comunque, non risolto l'importante problema di ricavare il secondo principio della termodinamica. Come è noto, questo principio viene spesso diviso in due parti, a seconda che si considerino soltanto processi reversibili o anche processi irreversibili. L'idea moderna di irreversibilità nei processi fisici è in effetti basata sul secondo principio della termodinamica nella sua forma più generale. Il primo enunciato di tale principio fu dato da Sadi Carnot nel 1824 in una memoria sull'efficienza delle macchine a vapore, scritta sotto la spinta d'un motivo molto pratico, cioè il problema di ottenere il massimo lavoro possibile da una data quantità di combustibile.

Nella letteratura scientifica anteriore al 1850 si trovano qua e là affermazioni su qualche cosa che si perde o si dissipa quando si usa il calore per produrre lavoro meccanico, ma solo nel 1852 William Thomson (Lord Kelvin) asserì l'esistenza di «una tendenza univer-

sale in natura alla dissipazione dell'energia meccanica». Le conseguenze del principio di dissipazione di Thomson furono elaborate da Hermann von Helmholtz, che, due anni dopo, descrisse la «morte termica» dell'universo, conseguenza della trasformazione di tutta l'energia in calore.

L'enunciato moderno del principio di dissipazione è basato sulla nozione di entropia, introdotta da Clausius nel 1865. Benché la formulazione di Clausius non introducesse alcun nuovo contenuto fisico, il solo fatto di scegliere un

nuovo nome per qualcosa, che prima era stato rappresentato solo da formule matematiche e da pesanti circonlocuzioni, ebbe un'influenza innegabile sullo sviluppo successivo della questione.

Entropia deriva dal greco εντροποη, cioè «conversione», «mutamento», «evoluzione», ma anche «confusione» e «vergogna» (anzi, in quest'ultimo significato, si trova, negli scritti di Ippocrate, la forma εντροπια); il vocabolo venne scelto intenzionalmente per la sua somiglianza con la parola energia. Invece di conservarsi in un sistema isolato, come fa l'energia, l'entropia ha la proprietà di non decrescere (anzi solitamente aumenta ed è questa la caratteristica dei processi irreversibili).

Questo enunciato, in effetti, era dimostrato su basi sperimentali soltanto con considerazioni relative a stati di equilibrio, mentre doveva toccare a Boltzmann, con gli strumenti della teoria cinetica, pure non ignota a Clausius, il compito di dare una prima dimostrazione dell'enunciato più generale nel caso di sistemi gassosi.

Nella descrizione della materia come collezione di molecole, anziché come un continuo, questioni relative all'irreversibilità si presentano per la prima volta con l'invenzione quasi scherzosa di quello che è noto come il «diavoletto di Maxwell» (si veda alla pagina precedente). Maxwell aveva già scoperto la sua legge di distribuzione delle velocità nel 1860, ma nel 1867, durante alcune discussioni con P. G. Tait e W. Thomson concepì un «essere le cui facoltà sono così acute da poter seguire il moto di ciascuna molecola».

Questo «diavoletto» è descritto per la prima volta in una lettera di Maxwell a Tait nel 1867 ma fece la sua prima apparizione in pubblico nella teoria del calore, dello stesso Maxwell, nel 1871. Si immagini un essere minuscolo e molto attivo che può vedere le singole molecole ed è abbastanza veloce da manovrarle come farebbe un campione di tennis colpendo le palline. Un tale demone potrebbe

Il punto essenziale di questa costruzione immaginaria è che il secondo principio non è necessariamente vero a livello molecolare; invece l'esistenza fisica del demonietto con le caratteristiche previste da Maxwell sarebbe impossibile, data la complessità della struttura richiesta da un tale essere o da una macchina che ne simuli le facoltà (in sostanza il congegno dovrebbe aumentare l'entropia della propria memoria per diminuire quella dell'ambiente).

I primi tentativi di spiegazione del secondo principio sulla base della teoria cinetica sono dovuti a William Rankine, che suppose traiettorie atomiche invariabili durante una trasformazione termodinamica e venne perciò criticato da Boltzmann, in quanto l'ipotesi è incompatibile con la deformazione che il sistema subisce durante la trasformazione in questione.

Boltzmann stesso debutta poi nel settore con un lavoro in cui cerca di dimostrare il secondo principio partendo da teoremi puramente meccanici; procede facendo l'ipotesi molto restrittiva che i moti molecolari siano periodici e l'osservazione un po' goffa, ma forse giustificabile, che «se le orbite non si chiudono in un tempo finito, si può pensare che lo facciano in un tempo infinito».

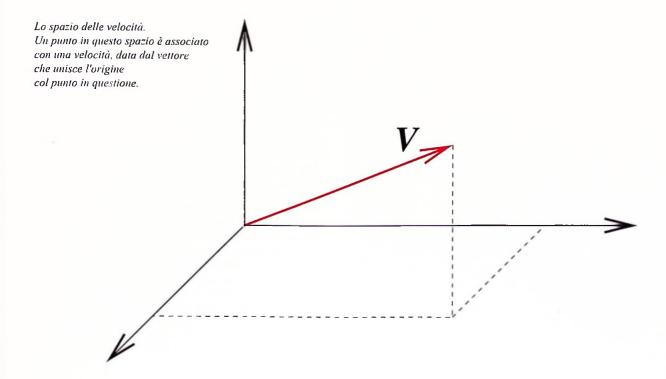
Sostanzialmente Boltzmann osserva che la temperatura si può pensare come una media temporale dell'energia cinetica (senza far uso quindi della cosiddetta costante di Boltzmann, che venne introdotta da Planck molto più tardi), mentre il calore può essere uguagliato all'incremento medio dell'energia cinetica; eliminando il periodo tra le due relazioni si vede che il calore diviso

Che cosa significa questo? Un dato stato di un gas è caratterizzato dai valori di due grandezze, per esempio densità e temperatura.

per la temperatura è, in linguaggio matematico, un differenziale esatto.



Il fisico scozzese William Rankine (1820-1872).





Sopra: Rudolf Clausius (1822-1888) introdusse i concetti di entropia e di libero cammino medio. Sotto: un ritratto di Boltzmann due anni prima della morte.



I valori di tutte le altre grandezze, come la pressione, sono determinati da quelli delle prime due. Tutte queste grandezze sono funzioni di stato, cioè assumono valori precisi in un dato stato del sistema. Non esiste invece una grandezza Q associata a ogni stato di un sistema tale che la differenza fra i valori assunti da Q in due stati diversi fornisca la somma delle quantità di calore scambiate successivamente in un processo.

Esiste invece una grandezza S associata a ogni stato del sistema tale che la differenza fra i valori assunti in due stati diversi fornisce la somma dei rapporti tra le quantità di calore scambiate successivamente in un processo e la temperatura a cui avviene lo scambio.

Questa parte appare come una giustificazione un po' primitiva ma efficace della prima parte del secondo principio; quanto alla seconda, Boltzmann sa un ragionamento di termodinamica piuttosto che di meccanica statistica e conclude che l'entropia deve aumentare in un processo irreversibile.

A quel tempo Boltzmann non era troppo noto e il lavoro ricevette poca attenzione. Non c'è da meravigliarsi quindi che Clausius non lo leggesse e pubblicasse quattro anni più tardi un lavoro del tutto analogo. Boltzmann fu pronto a pubblicare un commento, che riportava parola per parola una decina di pagine del suo lavoro precedente e concludeva dicendo:

«Penso di aver stabilito la mia priorità. Infine voglio esprimere il mio piacere per il fatto che un'autorità come il Dr. Clausius contribuisca alla disseminazione delle idee contenute nei miei lavori sulla teoria meccanica del calore».

Clausius riconobbe la priorità di Boltzmann, scusandosi per il poco tempo avuto negli ultimi anni per tenersi al corrente. Aggiungeva anche che i ragionamenti di Boltzmann non gli sembravano tanto generali quanto i suoi. Boltzmann non rispose a questa osservazione; ormai, come ora vedremo, i suoi studi scientifici avevano preso un'altra strada. Notiamo anche che nel 1868 Boltzmann, all'età di 24 anni, scrisse un lavoro che è un capolavoro di calcolo delle probabilità e statistica.

Tra gli altri risultati dimostra anche, per la prima volta, che la distribuzione maxwelliana di equilibrio ha un chiaro significato geometrico, essendo essenzialmente il rapporto tra le aree della superficie a n-2 dimensioni data dal vincolo soddisfatto dalle velocità di n-1 molecole quando l'energia di una di esse è stata fissata e della superficie a n-1 dimensioni data dal vincolo che sia assegnata l'energia totale.

Questo risultato viene spesso attribuito a Maxwell (e da qualcuno, addirittura, a Emile Borel). È vero che Maxwell ne diede una dimostrazione più veloce, dicendo: «Il Dr. Ludwig Boltzmann, nei suoi Studien über da Gleichgewicht der lebendingen Kraft zwischen bewegten materiellen Punkten, [Sitzb. d. Akad. Wiss., Bd. LVIII, 8 Oct. 1868], ha dedicato il suo terzo paragrafo alla soluzione generale dell'equilibrio dell'energia cinetica tra un numero finito di punti materiali. Il suo metodo è ingegnoso e, per quel che mi consta, soddisfacente, ma penso che un problema di tale importanza primaria nella scienza molecolare debba essere vagliato ed esaminato da ogni lato, cosicché il numero maggiore di persone possibile siano messe in grado di seguire la dimostrazione e di sapere su quale ipotesi si basa.».

Distribuzione di Boltzmann



Tale legge statistica di Boltzmann concerne la distribuzione delle energie in un sistema di molecole.

Tale distribuzione fu formulata da Maxwell nel 1859 sulla base di deduzioni probabilistiche e forniva la distribuzione delle velocità tra molecole gassose. Solo nel 1871 Boltzmann generalizzò la legge di distribuzione di Maxwell esprimendola in termini di distribuzione di energia. La conoscenza della funzione di distribuzione è d'importanza fondamentale e permette di valutare le proprietà termodinamiche di un sistema dalla meccanica statistica.

La legge di distribuzione di Boltzmann considera un sistema in cui le molecole, non interagenti tra loro, si trovano in equilibrio termodinamico.

La legge della distribuzione di Boltzmann, postulata prima delle leggi quantomeccaniche, nella sua forma originaria è basata sulla descrizione secondo la fisica classica delle energie molecolari.

In questa descrizione, la funzione di distribuzione è data dalla probabilità P che una molecola, in un certo istante, sia posizionata all'interno di un elemento di volume dx, dy, dz e abbia le componenti della velocità comprese tra: $u \div u + du$, $v \div v + dv$, $w \div w + dw$.

Probabilità

Secondo la legge di distribuzione di Boltzmann questa probabilità è data da:

$$P = \left(e^{-\varepsilon/kT} dx dy dz \ du dv dw\right) / \left(\int e^{-\varepsilon/kT} dx dy dz \ du dv dw\right)$$
 (1)

dove:

- ε = energia totale, data dalla somma di energia potenziale e cinetica
- k = una costante maggiore di zero nota come costante di Boltzmann
- L'integrale è esteso a tutte le possibili posizioni e velocità della molecola.

Secondo questa legge la probabilità che una molecola acquisti una energia ε diminuisce con l'aumentare dell'energia in proporzione al fattore $e^{-\varepsilon/kT}$. Per molecole dotate di moti rotazionali e vibrazionali la legge di distribuzione di Boltzmann può essere estesa, sebbene si preferisca una trattazione quantomeccanica.

Secondo la meccanica quantistica le energie molecolari sono limitate da livelli discreti ei e quindi l'equazione (1) può essere espressa come:

$$P_i = -g_i e^{-\varepsilon_i/kT}/q \tag{2}$$

dove:

- P_i = probabilità che ad un certo istante, una data molecola si trovi in una stato quantico avente energia ε_i ,
- g_i = la degenerazione di quel livello energetico, ovvero, il numero degli stati quantici aventi la stessa energia ε_i ,
- $q = \text{una funzione di partizione molecolare data da: } q = \sum_i g_i e^{(-\varepsilon_i/kT)}$ (3)

Poiché i livelli energetici di una molecola dipendono dal volume del sistema, q è una funzione sia di T che di V.

Energia libera di Helmholtz

L'energia libera di Helmholtz A per N molecole non interagenti tra loro è relazionata a q dall'equazione:

$$A = -kT \cdot \ln\left(\frac{qN}{N!}\right) \tag{4}$$

Se l'energia di ogni molecola può essere scritta come la somma di termini indipendenti per le traslazioni (t), le rotazioni (r), le vibrazioni (v) e gli altri gradi di libertà si può fare un'importante semplificazione della (4). In tal caso, infatti, q è data dal prodotto:

$$q_r q_t q_v g_0 \dots e^{(\varepsilon_0/kT)}$$

In tale espressione g_0 e ε_0 rappresentano rispettivamente la degenerazione e l'energia del livello energetico più basso, e tutte le altre forme di energia possono essere misurate rispetto a ε_0 . Ognuno dei fattori $q_r,\ q_t,\ q_v$ ecc che compare in q è dato dalla somma dei soli livelli energetici di un dato tipo.

La separazione delle energie molecolari e la conseguente fattorizzazione di q è esatta se le rotazioni vengono considerate come quelle di un corpo rigido e le vibrazioni sono assunte come armoniche.

Per molecole biatomiche aventi massa m, momento di inerzia I, frequenza vibrazionale ν e numero di simmetria s si ha:

$$q_t = \left(2\pi \frac{nkT}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}V}; \qquad q_r = \left(8\pi \frac{IkT}{sh^2}\right); \qquad q_v = \frac{1}{(1 - e^{hv/kT})}$$

sebbene l'equazione (2) sia basata su livelli energetici quantizzati, non è strettamente consistente con le restrizioni quantomeccaniche.

La funzione di distribuzione corretta dipende se le molecole contengono un numero pari o dispari di particelle elementari (protoni, neutroni e elettroni). Il primo caso porta alla distribuzione di Bose-Einstein, mentre il secondo caso dà la distribuzione di Fermi-Dirac.

Tuttavia entrambe le distribuzioni si riducono a quella di Boltzmann al limite se il numero di stati quantici disponibili è di molto superiore al numero di molecole. Ci si avvicina a tale limite con l'aumento della massa molecolare e della temperatura. In pratica quindi la statistica di Boltzmann si applica sempre con grande accuratezza, ad eccezione degli isotopi dell'idrogeno e dell'elio a temperature al di sotto dei 10 K.

E' possibile generalizzare la legge di distribuzione di Boltzmann a un sistema costituito da N particelle interagenti definendo una nuova funzione di probabilità \prod_i come la probabilità che, a un dato istante, l'intero sistema si trovi in uno stato quantico avente energia E_i . Anche questa probabilità è proporzionale al fattore di Boltzmann $e^{(-E_i/RT)}$ e si ha:

$$\prod_{i} = \Omega_{i} e^{(-E_{i}/RT)}/Q$$

essendo:

$$Q = \sum_{i} e^{(-E_i/RT)}$$

dove Ω_i è la degenerazione di E_i .

Q è detta funzione di partizione canonica è la sommatoria è fatta su tutti i possibili livelli energetici. Dalla conoscenza di Q, in accordo con la termodinamica statistica, si possono ottenere l'energia libera di Helmholtz e tutte le altre proprietà termodinamiche del sistema.

L'equazione di Boltzmann

Quella che porta il nome dello scienziato è la prima equazione che sia stata scritta per descrivere l'evoluzione nel tempo di una probabilità

equazione a cui è associato il nome di Boltzmann descrive le proprietà statistiche di un gas costituito da molecole ed è, da un punto di vista storico, la prima equazione che sia mai stata scritta per descrivere l'evoluzione nel tempo di una probabilità. L'incognita è la funzione di distribuzione, cioè la densità di probabilità di trovare una molecola in una certa posizione con una certa velocità a un certo istante di tempo.

Boltzmann intende la funzione di distribuzione in due modi, che sembra considerare a priori equivalenti: il primo è quello di pensarla come la frazione di un intervallo di tempo abbastanza lungo, durante la quale la velocità d'una parti-

colare molecola ha valori entro un certo elemento di volume nello spazio delle velocità, mentre il secondo è basato sulla frazione di molecole che, a un dato istante, hanno velocità nel suddetto elemento di volume. Sembra chiaro che Boltzmann non sentisse, allora, alcun bisogno di analizzare l'equivalenza, ipotizzata implicitamente, tra questi due significati così diversi. Si rese presto conto, però, della necessità di un'ipotesi «non improbabile» per i corpi reali composti di molecole che si muovono in quanto posseggono «il moto che chiamiamo calore». Questa ipotesi, secondo cui le coordinate o le velocità delle molecole prendono, in uno stato d'equilibrio, tutti i valori compatibili con l'energia totale assegnata del gas, divenne più tardi familiare col nome di ipotesi ergodica, attribuitole dai coniugi Ehrenfest (Paul e Tatjana).

L'equazione di Boltzmann permette l'estensione della trattazione statistica ai fenomeni irreversibili. È un'equazione integrodifferenziale, in cui cioè compaiono sia integrali che derivate della funzione di distribuzione f. Appena fu sicuro di questo risultato, si dice che volesse pubblicare un breve lavoro sui «Poggendorff's Annalen» per assicurarsi la priorità della scoperta e successivamente elaborare i risultati in forma completa per l'Accademia di Vienna.

Poiché Stefan era contrario alla doppia pubblicazione, si racconta, ci resta solo la memoria di quasi 100 pagine presentata all' Accademia, il che può spiegare lo strano titolo scelto per presentare una dovizia di risultati: Weitere Studien über das Wärmegleichgewicht unter Gasmolekülen (Ulteriori studi sull'equilibrio termico delle molecole di un gas). Il lavoro inizia con una critica alla derivazione della distribuzione delle velocità in un gas in uno stato d'equili-

brio fatta da Maxwell. Boltzmann mette in rilievo il fatto che tale deduzione aveva solo mostrato come la distribuzione maxwelliana, una volta raggiunta, non viene alterata dagli urti. Dice però Boltzmann: «Perciò non è stato ancora mostrato che, qualunque sia la distribuzione iniziale, essa evolverà verso la distribuzione trovata da Maxwell». In questa affermazione Boltzmann ha in



Paul Ehrenfest (1888-1933), allievo di Boltzmann, scrisse con la moglie Tatjana un famoso articolo per cercar di chiarire le sottigliezze dell'emergere dell'irreversibilità in un modello reversibile.

mente evidentemente il caso spazialmente omogeneo (il caso in cui f dipende solo dal tempo e dall'energia cinetica), a cui è dedicata in effetti la prima parte della memoria.

Facendo uso della sua equazione, Boltzmann mostra non solo che la distribuzione di Maxwell è una soluzione di equilibrio dell'equazione, ma che non ce ne sono altre, introducendo una grandezza che risulta, a meno di una costante di proporzionalità, l'opposto dell'entropia. Boltzmann la indicò con E e fu successivamente indicata con H (come faremo qui). Questa grandezza è definita sostanzialmente dalla somma (matematicamente, dall'integrale) dei valori di flogf per tutte le energie cinetiche, dove log indica il logaritmo naturale. Considerando le proprietà della sua equazione, Boltzmann dimostrò che la derivata rispetto al tempo di H non è mai positiva ed è nulla soltanto se la distribuzione è quella di Maxwell. H, essendo limitata inferiormente (dal suo valore all'equilibrio), non può continuare a decrescere e quindi tenderà al valore di equilibrio, e contemporaneamente f tenderà a una maxwelliana.

A dire il vero la dimostrazione rigorosa di queste tendenze è tutt'altro che semplice; passarono molti anni prima che il matematico svedese Carleman ne fornisse una dimostrazione ineccepibile. Il teorema di Boltzmann che asserisce la non crescenza di *H* nel tempo è ormai noto col nome di «teorema H».

La possibilità di esprimere l'entropia in termini della funzione di distribuzione, per quanto in un certo senso prevedibile, non cessa di restare un fatto notevole, che dovette impressionare molto i contemporanei di Boltzmann. Infatti, come notava lo stesso autore, essa implicava un approccio interamente diverso alla dimostrazione del secondo principio, che dimostrava non solo l'esistenza della funzione entropia per gli stati d'equilibrio, ma permetteva anche di studiarne l'aumento nei processi irreversibili.

Il lavoro prosegue con una derivazione alternativa basata su un modello a energie discrete, in modo che l'equazione integrodifferenziale per la funzione di distribuzione diventa un sistema di equazioni differenziali ordinarie non lineari. L'uso di energie discrete è sempre sembrato a Boltzmann «molto più chiaro e intuitivo». Questa sua affermazione può apparire un'ingenuità, ma potrebbe indicare una sorprendente intuizione relativa alla difficoltà matematica di una dimostrazione rigorosa della tendenza all'equilibrio. Infatti queste difficoltà della dimostrazione della tendenza all'equilibrio scompaiono se si ha a che fare con un sistema discreto finito di equazioni, dato che l'incognita f è, in ogni istante, un insieme finito di numeri, invece di essere una funzione (in linguaggio matematico, diremmo che abbiamo a che fare con uno spazio a un numero finito di dimensioni, invece che con uno spazio funzionale); questa semplificazione permette di utilizzare una proprietà già nota ai tempi di Boltzmann (il teorema di Bolzano-Weierstrass) per ricavare la tendenza in questione senza particolari raffinatezze matematiche. Molti storici della scienza hanno sottolineato il fatto che questi modelli discreti di Boltzmann guidarono Planck alla scoperta dei quanti di energia, come Planck stesso riconobbe.

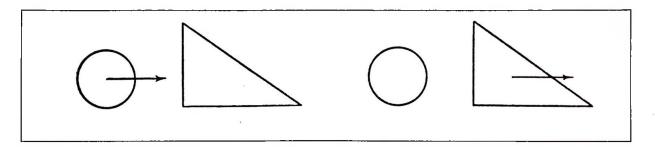
Un fatto notevole è che la dimostrazione del Teorema H può estendersi anche ai gas poliatomici. In realtà la dimostrazione originale data da Boltzmann in questo caso non era del tutto generale, come rilevò per la prima volta Lorentz nel 1886. Dopo aver ricevuto il manoscritto in cui Lorentz gli segnalava l'errore, Boltzmann lo ringraziò (in data 11 dicembre 1886) e ammise il proprio errore (in data 1° gennaio 1887), esprimendo (nella prima lettera) anche il piacere che gli procurava l'interesse di Lorentz per il suo lavoro: «Sono felicissimo di aver trovato in Lei una persona che lavora per sviluppare le mie idee sulla teoria cinetica dei gas. In Germania non c'è nessuno che capisce bene queste cose».

Alcuni anni dopo, mentre Lorentz stava scrivendo un lavoro sulla teoria molecolare delle soluzioni diluite, Boltzmann scrisse un articolo, in cui si dava una derivazione della legge di Van't Hoff per la pressione osmotica, argomento trattato anche da Lorentz. La dimostrazione di Boltzmann era molto semplice, ma conteneva un'ipotesi ingiustificata, come gli scrisse Lorentz in una lettera datata 16 dicembre 1890. Boltzmann si mise a scrivere un altro lavoro in cui correggeva l'errore e inviò una lettera di risposta in data 21 dicembre, priva di risentimenti, che contiene le seguenti osservazioni:

«Dal francobollo e dalla scrittura, ho riconosciuto che la lettera veniva da Lei e ho avuto un momento di gioia. Certo, ogni Sua lettera significa che ho



Hendrick Antoon Lorentz (1853-1928) corresse in due occasioni due sviste di Boltzmann. È più noto per le trasformazioni che portano il suo nome, fondamentali nella teoria della relatività ristretta.



fatto un errore; ma io imparo così tanto in queste occasioni che quasi desidererei fare più errori, per ricevere un numero maggiore di lettere da Lei».

Ritorniamo al teorema H per molecole poliatomiche; la versione «corretta» di Boltzmann basata sui cosiddetti «cicli chiusi d'urti» non ha mai soddisfatto nessuno. Per un po' la cosa è stata dimenticata, fin quando, con metodi quantistici, si dimostrò che, per dimostrare il teorema nel caso dei gas poliatomici, occorreva una proprietà generale degli urti, che era una conseguenza di quella d'unitarietà della cosiddetta «matrice di scattering» usata per definire i fenomeni d'urto nella meccanica quantistica. Una dimostrazione soddisfacente della diseguaglianza richiesta nel caso di molecole poliatomiche con metodi puramente classici è stata data solo in tempi piuttosto recenti.

Boltzmann fece le osservazioni sui gas poliatomici e sull'importanza del suo risultato in mezzo a un paragrafo, più o meno a un terzo delle circa 100 pagine del grande articolo del 1872, ma vi ritornò in una nota alla fine del lavoro. La «molecola complessa» nel gas avrebbe potuto essere un corpo macroscopico interagente con l'ambiente in cui è immerso.

Boltzmann pensò così di aver dato una dimostrazione completa del secondo principio su basi meccaniche.

Solo poche pagine della voluminosa memoria di Boltzmann riguardano il calcolo delle proprietà di trasporto nei gas. È in queste pagine, però, che Boltzmann pose la sua equazione nella forma oggi più familiare, in cui la funzione di distribuzione dipende dal tempo, dalla velocità e dalla posizione. I suoi calcoli mostrano che i coefficienti di viscosità, conduzione termica e diffusione possono ottenersi a partire dalla sua equazione con risultati identici a quelli di Maxwell, per le cosiddette molecole maxwelliane di cui abbiamo già parlato; ma Boltzmann mise in guardia contro l'illusione di una facile estensione dei calcoli espliciti nel caso di leggi di interazione più complicate.

Nel ricavare l'equazione di Boltzmann, l'effetto difficile da valutare è quello degli urti sull'evoluzione temporale di f. Notiamo che la probabilità che avvenga un urto è legata alla probabilità di trovare un'altra molecola, il cui centro si trovi esattamente a un diametro di distanza dal centro della

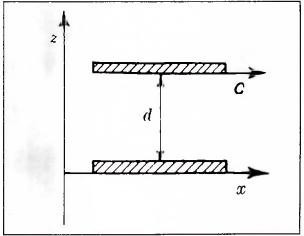
prima, la cui funzione di distribuzione è f. Così, in generale, per scrivere l'equazione di evoluzione per f avremo bisogno di un'altra funzione, g, che dà la densità di probabilità di trovare, a un certo istante di tempo, la prima molecola in un dato punto con una data velocità e la seconda in un altro dato punto con un'altra data velocità; ovviamente g è molto più complicata di f.

In generale il cambiamento nel tempo del numero di molecole con una data velocità sarà dovuto alla differenza fra quante molecole acquistano questa velocità e quante la perdono a causa degli urti; Boltzmann calcolò questi numeri, che dovrebbero dipendere dalla complicata funzione g.

Ma Boltzmann evitò l'uso di g, utilizzando implicitamente un'ipotesi di rarefazione del gas. Osserviamo che in un gas, anche se rarefatto, il numero N di molecole è pur sempre un numero enorme e il loro diametro (espresso in unità d'uso nella vita comune, come, per esempio, i centimetri) è piccolissimo; per fissare le idee, consideriamo una scatola il cui volume sia 1 centimetro cubo alla temperatura ambiente e alla pressione atmosferica.

Allora $N = 10^{20}$ e $\sigma = 10^{-8}$ cm; in tal caso $N\sigma^2 = 10^4$ cm² = 1 m² è un'area

Illustrazione delle difficoltà che sorgono nello studio degli urti tra molecole poliatomiche. Nel caso monoatomico per ogni urto A esiste l'urto inverso A', in cui lo stato prima dell'urto è lo stesso di quello dopo l'urto A. In quest'esempio (semplice, ma artificiale) una molecola ha forma sferica, l'altra ha forma di cuneo. Le masse sono eguali e i baricentri sono alla stessa altezza.



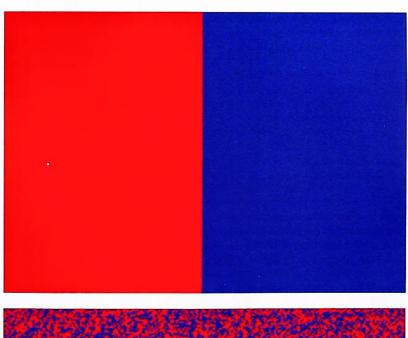
Le proprietà di trasporto sono esemplificate dal caso di un gas tra due lastre parallele, una ferma, l'altra in moto con velocità C nel proprio piano. Il gas si muove con velocità variabile; la trasmissione di quantità di moto da uno strato all'altro è dovuta alla viscosità del gas e misurata da un coefficiente di trasporto detto coefficiente di viscosità. La teoria cinetica dei gas spiega il fenomeno in maniera semplice e permette di calcolare il coefficiente di viscosità a partire delle proprietà molecolari (massa e legge d'interazione). Altri importanti fenomeni di trasporto sono la conduzione termica e la diffusione. apprezzabile, mentre possiamo trascurare la distanza fra due molecole che si urtano (ovviamente uguale al diametro molecolare σ).

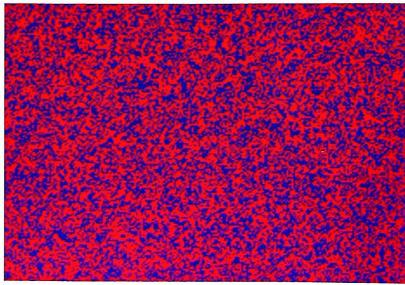
Questo induce a pensare che l'equazione che dobbiamo scrivere può essere valida rigorosamente solo nel cosiddetto limite di Boltzmann-Grad quando N tende all'infinito, σ tende a zero ma il prodotto $N\sigma^2$ rimane finito.

In aggiunta, dato che il volume occupato dalle particelle è circa $N\sigma^3 \equiv 10^{-4}$ cm³, l'urto tra due molecole prescelte è un evento piuttosto raro. Quindi due sfere che per caso si urtano, possono, in un certo senso, pensarsi scelte a caso. Appare perciò sensato fare l'ipotesi che la densità di probabilità di trovare la prima molecola in una data posizione con una data velocità e la seconda a un diametro di distanza con un'altra data velocità sia il prodotto della densità di probabilità di trovare la prima molecola nella posizione data con la sua data velocità per la densità di probabilità di trovare la seconda molecola nella posizione che le compete con la sua data velocità. Se accettiamo questa idea (ipotesi del caos molecolare) possiamo esprimere g in termini di f e ottenere l'equazione di Boltzmann, cioè un'equazione di evoluzione per f, senza alcun riferimento a g.

Questo è il suo vantaggio principale. È stata ottenuta, però, al prezzo di diverse ipotesi; l'ipotesi del caos è particolarmente forte e richiede un po' di discussione. Il caos molecolare è chiaramente un'ipotesi di casualità. Intuitivamente, si ha l'impressione che gli urti esercitino un'influenza di tipo casuale e questo si può rendere convincente con ulteriori considerazioni, ma sarebbe completamen-

Mescolamento di polveri di diverso colore: partendo da due polveri ben separate in una scatola e scuotendo si arriva a una miscela; se invece si parte dalla miscela non si può arrivare, scuotendo, alle polveri separate.





te errato sostenere che l'indipendenza statistica postulata col caos molecolare sia una conseguenza della dinamica (come sembrava sostenere Boltzmann nei suoi primi lavori sulla sua equazione). È chiarissimo infatti che il caos molecolare deve essere presente inizialmente e ci si può solo chiedere se si conserva inalterato nell'evoluzione temporale del sistema di sfere rigide.

Si può vedere che la proprietà di caoticità, se vera inizialmente, viene subito distrutta, almeno se insistiamo a richiedere che essa sia valida dappertutto. In questo caso, infatti, non ci sarebbe effetto degli urti nell'evoluzione temporale di f. È solo nel limite di Boltzmann-Grad che il caos molecolare, se presente inizialmente, si mantiene nel tempo per le molecole che stanno per urtare.

Questa chiarificazione, da un punto di vista fisico, è dovuta agli Ehrenfest, mentre i problemi posti dalla giustificazione matematicamente rigorosa sono al momento solo parzialmente risolti.

Irreversibilità dei fenomeni macroscopici

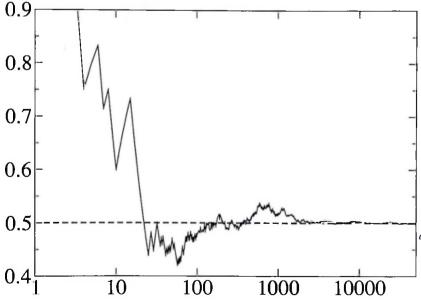
Nello stesso lavoro Boltzmann riuscì a derivare una dimostrazione dell'irreversibilità dei fenomeni macroscopici. È la differenza di scala tra gli oggetti che osserviamo nella vita d'ogni giorno e le molecole, che spiega questa irreversibilità attraverso le leggi della probabilità.

In effetti, l'enorme numero di molecole contenute in un volume di dimensioni macroscopiche interagisce attraverso un numero incredibilmente grande di urti in una dinamica che ha luogo su dimensioni incredibilmente piccole, dell'ordine di un millionesimo di millimetro.

C'è un numero eccezionalmente grande di successioni possibili di interazioni che descrivono un dato processo naturale. Esse sono impercettibilmente diverse l'una dall'altra; una piccola modifica nei dettagli dello stato iniziale, come la posizione o la velocità di poche molecole, non darebbe luogo a una differenza significativa nella nostra percezione del fenomeno, purché queste modifiche non incidano sulla nostra immagine macroscopica.

Al contrario, esiste essenzialmente una sola successione che descrive il processo inverso, formato dalla serie delle nostre sensazioni nella direzione dal futuro al passato; ogni impercettibile differenza in qualche dettaglio dello stato iniziale (il precedente stato finale con velocità invertite) cambierebbe drasticamente l'intera serie delle nostre sensazioni e quindi la nostra percezione del fenomeno. Non osserviamo mai certi strani eventi, non perché sono impossibili (cioè proibiti da qualche legge fisica), ma solo perché sono estremamente improbabili.

Si può usare un esempio (descritto visivamente alla pagina precedente) per illustrare questa circostanza: se mettiamo un gran numero di granelli di polvere bianca e nera in una scatola, ponendo accuratamente quelli neri nella metà destra della scatola e quelli bianchi nella metà sinistra, allora, purché i granelli



Legge dei grandi numeri: la percentuale dei casi in cui si ha testa o croce nel lancio d'una moneta si avvicina al 50 per cento con l'aumentare dei lanci (più esattamente, la probabilità di uno dato scostamento dal 50 per cento diviene tanto più improbabile quanto più è grande lo scostamento).

22

non siano disposti in maniera molto compatta, se scuotiamo la scatola in tutti i modi possibili, dopo un po' otterremo una miscela grigia in cui le due polveri sono mescolate finemente.

D'altra parte sarebbe impossibile, partendo dalla miscela grigia e scuotendo per giorni o anni, ottenere la separazione delle due polveri. Non c'è alcuna impossibilità meccanica: si tratta semplicemente del fatto che ci sono molte più posizioni dei vari granelli di polvere che danno l'aspetto grigio, in confronto col numero, molto più piccolo, di configurazioni in cui i granelli sono ben ordinati. È quindi una questione di probabilità.

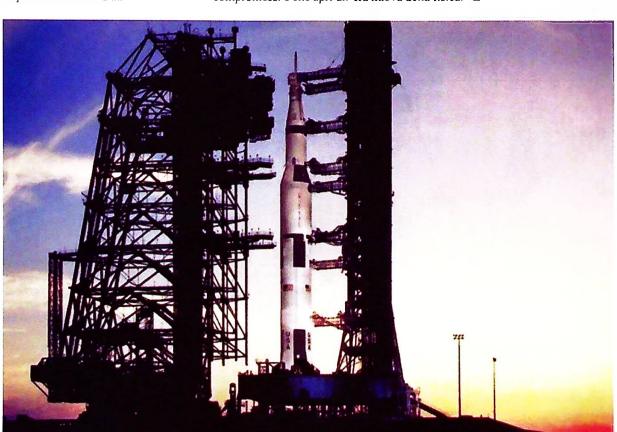
Le molecole, costituenti elementari di un gas, non hanno colori ma posizioni e velocità; l'atto di scuotere i granelli di polvere è sostituito dagli urti delle molecole che le portano in stati più probabili. Boltzmann scrisse un'equazione che ci permette di calcolare l'evoluzione nel tempo della probabilità che una molecola sia in una certa posizione con una certa velocità nelle situazioni più svariate, dall'aria in una stanza a quella intorno a una navetta spaziale durante il rientro.

All'inizio Boltzmann non si rese conto di che cosa aveva fatto esattamente; pensava di essere rimasto entro i confini della meccanica, di aver calcolato numeri effettivi di molecole, senza rendersi conto di quanta probabilità interveniva. È vero che nell'introduzione del suo articolo dice che userà la statistica e la probabilità, ma dice anche che sarebbe «errato credere che la teoria meccanica del calore sia perciò afflitta da qualche incertezza perché si usano i principi della teoria delle probabilità... è solo doppiamente obbligatorio far uso delle conclusioni col massimo rigore.».

Ora l'uso della teoria delle probabilità certo implica una qualche incertezza, come mostra il prototipo di ogni legge probabilistica, la cosiddetta «legge dei grandi numeri»: si possono solo calcolare medie e ci saranno deviazioni da queste medie, distribuite a caso. Si può ipotizzare che Boltzmann fosse ben conscio di ciò fin dall'inizio. Ma sembrava anche pensare di aver ottenuto un risultato che, a meno di queste fluttuazioni intorno alla media, discendeva dalle equazioni della meccanica senza eccezione. In effetti ottenne un risultato valido con una probabilità incredibilmente grande, ma nella sua derivazione sono presenti molte sottigliezze (riguardanti soprattutto i dati iniziali), di cui non sembrava conscio nel 1872.

Come vedremo, le obiezioni di amici e avversari lo costrinsero a dare una forma nuova alle sue idee e a creare un'altra visione, che è nuova e senza compromessi e che aprì un'era nuova della fisica.

Una navetta spaziale.
A una quota superiore ai 70 km non è possibile descriverne l'aerodinamica con le equazioni usuali della dinamica dei fluidi, ma occorre utilizzare l'equazione di Boltzmann.



Il giovane Boltzmann e l'Austria imperiale

I primi incarichi e il matrimonio: vita di un professore universitario tra Vienna e Graz nella società austriaca all'epoca di Francesco Giuseppe

el 1873 Boltzmann non seppe resistere alla tentazione di accettare una cattedra a Vienna come professore di matematica. Essere professore a Vienna era considerato in Austria – e sembra che lo sia ancora – il gradino più alto possibile in una carriera accademica, benché spesso si riducesse a una perdita di quiete e concentrazione nella ricerca. Naturalmente, Boltzmann può aver avuto altri motivi, come migliori possibilità di lavoro sperimentale e, sotto questo aspetto, non s'ingannava.

Per poter nominare Boltzmann, che era notoriamente un fisico, per il nuovo posto di matematica, la facoltà di Vienna argomentò che le sue ricerche, benché originate dalla fisica, erano anche «eccellenti come opere matematiche, contenendo soluzioni di difficilissimi problemi di meccanica analitica e soprattutto di calcolo delle probabilità». Si riconobbe l'impronta di un «talento decisamente matematico» nel suo uso dell'analisi superiore nella teoria del calore.

Nel 1875 l'equazione di Boltzmann incontrò un'obiezione da parte del suo amico Loschmidt, solitamente formulata in forma di paradosso: il paradosso di reversibilità. Questo paradosso è discusso brevemente già da Thomson nel lavoro che abbiamo citato nella premessa.

Josef Loschmidt, a cui il paradosso è solitamente attribuito, lo menzionò brevemente nel primo di quattro articoli sull'equilibrio d'un sistema di corpi soggetti a forze gravitazionali. Il suo intento era quello di dimostrare che la morte termica dell'universo non è inevitabile, per «distruggere il nembo terroristico del secondo principio, che lo ha fatto apparire come un principio di distruzione per tutti gli esseri viventi dell'universo; e aprire allo stesso tempo la prospettiva confortante che il genere umano non dipende dal carbone o dal Sole per trasformare il calore in lavoro, ma può avere a sua disposizione per sempre una fornitura inesauribile di calore trasformabile». Nel corso d'un suo tentativo di dimostrare che (contrariamente a quanto aveva affermato Maxwell) la temperatura in un gas in quiete in un campo gravitazionale dipende dalla quota, nota che «l'intero corso degli eventi sarebbe ripercorso se in qualche istante le velocità di tutte le sue parti fossero invertite».

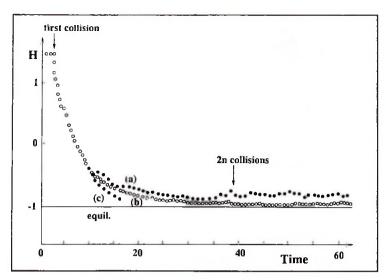
Abbiamo già incontrato Loschmidt (1821-1895) e sappiamo che aveva proposto a Boltzmann di smerigliare insieme certe sfere di cristalli di zolfo mentre facevano la coda per comprare i biglietti al Burgtheater. Qui possiamo aggiungere che in una lettera scritta a Boltzmann da sua moglie veniamo a sapere che Loschmidt era rimasto affascinato dal bricco del caffè da lei usato e ne aveva comprato un altro per sé. Probabilmente i due amici avevano già discusso l'obiezione. Questo può spiegare come mai, nonostante i ragionamenti un po' oscuri di Loschmidt, Boltzmann capi subito il punto essenziale e pubblicò immediatamente un breve lavoro, in cui, dopo aver fatto un bell'elogio al suo critico, perché il dubbio sulla dimostrazione del teorema H «è escogitato ingegnosamente e sembra di grande importanza per una comprensione corretta del secondo principio», procede a enunciare il paradosso in forma assai chiara («perché



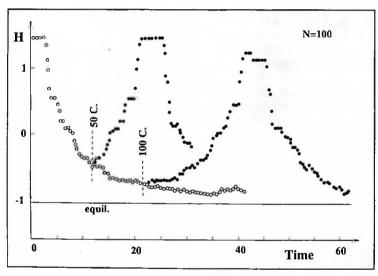
Boltzmann nel 1875, professore a Vienna.



Josef Loschmidt (1821-1895), autore del paradosso della reversibilità che porta il suo nome.



Il comportamento di H in un esperimento in due dimensioni simulato sul calcolatore. Il numero totale dei dischi che simulano le molecole era 100 nel caso (a), 400 nel caso (b), 1225 nel caso (c).



L'effetto di un'inversione temporale sul comportamento di H in un esperimento in due dimensioni simulato sul calcolatore. Il numero totale dei dischi che simulano le molecole era 100. I cerchietti bianchi corrispondono a possibili dati iniziali ottenuti da quelli della figura precedente con una inversione delle velocità, mentre le due successioni di cerchietti neri sono ottenute invertendo effettivamente le velocità dopo 50 e 100 urti, rispettivamente.

l'enunciato originale di Loschmidt può risultare di difficile comprensione per i fisici a causa della sua formulazione piuttosto filosofica») per discuterlo poi esaurientemente, facendo uso del modello di gas a sfere rigide, distribuite inizialmente in maniera disomogenea, e concludendo in maniera non dissimile da Thomson.

Osserviamo che in questo lavoro, Boltzmann prende atto esplicitamente della natura probabilistica del secondo principio:

«Dobbiamo fare la seguente osservazione: non si può fornire una dimostrazione che, dopo un certo tempo t,, le sfere debbono necessariamente essere mescolate in maniera uniforme, qualunque sia la distribuzione iniziale di stati. Questo risultato è infatti una conseguenza della teoria della probabilità, in quanto ogni distribuzione disuniforme di stati, per quanto improbabile, non è assolutamente impossibile. Infatti è chiaro che ogni singola distribuzione uniforme, che potrebbe nascere dopo un certo tempo da un particolare stato iniziale, è altrettanto improbabile quanto una singola distribuzione disuniforme; proprio come, nel gioco del lotto, ogni singola cinquina è altrettanto improbabile di 1, 2, 3, 4, 5. È solo perché ci sono molte più distribuzioni uniformi che disuniformi che la distribuzione di stati diventerà uniforme nel corso del tempo. Non si può quindi dimostrare che, qualunque siano le posizioni e velocità iniziali delle sfere, la distribuzione degli stati diventerà uniforme nel tempo; piuttosto, si può dimostrare che un numero infinitamente maggiore di stati iniziali porterà a uno stato uniforme, dopo un assegnato intervallo di tempo, anziché a uno disuniforme. Il teorema di Loschmidt ci dice qualcosa solo su stati iniziali che portano effettivamente a una distribuzione molto disuniforme dopo un certo tempo t_i; ma non dimostra che non ce n'è un numero infinitamente maggiore che porteranno a distribuzioni uniformi dopo lo stesso tempo. Al contrario, segue dal teorema stesso che, dato che ci sono molte più distribuzioni uniformi che disuniformi, il numero di stati che portano a distribuzioni uniformi dopo un certo tempo t, è molto più

grande di quello degli stati che portano a distribuzioni disuniformi, e sono questi ultimi che si devono scegliere, secondo Loschmidt, per ottenere una distribuzione disuniforme al tempo $t_{\rm l}$.»

Matrimonio e ritorno a Graz

Prima di partire da Graz, Boltzmann aveva conosciuto la sua futura moglie, Henriette von Aigentler, una ragazza dai lunghi capelli biondi e gli occhi azzurri, di dieci anni più giovane di lui. Non c'è da meravigliarsi se il professor Hirzel, decano della Facoltà di filosofia dell'Università di Graz, trovò strano il desiderio di quella ragazza di studiare matematica e fisica. Ai suoi occhi il destino di una donna cra quello di preparare da mangiare e spolverare: la sola base, pensava, d'una sana vita familiare.

Nel primo semestre le fu permesso solo di ascoltare le lezioni, perché non

c'erano ancora leggi che bandissero le donne dall'Università. Quando iniziò il secondo semestre, la Facoltà aveva già approvato una regola che escludeva le studentesse. Allora la ragazza fece una petizione al Ministro dell'Istruzione, che era stato già collega di suo padre, scomparso da poco, al tribunale di Graz. Il Ministro la esentò dalla regola della Facoltà, ma al semestre successivo le difficoltà ricominciarono. Infine, dopo il suo fidanzamento con Boltzmann, la ragazza decise di seguire il consiglio del professor Hirzel e imparò a cucinare nella casa del sindaco di Graz, che era stato, anche lui, un grande amico di suo padre. Boltzmann mandò una richiesta scritta di matrimonio a Henriette. Pensava infatti che la cosa si facesse meglio per iscritto. Da questa lettera si apprende che anche in quei giorni l'inflazione poneva dei problemi. Infatti vi si legge: «L'anno scorso le mie entrate annue sono state di 5400 fiorini. Ouesto sarà sufficiente per il nostro mantenimento, ma, se si tien conto dell'aumento enorme dei prezzi a Vienna, non è abbastanza per offrirLe molte distrazioni e divertimenti.».

Boltzmann era robusto e non molto alto. Aveva capelli ricci e occhi azzurri. La sua fidanzata lo chiamava qualche volta affettuosamente «il mio caro tesorone». Quando doveva lasciarla, Boltzmann, che aveva il cuore tenero, non poteva trattenere le lacrime.

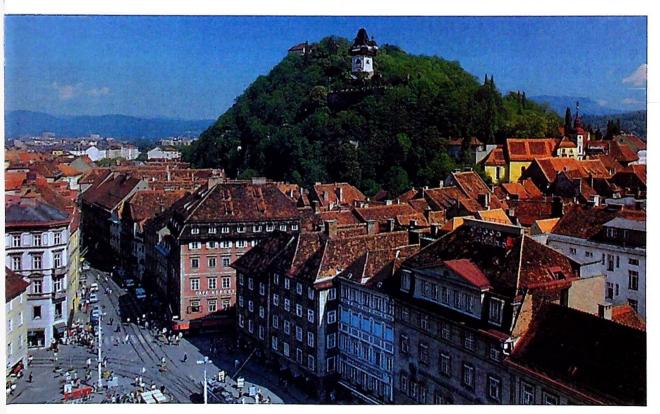
Anche quando gli venivano chiesti favori, non riusciva a dire di no. Se doveva bocciare uno studente in cattive condizioni finanziarie, sentiva un forte rimorso. Negli ultimi anni di vita non bocciava mai nessuno. Era molto coscienzioso e quindi il lavoro amministrativo, molto più pesante a Vienna che a Graz, diventò per lui un carico gravoso.

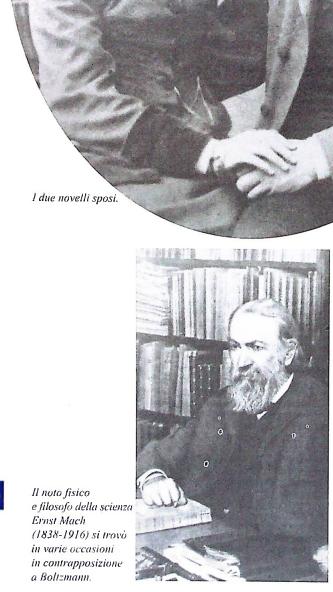
A Graz, l'Istituto di fisica era stato appena completato e trasformato in un centro ideale per ricerche altamente qualificate nell'ambito della fisica più avanzata del tempo. August Toepler, l'artefice di questa meraviglia, si lamenta, però, in una lettera a Boltzmann del 1876, della mancanza di soldi. Dopo aver speso le sue energie nel nuovo istituto (e anche la sua salute, avendo fatto un volo dal secondo piano dell'edificio) Toepler credeva che Graz avesse bisogno di un nuovo fisico e lasciò Graz per Dresda. La Cattedra di fisica a Graz attraeva molto Boltzmann per varie ragioni. Avrebbe ereditato il laboratorio di Toepler e tenuto lezioni di fisica anziché di matematica. Il carico amministrati-



Henriette von Aigentler, all'età di 23 anni.

Una veduta moderna della cittadina di Graz, non molto cambiata dai tempi di Boltzmann.





vo a Graz era inferiore a quello di Vienna. Non bisogna poi dimenticare il fatto che Boltzmann voleva sposarsi e aveva difficoltà a trovare un appartamento

> a Vienna. Infine, la sua futura moglie era di Graz.

> > Ma non era cosa facile anche per un Boltzmann essere chiamato sulla cattedra disponibile a Graz. Tra i suoi rivali c'era anche Ernst Mach, che vi aveva già avuto una Cattedra di matematica dal

1864 al 1867.

Mach è molto noto per il suo famoso trattato Die Mechanik ihrer in Entwickelung historischkritisch dargestellt (La Meccanica esposta nel suo sviluppo storico-critico), che ebbe molta influenza su un'intera generazione di scienziati (il più notevole e famoso tra questi è Einstein), e anche sullo sviluppo della filosofia della scienza. La tesi più importante di questo trattato, pubblicato nel 1883, è che l'atteggiamento tradizionale, prevalente ai suoi tempi, che considerava la meccanica come la pietra miliare per tutte le branche della fisica e voleva trovare una spiegazione meccanica per ogni fenomeno fisico, è sostanzialmente un

Per dimostrare questa tesi, Mach fece uso di tutti gli strumenti disponibili, dalla psicologia alla biologia evoluzionista, insieme con la sua conoscenza dettagliata dei vecchi testi e la sua abilità notevolmente raffinata di analizzare le strutture concettuali. Oltre a un'analisi fondamentale dei concetti di massa e di forza, simile a quelle condotte da Kirchhoff e Helmholtz, Mach sottolineò che l'aspetto principale della scienza è l'economia di pensiero; la scienza si sforza di formulare i propri principi in maniera da condensare in pochi concetti e asserzioni una ricchezza di conoscenza, che si accumula grazie alle osservazioni sperimentali. Quindi Mach era contrario a immagini o modelli sperimentali che andassero oltre i fatti osservati. Per questo negava l'esistenza degli atomi. La filosofia di Boltzmann era diversa in molti dettagli ed era molto favorevole alle immagini, come modelli di realtà che ci aiutano a fare scoperte. La formulazione economica era, secondo lui, la campana che suonava per qualche ramo morto della scienza.

pregiudizio.

Nel 1876 Mach era a Praga e voleva tornare a Graz. Sua moglie era di Graz come Henriette e anche lei era orfana. Naturalmente, nella Facoltà c'erano sostenitori di ambedue i candidati. Un aspetto umoristico della vicenda è che la famiglia del sindaco di Graz era in grado di trasmettere bollettini di guerra ai due rivali. Henriette era una protetta del sindaco e soprattutto di sua moglie e, come abbiamo già indicato, viveva con loro. Un figlio del sindaco, Wilhelm Kienzl, il futuro compositore, studiava acustica con Mach a Praga. I bollettini erano inizialmente favorevoli a Mach. Ma (apprendiamo da una lettera di Henriette al fidanzato) Frau Kienzl, parlando con Mach, gli aveva detto che Boltzmann ci teneva molto a Graz. Mach rispose che, pur avendo riposto grandi speranze di tornarvi, se avesse dovuto decidere lui, avrebbe proposto Boltzmann al primo posto.

Furono quindi giorni di preoccupata attesa per la giovane coppia pronta per il matrimonio, che era già stato fissato per il 17 luglio, senza sapere se metter su casa a Vienna o a Graz. La preoccupazione veniva anche dal pericolo che la loro luna di miele venisse rovinata dalla contrattazione col Ministero relativa alla Cattedra di Graz. Riguardo a questa spiacevole situazione Boltzmann scrisse: «Detesto questa continua lotta segreta: so integrare molto meglio che intrigare.».

Cinque giorni prima del matrimonio, non c'era ancora una delibera del Ministero, ma i due decisero di sposarsi comunque. Alla fine arrivò anche la sospirata delibera. Gli storici della scienza possono chiedersi se ci mise lo zampino Frau Kienzl o se la riluttanza di Mach a esercitare pressioni spianò la strada a Boltzmann.

Non bisogna naturalmente trascurare il ruolo della Facoltà, del ministro dell'Istruzione Stremayr e soprattutto dell'imperatore Francesco Giuseppe, che approvava personalmente e firmava tutte le nomine universitarie.

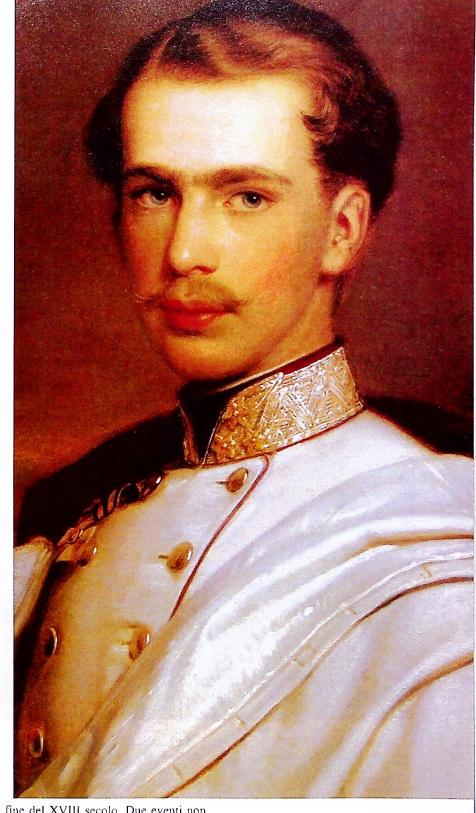
L'Austria ai tempi della giovinezza di Boltzmann

Boltzmann visse in un periodo abbastanza insolito per il suo paese e per l'Europa. L'Austria era stata per alcuni secoli una nazione-guida in Europa, rivaleggiando per autorevolezza e grandezza con l'Inghilterra e la Francia: Vienna era una grande capitale al livello di Parigi e Londra. Ed era inoltre una vera e propria metropoli per quei tempi, dato che contava circa due milioni di abitanti all'inizio del XIX secolo.

Ma la splendida decadenza dell'Austria e, insieme, dell'Europa come centro del mondo era cominciata alla fine del XVIII secolo. Due eventi non completamente scollegati tra di loro, le rivoluzioni americana e francese (ambedue figlie del punto più alto della cultura europea, l'Illuminismo) avevano

cambiato il mondo. La prima dette inizio alla formidabile ascesa e sviluppo degli Stati Uniti; la seconda, col notevole seguito di Napoleone e delle sue guerre, cambiò il volto dell'Europa in maniera irreversibile. Nel 1815 il Congresso

di Vienna ristabili l'*Ancien Régime* ma si trattava di una soluzione instabile che era destinata prima o poi a fallire.



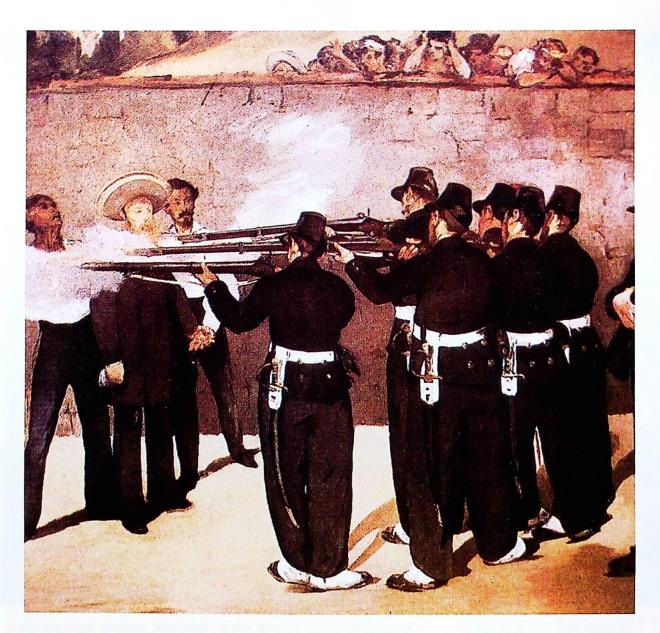
Il giovane Francesco Giuseppe,



L'imperatore Francesco I ritratto da Friedrich Amerling.

La nuova carta geografica dell'Europa così simile a quella che esisteva prima di Napoleone era il parto della mente di un geniale diplomatico e uomo di stato, il Principe di Metternich, che era riuscito nel gioco apparentemente impossibile di far sposare una principessa austriaca a Napoleone, d'essere alleato con lui nella guerra contro la Russia e di far emergere il suo paese potente come prima, anche se ora controllava un'area diversa (le penisole italiana e balcanica, l'Ungheria, la Boemia e parte della Polonia, anziché la Germania).

Il Principe di Metternich era l'obbediente Primo Ministro dell'imperatore Francesco I e fu poi l'obbediente esecutore del suo testamento durante i tredici anni di regno dell'inetto imperatore Ferdinando. Metternich stesso, che seguiva le regole stabilite da Francesco I, anche se non sempre era d'accordo su di esse, disse: «J'ai gouverné l'Europe quelquefois, l'Autriche jamais» («Ho governato l'Europa qualche volta, mai l'Austria»).

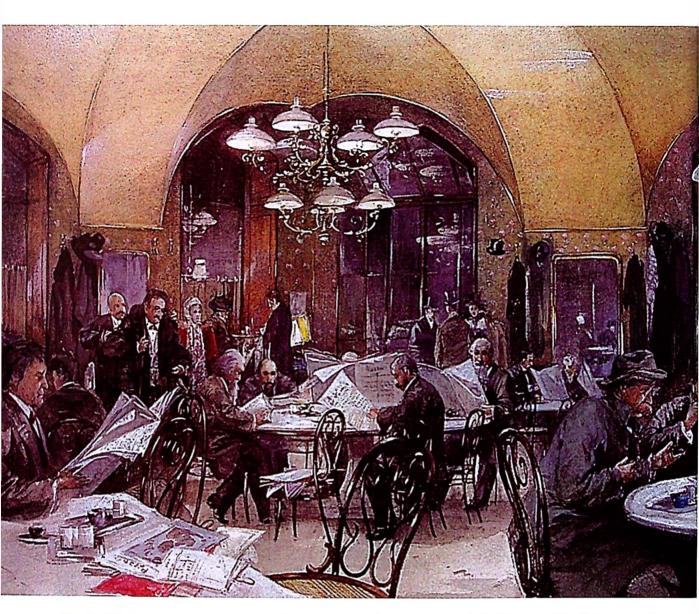


Vazio- La fucilazione di Massimiliano d'Austria proce- in Messico, dipinta da Manet.

Si può dire senz'altro che lo scopo di Francesco I era un'ottusa conservazione dello status quo, anche quando questo voleva dire mantenere alcune procedure del suo predecessore, l'illuminato imperatore Giuseppe II. «Il mio reame – disse una volta Francesco – somiglia a una casa mangiata dai vermi. Se si rimuove una parte, non si può dire quanta ne cadrà»,

Non è perciò sorprendente che il XIX secolo sia stato segnato dall'emergere di guerre dell'indipendenza in vari paesi o cambiamenti di regime in altri, come per esempio la Francia. Nel 1848, in seguito a moti insurrezionali in molte regioni sottoposte all'Impero austriaco (tra cui le Cinque Giornate di Milano), Ferdinando abdicò e fu sostituito da Francesco Giuseppe.

L'Austria fu sconfitta prima dalla Francia (1859) e poi dalla Prussia (1866). E quest'ultima guerra pose fine alle pretese di egemonia degli Asburgo sui paesi di lingua tedesca; l'Austria divenne non più di una potenza di secondo rango e nacque l'Impero tedesco. Il Regno di Sardegna (inizialmente formato da Piemonte, Liguria e Sardegna) trasse vantaggio da queste sconfitte austriache, per trasformarsi in Regno d'Italia. Infatti fu in ambedue le guerre al fianco del vincitore, e la stessa spedizione dei Mille non sarebbe stata possibile se l'Austria fosse stata quella di un tempo. Nel 1867 la «questione ungherese» era stata risolta creando due stati distinti, l'Impero d'Austria e il Regno d'Ungheria, uniti sotto il governo della stessa dinastia.



Un caffè di Vienna nel secolo XIX.

Tutto questo era già avvenuto quando Boltzmann cominciò la sua carriera scientifica, e quindi il nostro scienziato godette di un periodo senza guerre. C'erano ancora problemi con gli Slavi, i Cechi, gli Italiani (del Trentino e della Venezia Giulia), e gli Ungheresi, ma venivano risolti con metodi pacifici. Così, per esempio, due ex-nemici, l'imperatore d'Austria e il re d'Italia, finalmente riconciliati, erano in quegli anni tra gli spettatori per uno spettacolo di gala, la *Lucia di Lammermoor* di Donizetti, seguita da un balletto, al Teatro della Fenice di Venezia (semidistrutto da un incendio nel gennaio 1996 e non ancora restaurato). Notiamo di passaggio che, molti anni dopo il periodo di cui stiamo parlando (nel febbraio 1900), l'imperatore conferi simultaneamente la Medaglia dei Benemeriti dell'Arte e della Scienza a Boltzmann, a Giuseppe Verdi (che doveva morire l'anno dopo) e allo scrittore polacco H. Sienkiewicz (autore di *Quo Vadis?*).

Occasionalmente una nave partiva dall'Austria verso il Sudamerica o per le Indie Orientali; ma non troppo spesso. Gli austriaci non cullavano ambizioni imperialiste, soprattutto dopo aver tentato di far salire Massimiliano d'Asburgo, fratello di Francesco Giuseppe, sul trono del Messico e dopo aver invece assistito senza nulla potere alla sua fucilazione da parte delle truppe repubblicane di Benito Juarez nel 1867.

La gente era lieta di trovarsi al centro dell'Europa, dove si incontravano gli antichi assi del mondo. Le parole «colonia» e «oltremare» arrivavano agli orecchi come cose lontane, di cui non si era avuta esperienza. C'era del lusso; ma





Caffè e pasticcerie: la moderna immagine di Vienna.

non così raffinato come in Francia. C'era dello sport; ma non così assiduo come in Inghilterra. Quanto alle ambizioni militari, si spendevano somme enormi nell'esercito, ma appena sufficienti ad assicurarsi di rimanere la penultima in forza tra le grandi potenze.

Analogamente Vienna era un po' più piccola delle altre metropoli del mondo,

ma un po' più grande delle solite grandi città. Come ogni metropoli europea, era fatta di irregolarità, alternanze, cadute, intermittenze, urti di cose ed eventi, e, in mezzo, punti di profondo silenzio; di binari e terre vergini, di un grande battito ritmico e dell'eterno disaccordo e sconvolgimento di ogni ritmo; e, in complesso, sembrava una mistura in ebollizione dentro un recipiente fatto di case, leggi, regole e tradizioni storiche. Era, però, un grande centro culturale.

In generale, si può dire che tutto il mondo di lingua tedesca stava crescendo nel suo ruolo culturale al punto di rivaleggiare con la Francia e la Gran Bretagna e quasi superarle.

L'Austria (non il piccolo paese odierno ma un grande impero anche se non più delle dimensioni che aveva avuto sotto Carlo V) era un paese amministrato con astuzia, circospezione e abilità – dirette a smussare cautamente ogni angolo – dalla migliore burocrazia europea, a cui si poteva rimproverare una sola cosa: per essa, il genio e lo spirito di iniziativa in una persona non autorizzata a tali doni dai suoi nobili natali o da un elevato impiego governativo apparivano sintomi di impertinenza e presunzione. A nessuno, dopo tutto, piace di veder dettar legge una persona non autorizzata! Quindi se si poteva pensare a volte che un genio fosse una testa di rapa, non capitava mai, per contro, come invece poteva succedere in altri paesi, che una testa di rapa potesse esser preso per un genio.

Nell'immaginazione di molti, Vienna significa oggi valzer di Strauss, Concerto di Capodanno, vita da caffe, pasticceria attraente. Qualche settimana dopo che l'esercito di Francesco Giuseppe era stato sconfitto dai Prussiani a Sadowa (luglio 1866), Strauss allontanò le menti della borghesia viennese dal disastroso evento. Siamo soliti considerare il valzer come se fosse una tipica espressione del godersi la vita dei viennesi. Ma ci sono diverse descrizioni che indicano come molti dei contemporanei di Strauss abbiano considerato la sua musica «africana, erotica, edonistica, demoniaca, baccantica, pericolosa».



L'abitazione della famiglia Boltzmann a Graz.

I Boltzmann a Graz

I Boltzmann passarono 14 anni a Graz, dove ebbero due figli e tre figlie. I primi dieci anni furono piuttosto felici; il solo evento triste fu la morte della madre di Ludwig nel 1885.

In quegli anni Boltzmann sviluppò le sue idee sulla concezione statistica della natura, onorato e rispettato dalla comunità accademica e dal Governo. Per assisterlo era stato nominato un professore straordinario (equivalente a un odierno associato) nella persona di Albert von Ettingshausen (nipote di Andrea, già incontrato) che si occupava di quasi tutti gli aspetti amministrativi e fu lo scopritore dell'effetto Nernst-Ettingshausen (un effetto galvano-magnetico).

Nel 1878 Boltzmann diventò preside di Facoltà, nel 1888 consigliere del Governo, nel 1885 membro dell'Accademia imperiale delle scienze, nel 1887 rettore dell'Università di Graz e nel 1889 Consigliere di corte. Per non parlare della lunga lista dei riconoscimenti accademici dall'estero (fu anche socio straniero dell'Accademia dei Lincei).

Oltre alla sua cattedra, quella che era stata di Toepler, ce n'era un'altra, che era stata di Boltzmann stesso durante il suo primo soggiorno a Graz. Allora era coperta da Heinrich Streintz, una persona molto rispettabile e distinta, che rimaneva all'ombra del suo famoso collega. In effetti, Boltzmann non ebbe mai



Boltzmann con la famiglia (1886): da sinistra a destra, le figlie Henriette e Ida, i figli Ludwig e Arthur.

3

problemi con Streintz, a cui dette tutto il proprio sostegno personale e finanziario, quando ce n'era bisogno.

Boltzmann amava molto la natura. Faceva lunghe passeggiate, durante le quali usava spesso dare spiegazioni di botanica ai figli e che, insieme col pattinaggio su ghiaccio che praticava d'inverno, mettevano un qualche rimedio alla scarsità di esercizio fisico dei suoi anni giovanili. Aveva comprato una fattoria presso Oberkroisbach, con una bella vista su una buona parte della Stiria, e viveva in campagna con la famiglia. Conosceva la botanica fin dall'adolescenza, aveva collezionato un erbario e una raccolta di farfalle. I suoi vicini erano agricoltori. Possedeva un cane alsaziano, che scendeva dalla fattoria a mezzogiorno, aspettava fuori dell'istituto e accompagnava il padrone a una trattoria vicina, dove rimaneva sdraiato ai suoi piedi durante il pranzo. Si dice che Boltzmann abbia condotto di persona una mucca, che aveva appena comprato, attraverso le vie di Graz, dopo aver consultato i suoi colleghi di zoologia sul modo migliore per mungerla.

Durante questo periodo Boltzmann fu invitato a corte in diverse occasioni. Amava la cucina e mangiava piuttosto lentamente, forse anche a causa della sua miopia. Nelle situazioni ufficiali, l'imperatore Francesco Giuseppe toccava appena il cibo e l'etichetta di corte non permetteva che gli ospiti continuassero a mangiare dopo che l'imperatore aveva finito. Pare che lo scienziato rimanesse molto male quando i camerieri gli portavano via il piatto talmente in fretta che riusciva a malapena ad assaggiare quei piatti squisiti. Ma non fu questa certo la ragione che lo spinse a rifiutare il titolo nobiliare che gli fu offerto dall'imperatore. Diceva infatti: «Il nostro nome borghese è andato bene per i miei antenati e andrà bene anche per i miei figli e nipoti.».

Boltzmann voleva molto bene ai propri figli. Riportiamo qui un aneddoto che si riferisce a un periodo successivo della sua vita. Capitò che la figlia minore desiderasse una scimmietta, ma Frau Boltzmann non voleva animali in casa. Lo scienziato escogitò il compromesso di comprare dei conigli per la figlia e installò per loro una gabbia nella propria biblioteca. La stanza dell'ultimogenita era vicina allo studio dello scienziato e la bambina poteva giocare con gli animali. La sera Boltzmann dava una bussatina alla porta di lei come segno di affetto e per augurarle la buonanotte.

Gli hobby di Boltzmann includevano il pattinaggio su ghiaccio e il nuoto. Gli piacevano anche le serate con amici che si protraevano fino a tardi. In effetti, questi ricevimenti a casa sua erano frequenti e tra gli invitati c'erano anche i suoi allievi di dottorato. Gli piaceva socializzare e ai ricevimenti era un ospite gradito perché intratteneva tutti con il suo umorismo eccezionale. In tali occasioni scriveva poesie divertenti; la più nota, scritta negli ultimi anni di vita, è intitolata Beethoven in Paradiso.

Boltzmann era un gran conoscitore della letteratura classica tedesca, che amava citare. Dedicò il suo libro *Populäre Schriften* (*Scritti divulgativi*) a Friedrich Schiller, che era il suo poeta preferito, mentre tra i compositori preferiva Beethoven. Gli piaceva suonare al piano le sinfonie di questo grande musicista nella forma adattata da Liszt. Con vari amici e col figlio Arthur suonava spesso musica da camera. Gli piacevano anche i concerti filarmonici ed era assiduo frequentatore dell'Opera di Vienna.

All'Università aveva fondi in abbondanza, molto spazio, l'aiuto di Ettingshausen, un paio di studenti di dottorato e di visitatori e ogni opportunità di perseguire i propri interessi sperimentali, che derivavano dai suoi problemi teorici o dalle sue scelte. Il lavoro di preside non era impegnativo, soprattutto dal momento che, appena possibile, veniva lasciato al vice-preside.

Erano circostanze idilliache. Boltzmann era in contatto epistolare coi fisici più famosi del tempo, H. A. Lorentz, H. Helmholtz, J. Rayleigh, W. Ostwald. Tuttavia le poche lettere scritte in quel periodo indicano che in qualche modo si sentiva lontano dai centri della scienza moderna, dove avrebbe potuto avere più contatti e discussioni.

Però confessò a Toepler, con una certa soddisfazione, che il matrimonio rende pigri più di quanto ci si aspetti. Forse è per questo che il suo successore Leopold Pfaundler, con tutto il suo rispetto per Boltzmann, dichiarò di aver trovato un porcile nell'edificio dell'istituto. In effetti sembra che il famoso scienziato abbia fatto veramente il minimo, come docente universitario, tutto preso dalle sue ricerche.

Boltzmann a Graz: le prime pubblicazioni

Con i primi testi dedicati ai gas, alla fine degli anni settanta, lo scienziato pose le basi della sua futura notorietà internazionale



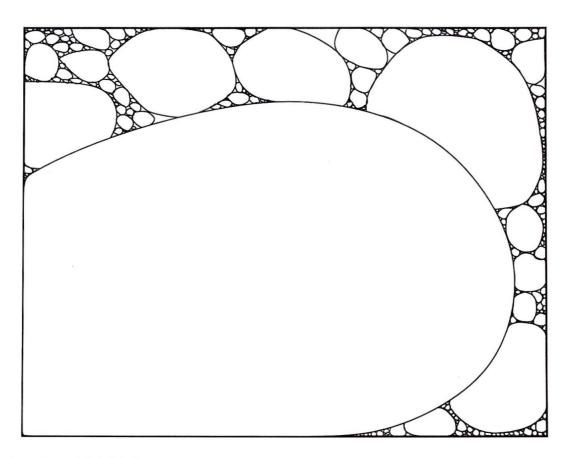
Tel 1877 Boltzmann pubblicò il suo lavoro sui Fondamenti probabilistici della teoria del calore, in cui formulava quello che Einstein chiamò in seguito principio di Boltzmann; in esso viene estesa l'interpretazione del concetto di entropia come una misura, ben definita matematicamente, di quello che si può chiamare il «disordine» degli atomi, già presente nel suo lavoro del 1872.

Questa interpretazione divenne un'affermazione generale. Come si sa, in fisica, prima di Boltzmann, gli effetti del disordine nel moto degli atomi venivano studiati senza nemmeno affermare la struttura atomica della materia, nella disciplina chiamata termodinamica; c'era una grandezza piuttosto misteriosa, la già citata entropia, che giocava un ruolo importante tutte le volte che certi processi non erano permessi. Grazie al lavoro di Boltzmann risultava che l'entropia non è nient'altro che la misura del livello di probabilità di uno stato macroscopico, che può essere collegata alla probabilità dello stato microscopico, quando si descrive il mondo delle molecole con una relazione trovata da Boltzmann (da non confondere con l'equazione di Boltzmann, di cui abbiamo già parlato) e incisa sulla sua tomba a Vienna nella forma $S = k \log W$, dove $S \in l$ 'entropia, W la probabilità e k la cosiddetta Costante di Boltzmann, Anziché di probabilità, si può parlare di una misura del disordine degli atomi, perché gli stati disordinati equivalenti (per un dato stato macroscopico) sono moltissimi e la probabilità che uno di essi si realizzi è estremamente elevata.

Il testo originale della memoria del 1877 è chiaro e suggestivo. Boltzmann enuncia l'idea che vuole utilizzare in questi termini:

«Lo stato iniziale d'un sistema sarà, nella maggior parte dei casi, poco probabile e il sistema tenderà sempre verso stati più probabili, fino ad arrivare allo stato più probabile, cioè lo stato d'equilibrio termodinamico. Se applichiamo questa idea al Secondo Principio della termodinamica, potremo identificare la grandezza che si usa chiamare

La formula S = klogW è incisa sulla pietra tombale di Ludwig Boltzmann nel cimitero di Vienna.



entropia con la probabilità dello stato corrispondente. Consideriamo quindi un sistema di corpi che sia isolato (e il cui stato non si modifica quindi che per interazione tra i corpi che lo costituiscono). In una tale trasformazione, in virtù del secondo principio della termodinamica, l'entropia totale dell'insieme dei corpi del sistema deve aumentare continuamente: il sistema non può che passare da un dato stato a uno più probabile.».

Boltzmann considera naturalmente il caso più semplice, quello d'un gas racchiuso in un recipiente a pareti specularmente riflettenti e per evitare le difficoltà connesse col fatto che le variabili di posizione e velocità sono continue, prende come punto di partenza il suo modello favorito, quello discreto, «una finzione irrealizzabile», che è utile per far emergere le idee essenziali. Considera perciò una collezione di N molecole, con energie discrete (0, u, 2u, ...pu) ed energia totale fissata e uguale a un multiplo intero dello stesso «quanto» u, lu, con l intero. In questo modello, la funzione di distribuzione è sostituita da una collezione di interi $n_0, n_1, n_2, ..., n_p$ dove n_k è il numero di molecole con energia ku; a questa collezione Boltzmann dà il nome di «distribuzione di stati» (Zustandsverteilung). Allora abbiamo:

$$n_0 + n_1 + n_2 + ... + n_p = n$$

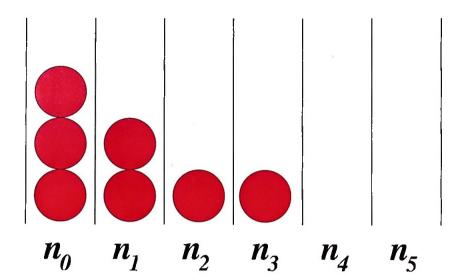
 $n_1 + 2n_2 + ... + pn_p = 1$ (1)

Boltzmann dà poi il nome di complessione a una ripartizione in cui le molecole che possiedono un'energia data non vengono distinte. Il numero P delle complessioni compatibili con una data distribuzione è dato dalla relazione:

$$P = n!/(n_0!n_1!n_2!...n_n!)$$
 (2)

dove, come al solito, $n! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \dots$ n e 0! = 1. Infatti se permutiamo le N molecole in tutti i possibili elenchi, avremo n! elenchi; ma $n_1!$ avranno energia $u, n_2!$ energia $2u, \dots, n_p!$ energia pu; quindi occorre, per calcolare il numero delle complessioni, dividere n! per il prodotto $n_0!n_1!n_2!\dots n_p!$.

Una suddivisione dello spazio delle fasi in regioni corrispondenti a stati macroscopicamente indistinguibili. L'entropia è proporzionale al logaritmo del volume nello spazio delle fasi.



Per esempio, se abbiamo quattro molecole con energia totale 4*u*, avremo cinque possibili distribuzioni:

1) una molecola con energia 4u, tre molecole con energia 0; ci sono 4!/(0!3!) = 4 complessioni, e cioè:

2) una molecola con energia 3u, una molecola con energia u, due molecole con energia 0; ci sono 4!/(1!1!2!) = 12 complessioni, e cioè:

3) una molecola con energia 2u, due molecole con energia u, una molecola con energia 0; le complessioni sono 4!/(1!2!1!) = 12, e cioè:

4) due molecole con energia 2u, due molecole con energia 0; ci sono 4!/(0!2!2!) = 6 complessioni, e cioè:

5) quattro molecole con energia u; ci sono 4!/(4!0!0!) = 1 complessione, e cioè:

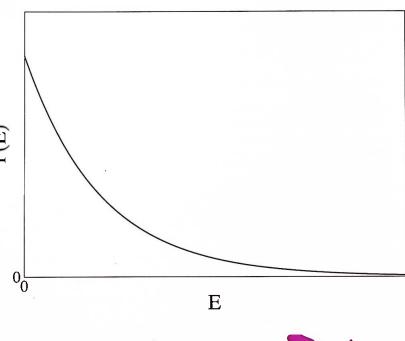
Al fine di illustrare il numero di complessioni e di conseguenza la probabilità di realizzazione di una data distribuzione, Boltzmann esamina in dettaglio l'esempio d'un sistema costituito da 7 molecole (un numero piccolo, ma un po' più grande del numero 4 considerato prima) con energia totale 7*u*. Ci sono allora 15 distribuzioni possibili e 1716 complessioni.

Lo stato più probabile è caratterizzato da $n_0 = 3$, $n_1 = 2$, $n_2 = n_3 = 1$, mentre gli altri n_k sono nulli; è un'approssimazione rudimentale a una funzione esponenziale decrescente.

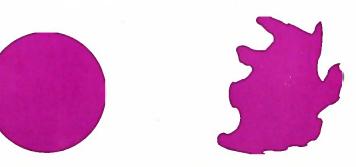
Il numero delle complessioni corrispondenti è allora dato da:

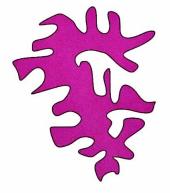
$$P = 7!/1!1!2!3! = 2 \cdot 5 \cdot 6 \cdot 7 = 420$$

ed è quindi 60 volte superiore a quello dello stato in cui tutta l'energia si concentra in una sola molecola (in tal caso il denominatore sarebbe 1!6!).



La distribuzione di Maxwell-Boltzmann generalizza la distribuzione delle velocità di Maxwell a ogni tipo di energia.





Invece di studiare l'evoluzione nel tempo della distribuzione come conseguenza degli urti (metodo cinetico), Boltzmann propone ora di determinare la «probabilità» di una distribuzione in maniera «completamente indipendente da come quella distribuzione è stata raggiunta», in altre parole di determinare la distribuzione più probabile (sotto i vincoli della conservazione del numero e dell'energia totale delle particelle, espresse dalle (1)), affidandosi all'idea intuitiva che l'evoluzione porterà a questa distribuzione.

Boltzmann prende il numero delle complessioni, dato dalla (2), come misura della probabilità di una data distribuzione, sottolineando che in questo modo considera le complessioni equiprobabili a priori, così come la probabilità che vengano estratti 1, 2, 3, 4, 5 su una data ruota al lotto non è diversa da quella di ogni altra cinquina preassegnata. In tal modo, il problema è ridotto alla ricerca di un massimo vincolato di P; bisogna cioè cercare per quali valori di n_1 , n_2 , ..., n_p , il numero P dato dalla relazione (2), prende il valore massimo, quando i vari n_k non possono variare arbitrariamente ma sono sottoposti al vincolo di soddisfare le due relazioni (1).

Il problema sarebbe complicato se i numeri considerati fossero piccoli; ma se, come avviene nella realtà, sono molto grandi, si può utilizzare la formula di Stirling, secondo la quale $n! = n^n e^{-n} u(n)$ dove e è la base dei logaritmi naturali e u(n) è un fattore che varia molto lentamente rispetto agli altri e può quindi trattarsi come una costante. È allora chiara la convenienza di lavorare col logaritmo naturale di P che è dato da:

$$-\log P = n_0 \log n_0 + n_1 \log n_1 + n_2 \log n_2 + \dots + n_n \log n_n - n \log n + r_n$$
 (3)

dove l'ultimo termine varia lentamente e può essere trascurato (in effetti la sua variazione percentuale tende a zero quando N tende all'infinito).

Conservazione del volume nello spazio delle fasi. Il teorema di Liouville dice che quando abbiamo una certa regione nello spazio delle fasi (qui rappresentato dal cerchio a sinistra) e ogni punto della regione evolve nel tempo secondo la dinamica molecolare, il volume della regione rimane inalterato; ma la regione cambia di forma, diventando, in generale, sempre più sparpagliata nello spazio delle fasi.

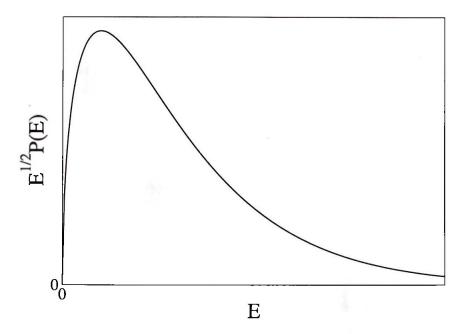
Nella (3) abbiamo tenuto conto del vincolo dato dalla prima delle relazioni (1). Boltzmann dimostra che la distribuzione:

$$n_k = n \cdot e^{-\beta ku} (k = 0, 1, 2, ..., p)$$

dà il massimo di $\log P$, dove n_* e β sono due costanti che servono a soddisfare i due vincoli nella (1).

Boltzmann continuò il suo lavoro, trattando il caso di un gas con energie date da variabili reali. Occorreva quindi trovare un'espressione per *P* o per il suo logaritmo anche in questo caso; naturalmente un metodo ovvio è quello di discretizzare il caso continuo, usare il metodo precedente e poi passare al limite. È infatti questo il metodo seguito da Boltzmann. Sostanzialmente si otterrà che le somme sono sostituite da integrali.

Qui nasce un piccolo problema, legato all'equiprobabilità a priori degli stati, che viene sfruttato abilmente da Boltzmann per ricavare prima un risultato sbagliato, forse per ottenere quel tipo di effetto teatrale che ammirava tanto



negli scritti di Maxwell. Nel caso continuo non è immediatamente evidente come definire gli stati equiprobabili, ma, come indicato da Boltzmann stesso, c'è un principio guida fornito dal fatto che un volume di una regione dello spazio astratto in cui si possono pensare rappresentati gli stati o fasi del sistema (spazio delle fasi) non varia durante l'evoluzione temporale (grazie a un teorema di Liouville); quindi sono equiprobabili gli insiemi di egual misura nello spazio delle fasi.

L'errore che si può commettere è quello di prendere la misura (di Lebesgue) unidimensionale per l'energia E, arrivando a omettere un fattore $E^{1/2}$. Una volta chiarito questo, si vede che l'equivalente di $-\log P$ è proprio la grandezza H precedentemente scoperta da Boltzmann nel grande lavoro del 1872 e data dall'integrale di flogf rispetto alla misura nello spazio delle fasi.

Se ci fimitiamo, per semplicità, ancora al caso dei gas monoatomici in assenza di forze esterne (anche se in questo caso l'estensione è banale), la minimizzazione vincolata di H o la massimizzazione di $\Omega = \log P$ fornisce la distribuzione di velocità di Maxwell e il valore corrispondente del logaritmo di P (che Boltzmann chiama permutabilità) uguaglia l'entropia in uno stato d'equilibrio, a meno di un fattore (2/3 con le normalizzazioni di Boltzmann, che non distingue, per un gas perfetto, tra energia interna e temperatura).

Boltzmann conclude dicendo: «È ben noto che, quando un sistema di corpi subisce una trasformazione puramente reversibile, l'entropia totale del sistema

rimane costante. Se, al contrario, tra le trasformazioni subite, ce ne sono di irreversibili, l'entropia del sistema non può che aumentare... In virtù della relazione precedente, lo stesso avviene di $\Sigma\Omega$, misura della permutabilità per l'insieme dei corpi. Questa misura della permutabilità è quindi una grandezza che in uno stato d'equilibrio termodinamico coincide con l'entropia, a meno di un fattore costante, ma che possiede un senso anche durante ogni processo irreversibile, nel corso del quale cresce continuamente.

Se ne deducono immediatamente due enunciati: il primo si riferisce a un sistema di corpi che subisce diverse trasformazioni, di cui almeno alcune sono irreversibili ... Se, all'inizio e alla fine del processo, il sistema viene a trovarsi in uno stato d'equilibrio termodinamico, l'entropia totale di questo sistema può calcolarsi immediatamente; è uguale ogni volta ai due terzi della misura di permutabilità. Questo primo enunciato esprime allora il fatto che l'entropia totale è sempre maggiore, dopo le trasformazioni subite, al suo valore iniziale; questo vale anche, naturalmente, per la misura di permutabilità. Il secondo enunciato si riferisce a un gas che subisce una trasformazione senza che lo stato iniziale e quello finale siano necessariamente d'equilibrio termodinamico. Non si può quindi calcolare l'entropia del gas nello stato iniziale e in quello finale, ma si può sempre calcolare la grandezza che abbiamo chiamato misura della permutabilità; e qui ancora il suo valore finale è necessariamente superiore a quello iniziale. Si può anche verificare che auest'ultimo enunciato si estende senza difficoltà a un sistema costituito da più gas, e anche al caso in cui le molecole sono poliatomiche e sottoposte all'azione di forze esterne.».

Boltzmann formula anche il seguente risultato generale: «Si consideri un sistema qualsiasi che subisce una trasformazione arbitraria, senza che gli stati iniziale e finale siano necessariamente d'equilibrio; in queste condizioni, la misura della permutabilità dell'insieme dei corpi del sistema aumenterà costantemente nel corso del processo, e potrà al più restare costante nei processi reversibili infinitamente vicini all'equilibrio termodinamico.». Nel formulare questo enunciato, Boltzmann sembra ben cosciente di aver raggiunto un principio molto generale e considera verosimile che questo principio non debba essere fimitato al caso dei gas, ma estendersi anche al caso dei solidi e dei fluidi, ancorché una trattazione matematica esatta di questi casi più generali appaia scontrarsi con difficoltà di descrizione dettagliata.

Nel 1884 Boltzmann, al corrente del lavoro del fisico italiano Adolfo Bartoli sulla pressione di radiazione, ne fu spinto a occuparsi dell'argomento e dette una brillante deduzione teorica della legge empirica di Stefan per il calore raggiante, secondo cui l'energia irraggiata da una sorgente è proporzionale alla quarta potenza della temperatura assoluta della sorgente stessa. Questa deduzione si trova oggi in tutti i testi universitari che si occupano dell'argomento.

Nello stesso anno Boltzmann scrisse anche un lavoro fondamentale, generalmente ignoto alla maggioranza dei fisici, che leggendo esposizioni di seconda mano sono condotti erroneamente a credere che Boltzmann abbia discusso solo gas ideali; questo lavoro indica chiaramente che egli considerava anche molecole interagenti tra loro, con un'energia potenziale non trascurabile.

In questo lavoro, il meno citato tra i suoi contributi fondamentali, Boltzmann formulò l'ipotesi che alcune tra le possibili distribuzioni stazionarie possano interpretarsi come stati di equilibrio macroscopico. Il lavoro venne ripreso, ampliato ed esposto in un classico trattato di Gibbs ed è la terminologia di Gibbs quella che si è imposta. In effetti un insieme statistico (l'*ensemble* di Gibbs) è chiamato «monodo» da Boltzmann. Più precisamente, la domanda che Boltzmann si pone è la seguente: quali insiemi statistici di distribuzioni stazionarie hanno la proprietà che al variare infinitesimo dei loro parametri, valgano (almeno nell'appropriato limite, in cui il volume e il numero delle molecole tendono all'infinito, mentre il loro rapporto rimane limitato) le relazioni della termodinamica d'equilibrio? Tali insiemi sono detti da Boltzmann «ortodi». La risposta data da Boltzmann alla propria domanda è che esistono almeno due insiemi di questo tipo, l'«ergodo» (*insieme microcanonico* di Gibbs) e l'«olodo» (*insieme canonico* di Gibbs).

Boltzmann nel 1884, professore a Graz.

Benché dunque Boltzmann abbia dato inizio allo studio degli stati d'equilibrio per situazioni più generali di quella, già considerata da Maxwell, d'un gas non troppo denso in assenza di forze esterne, non è al suo nome ma a quello di Gibbs che vengono associati, di solito, i metodi di questa sottodisciplina (la più sviluppata) della meccanica statistica. Anche la terminologia (insieme microcanonico, insieme canonico, insieme gran canonico) è quella di Gibbs, mentre i primi due furono chiaramente definiti (con altri nomi) e usati da Boltzmann. È quindi indubbio che fu Boltzmann, e non Maxwell o Gibbs, a scoprire in maniera precisa come il secondo principio è legato alla probabilità, creando la meccanica statistica.

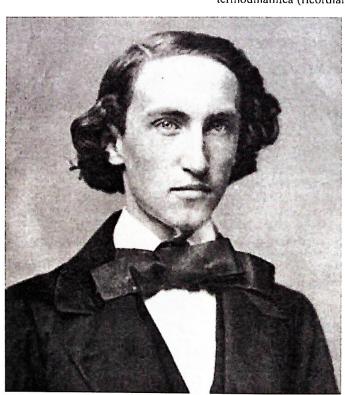
Perché allora, al di là di generici riconoscimenti a Boltzmann, è il nome di Gibbs quello che emerge? Si tratta d'una questione interessante, a cui può essere fin troppo facile rispondere. All'epoca in cui sviluppò la sua trattazione, Gibbs era al termine d'una carriera dedicata allo studio e alle applicazioni della termodinamica (ricordiamo, per citare un esempio, la sua famosa regola delle

fasi), in cui un pensiero astratto era rischiarato da numerose rappresentazioni geometriche, ma non da rappresentazioni basate su modelli meccanici di tipo atomico. Benché schemisse alquanto i procedimenti tipici dei matematici, Gibbs non era meno severo di questi nell'applicare una logica stringente e preoccupato di non pubblicare altro che risultati completi. Insomma, aveva un carattere e un modo di procedere quasi diametralmente opposto a quello di Boltzmann, che aveva nella sua intuizione, nella sua fede nei modelli meccanici e nel suo entusiasmo le armi vincenti, con l'ovvia conseguenza d'un numero elevatissimo di scritti, di lunghezza preoccupante. Già Maxwell aveva scritto a Tait nel 1873: «Studiando Boltzmann, non sono riuscito a capirlo. Lui non mi capiva per la mia concisione, ma la sua prolissità era ed è un intoppo per me. Sono perciò incline a unirmi alla bella compagnia di quelli che rimpiazzano e a raccontare l'intera storia in sei righe». Se così scriveva Maxwell, ci possiamo immaginare quale fosse l'opinione sullo stile e le affermazioni di Boltzmann in tempi e luoghi più ostili alla teoria atomica della materia. Il fatto che il lavoro di Boltzmann sia scritto in tedesco e non sia mai stato tradotto in inglese non ha certo migliorato le cose. Nel 1886, profondamente impressionato dalla verifica sperimentale, da parte di Hertz, dell'equivalenza tra onde elettromagnetiche e luce, predetta dalla teoria di Maxwell, Boltzmann dedicò

uno sforzo considerevole a ripetere gli esperimenti di Hertz. Questo lavoro è documentato nell'ultima pubblicazione scritta prima di lasciare Graz. A differenza da quanto fece in seguito, Boltzmann evitò in quegli anni di discutere gli aspetti filosofici della scienza e della conoscenza.

In un tempo relativamente breve il suo approccio alla teoria cinetica era diventato ampiamente noto, soprattutto in Gran Bretagna, come risulta dal fatto che un piccolo libro di H. W. Watson sulla teoria cinetica, pubblicato nel 1876, faceva uso dei metodi di Boltzmann. Era già stato celebrato come uno dei padri della teoria cinetica dei gas in una biografia di Maxwell scritta nel 1882. Una discussione scientifica con due famosi colleghi, P. G. Tait e W. Burnside, nel 1885-7 contribuì notevolmente a migliorare le sue relazioni coi fisici britannici. Dato che non erano molti quelli che osavano leggere i suoi lunghi lavori, furono queste discussioni a gettare le basi della reputazione internazionale di Boltzmann, che crebbe forse prima in Inghilterra che nel mondo di lingua tedesca. Ne seguì un cumulo di riconoscimenti e premi scientifici.

Insomma, durante il suo secondo soggiorno a Graz Boltzmann pose le basi della sua reputazione internazionale, divenendo uno dei grandi nomi della fisica dell'epoca. È da pensare che sia stata proprio questa circostanza la causa di uno degli avvenimenti che gli cambiarono la vita, come vedremo di qui a poco.



Josiah Willard Gibbs (1839-1903), considerato da molti, a torto, il fondatore della meccanica statistica, di cui inventò il nome.

L'inizio della crisi

Tensioni, dispiaceri e troppe responsabilità nell'ateneo di Graz condussero Boltzmann a Berlino mentre la morte del figlio lo precipitava nello sconforto

n pochi mesi la situazione idilliaca che abbiamo appena descritta cambiò di colpo. I problemi cominciarono nel gennaio 1888 e peggiorarono fino a svilupparsi in una crisi fisica e psicologica veramente seria nei mesi tra maggio e luglio.

Che cosa era successo? Si può identificare una serie di fatti spiacevoli, nessuno dei quali però sufficiente, da solo, a spiegare una crisi di tali proporzioni. Presi tutti insieme, però, possono giustificarla, in quanto causarono un coagulo

di problemi che Boltzmann non fu in grado di superare.

La prima crisi psicologica documentata, in effetti, risale al 1885, ed è molto probabilmente collegata con la morte della madre di Boltzmann. In quanto tale, potrebbe essere interpretata come una reazione naturale di un uomo di 41 anni, che aveva perso il padre all'età di 15 anni ed era profondamente affezionato all'unico genitore sopravvissuto. È da osservare, tuttavia, che nel 1885 non scrisse alcun lavoro scientifico e non risulta neppure alcuna lettera.

Nel 1888, un primo problema originò dalla già citata elezione di Boltzmann a rettore: un onore, ma anche un onere, a cui Boltzmann non era preparato. Il 22 novembre 1887, gli studenti filogermanici di Graz tolsero il busto dell'imperatore d'Austria da una delle sale dove facevano le loro feste e fecero discorsi anti-asburgici. Boltzmann, in qualità di rettore, fu costretto a prendere misure disciplinari contro gli studenti, mentre era tenuto d'occhio dal Governatore della Stiria, dall'amministrazione centrale in Vienna e dall'imperatore in persona. Ciò gli causò uno stato di tensione dovuto all'eccesso di responsabilità, soprattutto perché queste attività durarono per più di quattro mesi, estendosi fino alla primavera del 1888.

Un altro fatto che, con le sue conseguenze, gli provocò preoccupazioni fu la morte di Gustav Kirchhoff, avvenuta a Berlino il 17 ottobre 1887. Boltzmann lo commemorò a Graz il 15 novembre e, negli ultimi giorni del 1887 e i primi del 1888, fu invitato a Berlino, dove gli venne offerta l'opportunità di diventare il successore di Kirchhoff nonché collega di Helmholtz.

Partì subito, visitò gli istituti e i laboratori, accettò l'offerta e scelse perfino le sue stanze nel Dipartimento. Il relativo contratto era già stato firmato dal Kaiser nel marzo 1888, quando Boltzmann chiese di scioglierlo. Si può presumere che le maniere alquanto formali del mondo accademico berlinese lo avessero messo un po' in difficoltà, data l'abitudine all'atmosfera rilassata di Graz. Per esempio, si racconta che dopo la contrattazione al ministero, durante un pranzo coi colleghi, la sig.ra Helmholtz gli abbia detto: «Professor Boltzmann, ho paura che non si sentirà a suo agio qui a Berlino», forse perché aveva usato il coltello sbagliato.



Il Kaiser Guglielmo II firmò la sua nomina di professore a Berlino, ma Boltzmann non prese mai servizio.

In realtà ci devono essere state altre ragioni. Infatti, tutti i suddetti contatti avrebbero dovuto restare segreti, ma divennero noti a metà gennaio ed ebbero come conseguenza il fatto che Heinrich Streintz fece le sue mosse: domandò più spazio e più soldi, perché pensò che queste richieste non avrebbero offeso il suo direttore o chiunque altro, visto che Boltzmann stava per andare a Berlino.

Il 1° febbraio, Albert von Ettingshausen venne nominato supplente di fisica al Politecnico di Graz su una Cattedra, per cui veniva ritenuto il miglior candidato e che venne infatti chiamato a coprire poche settimane dopo. Con la partenza di Ettingshausen, Boltzmann perse il principale sostegno nel suo Dipartimento, un colpo piuttosto serio nella situazione in cui si trovava.

Quando tornò da Berlino, si rese conto di quel che aveva combinato e cominciò a pensare di aver osato troppo. Di conseguenza, non ebbe il coraggio d'informare le autorità austriache di aver già accettato la proposta di trasferirsi a Berlino. Cominciarono negoziati serrati per persuaderlo a restare a Graz. Questo lo costrinse a fare una specie di doppio gioco, il che, come sappiamo dal suo gioco di parole sugli integrali e gli intrighi, non era esattamente la sua specialità e lo portò a uno stato di esaurimento.

Durante la primavera del 1888, Boltzmann si trovò a dover affrontare un dilemma assai penoso, perché non osava chiarire la sua difficile posizione. Le circostanze sono oggi ben chiare da un paio di lettere ufficiali che Boltzmann scrisse alle amministrazioni austriache e prussiane, nonché da lettere ufficiali e telegrammi cifrati con nuove offerte di stipendio e altri documenti scritti,

conservati presso queste amministrazioni.

Boltzmann rimase in uno stato orribilmente confuso e penoso per mesi. Quando ricevette la chiamata a Berlino in marzo, tentò di sfruttare la sua miopia, dicendo che avrebbe avuto difficoltà a occupare

la Cattedra di Berlino a causa di questo difetto; ma Berlino rispose che lo avrebbero ricevuto con comprensione e attenzione sincera e che non volevano fare a meno di lui. Quindi la proposta di Boltzmann di rinunciare alla chiamata non ebbe l'effetto voluto. Alla fine, Boltzmann fu costretto a smentire la sua promessa e a far domanda di rinuncia alla Cattedra di Berlino, senza aver mai preso servizio. Diamo qui un passaggio della seconda lettera di Boltzmann, volta a spiegare la sua posizione:

«Iniziando la mia attività a Berlino, entrerei in un'area nuova, la fisica matematica. Negli ultimi 15 anni ho fatto lezione soltanto sulle nozioni fondamentali di fisica matematica e i concetti introduttivi del calcolo differenziale e integrale [...] Ho, però, finora trascurato quasi totalmente molti capitoli estesi e significativi della fisica matematica. Quand'ero a Berlino, mi sembrò, nel mio entusiasmo iniziale, molto più facile rimediare a questa mia negligenza. Ora, però, al momento di iniziare effettivamente questa nuova attività, mi rendo conto che metterebbe a dura prova i miei occhi. D'altra parte, la mia coscienza non mi permetterebbe di cominciare il mio lavoro, in questa posizione di alta responsabilità, senza un'esperienza

Questa lettera appare molto strana, se si pensa alla fama meritata di cui Boltzmann godeva per la sua familiarità con tutti gli argomenti oggetto di ricerca in quel periodo. Tuttavia si può ritenere che le parole della lettera appena citata riflettano un punto molto serio e intimo della personalità di Boltzmann. Esse ci dipingono un uomo pieno d'ansia e di desiderio di perfezione: quando non era in grado di essere all'altezza dell'immagine di se stesso che si era fatta, veniva preso da sentimenti di timore, sofferenza, depressione.

Il 9 luglio il Kaiser annullò la chiamata.

completa dell'intera area, per cui sono stato chiamato».



Mentre è facile descrivere in poche parole i fatti accaduti tra il gennaio e il luglio 1888, non è altrettanto semplice rendersi conto del mutamento da loro indotto nella vita e nella personalità di Boltzmann.

Fu allora, infatti, che emerse la sua nevrastenia, la sua tendenza a sviluppare sindromi maniaco-depressive. Era finito il periodo della quiete e della bellezza; cominciava quello dell'insoddisfazione e dell'irrequietezza. Boltzmann comin-



Adolf Baeyer (1835-1917), famoso chimico, insignito del premio Nobel, fu il principale artefice del trasferimento di Boltzmann a Monaco.

ciò a esitare nelle sue decisioni, a cercare di cambiare di residenza e di Università. Ciò può sembrare strano se interpretato da un punto di vista psicologico in maniera semplicistica: dato che era sfuggito alla grossa tentazione di Berlino, perché non restare a Graz? Ma è esattamente un'indicazione della sua sindrome: aveva rifiutato Berlino per ragioni che non erano chiare neanche a lui e così può aver cominciato a dubitare di essere al livello dei grandi scienziati, a cui, in maniera più o meno conscia, si era forse paragonato. Forse, però, Graz non era una sede abbastanza importante per lui. Questi sono presumibilmente i pensieri che lo rendevano irrequieto.

Agli altri problemi venne ad aggiungersi la morte del figlio maggiore Ludwig, vittima di un'appendicite all'età di undici anni. Ed è a questo evento che i biografi più tradizionalisti attribuiscono la sua depressione.

Quello che è certamente vero è che Boltzmann si rimproverava di non aver capito la serietà del caso e l'errore di diagnosi d'un medico generico e che il tragico episodio contribuì ad aumentare il suo senso d'insicurezza e d'isolamento.

Per prima cosa cercò di lasciare Graz, ormai un luogo spiacevole per molte ragioni: la cambiata attitudine dei suoi colleghi, provocata dal suo stesso

ragioni: la cambiata attitudine dei suoi collegni, comportamento, l'idea di meritare una posizione più importante, il ricordo del figlio perduto. Cominciò ad avere problemi con Streintz e altri suoi colleghi e, già alla fine del 1888, scriveva a Helmholtz di essersi ristabilito e di essere di nuovo interessato alla Cattedra di Berlino, a cui aveva rinunciato qualche mese prima.

Informò poi tutti i suoi colleghi d'ogni Università del suo desiderio di lasciare Graz per un altro ateneo. Chi capì la situazione e la sfruttò fu Eugen Lommel, che, con l'aiuto del famoso chimico Adolf Baeyer, futuro premio Nobel, nel 1890 fece trasferire Boltzmann su una Cattedra di fisica teorica all'Università di Monaco. Li era un tipo nuovo di Cattedra, ma non era molto comune anche altrove; quindi la facoltà dovette giustificarlo.

La motivazione, scritta con molta cura, rilevava che c'era una «separazione crescente della fisica teorica da quella sperimentale», dovuta alla loro «differenza di metodi»: «mentre la fisica sperimentale nel suo lavoro induttivo richiede la conoscenza e la pratica delle tecniche sperimentali che diventano sempre più complicate, la fisica teorica usa la matematica come proprio strumento principale nei suoi procedimenti deduttivi e richiede un'intima familiarità con tutti i mezzi di questa scienza in rapido progresso.».

La motivazione continuava mettendo in rilievo che la rapida crescita della fisica avrebbe avuto la conseguenza che un numero sempre minore di fisici avrebbe potuto padroneggiare ambo i metodi con la stessa perfezione: ovvero, in altre parole, che sarebbero stati costretti a specializzarsi in una delle due branche. Boltzmann, a causa del suo rilevante

talento per la ricerca teorica e «la sua grande cultura matematica», poteva «sviluppare ulteriormente e completare le teorie di Maxwell, Clausius e Helmholtz.». La facoltà di filosofia ricordava anche la sua opera in diverse aree che gli aveva guadagnato la reputazione di essere uno dei migliori fisici teorici.

Boltzmann era pronto ad andare, esattamente per la stessa ragione per cui la facoltà lo voleva, e quest'ultima, combinando gli stipendi di due Cattedre vacanti, fu in grado di permetterselo. Quando Boltzmann lasciò Graz ci fu un solenne banchetto di commiato nel tradizionale stile accademico, il 16 luglio. Il nuovo rettore J. A. Tewes e il collega di Boltzmann H. Streintz, fecero ciascuno un discorso, in cui esprimevano la speranza che Boltzmann sarebbe un giorno tornato a lavorare in Austria. Boltzmann replicò con un discorso, poi inserito nei suoi *Populäre Schriften*, intitolato «Sul significato delle teorie».

VORLESUNGEN

UEBER DIE

PRINCIPE DER MECHANIK.

VON

LUDWIG BOLTZMANN.

I. THEIL

onthaltend die Principe, bei denen nicht Ausdrücke nach der Zeit integritt werden, welche Variationen der Coordinaten oder ihrer Ableitungen nach der Zeit enthalten.

MIT SECHZEHN FIGUREN

Zweiter unveränderter Abdruck



LEIPZIG, VERLAG VON JOHANN AMBROSIUS BARTH.

> Frontespizio di uno dei più noti testi di Boltzmann: Lezioni sui principi della Meccanica, pubblicato per la prima volta a Lipsia nel 1897. L'interesse di Boltzmann per le applicazioni meccaniche della fisica era evidente già molto tempo prima.

44

«Quando ho saputo alcuni giorni fa che era stata programmata questa cerimonia, era mia ferma intenzione chiedervi di rinunciare. Infatti mi sono chiesto: come può un singolo meritare un tale onore? Ognuno di noi è infatti soltanto partecipe di una grande impresa e a chiunque compia il suo dovere al suo posto spetta uguale lode. Se quindi viene fatto spiccare un singolo nella generalità, ciò non riguarderà mai la sua persona, ma solamente l'idea che egli rappresenta. Soltanto dedicandosi totalmente all'idea il singolo può accrescere il proprio valore. Ho deciso quindi di rinunciare alla mia richiesta, soltanto quando ho rapportato tutte le onorificenze non ai miei modesti meriti personali, ma all'idea che riempie i miei pensieri e le mie azioni, lo sviluppo della teoria per la cui gloria non ritengo eccessivo alcun sacrificio. Poiché la teoria costituisce il contenuto della mia vita, essa sarà anche il contenuto delle mie odierne parole di ringraziamento.».

E così concluse:

«Se all'inizio mi sono presentato come sostenitore della teoria, non voglio neanche tacere il fatto di aver sperimentato queste cattive conseguenze del suo fascino su me stesso. Ma cosa sarebbe più efficace contro questo fascino, che cosa potrebbe riportare alla realtà in modo maggiormente potente del contatto vivente con una riunione così ragguardevole come questa?

Per il bene che mi avete fatto ringrazio tutti voi: soprattutto Lei, Magnifico Rettore, che ha organizzato questa cerimonia, quindi l'oratore ufficiale, tutti i

colleghi e gli ospiti che hanno accolto il Suo invito e infine i valenti figli della nostra Alma mater, il cui ardore e nobile entusiasmo furono il mio sostegno per 18 anni. Possa l'Università di Graz crescere e fiorire, possa essere e rimanere eternamente quello che ai miei occhi è il massimo: un baluardo della teoria.».

Monaco

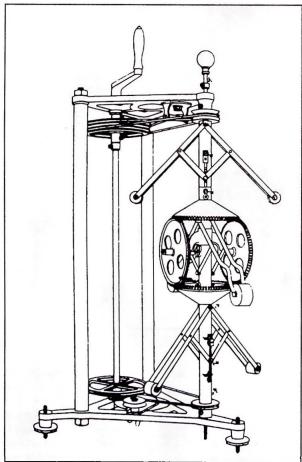
A Monaco Boltzmann poté finalmente insegnare l'argomento che gli stava più a cuore. Avendo insegnato fisica sperimentale per quattordici anni, usava modelli meccanici per illustrare in maniera assai vivida i concetti teorici. Per esempio, per visualizzare la teoria di Maxwell, costruì una macchina chiamata «biciclo».

Era un ingegnoso modello usato per illustrare, in termini meccanici, la mutua influenza di due circuiti elettrici. Aveva affidato la costruzione di questo congegno a Herr Gasteiger, perito meccanico di Graz. Ehrenfest, nel suo necrologio di Boltzmann, scritto nel 1906, dice, di questo apparato, che la chiarezza del movimento e delle forze devono aver costituito per lui un piacere estetico.

Arnold Sommerfeld, il grande fisico matematico che portò importanti contributi alle prime formulazioni della meccanica quantistica e alla teoria matematica delle onde elettromagnetiche, ricorda questo strano apparato in una conferenza celebrativa svoltasi a Vienna nel 1944, in occasione del centenario della nascita di Boltzmann: «Questo modello, che funzionava anche bene, fu fatto su ordine di Boltzmann; era tenuto nel mio vecchio Dipartimento a Monaco con tutto il dovuto rispetto. Tuttavia, era usato meno per l'elettrodinamica che per la meccanica, cioè per rendere comprensibile come funziona il differenziale delle automobili, che è completamente analogo al Biciclo di Boltzmann.».

Osserviamo, tra parentesi, che nello stesso discorso Sommerfeld esprime l'opinione che, per la mente orientata atomisticamente di Ludwig Boltzmann, la teoria quantistica sarebbe stata il vero terreno.

Il Biciclo, un ingegnoso modello di Boltzmann, usato per illustrare, in termini meccanici, la mutua influenza di due circuiti elettrici.



Esistevano due esemplari del Biciclo, uno all'Università di Graz, l'altro

all'Università di Monaco. In un inventario del Dipartimento di fisica dell'Università di Graz datato 1914, il Biciclo è succintamente descritto in questo modo: «0 776: apparato inspiegabile con ingranaggi a denti secondo Boltzmann». Ambedue gli esemplari si persero durante la guerra. Nelle sue lezioni sulla teoria di Maxwell, Boltzmann scrisse su questo Biciclo: «Questo strumento fu fatto da Herr Gasteiger, perito meccanico; è di prima qualità, e gli esperimenti effettuati con esso sono stati del tutto soddisfacenti.». Una copia del Biciclo venne costruita circa un secolo dopo da un altro perito meccanico dell'Università di Graz, Kurt Ansperger, in occasione di una mostra dedicata a Boltzmann nel 1985.

A Monaco Boltzmann si incontrava una volta alla settimana alla Hofbräuhaus a discutere questioni accademiche davanti a un bicchiere di birra con un certo numero di colleghi, tra cui i matematici von Dyck e Pringsheim, i fisici Lommel e Sohnke, il chimico Nayer, l'astronomo Seeliger e lo studioso di criogenia Linde. Passò quattro anni abbastanza sereni, durante i quali molti studenti provenienti da tutte le parti del mondo vennero a studiare sotto la sua guida. Dapprima Boltzmann viveva in Maximilian Strasse, conveniente sia per l'Università che per il Teatro dell'Opera, dove poteva ascoltare le opere di uno dei suoi compositori favoriti, Richard Wagner. A tutta la famiglia piaceva poi l'Evangelimann di Wilhelm Kienzl.

Il solo svantaggio sembra che fosse il fatto che il Governo bavarese a quel tempo non pagava una pensione ai professori universitari. Dato che la sua vista peggiorava sempre più, Boltzmann cominciò a preoccuparsi del futuro della famiglia. Ricordava la morte prematura di suo padre e l'esempio di Georg Simon Ohm, morto cieco senza una pensione in una situazione assai triste. Già la moglie di Boltzmann gli leggeva regolarmente ad alta voce i lavori scientifici per risparmiargli gli occhi.

Nell'introduzione al primo volume del suo trattato *Lezioni sulla teoria dei gas*, apparso qualche anno più tardi, Boltzmann esprime questa preoccupazione: già durante la Fiera Mondiale di Vienna del 1873 il professor Wroblewski gli aveva chiesto di scrivere quel libro, ma allora lo scienziato aveva declinato l'offerta, perché temeva di perdere presto la vista. Non fu certo la secca risposta «*Una ragione di più per sbrigarsi!*», però, a convincerlo nel 1896, ma gli attacchi a cui era esposta la teoria, come vedremo in seguito.

Inoltre, già nel 1892, la nostalgia cominciò a farsi sentire; in una lettera a Loschmidt dell'ottobre di quell'anno leggiamo che viveva «si, ma certo non meglio che nella vecchia, cara Austria».

Tre mesi dopo moriva il suo famoso maestro, Josef Stefan, e i suoi colleghi di Vienna cominciarono le manovre per installare Boltzmann al posto dell'illustre scomparso. Boltzmann esitò, per rafforzare la sua posizione a Monaco e mantenere aperta la possibilità di andare a Vienna. Alla fine l'Università di Monaco lo convinse a restare offrendogli qualche vantaggio fra cui un aumento di stipendio, ma poco dopo Boltzmann informò Vienna che si riteneva impegnato con Monaco per un anno soltanto. Se la comunità scientifica viennese si fosse rifatta viva, avrebbe accettato.

Abbiamo un testimonianza insolita degli anni trascorsi da Boltzmann a Monaco in un'interessante lettera scritta al «Gakuzei Zasshi» («Giornale Asiatico Di Scienza e Arte») dell'aprile 1894, da Hantaro Nagaoka, uno dei più noti promotori della ricerca in fisica in Giappone. A quel tempo Nagaoka era uno dei tanti studenti arrivati da tutto il mondo per ascoltare le lezioni di Boltzmann: aveva meno di 30 anni, ma due anni dopo divenne professore all'Università di Tokyo. La sua lettera contiene alcune opinioni non solo sulla città e sull'Università di Monaco ma anche sulla fama e la personalità di Boltzmann.

Il passo riguardante Boltzmann è degno di citazione. La prima parte spiega che Nagaoka era andato a Monaco proprio perché Boltzmann vi faceva lezione. C'è una chiara indicazione di quanta fosse la fama di Boltzmann. Ma c'è una annotazione anche sulle sue stranezze:

«Monaco è chiamata città d'arte, proprio come la nostra Kyoto. Benché (normalmente) non vi capiti molto d'interessante per la scienza, sono venuto a Monaco all'inizio di aprile per ascoltare le lezioni del professor Boltzmann, invitato qui recentemente. Fortunatamente, farà le sue famose lezioni sulla teoria cinetica dei gas e le applicazioni del principio di Hamilton alla fisica nel semestre estivo. Abbiamo sentito che il professor Boltzmann è stato invitato

all'Università di Berlino per succedervi a Kirchhoff, ma non ha accettato l'invito e ha scelto di venire a Monaco. Non so perché lo abbia fatto. Penso che nessuno possa essere competente quanto lui, con l'eccezione forse di Helmholtz. Le sue lezioni sono molto chiare; parla bene, non come Helmholtz che parla in maniera piuttosto goffa. Ma è un tipo un po' strano e talvolta finisce per fare cose poco intelligenti.».

Nagaoka continua spiegando il suo interesse per le lezioni di Boltzmann e dà anche un riassunto del loro contenuto. In particolare, ha qualche commento da fare sul principio di equiripartizione dell'energia:

«Il professor Boltzmann è di origine austriaca. Ma ammira Maxwell e

sembra aver l'attitudine di Maxwell sotto molti aspetti. Tale situazione è conveniente per me dato che sono stato educato nella tradizione britannica. Sono particolarmente interessato alla teoria dei gas che è stata sviluppata da lui, Clausius e Maxwell. In particolare, dalle lezioni di Boltzmann, posso capire chiaramente la teoria di Maxwell-Boltzmann della distribuzione di energia che ha recentemente dato luogo a controversie.».

All'incirca nello stesso periodo Nagaoka scrisse a un certo Tanakadate (presumibilmente non il famoso vulcanologo, che aveva allora solo dieci anni) una lettera in cui esprime opinioni simili anche se con parole diverse: «Il professor Bol è un uomo dalla barba cespugliosa come sai. Gli studenti sono molto impressionati dal suo aspetto. Ma le sue lezioni sono sorprendentemente chiare a differenza di quelle del professor Hel. Sembra avere un cervello eccellente, perché spiega le funzioni di Hamilton o integrali sestupli senza consultare appunti.».

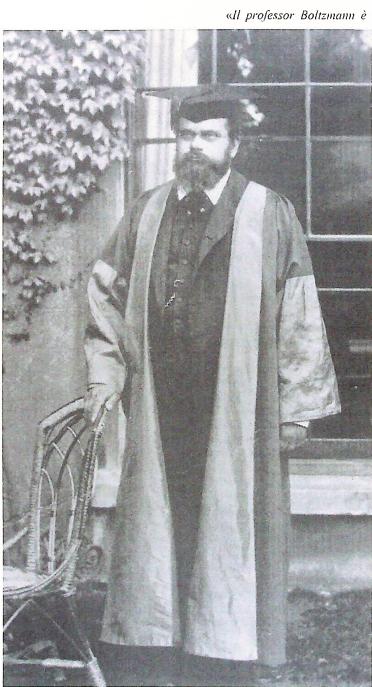
Dopo aver informato il suo corrispondente del numero piuttosto piccolo di studenti che seguivano le lezioni di Boltzmann, Nagaoka dice: «Il professor Bol è gentile e sincero, e ha una personalità tale da piacere a tutti, piuttosto in contrasto col suo aspetto.». E ancora: «Stanno costruendo l'edificio di un laboratorio; è circa la metà di quello di Berlino, ma sembra che vibri di meno. Il professor Bol ha un solo studente in fisica sperimentale.».

Nel 1894 Boltzmann divenne dottore *hono*ris causa dell'Università di Oxford, istituzione presso la quale le sue teorie godevano di grande prestigio.

Nella primavera di quell'anno, la sua scelta tra Monaco e Vienna cambiava praticamente ogni giorno, finche accettò la chiamata a Vienna, dove tornò nel mese di giugno. Era allora il più importante e famoso scienziato austriaco e i preparativi per riceverlo e farlo restare furono impressionanti.

La Philosophische Fakultät rinunciò a una Cattedra, già richiesta, di chimica fisica,

perché i soldi servivano ad aumentare lo stipendio di Boltzmann. Gli venne anche promessa la pensione piena nel caso che fosse divenuto inabile all'insegnamento, tenendo conto anche dei periodi precedenti di servizio in Austria.



Boltzmann dottore honoris causa a Oxford.

Nuovi anni viennesi

Il trionfale ritorno in patria non placò le inquietudini dello scienziato: una nuova partenza per Lipsia, il secondo ritorno a Vienna e le polemiche con Zermelo

euforia iniziale di Boltzmann per gli sforzi impressionanti fatti per riportarlo a Vienna non durò a lungo. Dopo esser stato lontano da Vienna per 18 anni, non vi trovò un gruppo di amici e colleghi simpatico come quello di Monaco. Inoltre, quando Boltzmann prese la direzione del laboratorio, vi ritrovò il personale che aveva conosciuto trent'anni prima, ma questo rese le cose più difficili. In particolare, il tecnico di laboratorio, Herr Damm, non sopportava che «il ragazzo» fosse diventato il suo capo e gli nascondeva il materiale. La situazione peggiorò soprattutto quando Ernst Mach, fortemente ostile a una visione atomica della natura, divenne professore di filosofia e storia della scienza (o, più esattamente di teoria e storia della scienza induttiva) nel 1895. Abbiamo già ricordato la filosofia di Mach e, in particolare, il fatto che negava l'esistenza degli atomi. Per la debolezza psicologica di Boltzmann era troppo avere un collega molto famoso che combatteva apertamente proprio la teoria a cui aveva dedicato l'intera sua vita e che per di più attraeva o distraeva alcuni suoi studenti e assistenti.

Non c'era una polemica aperta tra Mach e Boltzmann, ma è chiaramente vero che la personalità di Mach era del tutto diversa, distante e fredda, pronta talvolta a mostrare una sorta di sufficienza accondiscendente verso Boltzmann in aree non collegate alla fisica.

Per esempio, in una lettera al filosofo Gomperz, Mach scrive: «Boltzmann non è malizioso, ma incredibilmente ingenuo e sporadico... semplicemente non



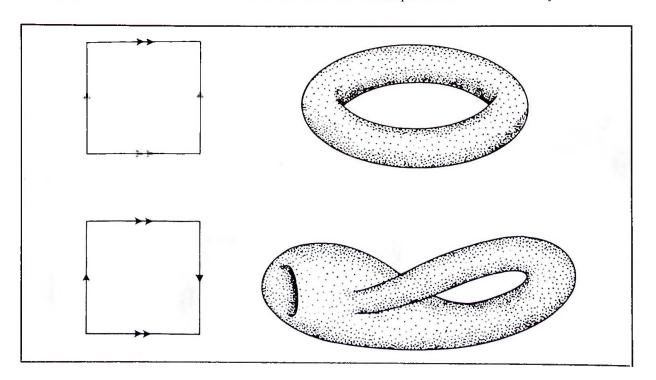
L'Istituto di fisica dell'Università di Lipsia, nel quale lavorò Boltzmann dopo il 1900. sa dove tirare la linea di confine. Questo si applica anche ad altre cose, che sono importanti per lui.».

In quegli anni Boltzmann, che aveva sempre gradito, come abbiamo visto, le discussioni scientifiche e aveva l'attitudine di uno scienziato moderno nel ritenere che l'isolamento rechi danno al progresso scientifico, dovette opporsi duramente agli avversari della teoria atomica della materia. E non era certo a corto di argomenti. In particolare, si prodigò a indicare gli errori della cosiddetta «energetica». Era questa un'applicazione delle idee di Mach, piuttosto sistematica in linea di principio, benché in pratica alquanto ingenua. Se non possiamo riferirci a cose che non riusciamo a osservare, possiamo tentare di ridurre tutto a scambi di energia, perché questo è ciò che possiamo veramente misurare e sentire, in una maniera o nell'altra, e basare su questa idea gli interi fondamenti della fisica. Questo era in nuce la dottrina dell'energetica.

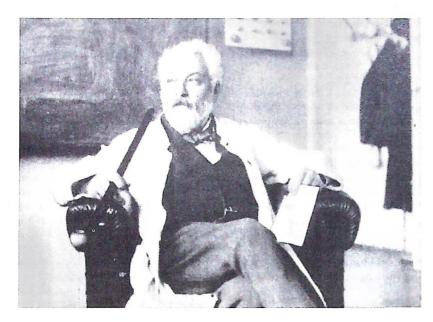
Benché questa concezione possa suonare ragionevole (soprattutto dopo la scoperta, da parte di Einstein, dell'equivalenza tra massa e energia), questo programma era portato avanti in un modo che effettivamente impoveriva gli strumenti della fisica teorica e la sua capacità di predire nuovi fenomeni. Non dobbiamo quindi sorprenderci scoprendo che Boltzmann avversava fortemente l'energetica. Possiamo leggere, per esempio, nella conferenza di Sommerfeld già citata, la descrizione di una discussione, avvenuta in un convegno tenuto a Lubecca nel 1895, tra Wilhelm Ostwald, sostenitore dell'energetica, che negava l'esistenza degli atomi, e Boltzmann:

«Il campione per l'energetica era Helm; dietro di lui stava Ostwald, e dietro ambedue la filosofia di Ernst Mach (che non era presente di persona). L'avversario era Boltzmann, assecondato da Felix Klein. La battaglia tra Boltzmann e Ostwald somigliava molto a un duello tra un toro e uno smilzo torero. Tuttavia, in quella occasione il toro sconfisse il toreador a onta dell'agilità di quest'ultimo. I ragionamenti di Boltzmann risultarono convincenti. Noi, giovani matematici, eravamo tutti dalla parte di Boltzmann; era immediatamente chiaro per noi come fosse impossibile che da una sola equazione per l'energia seguissero le equazioni del moto anche di un solo punto materiale, per non dir niente di quelle per un sistema a un numero arbitrario di gradi di libertà. Riguardo a Ostwald, però, devo ricordare la sua osservazione su Boltzmann nel suo libro Grosse Männer (Grandi uomini, Lipsia, 1909, p. 405), in cui chiama Boltzmann "l'uomo che eccelleva su noi tutti per acume e chiarezza scientifica"».

La bottiglia di Klein si può ottenere identificando (in pratica, incollando) i lati opposti di un quadrato con una orientazione diversa da quella da usare per il toro. In uno spazio a tre dimensioni non si può evitare che la superficie si autointersechi.



Franz Serafin Exner (1849-1926), professore di chimica fisica a Vienna e collega di Boltzmann.



Mentre il fisico Georg Ferdinand Helm è ricordato solo per essere stato un campione piuttosto ostinato dell'energetica, Felix Klein era un matematico geniale, particolarmente ricordato per i suoi contributi alla topologia, alla teoria delle funzioni analitiche, e alle applicazioni della teoria dei gruppi alla geometria. È l'autore del famoso «programma di Erlangen» e l'ideatore dell'*Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften*, una grande impresa realizzata sotto la sua direzione. Il suo nome è legato a molti oggetti matematici, tra cui ricordiamo solo la bottiglia di Klein, un tipico esempio di superficie a una sola faccia (una specie di nastro di Möbius, ma senza bordi). Wilhelm Ostwald (1853-1932) era un noto chimico fisico, più tardi premio Nobel.

Boltzmann soffriva molto dell'isolamento e del fatto che le sue idee ricevessero poca attenzione in Germania. È caratteristica e spesso citata, a questo proposito, la frase contenuta nell'articolo in cui rispondeva agli attacchi rivolti da Zermelo al teorema H: «Ora, l'articolo del Sig. Zermelo mostra che i miei lavori sull'argomento non sono stati compresi; tuttavia mi fa piacere, in quanto sembra la prima indicazione che questi lavori abbiano avuto una qualche attenzione in Germania.».

Quando Boltzmann arrivò a Vienna nel 1894 come direttore dell'Istituto di fisica, avrebbe dovuto avere, normalmente, la responsabilità della direzione dei corsi di laboratorio, ma chiese di esserne esentato. Franz Exner, professore di chimica fisica, era obbligato a occuparsi del corso di laboratorio di fisica. Questo produsse una situazione curiosa se non addirittura caotica, perché Exner non era in grado di far fronte ad ambedue i compiti.

Boltzmann si rese presto conto del fatto che il suo ritorno a Vienna non era stata una buona mossa. In una lettera a Ostwald datata 13 dicembre 1898, non nascose che c'erano «molti meno studenti preparati al lavoro scientifico» che in Germania, e c'erano pochi incontri e società scientifiche e nessuno stimolo alla ricerca. Un anno dopo, sua moglie aggiunse che la sua attività a Vienna aveva il «carattere di un addestramento di candidati da parte di un professore di scuola media superiore». Questo, naturalmente, non rendeva giustizia né al suo talento né alle sue aspirazioni.

Concetti simili esprime Boltzmann in lettere ai suoi ex-colleghi di Monaco. Diceva che era anche insoddisfatto della situazione politica in Austria. Ma il Ministero dell'Istruzione non era disposto a lasciarlo andar via di nuovo dalla patria senza combattere. Il caposezione von Hartel, che sarebbe divenuto ministro qualche anno dopo, in una lettera del 1896 dice che, tra i fisici teorici, «dopo la morte di Helmholtz, Boltzmann viene incontestabilmente per primo».

Nel 1900 Boltzmann decise, «dopo una lunga e difficile lotta con la propria anima», di accettare una chiamata a professore di fisica teorica a Lipsia, dove il chimico-fisico Wilhelm Ostwald, che abbiamo già incontrato, aveva costruito un grosso centro di ricerca. Anche questa decisione lo mise a dura prova e gli causò

un esaurimento nervoso così grave da dover essere ricoverato in una casa di cura psichiatrica.

Anche Lipsia non gli andava a genio. Benché Ostwald fosse personalmente un amico, la sua dottrina dell'energetica era basata sulla filosofia di Mach e contraria alle idee di Boltzmann. Così a Lipsia Boltzmann si trovò ancora più a mal partito che a Vienna. La lotta costante lo deprimeva, perché gradiva invece un buon lavoro di gruppo. Per di più, non gli piaceva lo stile di vita in uso in Sassonia. Prima ancora di partire da Vienna, aveva comunque iniziato trattative per ritornarvi.

Il paradosso di Zermelo

Il paradosso detto «di Zermelo» non compare per la prima volta in un lavoro del famoso matematico, allora giovane assistente di Max Planck nell'Istituto di fisica teorica di Berlino. Se si trascura un enunciato dovuto al filosofo Friedrich Nietsche, basato sul fatto che un universo che, come egli pensava, è sempre esistito non può avere uno stato finale (altrimenti lo avrebbe già raggiunto) e quindi non ha altra possibilità che ripetere infinite volte gli stessi eventi, troviamo un enunciato del paradosso in un breve lavoro di Poincaré, inteso a criticare «la concezione meccanicistica del mondo che ha sedotto tante brave persone».

Ma, dice l'illustre matematico, «un teorema, di facile dimostrazione, ci dice che un mondo limitato, governato solo dalle leggi della meccanica, passerà per ogni stato molto vicino al suo stato iniziale». E dopo aver notato il contrasto col secondo principio osserva, ignorando apparentemente Boltzmann, che, secondo le «teorie cinetiche inglesi», il mondo «tende dapprima verso uno stato dove rimane per lungo tempo senza cambiamento apparente; e questo è in accordo con l'esperienza; ma non vi rimane per sempre, se non viene violato il teorema sopra citato; ci rimane solo per un tempo enormemente lungo, un tempo che è tanto più lungo quanto più numerose sono le molecole. Ouesto stato non sarà la

morte finale dell'universo, ma una sorta di sonno, da cui si sveglierà dopo milioni di milioni di secoli. Secondo questa teoria, per veder il calore passare da un corpo freddo a uno caldo, non sarà necessario avere la vista acuta, l'intelligenza e la destrezza del demone di Maxwell; basterà avere un po' di pazienza».

Il teorema a cui allude Poincaré era stato da lui stesso enunciato tre anni prima in un famoso lavoro sul problema dei tre corpi e dimostrato nel caso particolare in cui il sistema sia retto da tre equazioni differenziali del prim'ordine. Nel 1896 Zermelo prende le mosse da quest'ultimo lavoro, ignorando invece la breve trattazione di Poincaré, già citata, e fornisce una semplice dimostrazione del teorema di ricorrenza. Passa poi ad applicarlo alla teoria cinetica dei gas, giungendo ad affermazioni simili a quelle di Poincaré, per concludere che:

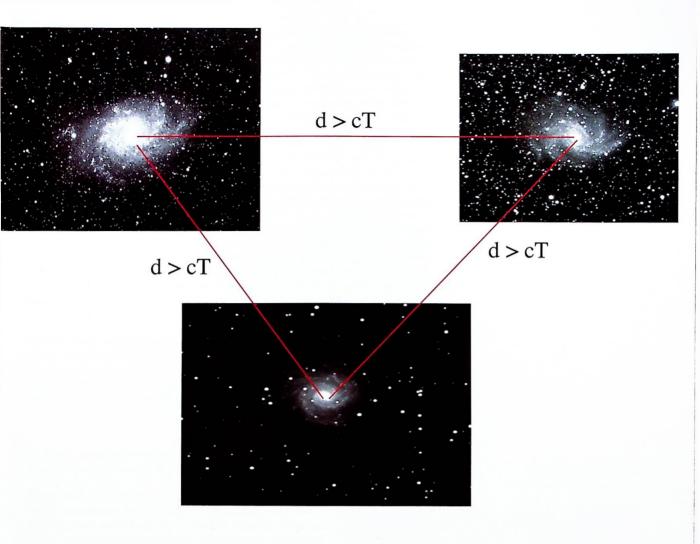
«è in ogni caso impossibile sulla base della teoria attuale arrivare a una derivazione meccanica del Secondo Principio senza prendere uno stato iniziale speciale. È analogamente impossibile dimostrare che la ben nota distribuzione di velocità verrà raggiunta come stato stazionario finale, come volevano i suoi scopritori Maxwell e Boltzmann. Non ho esaminato in dettaglio i vari tentativi di una dimostrazione del genere fatti da Boltzmann e da Lorentz, perché a causa della difficoltà di questa materia, preferisco spiegare il più chiaramente possibile ciò che può dimostrarsi rigorosamente e ciò che a me sembra della massima importanza, e contribuire in tal modo a una rinnovata

discussione e soluzione finale di questo problema».

Ernst Zermelo (1871-1953) attuccò discussione e solu

Ernst Zermelo (1871-1953) attaccò la logica del teorema H di Boltzmann col paradosso della ricorrenza.

La risposta di Boltzmann non si fece attendere e fu abbastanza decisa, in quanto ripeteva ancora una volta che non si stava parlando di una spiegazione meccanica del secondo principio, ma anzi di una sua delimitazione ad affermazione non assolutamente certa, ma solo probabile. A questa precisazione segue



la frase amara a cui si è fatto cenno in precedenza, seguita dalla precisazione: «Il teorema di Poincaré, che il sig. Zermelo spiega all'inizio del lavoro, è chiaramente corretto, ma la sua applicazione alla teoria del calore non lo è.».

Il punto principale sottolineato da Boltzmann è che, contrariamente a quanto pensava Zermelo (ma non Poincaré, come abbiamo visto), è che gli stati che portano, dopo un tempo sufficientemente lungo, a uno stato d'equilibrio, sono la stragrande maggioranza. Riguardo poi alla ricorrenza, Boltzmann osserva che il tempo deve essere enorme; per esempio, dice, per un gas di 10¹⁸ particelle in un recipiente di un centimetro cubo il tempo dovrebbe essere espresso (in secondi) da un numero con 10¹⁸ cifre decimali, un numero piuttosto inconcepibile (l'età stimata dell'universo ha soltanto 17 cifre). «Perciò quando il sig. Zermelo conclude, dal fatto teorico che gli stati iniziali devono ripresentarsi, senza aver calcolato quanto tempo questo richiederà, che le ipotesi della teoria dei gas devono essere abbandonate oppure cambiate radicalmente, egli è come il giocatore di dadi che ha calcolato che non è nulla la probabilità di una successione di mille "uno" e allora conclude che un dado è truccato perché non ha mai osservato una tale successione!».

Ai due lavori di Zermelo e Boltzmann a cui si è fatto cenno, ne seguono altri due degli stessi autori, in cui sostanzialmente si ribadiscono i punti di vista di ciascuno. Tuttavia, dopo aver invitato alla cautela nell'applicare la teoria oltre al dominio confermato dall'esperienza, qui Boltzmann enuncia le due possibili affermazioni alternative sullo stato e l'evoluzione dell'universo che sono da prendere in considerazione per ottenere un quadro coerente. Vale la pena di citare il passo per esteso:

«Si ha la scelta tra due tipi di immagine. Si può far l'ipotesi che l'intero

Sistemi di galassie, che non interagiscono fra di loro. In meccanica classica sarebbero sempre interagenti attraverso la gravità. Secondo la teoria della relatività (ignota a Boltzmann) il caso si potrebbe presentare per galassie distanti più di cT, dove T è l'età dell'universo e c la velocità della luce.

universo si trovi attualmente in uno stato assai improbabile. Si può invece supporre che gli eoni durante i quali permane questo stato improbabile e la distanza tra qui e Sirio siano minuscoli in confronto, rispettivamente, all'età e la grandezza dell'universo. Ci devono essere, quindi, nell'universo, che nel suo insieme è in equilibrio termico e perciò morto, qua e là regioni relativamente piccole della grandezza della nostra galassia (che chiamiamo mondi), che deviano significativamente dall'equilibrio termico per un tempo relativamente piccolo, in termini di quegli eoni. Entro ciascuno di questi mondi la probabilità del loro stato cresce o decresce con ugual frequenza. Per l'universo nel suo insieme, le due direzioni del tempo sono indistinguibili, proprio come nello spazio non c'è un sopra e un sotto. Tuttavia, proprio come in un certo punto della superficie terrestre possiamo chiamare "sotto" la direzione verso il centro della Terra, così un essere vivente che si trova in tale mondo in un certo periodo di tempo può definire la direzione del tempo come quella che va da uno stato più improbabile a uno più probabile (il primo sarà il passato, il secondo il futuro) e grazie a questa definizione troverà che questa piccola regione, isolata dal resto dell'universo, è inizialmente sempre in uno stato improbabile. Questo punto di vista sembra a me l'unico modo in cui si può capire la validità del secondo principio e la morte termica di ciascun mondo singolo, senza invocare un cambiamento unidirezionale dell'intero universo da uno stato iniziale definito a uno stato finale.».

La conclusione inevitabile è che il secondo principio della termodinamica non vale quando si considerano intervalli di tempo così lunghi. Naturalmente, questo vale se il modello di atomi discreti è valido incondizionatamente (se no, non vale il teorema di Poincaré); per mettere in crisi questa ipotesi basta pensare a un'interazione, anche molto debole, attraverso un campo elettromagnetico (con emissione e assorbimento di radiazione).

Secondo ritorno a Vienna

Nel 1901 Mach andò in pensione, a causa delle sue cattive condizioni di salute. Poiché durante l'esilio volontario a Lipsia la sua cattedra era rimasta vacante, Boltzmann tornò a Vienna nel 1902.

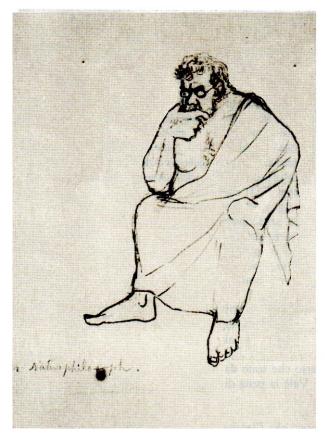
Ma le persone che contavano non gli perdonarono subito la sua precedente fuga. Il Ministro dell'Istruzione ebbe il suo bel daffare per spiegare i problemi della personalità di Boltzmann all'imperatore Francesco Giuseppe e per mettere a tacere le voci che circolavano a Vienna, secondo cui Boltzmann non era sano di mente e non sarebbe stato in grado di fare il professore.

Il Ministro dovette consultare lo psichiatra e i medici che si erano occupati dello scienziato e Boltzmann dovette dare la sua parola d'onore, per iscritto, che non avrebbe più cercato di lasciare l'Austria. Per fortuna ormai Boltzmann era considerato un simbolo dell'indipendenza scientifica dell'Austria più che un professore.

Presto anche Vienna divenne piena di problemi per Boltzmann, che, in una lettera al suo assistente Stefan Mayer, espresse la sua preoccupazione per i grossi tagli al bilancio dell'istituto. Per di più, dovette aspettare un paio d'anni prima di essere rieletto membro effettivo dell'Accademia Imperiale. Nel febbraio del 1903, sua moglie scrisse alla figlia Ida, che era rimasta a Lipsia per terminarvi il ginnasio: «Il babbo peggiora ogni giorno. Ho perso fiducia nel nostro futuro. Avevo immaginato una vita migliore qui a Vienna.».

La vista gli si era deteriorata a tal punto che aveva difficoltà a leggere; aveva assunto una donna che gli leggeva articoli scientifici ed era sua moglic a scrivere materialmente i suoi lavori. Soffriva anche di forti attacchi notturni di asma e forse anche d'*angina pectoris*; era inoltre disturbato da forti mal di testa dovuti al superlavoro. I suoi doveri didattici erano allora di cinque ore alla settimana per un corso di fisica

Boltzmann come filosofo (caricatura di K. Przibram).



53

teorica, il seminario della stessa materia, e un corso di almeno un'ora alla settimana, ogni tre semestri. A partire dal 1903, oltre a ciò, Boltzmann teneva per due ore alla settimana il corso di filosofia che era stato di Mach.

È facile immaginare che questi pesanti impegni didattici, messi insieme con l'attività scientifica, fossero più di quanto potesse sopportare a lungo la sua salute già vacillante. Non è chiaro quando Boltzmann espresse al Ministero dell'Istruzione il suo desiderio d'insegnare filosofia oltre che fisica, ma c'è una lettera del maggio 1903 che gli dà l'incarico di insegnare un corso di «filosofia della natura e metodologia delle scienze naturali».

Le lezioni più popolari di Boltzmann furono proprio le prime del suo corso di filosofia. La sua prima lezione ebbe un successo enorme. Benché fosse stata scelta la sala più grande, nella Facoltà di medicina, la gente stava in piedi fin sulle scale; si parla di una folla di 600 persone. La sala era ornata di ramoscelli di abete bianco e Boltzmann ricevette applausi entusiastici. Il suo esordio provocò anche uno scoppio di risate, quando per spiegare com'era arrivato a insegnare filosofia, disse: «Si dice che quando Dio dà un incarico a qualcuno gli dà anche il senno. Diversamente accade per il Ministero; questo può anche dare l'incarico d'insegnamento e lo stipendio, ma mai il senno; per quest'ultimo la responsabilità ricade soltanto su di me.».

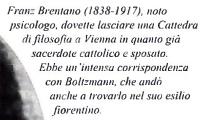
Tutti i giornali parlarono dell'evento. Ricevette un gran numero di lettere di consenso. Ebbe perfino un'udienza con l'imperatore Francesco Giuseppe, che gli disse quanto fosse lieto del suo ritorno e di come avesse udito della folla presente alle sue conferenze.

Dopo due o tre lezioni scintillanti, il suo entusiasmo però venne meno e con esso l'uditorio, che forse si era aspettato più filosofia e meno matematica. Ne risultò un senso di fallimento. Dalle lettere scritte in quegli anni a Brentano, uno psicologo che aveva dovuto lasciare una Cattedra di filosofia a Vienna (quella su cui sarebbe poi stato chiamato Mach) poiché già sacerdote cattolico e sposato, si comprende l'importanza che quelle lezioni rivestivano per lui. Qualche anno dopo (nel 1905) andò anche a trovare Brentano, che lo ospitò a casa sua, a Firenze. Di quel che avvenne nel loro incontro non si sa molto, ma certo discussero di filosofia. Sulla via del ritomo si fermò a Venezia, dove ebbe qualche difficoltà con l'albergo:

«Gli Hotel Cavalletto e Vapore erano ambedue al completo. Il mio facchino mi ha detto che sarebbe stato lo stesso dappertutto. Ma conosceva una bella stanza in un bar. (Me l'ha detto in italiano e questa è la mia traduzione.) Ma, come dice il proverbio: quando bisogna, il Diavolo si rimpinza di mosche. Quindi, lo

seguii. Mentre camminavamo, sono rimasto incastrato in un passaggio particolarmente stretto e sono riuscito a liberarmi solo con qualche sforzo. Mi sembrava che se avessi ruotato verticalmente di 90 gradi, avrei potuto venirne fuori in maniera indecorosa. Il bar e il suo gestore non ispiravano confidenza. Ma che scelta avevo? Ero davanti a un imperativo categorico. Ho dovuto essere così cauto, quindi, che prima di andare a letto ho fatto un accordo col furfante: avrei rifiutato di pagarlo se fossi stato assassinato durante la notte.».

Continuava la sua attività sociale nelle ore serali. Ciononostante, negli ultimi anni di vita spesso lavorava già alle cinque del mattino. Anche in questo possiamo riconoscere un aspetto della sindrome maniaco-depressiva. In effetti chi ne soffre ha una tendenza a svegliarsi molto presto e a lavorare intensamente, se si trova nella fase maniacale, mentre la fase depressiva porta con sé, insieme a sonnolenza e scarsa voglia di fare durante il giorno, un'insonnia mattutina popolata di cattivi pensieri e di progetti di suicidio.



Il Boltzmann «filosofo»

Lo stretto legame tra scienza, matematica e filosofia ispirò il lavoro negli ultimi due decenni della vita dello scienziato

Tegli ultimi vent'anni della sua vita, Boltzmann dedicò una parte non trascurabile della sua attività agli aspetti filosofici della scienza e più in generale della conoscenza. Di questa sua attività rimane traccia nel volume dei *Populäre Schriften*, parzialmente tradotto in italiano. Nel 1903 questa attività era sufficientemente riconosciuta da valergli, come abbiamo visto, un incarico per un corso di filosofia della scienza all'Università di Vienna. Recentemente sono stati pubblicati anche appunti, in parte stenografati, di queste sue lezioni.

Il punto centrale della filosofia è, per Boltzmann, il problema della relazione fra esistenza e conoscenza, la gnoseologia. Per caratterizzare il suo atteggiamento in proposito, nulla può servire meglio della frase buttata casualmente nel meno filosofico dei suoi scritti, in cui racconta in termini divertenti il suo viaggio in California del 1905. Queste parole, citate di frequente, seguono la descrizione del campus di Berkeley: «Si respira dovunque un'atmosfera quasi filosofica. Già il nome Berkeley è il nome di un filosofo inglese molto rinomato, a cui va riconosciuto il merito di essere l'inventore della più grossa sciocchezza che abbia mai architettato un cervello umano. È l'inventore dell'idealismo filosofico, che nega l'esistenza del mondo materiale...».

Boltzmann presenta ragionamenti dettagliati a favore dell'esistenza oggetti-

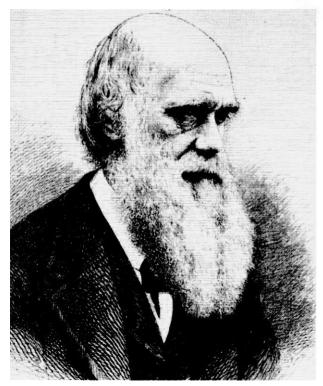
va, su cui non ci possiamo soffermare, ma che sono disponibili, anche in traduzione italiana, nelle sue lezioni rivolte a un ampio pubblico.

Le opinioni di Boltzmann, espresse in maniera molto vivace, differivano naturalmente, come sappiamo, da quelle del suo collega Ernst Mach, anche lui fisico e filosofo. Per usare le parole stesse di Boltzmann, per Mach «le grandezze fisiche, gli atomi, le molecole, le forze, le energie e così via sono meri concetti per la rappresentazione economica e l'illustrazione di queste relazioni regolari delle nostre percezioni sensoriali e idee». Ora, mentre Boltzmann apprezzava immediatamente l'importanza dell'economia nella classificazione e ordinamento dei risultati della scienza, non ravvisava nell'economia lo scopo finale della ricerca scientifica.

Un altro motivo presente nelle opere filosofiche di Boltzmann è quello della natura come grandioso meccanismo, il cui culmine è costituito dalla teoria dell'evoluzione e della selezione naturale di Darwin. Anche il successo della fisica teorica è spiegato su basi evoluzioniste:

«Consideriamo il cervello come l'apparecchio, l'organo per la produzione di immagini del mondo, che si è creato a causa della grande utilità di queste immagini del mondo per la conservazione della specie, in corrispondenza con la teoria di Darwin, e che nell'essere umano è arrivato a particolare perfezione, come nella giraffa il collo e nella cicogna il becco sono arrivati a insolita lunghezza. [...] Non

Charles Darwin (1809-1882), la cui teoria dell'evoluzione era ritenuta da Boltzmann «il nuovo teorema di Pitagora».



appena aderiamo all'opinione [in questione] dobbiamo supporre che le immagini e le leggi, che servono a rappresentare i processi nella natura inanimata, siano sufficienti a rappresentare chiaramente anche tutti i processi psichici. In breve: i processi psichici sono identici a determinati processi materiali nel cervello (realismo).».

Nel gennaio 1905 Boltzmann tenne una conferenza alla Società filosofica di Vienna il cui titolo originale era «Dimostrazione che Schopenhauer è un filosofastro stupido e ignorante, che scarabocchia cose senza senso e dispensa vacuo

II «materialismo» di Boltzmann

I ella conferenza dedicata a Schopenhauer, Boltzmann chiama la sua filosofia esplicitamente «materialismo», là dove dice: «L'idealismo asserisce che esistono solo l'Io e le varie idee, cercando di spiegare la materia a partire da queste. Il materialismo parte dall'esistenza della materia e cerca di spiegare le sensazioni a partire da questa.».

L'uomo deve le proprie idee all'evoluzione: «A mio parere tutta la salvezza per la filosofia viene dalla teoria di Darwin. Finché la gente crede che esista uno spirito speciale che può conoscere gli oggetti senza mezzi meccanici, o una volontà speciale che è analogamente adatta a volere quel che ci porterà beneficio, i fenomeni psicologici più semplici sfuggiranno a ogni spiegazione. Solo quando si ammette che lo spirito e la volontà non sono qualcosa al di sopra del corpo, ma piuttosto le azioni complicate di parti materiali, la cui abilità di agire in tal modo diventa sempre più perfetta con lo sviluppo, solo quando si ammette che l'intuizione, la volontà e la coscienza di sé sono meramente gli stadi più elevati dello sviluppo di quelle forze fisico-chimiche della materia, grazie alle quali bolle primordiali di protoplasma furono in grado di cercare regioni che erano più favorevoli per loro ed evitare quelle che lo erano meno, solo allora ogni cosa diventa chiara in psicologia. [...]

Si consideri un altro esempio semplice e banale. Una quantità innumerevole di nostri antenati deve essere morta per aver bevuto acqua malsana.

Quelli che preferivano il succo di frutta ebbero un vantaggio. Ma anche il succo di frutta non fermentato potrebbe facilmente contenere batteri, così che quelli che li preferivano fermentati ebbero un vantaggio nella lotta per l'esistenza, e lo sviluppo ereditario di questa predilezione l'ha fatta divenire un'abitudine, che spesso, naturalmente, eccede i giusti limiti. Devo confessare che se fossi contrario all'alcool, non sarei potuto tornare vivo dall'America, a causa di una forte dissenteria, dovuta all'acqua malsana; anche le bottiglie con l'etichetta "acqua minerale" probabilmente contengono per lo più acqua di fiume, e fu solo attraverso le bevande alcooliche che riuscii a salvarmi.

Quale sarà allora la posizione delle cosiddette leggi del pensiero in logica? Ebbene, alla luce della teoria di Darwin, non saranno altro che abitudini di pensiero ereditate. Gli uomini si sono gradualmente abituati a fissare le parole, attraverso cui comunicano e che provano in silenzio quando pensano, [...] in maniera tale da

essere in grado di intervenire sempre nel mondo dei fenomeni nella maniera che vogliono e di indurre altri ad agire analogamente, cioè a comunicare con loro. Questi interventi sono fortemente promossi registrando e ordinando in maniera opportuna le immagini della memoria e imparando e praticando il linquaggio. Questa organizzazione costituisce un criterio di verità.



Il filosofo Immanuel Kant (1724-1804).

Il metodo di com-

binare le immagini della memoria e le parole, parlate in maniera udibile o no, è stato perfezionato sempre di più ed è stato ereditato in maniera da sviluppare precise leggi di pensiero. È del tutto vero che ogni conoscenza si fermerebbe e la percezione non formerebbe un quadro ordinato se non portassimo con noi queste leggi del pensiero. [...]

Possiamo chiamare a priori queste leggi perché sono innate in ogni individuo attraverso l'esperienza della specie, durata molte migliaia di anni. Ma sembra non più che uno svarione di Kant concludere che esse siano infallibili in tutti i casi. Questo svarione è perfettamente spiegabile sulla base della teoria di Darwin. Solo ciò che è certo è divenuto ereditario; ciò che era sbagliato è stato eliminato. Così queste leggi del pensiero hanno acquistato un tale aspetto di infallibilità che fu creduto giustificato assoggettare al loro giudizio anche l'esperienza. [...]

Analogamente un tempo si riteneva che anche l'orecchio e l'occhio fossero perfetti, perché hanno in effetti raggiunto uno sbalorditivo grado di perfezione. Oggi sappiamo che questo non è vero e che non sono perfetti. Allo stesso modo negherei che le nostre leggi del pensiero siano perfette. Esse non differiscono dalle altre abitudini che abbiamo ereditato.».

Una pagina di appunti autografi di Ludwig Boltzmann, con suoi commenti circa i testi di Schopenhauer. Era abitudine dello scienziato austriaco stenografare sempre i propri appunti per le lezioni.

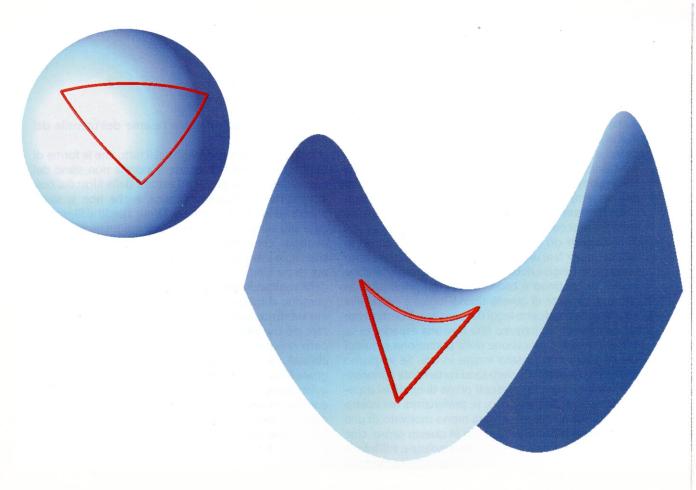
ente balleng holy & natification of sapelage with a 907-1-104 286 29- 187768 16, e160. Classed 169 50 cm 2.67 8.9 . 96 458) 90 1,11 14 m in dik 456 5 +265 2 defended in Bone 3 min 3 min al Wood sty with or red who wheely marketicle you rasque de est Harfan - Mafinoside 17 Suion: - The perial stell greater 720 /2 Jesult. L. quintie 6462 1 Ju (136 Ml 1 = 92) (04-1) Emellini william to segue to s etres 21 olden mandes 12 m all de 1971 83-1-81 granged Dackfor they was, NF 9 9 mg m + 183 2 " pule a _ ne 870. 11 - 50 d, dy no 2 ho of 200 more - e - e 121 21 a 20 20 20 1 20 a ding had I for almost of 1 ortander of the sand of which with arsing straight arising of a candon the that let until for the and the the 6484 [7.7] / ~ CALA. / 3.7(x 02. 96) 5-1. 66 ~ 82 38 thes " sid (485 à coft + collinge hi 2 min to the ffliphet) h And see to a see the see of the s

parolame, che fa marcire il cervello della gente in maniera fondamentale e duratura». Questo titolo può sembrare un po' forte e, come tale, venne rifiutato, divenendo semplicemente: «Su una tesi di Schopenhauer», ma nel corso della conferenza (alla quale è dedicata la finestra alla pagina precedente) Boltzmann indica che originariamente aveva dato il titolo precedente e spiega di averlo preso da uno scritto di Schopenhauer stesso, mutando solo il nome del filosofo a cui si riferiva (e che, anche se Boltzmann non lo dice, era Hegel). In questa conferenza, che come si può immaginare suscitò un certo scalpore, i pensieri di tutti i filosofi, incluso Kant, per cui Boltzmann aveva un certo rispetto, vengono dichiarati fondamentalmente insostenibili.

La sua meta, sostiene, è la liberazione del genere umano da quel mal di testa mentale che si chiama metafisica.

Abbiamo altre convinzioni sbagliate, osserva Boltzmann verso la fine della conferenza: «Il pregiudizio contro la geometria non euclidea e lo spazio a quattro dimensioni sta naturalmente per scomparire. Molta gente crede ancora che la geometria di Euclide sia la sola possibile, che la somma degli angoli di un triangolo deve essere 180°, ma alcuni sono già arrivati ad ammettere che queste sono solo idee divenute abituali, da cui possiamo e dobbiamo liberarci,».

Si può a questo punto capire la critica che Boltzmann rivolgeva a Hertz, che



nel suo famoso libro sui principi della meccanica aveva proposto che le nostre immagini mentali si devono conformare alle leggi del pensiero. Boltzmann aveva scritto già nelle lezioni alla Clark University del 1899:

«Nei confronti di questa condizione vorrei esprimere certi dubbi, o per lo meno vorrei chiarirla un po' di più. Certamente dobbiamo disporre di un ricco patrimonio di leggi del pensiero. Senza di esse l'esperienza sarebbe perfettamente inutile; non potremmo assolutamente fissarla attraverso immagini interne. Queste leggi del pensiero sono innate in noi, quasi senza eccezioni, ma subiscono modificazioni per mezzo dell'educazione, dell'apprendimento e dell'esperienza personale. Non sono perfettamente uguali nel bambino, nell'uomo semplice e incolto o nello studioso. Lo vedremo anche confrontando l'orientamento del pensiero in un popolo semplice come quello dei greci con quello degli scolastici del Medioevo e confrontando questi con quello attuale. Certamente esistono leggi del pensiero che si sono dimostrate così valide senza eccezioni, che ci fidiamo di loro incondizionatamente e le consideriamo principi del pensiero aprioristici e immutabili. Ma credo che queste si siano sviluppate solo lentamente. La loro prima fonte furono esperienze primitive dell'umanità allo stato originario e a poco a poco si rafforzarono e si chiarirono attraverso esperienze complicate finché finalmente assunsero la loro attuale formulazione forte; ma non riconoscerei le leggi del pensiero come giudici supremi assoluti. Non possiamo sapere se esse non subiranno ancora l'una o l'altra modifica. Ma ricordiamoci con quale sicurezza i bambini o le persone incolte siano convinti che attraverso la sola sensazione si debba poter distinguere la direzione verso l'alto da quella verso il basso in tutti i luoghi dello spazio e credono di poter dedurre da ciò l'impossibilità degli antipodi. Se queste persone scrivessero di logica considererebbero questa sicuramente una legge del pensiero evidente a priori. Allo stesso modo all'inizio furono sollevati molti dubbi aprioristici contro la teoria copernicana e la storia della scienza presenta molti casi in cui dei principi ora venivano motivati, ora venivano confutati per mezzo di prove che allora erano considerate leggi del pensiero evidenti, mentre ora siamo convinti della loro nullità o inconsistenza. Quindi vorrei modiBoltzmann citò varie volte la geometria non-euclidea nei suoi scritti.
Per comprenderne l'assenza di contraddizione logica, basta pensare che il piano sia sostituito da un'opportuna superficie e le rette da opportune curve. Allora non è più vero che la somma s degli angoli interni di un triangolo sia 180° (teorema della geometria euclidea).
Qui vediamo un triangolo su una sfera (geometria ellittica, s è maggiore di 180°) e su un paraboloide iperbolico. (geometria iperbolica. s è minore di 180°).

La conferenza di St. Louis: il procedere dei filosofi

n'altra occasione in cui Boltzmann ebbe l'occasione di parlare dei metodi usati dai filosofi fu il convegno di St. Louis, in cui fece un'aggiornata esposizione della meccanica statistica, facendola precedere da una discussione del perché i fisici si interessano di questioni che un tempo erano riservate ai filosofi. Ecco la parte della conferenza in cui lo scienziato tratta dell'usuale modo di procedere dei filosofi.

«Chiamare ciò logica, mi sembra che sia come se qualcuno per fare una gita in montagna si mettesse un vestito così lungo e ricco di pieghe che vi impiglierebbe i piedi di continuo e cadrebbe fin dai primi passi in pianura. La fonte di questo tipo di logica è l'eccessiva fiducia nelle cosiddette leggi del pensiero. È certamente sicuro che non potremmo fare nessuna esperienza se certe forme di connessione della percezione e quindi del pensiero non fossero innate in noi. Se vogliamo chiamarle leggi del pensiero sono certamente aprioristiche fintantoché sono presenti prima di qualsiasi esperienza nella nostra anima, o, se preferiamo, nel nostro cervello. Ma niente mi sembra meno motivato di una conclusione sulla natura a priori in questo senso, cioè dell'essere fondata sulla sicurezza assoluta e sull'infallibilità. Queste leggi di pensiero sono nate secondo le stesse leggi dell'evoluzione, come l'apparato ottico dell'occhio, quello acustico dell'orecchio e il sistema di pompe del cuore. Nel corso dello sviluppo dell'umanità tutto quello che era inadatto venne eliminato e così sorse quell'unità e completezza che si può scambiare facilmente per infallibilità. Quindi anche la perfezione dell'occhio, dell'orecchio e la struttura del cuore provocano la nostra ammirazione, senza però che si affermi la perfezione assoluta di questi organi. Tanto meno le leggi del pensiero dovrebbero essere considerate come assolutamente infallibili. Certamente si sono sviluppate proprio per comprendere ciò che era necessario per il sostentamento e ciò che era utile praticamente. I risultati di ricerche sperimentali hanno molta più parentela

con ciò di quanta ne abbia l'esame dell'utensile del pensiero.

Non può quindi meravigliarci il fatto che le forme di pensiero che sono diventate la norma non siano del tutto adeguate ai problemi astratti della filosofia, così lontani dall'applicazione pratica, e che non si siano ancora adeguate dai tempi di Talete. Perciò al filosofo la cosa più semplice sembra la più enigmatica. E trova ovunque contraddizioni. Queste non sono nient'altro che copie inadeguate e distorte di ciò che ci è dato dai nostri pensieri. In ciò che è dato non possono esserci delle contraddizioni. Fintantoché, a quanto pare, non si possono eliminare le contraddizioni, dunque, dobbiamo subito cercare di verificare, di ampliare e di modificare ciò che chiamiamo le nostre leggi di pensiero che però non sono nient'altro che immagini ereditarie e abituali, conservate per un'infinità di tempo per designare le necessità pratiche. Proprio come sono entrate a far parte delle invenzioni trasmesse da tempo in eredità, come il rullo, il carro e l'aratro e certe altre innumerevoli invenzioni artificiali costruite con consapevolezza, dobbiamo anche qui ordinare meglio le immagini in modo artificiale e con consapevolezza. Il nostro compito non può essere quello di citare ciò che esiste nel tribunale delle nostre leggi di pensiero, ma anzi adeguare i nostri pensieri, le nostre idee e i nostri concetti all'esistente. Poiché riusciamo a esprimere chiaramente dei rapporti così complicati solo attraverso parole, scritte, dette o pensate in silenzio, si può anche dire che dobbiamo mettere insieme le parole in modo che attribuiscano ovunque a ciò che esiste l'espressione più adatta e che i nessi costruiti fra le parole siano ovunque adequati il più possibile ai nessi del reale. Finché si presenta il problema in questo modo, la sua soluzione più adatta può fornire anche le maggiori difficoltà, ma si conosce la meta agognata e non si inciamperà sulle difficoltà che si sono create da sole.

Molte cose inappropriate nelle abitudini e nel

ficare la richiesta di Hertz dicendo che fin tanto che possediamo delle leggi del pensiero che abbiamo riconosciuto come indubbiamente esatte, perché si sono costantemente avverate nell'esperienza, possiamo verificare l'esattezza delle nostre immagini per prima cosa in corrispondenza di esse, ma che l'ultima e sola decisione sull'adeguatezza delle immagini sta nella circostanza per cui queste rappresentano l'esperienza nel modo più semplice e preciso possibile e che proprio qui sta la verifica dell'esattezza delle leggi del pensiero.».

Come si situa in questa filosofia di Boltzmann uno dei problemi piatici, che agli occhi di molti motivano la metafisica, o almeno una filosofia fondata sullo spirito anziché sulla materia, cioè il problema dell'etica? Ovviamente il fondamento è ancora di tipo evoluzionista. Nella sua già citata conferenza su Schopenhauer, infatti afferma:

«L'etica deve chiedersi quando l'individuo può agire secondo la propria

comportamento vengono causate dal fatto che un modo di agire, che nella maggior parte dei casi è appropriato, diventa così abitudinario e una seconda natura, tale che non lo si può più lasciare quando in qualche modo cessa di esistere il suo essere appropriato. Dico che qui l'adattamento va al di là dello scopo. Questo accade particolarmente spesso nel caso delle abitudini mentali e diventa fonte di apparenti contraddizioni fra le leggi del pensiero e il mondo e fra una legge di pensiero e l'altra.

La regolarità di ciò che accade in natura è quindi la condizione fondamentale per ogni riconoscibilità; di qui nasce l'abitudine a chiedere la causa di ogni cosa per impulso irresistibile e ci chiediamo anche la causa per cui tutto ha una causa. Ci si rompe la testa a proposito del fatto se la causa e l'effetto abbiano un legame necessario o se rappresentino solo una successione casuale mentre ha senso soltanto chiedersi se un fenomeno particolare sia sempre collegato a un determinato gruppo d'altri, di cui è conseguenza necessaria, o se questo gruppo possa eventualmente mancare.

Allo stesso modo è qualcosa di utile e valido ciò che incentiva le condizioni di vita del singolo o dell'umanità; ma andiamo oltre la meta se ci chiediamo anche quale sia il valore della vita stessa, se questa ci appare quasi inutile perché non ha nessuno scopo al di fuori di sé. Qualcosa di simile accade quando cerchiamo inutilmente di ricostruire i concetti più semplici con cui è costruita ogni cosa e di spiegare di nuovo le leggi fondamentali più semplici.

Non dobbiamo voler dedurre la natura dai nostri concetti, ma dobbiamo adattare gli ultimi alla prima. Non dobbiamo credere che si possa suddividere tutto secondo le nostre categorie e che esista una suddivisione del tutto perfetta. Questa sarà sempre vacillante e adattata solo ai bisogni del momento. E anche la divisione della fisica in "teorica" e "sperimentale" è solo una conseguenza della divisione in due dei metodi che vengono usati per il momento e non durerà in eterno.

La mia attuale teoria è totalmente diversa da quella per cui certe questioni cadono fuori dei limiti della conoscenza umana. Infatti secondo quest'ultima teoria c'è una mancanza, una incompletezza dell'intelletto umano, mentre io considero l'esistenza di queste questioni, di questi problemi un'illusione dei sensi. Certamente a una riflessione superficiale stupisce il fatto che dopo che si è riconosciuta l'illusione dei sensi, l'impulso a rispondere a quelle domande non cessi. L'abitudine logica è troppo potente perché ci abbandoni.

Accade proprio come nel caso delle ordinarie illusioni dei sensi che continuano a sussistere anche dopo che se ne è riconosciuta la causa. Quindi subentra la sensazione dell'insicurezza, la mancanza di soddisfazione che prende lo studioso di scienza naturale quando parla di filosofia. Solo molto lentamente e gradatamente queste illusioni dei sensi svaniranno e ritengo che sia compito principale della filosofia rappresentare chiaramente l'inopportunità di questo andare al di là della meta delle nostre abitudini logiche e perseguire nella scelta e nel collegamento di parole e concetti soltanto l'espressione di ciò che esiste, indipendentemente dalle abitudini ereditate. Poi devono scomparire gradualmente queste complicazioni e contraddizioni.

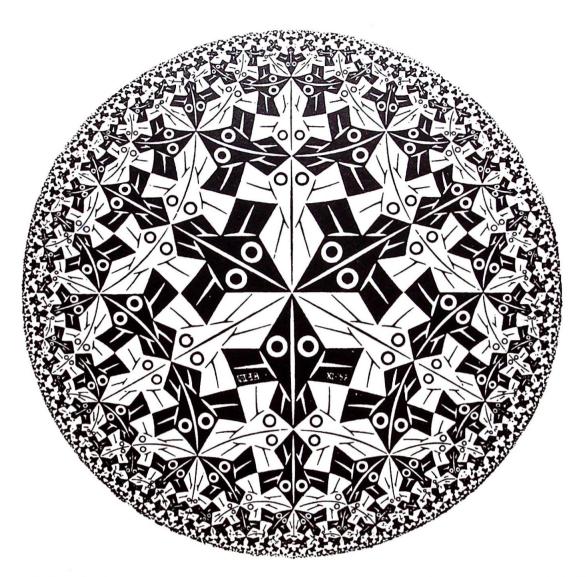
Deve apparire chiaro cosa nell'edificio dei pensieri sia pietra di costruzione e cosa malta e ci libereremmo dalla sensazione opprimente per cui la cosa più semplice è la meno chiara e la più banale è la più enigmatica. Le abitudini logiche che non hanno diritto di esistere possono svanire col tempo. Una prova di ciò è il fatto che oggi ogni dotto comprende la teoria degli antipodi e molti comprendono la geometria non euclidea. Se la filosofia riuscisse a creare un sistema in cui, in tutti i casi analizzati precedentemente, apparisse chiara la non giustificazione del modo di porre le domande e in questo modo l'impulso abituale si estinguesse gradualmente, di colpo gli enigmi più oscuri sarebbero risolti e la filosofia sarebbe degna del nome di regina della scienza.

Le nostre leggi di pensiero innate sono il presupposto per la nostra esperienza complessa, ma non lo erano per gli esseri viventi più semplici. Sono sorte lentamente in questi anche attraverso le loro semplici esperienze e continuarono a trasmettersi ereditariamente agli esseri più altamente organizzati. In questo modo si spiega il fatto che in essi appaiano giudizi sintetici, che abbiamo acquisito dai nostri antenati, che per noi sono innati, quindi aprioristici. Ne consegue quindi il loro potere costrittivo, ma non la loro infallibilità.»

volontà e quando deve subordinarla a quella degli altri, cosicché l'esistenza della famiglia, della tribù, del genere umano nel suo insieme e quindi di ciascun individuo sia meglio preservata. Questo amore innato a chiedere, però, va oltre i termini consentiti se ci chiediamo se la vita stessa in quanto tale debba essere preservata od ostacolata. Se qualche tipo di moralità causasse il declino d'una tribù che vi aderisce, verrebbe di conseguenza rifiutata. In ultima analisi non è la logica, né la filosofia né la metafisica a decidere se qualcosa è vero o falso, ma l'atto. In principio c'era l'atto (Faust di Goethe). Ciò che ci porta all'atto corretto, è vero.».

Le stesse considerazioni valgono anche per l'estetica, come discusso da Boltzmann nella sua lezione inaugurale a Lipsia (1900):

«Ci dobbiamo ancora occupare della teoria meccanica più meravigliosa nel campo delle scienze biologiche, la teoria di Darwin. Questa, partendo dal principio puramente meccanico dell'ereditarietà, che certamente in se stesso come tutti



Un altro modo di pensare al piano iperbolico è di immaginarlo come un cerchio, in cui tutte le lunghezze, incluse quelle dei campioni usati per misurare, decrescono. per un osservatore esterno, dal centro alla periferia. Ma un osservatore che partecipa delle leggi di quel mondo immaginario non se ne accorgerebbe; penserebbe però che la geometria euclidea non vale. Qui il piano iperbolico è illustrato in una litografia dell'artista olandese Maurits Cornelis Escher; per capirla si deve pensare che tutti i pesci neri siano esattamente sovrapponibili, e lo stesso succeda dei bianchi.

i principi meccanici primigeni è oscuro, intende spiegare l'intera varietà del mondo vegetale e di quello animale. La spiegazione della meravigliosa bellezza dei fiori, la ricchezza di forme del mondo degli insetti, la struttura appropriata degli organi del corpo umano e animale diventano in questo modo tutti dominio della meccanica. Comprendiamo perché per la nostra specie era utile e importante che certe impressioni sensoriali fossero lusinghiere e quindi da ricercare e che altre fossero da respingere; capiamo come fosse vantaggioso creare nel nostro spirito delle immagini il più possibile esatte dell'ambiente a noi circostante e separare nettamente ciò che di queste coincideva con l'esperienza, il vero, e ciò che non coincideva, il falso. Possiamo dunque spiegare in termini meccanici la nascita dei concetti di bellezza e di verità. Ma capiamo anche perché siano potuti sopravvivere solo quegli individui che aborrivano certi effetti altamente dannosi con tutta l'intensità della loro forza nervosa e cercavano di respingerli, ma anelavano ad altri, necessari per la loro conservazione o per quella della specie, con la stessa vivacità. Comprendiamo così come si svilupparono tutta l'intensità e la potenza della nostra vita emotiva: piacere e dolore, odio e amore, desiderio e paura, gioia e disperazione. Non possiamo liberarci della gamma di tutte le nostre passioni proprio come accade per le malattie fisiche, ma d'altra parte impariamo a comprenderle e a sopportarle,».

Boltzmann era conscio della difficoltà che queste idee incontravano, come si può rilevare da questo passo nella commemorazione di Kirchoff a Graz (1977):

«No, i nostri posteri più lontani non risparmieranno ammirazione per i grandi

uomini che il nostro secolo ha generato. Se qualcosa potesse eguagliare questa ammirazione, sarebbe il fatto che lo stesso secolo non sia riuscito a liberarsi di tanta ridicola pedanteria, del retaggio di così tante cose prive di senso e di tanta stupida superstizione [...] Non suona forse più forte che mai il belato di tutti gli oscurantisti, i nemici del libero pensiero e della ricerca contro il nuovo teorema di Pitagora, gli insegnamenti di Darwin [...] Ma, beati noi!, è la tempesta che preamuncia l'arrivo della primavera. Ma prima, le facezie a cuor leggero sono premature; armatevi per una battaglia amara e sanguinosa.».

Né Boltzmann trascura il moto di repulsione spontaneo nel vedere il senso del bello e del buono ridotto a puro meccanismo. Nella stessa lezione inaugurale di Lipsia infatti si legge:

«Posso prevedere quale terrore assalga l'entusiasta alle mie ultime argomentazioni e come tema che ogni grandezza e ogni cosa sublime venga degradata a meccanismo morto e privo di sentimento e svanisca tutta la poesia. Ma mi sembra che tutto questo timore si basi su un'interpretazione completamente sbagliata della mia esposizione. Le nostre idee delle cose non sono mai identiche alla loro essenza. Sono solo immagini o anzi simboli, che rappresentano l'oggetto del simbolo in modo necessariamente unilaterale, ma non possono fare altro che imitarne certi tipi di connessione lasciandone così l'essenza completamente immutata. Non dobbiamo perciò ritrattare niente della nettezza e della determinatezza del nostre espressioni precedenti. In questo modo non abbiamo fatto altro che affermare l'esistenza di una certa analogia fra i fenomeni spirituali e i semplici meccanismi della natura. Abbiamo soltanto costruito un'immagine unilaterale allo scopo di illustrare certi nessi fra i fenomeni e di prevedere fenomeni nuovi a noi sconosciuti. A questa immagine possono e devono, a causa della sua unilateralità, esserne legate altre che rappresentano il lato intimo ed etico di questo oggetto e l'elevazione della nostra anima a opera di quest'ultimo non verrà più offuscata non appena avremo la giusta comprensione dell'immagine meccanica. Questa andrà applicata solo dove è il suo posto; ma non contesteremo la sua utilità e rifletteremo sul fatto che anche le idee e le rappresentazioni più elevate sono solo ancora immagini, solo simboli esterni dei tipi di connessione dei fenomeni.».

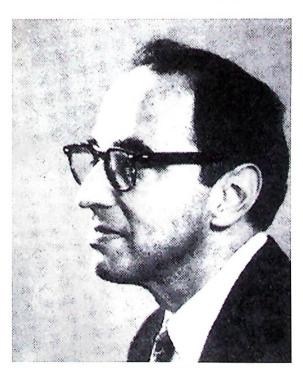
Naturalmente, oltre a occuparsi di filosofia della conoscenza in generale, con excursus nell'etica e nell'estetica, Boltzmann si occupò di filosofia della scienza

vera e propria, come dovrebbe essere indirettamente chiaro dai brani già riportati. I contributi a questa parte dello scibile mostrano certamente l'influenza di Maxwell e del cambiamento di atteggiamento verso la scienza, e in particolare verso i fondamenti della meccanica, che ebbe luogo in Germania nella seconda metà del XIX secolo. Ma il punto di vista di Boltzmann appare chiaro e pragmatico, nel senso che accetta il nuovo e le critiche al vecchio, in quanto servono a migliorare la comprensione dei fondamenti della meccanica; certi passaggi sono sorprendenti per la loro freschezza e modernità. Naturalmente il problema che lo preoccupa di più è quello dell'ipotesi atomica.

Un aspetto importante del pensiero di Boltzmann, che dimostra come Boltzmann abbia anticipato le opinioni di Thomas Kuhn (1922-1996) sulle rivoluzioni scientifiche, si può cogliere in un passaggio del necrologio di Stefan (1895):

«L'uomo della strada può immaginare che nuove nozioni e cause di fenomeni siano aggiunte gradualmente a quelle fondamentali già esistenti e che in tal modo la nostra conoscenza della natura subisca uno sviluppo continuo. Questa opinione, però, è errata, e lo sviluppo della fisica teorica è stato sempre per salti. In molti casi dovettero passare decenni o anche più di un secolo per articolare pienamente una teoria che fornisse un'immagine chiara d'una certa classe di fenomeni. Ma prima o poi si scoprirono nuovi fenomeni che erano incompatibili con la teoria; vano fu il tentativo di assimilare

Il noto filosofo della scienza Thomas Kuhn (1922-1996).



quelli in questa. Si sviluppò una lotta tra i seguaci della teoria e i sostenitori di una concezione finché, alla fine, quest'ultima venne generalmente accettata. Un tempo si era soliti dire che la vecchia descrizione era stata riconosciuta falsa. Questo suona come se le nuove idee fossero assolutamente vere e, d'altra parte, le vecchie (essendo false) fossero completamente inutili. Oggi, per evitare ogni confusione a questo riguardo, si dice semplicemente: il nuovo modo di pensare è una descrizione migliore, più completa e adeguata dei fatti. In tal modo si esprime chiaramente la seguente situazione: 1) anche la teoria precedente era stata utile perché dava un'immagine vera, anche se parziale, dei fatti; 2) non si esclude la possibilità che la nuova teoria sia a sua volta soppiantata da una più adatta.».

E altrove, in una conferenza sullo sviluppo dei metodi della fisica teorica: «Se consideriamo più da vicino il processo evolutivo della teoria, salta agli occhi per prima cosa che esso non ha assolutamente luogo in modo così continuo come ci si aspetterebbe, ma anzi è pieno di discontinuità e almeno apparentemente non segue il cammino più semplice da un punto di vista logico. Spesso certi metodi hanno dato, solo di recente, i più bei risultati e alcuni pensano che lo sviluppo della scienza all'infinito non consista in altro se non nel loro costante utilizzo. Al contrario, proprio per questo, all'improvviso questi metodi risultano esauriti e ci si sforza di trovarne di completamente nuovi e disparati, Si sviluppa allora una lotta fra i sostenitori dei vecchi metodi e gli innovatori. Il punto di vista dei primi viene definito dagli oppositori come antiquato e supera-

to, mentre quelli insultano gli innovatori in quanto corruttori della

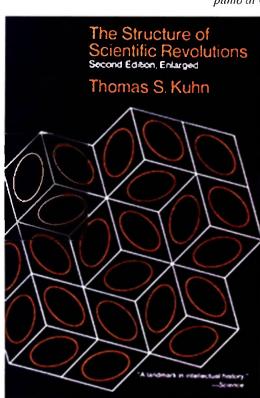
vera scienza classica.».

E più avanti, nella stessa conferenza: «Ne consegue che non può essere nostro compito trovare una teoria assolutamente corretta. mentre lo è quello di trovare un'immagine il più possibile semplice che rappresenti i fenomeni nel modo migliore possibile. È perfino concepibile la possibilità di due teorie completamente differenti che siano entrambe semplici e concordino ugualmente bene con i fenomeni, e che dunque, sebbene completamente diverse, siano entrambe, ugualmente giuste. L'affermazione per cui una teoria sarebbe l'unica giusta può essere solo l'espressione della nostra convinzione soggettiva, secondo cui non può esistere nessun'altra immagine ugualmente semplice e altrettanto adeguata.».

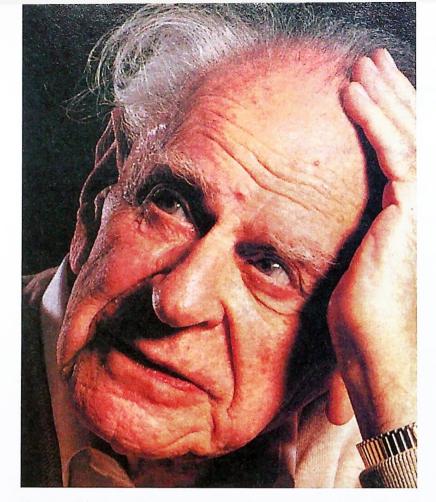
Un aspetto sorprendente dei contributi di Boltzmann alla filosofia è dato dal fatto che sembrano rimasti sconosciuti alla maggior parte dei filosofi del XX secolo. A questo proposito, ci limiteremo a citare un passo illuminante di Karl Popper, anch'egli austriaco di nascita: «Boltzmann è poco conosciuto come filosofo; fino a poco tempo fa, io stesso non sapevo pressoché nulla della sua filosofia, e tuttora ne so molto meno di quanto dovrei. Ma nei limiti in cui la conosco la condivido; più da presso, forse, di qualsiasi altra filosofia. È dunque chiaro che preferisco Boltzmann a Mach, non solo come fisico e come filosofo, ma anche, lo confesso, come persona. [...] Fino a oggi, il realismo e l'oggettivismo di Boltzmann non sono stati rivendicati né da lui né dalla storia (tanto peggio per la storia).».

D'altra parte Popper critica la fisica di Boltzmann, rifacendosi al cosiddetto «paradosso della ricorrenza di Zermelo», che abbiamo già discusso, e in particolare alla risposta di Boltzmann a Zermelo.

Ricordiamo che, secondo un calcolo di Boltzmann, anche per un solo centimetro cubo di gas, il tempo richiesto per «tornare indietro nel tempo» è inimmaginabilmente lungo, dell'ordine di un numero di anni espresso da 1018 cifre (contro le 17 cifre richieste per esprimere l'età stimata dell'universo). Probabilmente Popper intravide nell'idea di Boltzmann, «impressionante nella sua audacia e bellezza», un esempio di teoria concettualmente falsificabile, ma praticamente non falsificabile (chi sarà qui a falsificare la teoria dopo un tempo così lungo?). Invece di prendere atto di questo fatto, però, accusa Boltzmann di idealismo: «Ma penso anche che [l'idea di Boltzmann] sia del tutto insostenibile, almeno per un realista. Presenta il cambiamento unidirezionale come un'illusione. Questo rende la catastrofe di Hiroshima un'illusione. Quindi rende il nostro mondo un'illusione, e con esso tutti i nostri tentativi di saperne di più sul mondo. Si sconfigge perciò da sola



Il frontespizio dell'opera di Kuhn. Struttura della rivoluzione scientifica. Boltzmann anticipò molte delle idee successivamente sviluppate dal filosofo americano.



(come ogni idealismo). L'ipotesi idealistica ad hoc di Boltzmann fa a pugni con la sua filosofia anti-idealistica, realistica e sostenuta appassionatamente, e col suo appassionato desiderio di conoscenza.».

Qui sembra esserci una confusione (abbastanza comune) tra idealismo e antropocentrismo. In effetti questo è un aspetto assai importante della questione: dobbiamo distinguere tra leggi naturali e il nostro modo di parlare in relazione alle nostre sensazioni. Questo è perfettamente rispettabile, accettabile e giustificato, purché non lo si usi in un ragionamento scientifico. Così quando un astronomo dice: «Domani, il sole sorgerà alle 6.23», nessuno pensa che sia un sostenitore del sistema tolemaico. È un'affermazione abbreviata di qualcosa che potrebbe esprimersi in termini rigorosamente scientifici. Quando si parla poi di sensazioni ed eventi storici, le cose diventano ancora più complicate. Uno scopo importante della filosofia della scienza dovrebbe essere infatti quello di riconciliare le nostre impressioni intuitive, che vengono dalla vita di tutti i giorni, con i dati oggettivi della scienza. Infatti di solito le nostre impressioni sono «illusioni» dal punto di vista delle leggi scientifiche. Boltzmann fece un gran passo verso un chiarimento della differenza tra tempo fisico e tempo della vita di tutti i giorni (che è, più o meno, prossimo al tempo della termodinamica, ma non a quello della meccanica). Come tutte le grandi spiegazioni, il contributo di Boltzmann ha spostato il problema a spiegare qualcos'altro, ma ha certamente prodotto un progresso immenso nella nostra comprensione delle diverse concezioni del tempo.

Recentemente la filosofia di Boltzmann è stata oggetto di studio da parte di molti filosofi di professione che, pur rilevandone la scarsa sistematicità e qualche aspetto contraddittorio (dovuto all'evoluzione del pensiero dello scienziato), la ritengono interessante proprio perché passò attraverso diverse fasi dei maggiori tipi di epistemologia e ontologia senza rimanerne soddisfatto. Inoltre, a livello metodologico, Boltzmann è passato attraverso svariati stadi (empirico, riduzionista, matematico, linguistico, pragmatico). Purtroppo, non possiamo approfondire qui questo interessante argomento.

64

I viaggi e gli incontri

Nel corso della sua carriera di scienziato Boltzmann venne conosciuto e apprezzato da studiosi del calibro di Max Planck e Albert Einstein

ra i molti viaggi all'estero che Boltzmann fece per aumentare i contatti scientifici, i tre più lunghi furono negli Stati Uniti. Nel primo di questi, avvenuto nel 1899, fu accompagnato dalla moglie. Si imbarcarono sul vapore Kaiser Wilhelm der Groβ del North German Lloyd a Brema e raggiunsero New York via Southampton e Cherbourg. Boltzmann fece quattro conferenze

sui principi e le equazioni fondamentali della meccanica alla Clark University di Worchester nel Massachusetts, che celebrava il suo decimo anniversario. Ricevette anche un dottorato

honoris causa.

Durante il viaggio i Boltzmann scrissero sei lettere ai figli. La prima venne scritta sulla nave e parla soprattutto del mal di mare, che aveva impedito a Henriette di partecipare a una cena di nove portate. Furono molto impressionati da New York: «L'affollamento di tram elettrici e di treni a vapore sulla strada, e sopra e sotto la strada, è meraviglioso. Vanno molto veloci. È davvero piuttosto pericoloso.». I due coniugi trovarono che Boston era terribilmente polverosa. Visitarono anche Montreal, Buffalo, Washington, Baltimora e Filadelfia. Nell'ottobre del 1904 Boltzmann partecipò a un congresso a St. Louis (accompagnato dal figlio Arthur Ludwig, come era già avvenuto in una crociera nel Mediterraneo, intrapresa nel 1901 con l'intento di migliorare lo stato di salute dello scienziato). Ouesta volta il viaggio, da Amburgo a New York, sul postale Belgravia della Hamburg America Line durò dieci giorni e fu molto disagevole, soprattutto per il continuo suono delle sirene da nebbia che impedivano di dormire. Visitarono Detroit e Chicago e ritornarono sulla Deutschland.

Nel 1905, viaggiando da solo, Boltzmann tornò per l'ultima volta negli Stati Uniti, per tenervi 30 lezioni a una scuola estiva all'Università di California, a Berkeley, dove era stato invitato insieme con Ostwald. Di quest'ultimo viaggio fece una deliziosa descrizione, intitolata Viaggio d'un professore tedesco nell'Eldorado, che abbiamo già citato. Durante il suo lungo soggiorno negli Stati Uniti nel luglio 1905, a differenza

di quanto era avvenuto in precedenti viaggi, soffrì di attacchi d'asma. Ne scrisse al suo assistente Stefan Mayer: «Quel che ho visto è molto interessante e spero di vedere cose ancora più interessanti, ma il tutto mi ha esaurito e stancato. Soprattutto perché il clima della California non è così piacevole come spesso si racconta. I cambiamenti da un caldo subtropicale al freddo, dove si deve usare una stufa o una fornace (in luglio, allo stesso parallelo di Palermo), da un tempo secco a un clima nebbioso, in cui non si può vedere neppure la casa vicina, sono duri da sopportare per un europeo. In aggiunta, l'acqua piovana, conservata in grosse cisterne dall'inverno, sconvolge il mio stomaco. Il vino viene nascosto, come fa uno studente di liceo col suo sigaro. Questo è quel che chiamano libertà.».



Svante August Arrhenius (1859-1927), premio Nobel per la chimica, fu studente di Boltzmann a Graz.

Possiamo leggere notizie sul viaggio di Boltzmann nell'Eldorado nei giornali locali del tempo. Il «Daily Californian» (Vol. XXV, n. 17, p. 1) dice: «Il professor Boltzmann occupa un posto molto elevato tra i fisici di tutto il mondo e si situa nella stessa classe di Arrhenius, il fisico svedese, e De Vries, il famoso botanico olandese, che furono ambedue membri della facoltà nell'ultima sessione estiva.» E un po' dopo: «Il successo degli sforzi del rettore Wheeler per assicurare che eminenti scienziati e professori facessero lezione nelle sessioni estive è diventato maggiore quando il suo invito è stato accettato da Ludwig Boltzmann, professore di fisica teorica all'Università di Vienna. Nel suo settore di ricerca il dr. Boltzmann ha raggiunto una preminenza che lo classifica con i più grandi scienziati del mondo. Ha fatto per la fisica matematica quello che il professor Arrhenius ha fatto per chimica fisica.».

Dopo aver detto ai propri lettori che «il dr. Boltzmann è il maggior esponente vivente della teoria atomica» il giornale dà ulteriori informazioni su di lui: «Il dr. Boltzmann è un pensatore così profondo e astruso che la matematica non è abbastanza avanti per qualcuna delle sue opere maggiori, cosicché ha dovuto sviluppare da solo le sue formule matematiche.».

Si può leggere qualcosa di simile nell'edizione del 29 giugno di «The Record»:

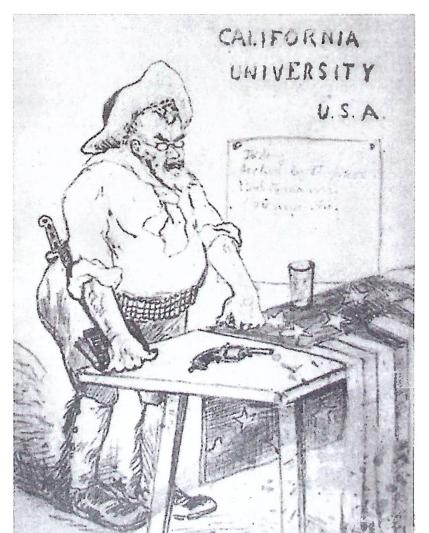
«Il dr. Boltzmann arriva per la sessione estiva – Terrà un corso avanzato della durata di sei settimane – È uno dei più preminenti fisici d'Europa – È stato docente in diverse università in Germania per più di trent'anni. – Il Dr. Ludwig Boltzmann occupa, nel mondo degli scienziati, lo stesso posto di Arrhenius e De Vries, il fisico e botanico eminenti che furono i divi della sessione estiva l'anno scorso. È stato invitato a venire in California l'anno scorso, quando venne in questo paese per prender parte al Congresso Internazionale di Arti e Scienze alla fiera di St. Louis. Allora non poté accettare l'invito, ma promise di venire quest'estate. Questo è il suo primo viaggio sulla Costa Pacifica, in quanto la sua carriera molto occupata l'ha costretto a restare sull'altro lato dell'Atlantico. Durante

gli ultimi trent'anni il professor Boltzmann ha insegnato alle università di Graz, Monaco, Lipsia e Vienna, in quest'ultima dal 1902.».

Boltzmann era molto orgoglioso del suo inglese, come apprendiamo dal suo racconto del viaggio. Ma i commenti della gente che ascoltava le sue lezioni esprimono qualche riserva su come padroneggiava la lingua. Un commento dice che era «alquanto manchevole, per non calcare la mano». «Oh! Stasera ho imparato "heem"» è un altro commento, riferentesi alla difficoltà, tipica di molti europei, di pronunciare la i breve inglese, per esempio di him. O più esplicitamente: «Si dice che se avesse fatto lezione in tedesco la maggior parte del suo uditorio sarebbe stato in grado di seguirlo. Ma in effetti ha fatto lezione, quattro volte alla settimana, in (cosiddetto) inglese, sulle "Analogie meccaniche della termodinamica con particolare riferimento ai teoremi della meccanica statistica",»,

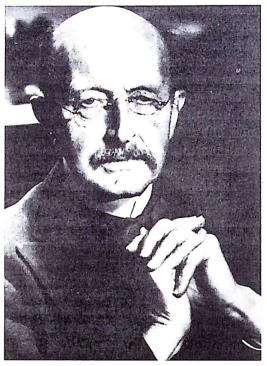
Si dice anche che fino a qualche decina di anni fa c'era ancora a Berkeley chi era un po' scontento del comportamento di Boltzmann, che era considerato un misto di estasi maniacale e di affettazione piena di pretese di un famoso professore tedesco.

Boltzmann fa lezione all'Università di California, a Berkeley, in una caricatura di K. Przibram.



L'opera di Planck costituisce il filo che lega Boltzmann alla meccanica quantistica. All'inizio delle sue ricerche sul corpo nero, impressionato dal paradosso di

Zermelo, Planck scrive;



Max Planck (1858-1947), premio Nobel per la fisica, dapprima credeva di poter studiare la radiazione del corpo nero senza gli strumenti della meccanica statistica elaborati da Boltzmann, ma dovette ricredersi

«Senza dubbio, la teoria cinetica ha affrontato il compito di spiegare la tendenza all'equilibrio termomeccanico [...] in termini di effetti conservativi, cioè come il risultato finale di tutti gli urti tra le mumerose molecole che, concepite come punti, interagiscono attraverso forze conservative. Ma uno studio più accurato fa vedere che i moti molecolari supposti dalla teoria cinetica dei gas non sono in nessun senso unidirezionali, e che, in modo del tutto generale, qualsiasi stato che sia esistito una volta, nel corso del tempo si verificherà con una frequenza così elevata da soddisfare qualsiasi livello desiderabile di approssimazione. Partendo dal punto di vista della teoria cinetica dei gas non si otterrà alcuna rigorosa teoria della viscosità se non si ricorre a qualche ipotesi addizionale!».

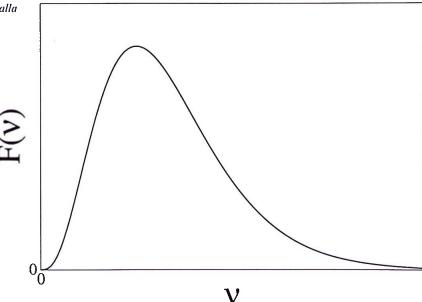
Dopo questa dichiarazione di fallimento della teoria cinetica, Planck indica quali siano le sue speranze per ridurre i mutamenti unidirezionali a effetti conservativi: «Credo di dover riconoscere come processo unidirezionale costituito da effetti completamente conservativi l'influenza di un risuonatore, che vibra senza attrito o resistenza, sull'onda che lo eccita ...».

Infatti, tale risuonatore avrebbe alterato il campo, per esempio assorbendo energia da un'onda piana e riemettendola sotto forma di onda sferica oppure eliminando gradualmente le fluttuazioni o anche alterando lo spettro. Inoltre, essendo il sistema a infiniti gradi di libertà (in quanto include il campo), il paradosso di Zermelo sarebbe stato evitato.

Planck proseguì per un po' su questa linea (che potremmo definire «antiboltzmanniana»). Non è qui il caso di entrare in un'esposizione del modo di procedere di Planck. Ci soffermeremo quindi su quegli aspetti dello sviluppo del pensiero di Planck rilevanti per la loro relazione con l'opera di Boltzmann.

Quattro mesi dopo la presentazione della prima parte del lavoro di Planck sul corpo nero, venne illustrata, alla stessa Accademia di Berlino, una breve critica scritta da Boltzmann, che rilevava, dopo il riconoscimento del grande valore delle formule ricavate da Planck, come il programma per cui esse erano state

La distribuzione di Wien, una prima alla distribuzione di Planck.



sviluppate fosse destinato a fallire. Infatti, il paradosso della reversibilità (ben familiare a Boltzmann) restava pienamente valido. Senza invocare condizioni iniziali opportune (anche se altamente probabili) non si poteva dedurre un'equazione irreversibile da equazioni reversibili.

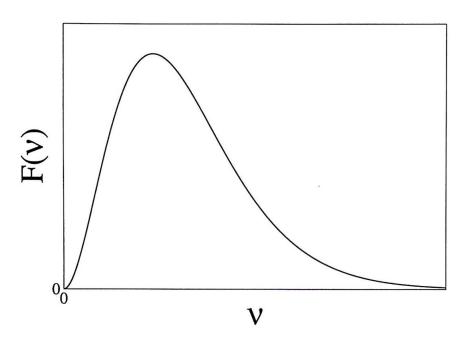
Dopo aver preso visione di questa obiezione, Planck, nella seconda parte della serie di lavori sul corpo nero, sorvola sui dettagli e la considera frutto di un «equivoco». Nel terzo lavoro, però, pur proseguendo sulla strada intrapresa, dà un chiaro segnale di aver capito la rilevanza della critica di Boltzmann, perché chiude il lavoro con queste osservazioni: «probabilmente sono possibili anche i casi in cui [...] il processo di radiazione è disordinato all'inizio, ma appare ordinato nei momenti successivi. In queste circostanze, l'intensità della radiazione sarebbe costante all'inizio, per essere soggetta a notevoli variazioni successivamente. Che tale processo si verifichi realmente in natura, o no, dipende dal tipo di stato iniziale.».

Con la quarta parte delle sue comunicazioni all'Accademia, il programma di Planck cambia completamente; si apre infatti con una dichiarazione, secondo cui «bisogna soprattutto escludere, grazie a una precisa asserzione preliminare, tutti i processi di radiazione che non manifestano la caratteristica dell'irreversibilità.». Si tratta di quelle inversioni del modo di procedere, o d'interpretazione del proprio modo di procedere, su cui gli storici della scienza possono solo fare congetture, in mancanza di esplicite ammissioni. Quel che è certo è che, ben prima d'introdurre l'ipotesi del quanto di radiazione nel 1900, Planck si era convertito alle idee della teoria cinetica o, per riprendere una frase precedente, aveva adottato una linea «boltzmanniana».

In effetti, il risultato a cui arriva (la distribuzione di Wien, il cui discreto accordo con dati sperimentali era già noto), dipende esclusivamente da una definizione *ad hoc* di un'entropia di forma smaccatamente analoga alla *H* di Boltzmann (cambiata di segno) e della ricerca del suo massimo vincolato, come viene riconosciuto nella quinta parte.

A questo punto, Planck ebbe la percezione di essere arrivato a un grosso risultato, o almeno a qualcosa che gli somigliava. Preparò quindi un articolo per gli «Annalen», che iniziava con una lunga parte introduttiva, in cui si segnalavano i parallelismi tra il suo (nuovo) programma e quello di Boltzmann fino ad arrivare a dire: «Nessun ostacolo blocca la via per lo sviluppo generale dell'ipotesi del caos molecolare. La possibilità di sviluppare la seconda legge in tutte le direzioni sulla base della teoria cinetica dei gas è perciò assicurata.».

Tuttavia, Planck era ben conscio della debolezza dei suoi argomenti; inoltre i dati sperimentali cominciavano a dimostrare che la legge di distribuzione di Wien non era così accurata come si era pensato fino ad allora. La confessione,



La distribuzione di Planck.

piena e onesta, dell'influenza della critica di Boltzmann sul suo lavoro successivo può leggersi nel discorso tenuto in occasione della cerimonia in cui Planck venne insignito del Premio Nobel:

«Avevo suggerito che un risuonatore potesse esercitare un'azione unilaterale, quindi irreversibile, sull'energia del campo che lo circonda, ma mi attiraì l'opposizione energica di Boltzmann. Con l'esperienza più matura che aveva in questo tipo di questioni, non ci mise molto a dimostrare che, secondo le leggi della meccanica classica, tutti i fenomeni da me considerati, potevano aver luogo nei due sensi, cioè che l'onda sferica emessa da un risuonatore poteva inversamente tornare a questo stesso risuonatore, sotto forma di superfici sferiche che si contraevano sempre di più fino all'assorbimento completo. Il risuonatore poteva dunque rinviare nello spazio l'energia da lui prima ricevuta, nella direzione stessa da cui gli era arrivata. Se potevo, nella mia ipotesi dell'irraggiamento, trascurare nozioni così singolari come quella d'onda a senso unico, introducendo una condizione restrittiva, non era meno vero che tutte queste analisi mostravano chiaramente l'assenza d'un anello essenziale per arrivare alla soluzione del problema. Non mi restava dunque altra possibilità, in queste condizioni, che riprendere il problema in senso inverso, cioè situandomi dal punto di vista della termodinamica, terreno dove mi sentivo più a mio agio e come a casa mia».

Scrisse quindi un lavoro in cui, con motivazioni di semplicità e di accordo con dati sperimentali, postulava una formula semplice per la derivata seconda dell'entropia rispetto alla energia interna e, usando relazioni ben stabilite, arrivava, per integrazione, a quella che è oggi nota come distribuzione di Planck.

A questo punto era possibile anche esprimere l'energia e l'entropia dei risuonatori, da Planck a lungo utilizzati nelle precedenti ricerche. In particolare, l'espressione dell'entropia in termini dell'energia si presta a interpretazioni combinatorie del tipo introdotto da Boltzmann e da noi discusse in dettaglio. Come ci dice lo stesso Planck: «La questione considerata da questo punto di vista mi portò a considerare i rapporti tra l'energia e l'entropia, riprendendo il punto di vista di Boltzmann. Dopo alcune settimane, che furono certamente occupate dal lavoro più accanito della mia vita, un lampo rischiarò la tenebra in cui mi dibattevo.».

Occorre infatti trasformare la formula di cui si è appena detto in qualcosa contenente solo numeri interi. Come si è visto, già Boltzmann aveva suddiviso l'energia in un certo numero (diciamo p) di «quanti», indicati con u, spianando così la strada a Planck. Osserviamo che i risuonatori di una data frequenza sono N e l'energia di ciascuno U, allora: NU = pu.

Ma mentre Boltzmann pensava a u come a qualcosa da far poi tendere a zero, Planck scoprì che, se voleva interpretare con l'analisi combinatoria l'espressione suddetta dell'entropia, doveva supporre u proporzionale alla frequenza v dell'oscillatore, ottenendo così la famosa formula: u = hv.

Usando ora il principio di Boltzmann a rovescio, rispetto all'uso che ne abbiamo fatto in precedenza, si può risalire a una probabilità (indicata da Planck con *R*), che risulta:

$$R = (N+p-1)!/[(N-1)!p!]$$

cioè al numero dei modi in cui *N* oggetti indistinguibili possono essere distribuiti in *P* scatole distinguibili.

Questa è la ricostruzione probabile del ragionamento, in quanto nella pubblicazione in cui compare per la prima volta il quanto d'azione h, Planck introduce le ipotesi che aveva scoperto lavorando a ritroso e procede poi al calcolo combinatorio, trovando l'espressione di R. Poi accenna alla ricerca del massimo di P con calcoli «indubbiamente molto prolissi» e dà semplicemente il risultato del suo calcolo, già introdotto su basi semiempiriche nella precedente comunicazione.

Nel suo famoso articolo, apparso nel 1901, Planck procede in modo più spedito. Vi leggiamo una piena adesione alla concezione di Boltzmann: «L'entropia tiene conto della disorganizzazione e, secondo la teoria elettromagnetica dell'irraggiamento, questa disorganizzazione risiede, per le oscillazioni monocromatiche d'un risuonatore, anche quando questo si trova in un campo d'ir-

raggiamento stazionario, nell'irregolarità dei suo continui cambiamenti d'ampiezza e di fase, quando si considera un intervallo di tempo assai grande rispetto a quello d'una oscillazione, ma assai breve rispetto a quello d'una misura. Se l'ampiezza e la fase fossero assolutamente costanti, cioè se le oscillazioni fossero assolutamente omogenee, non potrebbe esservi alcuna entropia e l'energia d'oscillazione sarebbe integralmente convertibile in lavoro. L'energia U d'un solo oscillatore, che oscilla in maniera stazionaria non deve quindi essere considerata che come una media temporale ovvero, il che è lo stesso, come la media a un dato istante delle energie d'un gran numero N di risuonatori identici, che si trovano sufficientemente lontani gli uni dagli altri nel campo di radiazione stazionario perché non si influenzino a vicenda. È in questo senso che parleremo d'energia media U d'un risuonatore.».

Adotta quindi la relazione fra entropia e il logaritmo della probabilità, osservando che la sua semplicità «e la sua stretta parentela con un'asserzione della teoria cinetica dei gas ne perorano a priori la causa». Per trovare l'espressione della probabilità «è necessario considerare U_N [= NU] non come una grandezza continua, infinitamente suddivisibile, ma come una grandezza composta di parti uguali, discrete e finite. Chiamiamo elemento d'energia una tal parte, in maniera che:

NU = pu

P essendo un numero intero grande.».

Introduce poi il calcolo combinatorio del precedente lavoro per N risuonatori con energia pu, si pone in condizione d'equilibrio termodinamico e usa la legge generale di Wien, già dimostrata per via termodinamica; questo ha come conseguenza la legge: u = hv.

Se si applica quindi una nota relazione termodinamica secondo cui la derivata parziale dell'entropia rispetto all'energia è uguale all'inverso della temperatura, è immediato ottenere di nuovo la strana legge di distribuzione che Planck aveva già indicato nei precedenti lavori. Questa teoria di Planck ebbe l'approvazione esplicita di Boltzmann, come leggiamo ancora nella conferenza per l'assegnazione del premio Nobel: «Dopo tante disillusioni, ebbi la soddisfazione particolarmente preziosa di vedere Ludwig Boltzmann dichiararsi, nella lettera che mi scrisse quando gli ebbi mandato il mio articolo, pienamente d'accordo con me, tanto sui principi quanto sulla catena delle mie deduzioni.».

Notiamo che Planck propose Boltzmann al Comitato per il premio Nobel per il 1905 e il 1906. Nel 1906 Boltzmann fu proposto anche da Philipp Lenard, e anche da un professore di medicina a Heidelberg, V. Czerny, a cui, evidentemente per errore, il suddetto Comitato aveva chiesto un proposta per il premio Nobel per la fisica.

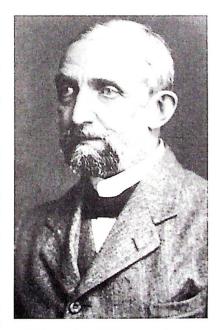
Boltzmann ed Einstein

Il primo giudizio di Einstein su Boltzmann, basato presumibilmente sul libro di teoria cinetica dello scienziato austriaco, può leggersi in una sua lettera alla sua amica Mileva Maric, che in seguito sposò. La lettera fu scritta un giovedì, presumibilmente il 13 settembre 1900, da Milano e dice: «Il Boltzmann è magnifico. L'ho quasi finito. È un espositore magistrale. Sono fermamente convinto che i principi della teoria sono giusti, il che significa che sono convinto del fatto che, nel caso dei gas, abbiamo veramente a che fare con punti materiali discreti di ben precise dimensioni finite, che si muovono secondo certe condizioni. Boltzmann giustamente sottolinea che le ipotetiche forze tra le molecole non sono un elemento essenziale della teoria, perché l'intera energia è di natura cinetica. Questo è un passo avanti nella spiegazione dinamica dei fenomeni fisici.»

Alcuni autori parlano di una corrispondenza tra Boltzmann ed Einstein, ma non ce ne sono prove, se non che, in un'altra lettera, Einstein dice che manderà a Boltzmann una parte di un suo articolo.

I legami tra l'opera di Boltzmann e quella di Einstein sono notevoli; i più evidenti sono nella teoria del moto browniano e nello sviluppo del concetto di «quanto di luce» (dovuto a Planck) in quello di «fotone».

Soffermiamoci brevemente sul moto browniano; Boltzmann menziona questo moto in un paio di occasioni ma non sviluppa le conseguenze di queste osserva-



Il fisico tedesco Philipp Lenard propose Boltzmann per il premio Nobel.

Nel 1900 Albert Einstein (1879-1955) espresse il suo primo positivo giudizio su Boltzmann in una lettera alla sua amica Mileva Maric, che in seguito sposò.



zioni: «Tutti questi piccoli ammassi, come ben si sa, sono soggetti a un moto costante, noto come moto browniano [...]; [...] analogamente, si osserva che particelle minute in un gas eseguono moti che risultano dal fatto che la pressione sulla superficie può fluttuare».

Doveva toccare a Einstein elaborare quest'ultima osservazione e arrivare a una teoria, che avrebbe costituito il punto di partenza per accertare in maniera indubitabile la struttura atomica della materia. Notiamo che Giovanni Cantoni, fisico italiano, scrisse nel 1868 un lavoro in cui sostenne che il moto browniano è una «dimostrazione sperimentale bella e diretta dei principi fondamentali della teoria meccanica del calore».

Einstein stesso ricordò in una conversazione il proprio stupore per il fatto che i suoi risultati non fossero stati ottenuti da Boltzmann: «è sorprendente che Boltzmann non abbia tirato questa conseguenza notevolissima, dato che aveva posto le basi per l'intera disciplina».

«Tuttavia è difficile – osserva il biografo di Einstein, Abraham Pais – immaginare che un Boltzmann immerso nelle polemiche manifestasse lo spirito serio, ma nel contempo giocoso, con cui Einstein affrontò il problema della realtà molecolare.» Einstein sviluppò una conoscenza più dettagliata dei lavori di Boltzmann e una grande ammirazione per lui; a questo proposito appare sufficiente ricordare che, nell'esposizione divulgativa della teoria della relatività, che non aveva niente a che fare con l'opera di Boltzmann, lo cita nell'introduzione con la frase: «... ho scrupolosamente seguito il precetto del geniale fisico teorico Ludwig Boltzmann, secondo cui i problemi dell'eleganza vanno lasciati al sarto e al calzolaio.».

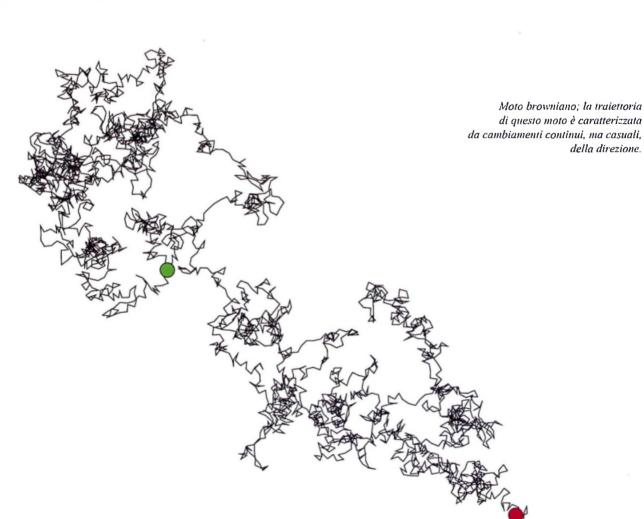
È stato suggerito che le discussioni di Boltzmann sulla possibilità di cambiare gli assiomi della meccanica abbiano influenzato Einstein nello sviluppo delle teorie relativistiche. Ecco i passaggi rilevanti per la teoria della relatività generale:

«Penseremo che l'universo sia finito [...] In maniera del tutto indipendente da questo c'è la questione se le equazioni della meccanica sviluppate qui e quindi anche la legge d'inerzia possano forse essere solo approssimativamente corrette se, formulandole più correttamente, l'improbabilità o piuttosto la disomogeneità di aver adottato nella descrizione un sistema di coordinate a fianco dei punti materiali sparirebbe da sola.».

«Qui Mach ha indicato la possibilità di una descrizione più corretta, ottenuta ipotizzando che solo l'accelerazione della posizione relativa tra due punti materiali è determinata principalmente dalle masse vicine, mentre la sua velocità è determinata da una formula in cui sono decisive le masse molto distanti. Questo, naturalmente, evita di adottare qualsiasi sistema di coordinate nella descrizione, dato che ora è solo una questione di distanze.».

«In ogni caso penso che una tale estensione della nostra immagine, che metta in rilievo il fatto che ciò che consideriamo più certo e ovvio possa forse essere solo approssimativamente corretto, sia del massimo valore. È in linea col suggerimento che le distanze delle stelle fisse possano forse costruirsi solo in uno spazio non euclideo di piccolissima curvatura, legata naturalmente alla legge d'inerzia in quanto un corpo in moto su cui non agiscono forze dovrebbe, dopo eoni, ritornare alla sua posizione precedente se la curvatura è positiva.».

Riguardo alla relatività ristretta, Boltzmann fu il primo a discutere la necessità di avere aste rigide e un orologio universale per descrivere le leggi della dinamica. L'autore successivo fu Einstein, che lasciò cadere l'orologio assoluto, per introdurre una velocità assoluta. Boltzmann fa inoltre questa notevole osservazione: «Tuttavia, la legge d'inerzia non vale per le particelle dello stesso etere luminoso; le equazioni di Maxwell dovrebbero esser formulate in maniera tale che determinino solo le mutue azioni di elementi di volume adiacenti senza che abbiamo bisogno di uno spazio assoluto per formularle. Lo sviluppo di questa teoria ancora tutta da sviluppare è al momento fuori della nostra portata.».



L'Austria negli ultimi anni di vita di Boltzmann

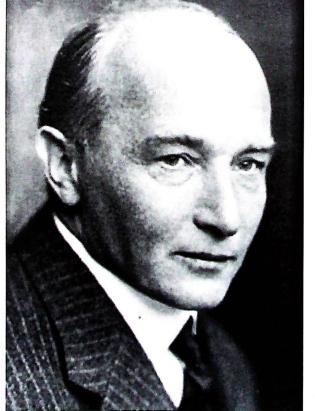
Il periodo a cavallo tra XIX e XX secolo vide a Vienna il fiorire delle arti e della cultura ma svelò anche l'esistenza di alcuni profondi malesseri sociali

Politzmann era ormai prossimo alla morte quando Robert Musil (1880-1942), che si era precedentemente laureato in ingegneria, cominciava a lavorare alla sua tesi su Mach, che l'avrebbe portato al dottorato (Berlino, 1908).

Alcune delle sue vivaci e affettuose descrizioni dell'Austria e di Vienna nel suo monumentale romanzo Der Mann ohne Eigenschaften (L'uomo senza

qualità), in cui fornì un'analisi ironica dei mali del suo tempo, uno smascheramento di falsi atteggiamenti nella vita e un tentativo d'applicare una precisione di pensiero scientifica alle esperienze sociali e spirituali, ci permettono di ricostruire le impressioni che Boltzmann potrebbe aver avuto riguardo all'ambiente in cui viveva (e noi sfrutteremo qualche sua osservazione, come abbiamo già fatto in un paragrafo precedente relativo all'Austria). Dopo tutto è un personaggio di Musil, Ulrich – presumibilmente un ritratto dell'autore – a proporre che nell'etica ogni cosa vola qua e là come le molecole secondo la teoria cinetica dei gas, producendo risultati medi molto stabili e accordi assai strani. Il progresso è allora la conseguenza statistica di voli casuali di idee e il comportamento del singolo non ha significato per la marcia della storia.

Musil coniò un nome speciale, «Kakania», per il suo paese, un nome che combina due significati. Da un lato è la derivazione dalle iniziali K. K. (ka-ka in tedesco) cioè la sigla di kaiser-königlich (imperial regio), che precedeva il nome di tutte le principali istituzioni dell'Impero. Dall'altro, una familiarità anche superficiale col linguaggio dei bambini di lingua tedesca suggerisce lo stesso significato che viene spontaneo a un lettore italiano.



Robert Musil (1880-1942), geniale scrittore austriaco, autore di una tesi di dottorato su Mach e del monumentale romanzo Der Mann ohne Eigenschaften (L'uomo senza qualità).

Ecco come parla di Francesco Giuseppe

«L'imperatore re di Kakania era un vecchio signore leggendario. Da allora moltissimi libri sono stati scritti su di lui e si sa esattamente cosa fece, impedì, o tralasciò di fare; ma allora, nell'ultimo decennio della vita sua e della Kakania, i giovani che avevano familiarità con lo stato corrente delle arti e delle scienze erano talvolta presi dal

dubbio se addirittura esistesse. Il numero di suoi ritratti che si vedevano era quasi pari al numero di abitanti dei suoi regni; il giorno del suo compleanno si mangiava e beveva quanto in quello del Salvatore; sulle montagne i fuochi d'artificio scoppiavano, e si sentivano le voci di milioni di persone che giuravano di amarlo come un padre. Infine, un inno che risuonava in suo onore era la

sola opera di poesia e musica di cui ogni Kakaniano sapeva almeno un verso. Ma questa popolarità e presenza pubblica era così superconvincente che poteva benissimo darsi il caso che credere nella sua esistenza fosse simile al veder ancora certe stelle, benché esse abbiano cessato di esistere migliaia di anni fa.».

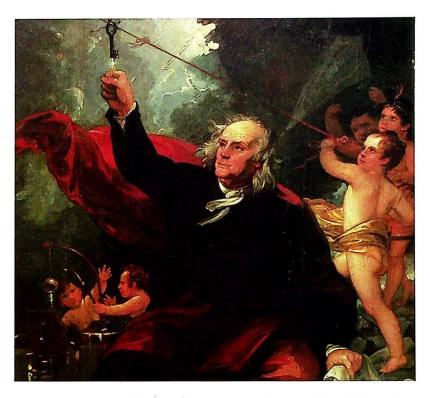
Nell'Impero austro-ungarico, una reliquia del passato ma anche un modello di perfetta amministrazione, si cercava di ridurre la velocità del progresso. Era proprio l'opposto di quello che la gente sapeva delle città americane, dove tutti sembravano correre o fermarsi con un cronometro in mano. Abbiamo visto ciò che impressionava di più Boltzmann: treni sopraelevati e metropolitane, la posta pneumatica, ascensori, treni e automobili muovevano persone e notizie orizzontalmente e verticalmente, lasciando appena la possibilità di dire poche parole tra un tipo di trasporto e l'altro, prima di essere risucchiati e inghiottiti dal moto perpetuo di una società avanzata.

Domande e risposte dovevano incastrarsi come i denti di un ingranaggio, le attività erano raggruppate insieme in certi luoghi, si mangiava camminando, mentre i divertimenti erano raggruppati in altre aree e la gente viveva in luoghi ancora diversi, dove enormi edifici fungevano da contenitori della famiglia, del grammofono e dell'anima. Per essere felici si doveva raggiungere uno scopo, non importava quale.

Questo era naturalmente New York e, quando si pensava all'America, si pensava a New York; la parte restante di quel paese era per un europeo un'immagine nebulosa, dove qualche macchia di colore collegata ai cow-boy e al Far West emergeva per dare un ulteriore tocco di irrealtà al Nuovo Mondo.

Gli Stati Uniti d'America (ancora chiamati «le colonie rivoltanti» dalla regina Vittoria d'Inghilterra) rimanevano indietro nelle scienze di base, perché, nonostante la presenza di alcuni fisici eccezionali (Benjamin Franklin, Joseph Henry, Josiah Willard Gibbs), erano più interessati alle invenzioni e applicazioni pratiche della scienza (Samuel Morse, Thomas Alva Edison, Alexander Graham Bell) che allo sviluppo dei suoi aspetti culturali e fondamentali in maniera originale.

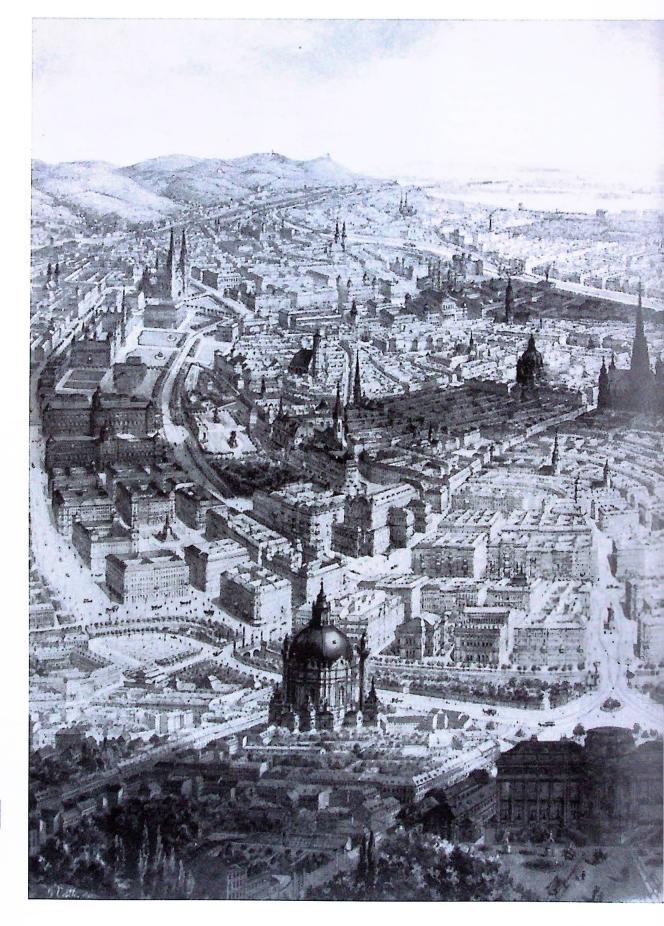
In Europa e soprattutto in Austria si sapeva del meraviglioso nuovo mondo che si stava sviluppando oltre l'Atlantico, ma non ci si precipitava a un'imitazione di quel tipo di vita. Quando era lontano dal suo paese, un austriaco lo pensava ancora come un insieme di strade bianche, larghe e confortevoli, dove si camminava o ci si muoveva su una diligenza, vagando in tutte le direzioni simili a canali di un ordine prestabilito, a nastri di quel tessuto chiaro usato per le uniformi, avvolgenti colline e valli in un abbraccio burocratico. Possiamo vedere questo anche nella descrizione del viaggio di Boltzmann in California, quando confronta le viste delle montagne americane a quelle che popolano il

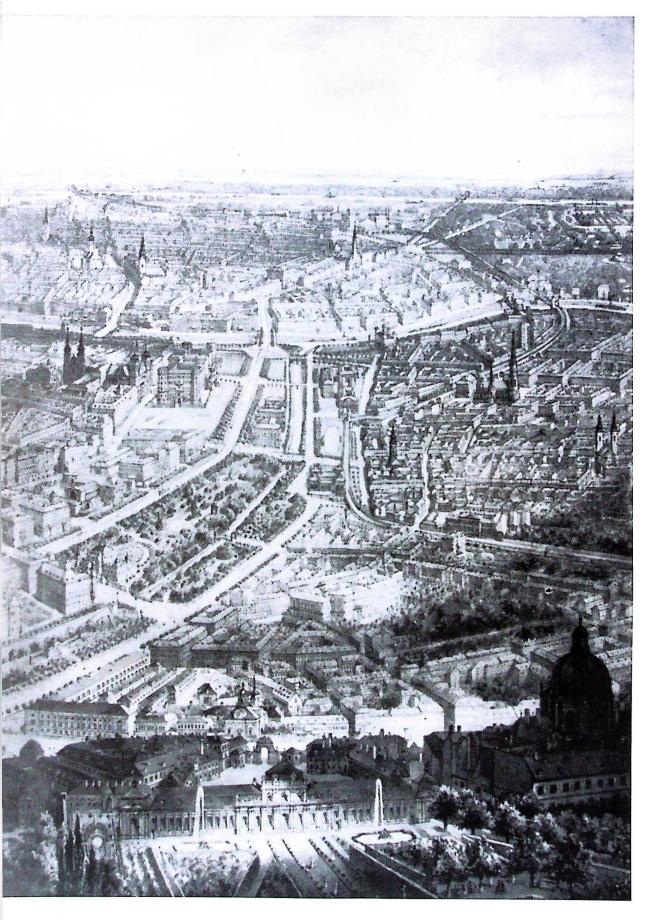


Il fisico americano Benjamin Franklin (1706-1790) ritratto da Benjamin West.



Il fisico americano Joseph Henry,







Vienna e i suoi cambiamenti; sopra in una stampa settecentesca; a destra in un'immagine moderna e, nelle pagine precedenti, una veduta della eitta come si presentava nel 1886.



paesaggio austriaco. E quale varietà di paesaggio! Mari e ghiacciai, grotte del Carso e campi di grano boemi, notti sul Mare Adriatico con grilli che frinivano senza requie e villaggi slovacchi in cui il fumo usciva dai comignoli come dalle narici di un naso camuso, mentre il villaggio era senato tra due collinette come se la Terra avesse dischiuso un po' le labbra per riscaldare il suo bambino. Si potevano vedere le prime automobili e si cominciava a pensare a conquistare l'atmosfera, ma non troppo assiduamente.

Per usare le parole di Musil:

«Era kaiser-königlich (imperial-regio) ed era kaiser und königlich (imperiale e regio) per ogni cosa e persona; ma si richiedevano cognizioni da addetti per essere sicuri di distinguere quali istituzioni dovevano chiamarsi k.k. e quali k.u.k.. Sulla carta si chiamava la Monarchia Austro-Ungarica; parlando, però, si chiamava Austria, cioè era nota con un nome a cui, come Stato, aveva solennemente rinunciato con un giuramento mentre lo conservava in tutte le questioni di sentimento, come segno che i sentimenti non sono così importanti come la legge costi-

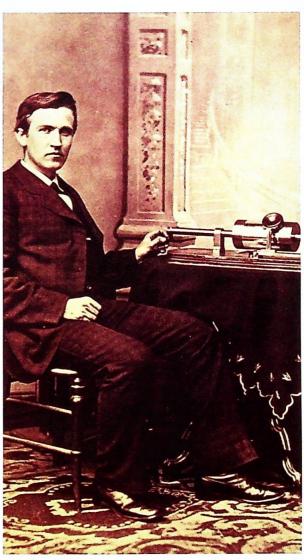
tuzionale, e che le regole non sono le cose davvero serie nella vita. Per la costituzione era liberale, ma il suo sistema di governo era clericale. Il sistema di governo era clericale, ma l'atteggiamento generale verso la vita era liberale. Davanti alla legge tutti i cittadini erano uguali: non tutti però erano, naturalmente, cittadini. C'era un Parlamento, che faceva un uso così vigoroso della sua libertà che di solito veniva tenuto chiuso, ma c'era anche un Atto dei Poteri d'Emergenza grazie al quale era possibile cavarsela senza il Parlamento. E ogni volta che tutti cominciavano a rallegrarsi dell'assolutismo. la Corona decretava che ci dovesse essere un nuovo ritorno al governo parlamentare.».

L'ostilità di un uomo contro un altro era stata perfezionata in un'etichetta estremamente raffinata ed era così aumentata da divenire un sentimento collettivo al punto che nessuno si fidava neanche di se stesso e del proprio destino con una profonda protervia. Si agiva – talvolta anche fino ai livelli più elevati della passione e delle sue conseguenze – in una maniera completamente diversa da ciò che si pensava, ovvero si pensava in un modo e si agiva in un altro. Osservatori non preparati prendevano questo modo di fare per cortesia, o anche per una debolezza che chiamavano la caratteristica austriaca. Ma si sbagliavano, dice Musil, come si sbaglia sempre quando si spiega l'aspetto di un paese attraverso le caratteristiche dei suoi abitanti.

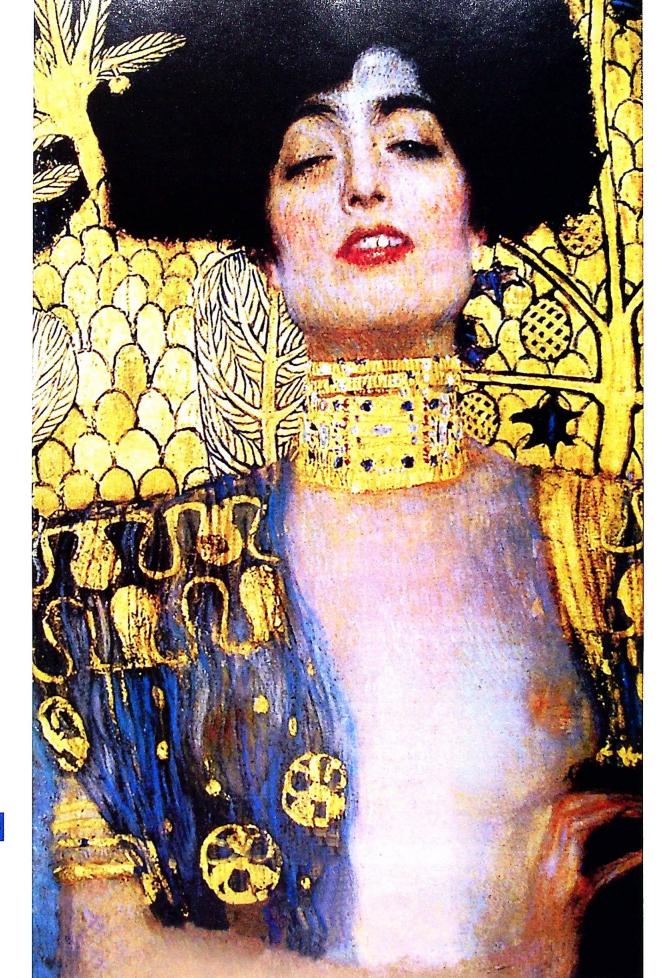
Infatti oltre alle caratteristiche collegate alla professione, nazione, stato, classe, geografia, sesso, coscienza, incoscienza, vita privata, c'è un decimo aspetto caratteristico, la fantasia degli spazi da riempire, che permette tutto a tutti, con un'eccezione: prendere seriamente quello che le altre nove caratteristiche fanno e che cosa loro capita; ovvero, in altre parole, quella che impedisce di ottenere proprio quello che potrebbe riempire quegli spazi. Questo spazio è certo difficile da descrivere; sicuramente in Italia ha un colore e una forma diversi che in Inghilterra, ma è lo stesso in ambedue i luoghi: uno spazio vuoto invisibile, entro cui la realtà esiste, come una piccola città fatta con le costruzioni, abbandonata dalla fantasia.

Così l'Austria andava avanti, come sembra fare oggi l'intero Occidente, con la sua libertà negativa, con una sensazione che la propria esistenza non avesse ragioni sufficienti. Le cose, anche quelle insolite, avvenivano e gli eventi e i colpi del destino diventavano leggeri come piume o pensieri. L'Austria, come oggi l'Occidente, era piena di geni. È questo probabilmente fu la causa della sua caduta.

Ma la mossa veramente esplosiva, l'annessione della Bosnia-Erzegovina all'Impero austro-ungarico (che avrebbe causato l'amara reazione dei patrioti serbi e condotto, dopo l'assassinio dell'Arciduca Francesco Ferdinando, allo scoppio della prima guerra mondiale nel 1914) avvenne nel 1908, dopo la morte di Boltzmann. Al volger del secolo, Vienna era un posto abbastanza liberale, con le limitazioni indicate, per esempio, dal caso di Brentano che abbiamo già citato, c abbastanza piacevole. Ma le parole «Ah, Vienna, Città dei Sogni! Non c'è un altro luogo come Vienna» sono poste, nel terzo volume del romanzo di Musil, sulle labbra di un pazzo. All'enorme cuore dell'Impero austro-ungarico, che ormai volgeva al tramonto, erano rifluiti slavi, ungheresi, italiani ed ebrei, che non avevano problemi a convivere con gli austriaci. C'era anche un ampio contatto tra l'aristocrazia terriera, la borghesia molto ricca, spesso ebraica, i cui figli affollavano le schiere degli intellettuali, e i socialisti austro-marxisti. Ma il potere era e doveva restare nelle mani dell'aristocrazia, con a capo gli Asburgo e strettamente legata a una Chiesa molto rigida, alla casta dei militari, ai gradi elevati della burocrazia e a un potere finanziario centralizzato. Quando si trattava di affidare posizioni importanti nelle arti e nelle scienze, il prescelto doveva già essere integrato o doveva adattarsi. Poteva essere conservatore o liberale, ma certamente non radicale.



L'inventore americano Thomas Alva Edison.



Nell'Austria asburgica, le idee scettiche e contrarie all'ortodossia potevano nascere soltanto al di fuori della struttura sopra descritta, come risultato del fatto che la città era divenuta un crogiolo di culture diverse. Si possono ricordare la psicanalisi, la musica dodecafonica, la Jugendstil (art nouveau), centrata intorno alla rivista «Ver Sacrum» («Primavera Sacra») e la critica letteraria avanzata e il pacifismo di un Karl Kraus col suo quindicinale satirico, «Die Fackel» («La fiaccola»), che denunciava la corruzione dovunque la trovava. Ludwig Wittgenstein, il movimento neo-positivista, che sarebbe diventato in seguito famoso col nome di Circolo di Vienna, o un genio della letteratura come Musil potevano solo nascere in una tale culla.

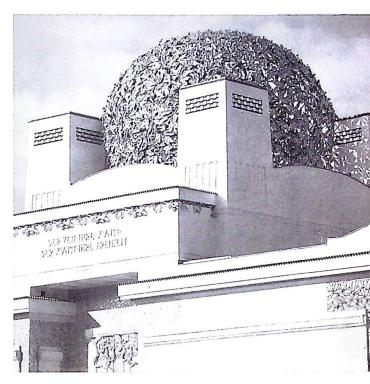
Forse il meno noto tra i nomi che abbiamo ricordato è quello di Kraus, ma egli fu un vero personaggio della vita di Vienna alla fine del XIX e nel primo terzo del XX secolo. Per indicare la sua importanza, possiamo menzionare che era molto ammirato da Wittgenstein e che Schönberg gli regalò una copia del suo grande testo musicale sull' Harmonielehre, con la seguente dedica: «Ho imparato più da Lei, forse, di quanto un uomo dovrebbe imparare, se vuole restare indipendente.».

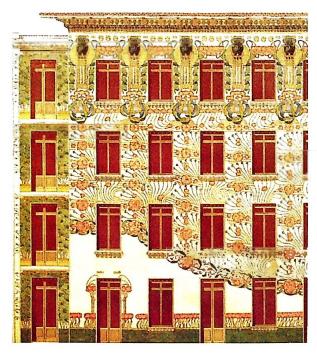
È interessante chiedersi se, negli ultimi anni di vita, Boltzmann si rese conto dell'importanza dei nuovi sviluppi culturali. Era certamente conscio delle nuove tendenze nelle arti, come mostra il seguente passaggio:

«Così forse qualcuno ai tempi di Lessing, Schiller e Goethe pensava che, attraverso lo sviluppo costante del metodo di poesia ideale curato da quei maestri, si fosse provveduto alla letteratura drammatica di ogni tempo, mentre al giorno d'oggi si cercano metodi di poesia drammatica totalmente diversi e quello giusto forse non è stato ancora trovato. In modo del tutto simile, alla vecchia scuola pittorica si contrappongono gli impressionisti, i secessionisti e i pittori en pleine-air, mentre all'arte musicale classica si contrappone la musica dodecafonica».

Forse nei suoi anni giovanili, distratto dalle novità tecniche e scientifiche, Boltzmann vide solo pittori classici, poeti che imitavano Goethe e Schiller, architetti che costruivano case in stile gotico e rinascimentale, cioè il conformismo artistico. Ma certo in seguito vide che, come un miracolo che si ripete continuamente nella storia della cultura, dopo anni di degrado spirituale piatto e lento, stava cominciando una piccola ascesa. Da una vista del mondo liscia come un olio, una febbre rinfrescante stava nascendo dovunque in Europa. Si alzavano uomini a combattere contro il passato. La pratica e la teoria si incontravano, emergevano grandi menti. Erano molto diverse l'una dall'altra. Amavano il superuomo e il povero cristo; adoravano il sole e la salute, ma anche la fragilità delle fanciulle

consunte dalla tisi; professavano il culto dell'eroe e il socialismo; erano credenti e scettici, amavano il naturismo e le raffinatezze, erano vigorosi e morbosi; i loro sogni contenevano vecchie mura presso ai castelli, parchi autunnali, grandi vasche di vetro per pesci, gemme preziose, hashish, malattia, demoni, ma anche praterie, orizzonti illimitati, fucine e mulini a vento, lottatori nudi, rivoluzioni di lavoratori in catene, la distruzione della società. Questi erano certamente contraddizioni e grida di guerra assai antitetici, ma avevano un'ispirazione comune: chiunque avesse voluto decomporre e analizzare quel periodo avrebbe trovato qualcosa privo di senso, come un cerchio quadrato fatto di ferro ligneo, ma in realtà tutto era amalgamato e aveva un significato abbagliante. Quell'illusione, materializzata nella magica data della fine del secolo, era così forte che



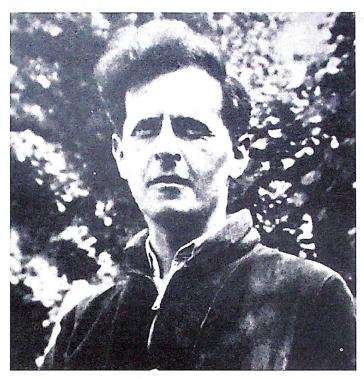


il Padiglione della Secessione (simbolo del movimento che s' opponeva a ogni accademismo in architettura) e la cosiddetta Casa delle Maioliche di Otto Wagner, (un esempio di Jugendstil) a Vienna. A fronte: Ritratto di donna di Gustav Klimt, eseguito dall'artista

austriaco a cavallo del secolo.

Dall'alto in basso:





Da sinistra a destra: ritratto di Karl Kraus (1874-1936), di Oskar Kokoschka, e Ludwig Wittgenstein (1889-1951), autore di un trattato di filosofia e ammiratore di Boltzmann.

alcuni si precipitavano entusiasticamente verso il nuovo secolo, mentre altri si attardavano nel vecchio come in una casa da cui si doveva sloggiare, ma i due atteggiamenti non sembravano troppo diversi. Non si deve sovrastimare questo movimento, perché si svolgeva nello strato sottile e variabile degli intellettuali, senza influenza permanente sulla massa. Eppure, qualcosa passava attraverso la massa aggrovigliata di fedi e credenze, come quando diversi alberi si piegano sotto lo stesso alito di vento; uno spirito di setta e di riforma, la coscienza felice di un nuovo principio, di un fiorire, di un'alba, una piccola resurrezione, cose che possono capitare solo nei tempi migliori.

Ma sotto la superficie radiosa e luccicante c'era una società i cui membri erano incapaci si aprirsi agli altri. Per citare ancora Musil, «la nozione che le persone che vivono così potessero mai incontrarsi per una navigazione razionalmente pianificata della loro vita spirituale e del loro destino non era soltanto irrealistico; era assurdo.».

Corrispondentemente il tasso di suicidi era molto alto. Il caso più famoso, che è divenuto oggetto di numerose rievocazioni romantiche, capitò nel 1889, quando il principe ereditario Rodolfo si suicidò uccidendo anche la sua amante, la baronessa Maria Vetsera. La lista di persone che commisero suicidio in quei tempi è assai lunga e include, oltre a Boltzmann e il caso appena citato, tre fratelli di Ludwig Wittgenstein (tutti maggiori di lui), Otto Weininger che aveva pubblicato un libro geniale intitolato Sesso e Carattere qualche mese prima del suo tragico gesto, Georg Trackl (un poeta lirico), Otto Mahler (fratello di Gustav, e lui stesso musicista di talento), Alfred Redl (nel 1913) e Eduard van der Nüll, che non riuscì a sopportare le critiche sul Teatro Imperiale dell'Opera che aveva progettato.

La morte

La vita di Boltzmann terminò tragicamente nel 1906. Stava trascorrendo qualche giorno, con la moglie e la figlia minore, a Duino, un paesetto vicino a Trieste, famoso per il suo castello, appollaiato su una roccia, su un promontorio del Mare Adriatico, col mare da un lato e folte foreste di alberi da sughero dall'altro. Il castello è collegato alla memoria del poeta Rainer Maria Rilke, che vi soggiornò a più riprese e vi scrisse le *Elegie di Duino*. Vi soggiornarono anche l'imperatrice Elisabetta, moglie di Francesco Giuseppe (la famosa Sissi di una serie cinematografica), e il compositore Franz Liszt.





Boltzmann non si era mai preoccupato della sua salute, ma l'aveva sacrificata alla sua attività scientifica. Quando, però, anche una vacanza a Duino, presso Trieste, non gli portò alcun sollievo dalla malattia di cui soffriva, in un momento di forte depressione, s'impiccò il 5 settembre del 1906. Il giorno dopo avrebbe dovuto tomare a Vienna a insegnare.

È possibile spiegare questa decisione improvvisa? Come può riconciliarsi con la descrizione umoristica del suo viaggio in California, scritta qualche mese prima? Era probabilmente esaurito e amareggiato dalla visita negli Stati Uniti. Le sue lezioni a Berkeley, al pari di quelle di filosofia della scienza a Vienna, non avevano avuto quel successo che si era aspettato. Come vedremo poi, Boltzmann era considerato un docente meraviglioso e il suo uditorio aveva l'impressione che fosse profondamente interessato all'argomento della lezione e felice di farla. Ma sappiamo dal suo assistente Stephen Mayer che far lezione gli era talvolta penoso e ogni volta che c'era la possibilità di annullarne una era

più sollevato che dispiaciuto. Quando faceva lezione era come un attore, con l'ambizione di fare del suo meglio. Ma, come un attore che pensa di aver mancato la prova, poteva anche divenire molto triste e depresso. Nel caso delle lezioni di filosofia della scienza ci poteva anche essere una sensazione di inadeguatezza e di timore.

Poche scintille dell'ultima euforia emersero quando scrisse la descrizione del suo viaggio in California. In una maniera tipicamente sintomatica, queste scintille furono seguite dalla depressione peggiore possibile. E possiamo anche aggiungere che, come abbiamo visto, il suicidio era piuttosto comune tra gli intellettuali viennesi del tempo.

Ci sono pochi documenti e testimonianze che ci permettano di ricostruire alcuni aspetti degli ultimi mesi e delle ultime ore della vita di Boltzmann. Nel complesso indicano alcune ragioni profonde e alcune superficiali del suo gesto. Anche le motivazioni superficiali non sono da scartare, data la serietà della sindrome di cui soffriva.

Nel maggio 1906 il preside della Facoltà di filosofia dell'Imperial Regia Università di Vienna scrisse una lettera per informare il competente Ministero che Boltzmann soffriva di una seria forma di nevrastenia e doveva astenersi da ogni attività scientifica.

Il Principe Rodolfo, erede al trono d'Austria, si uccise a Mayerling con l'amante Maria Vetsera.







Duino, un paesetto vicino a Trieste, famoso per il suo castello appollaiato su un promontorio del Mare Adriatico, dove Boltzmann si suicidò.

Ecco una descrizione particolarmente accurata dei suoi problemi di vista: «Chi ha conosciuto Boltzmann ricorderà il paio di pesanti occhiali ad alto potere d'ingrandimento poggiati su un profondo avvallamento del suo naso. Per molti anni la sua vista era andata peggiorando, e si accorse che diventava sempre più difficile completare le molte ricerche che aveva in mente.».

Consideriamo alcune impressioni sui problemi collegati alla salute fisica e mentale di Boltzmann. Parlando dell'ultima parte dell'anno 1905 un giornalista anonimo dice: «Nell'autunno dell'ultimo anno lo studioso decise di entrare in un ospedale psichiatrico vicino a Monaco, ma rinunciò al ricovero poco tempo dopo e ritornò a Vienna.».

Ludwig Flamm era uno studente di Boltzmann e sposò sua figlia Elsa. È stato uno dei primi a discutere un significato intuitivo delle sezioni a tre dimensioni dello spazio-tempo di Schwarzschild, la più nota soluzione esatta delle equazioni della relatività generale di Einstein. Dice: «Io stesso, da studente ho potuto sentire l'ultima lezione di fisica teorica di Boltzmann: fu nel semestre d'inverno del 1905-1906. Un disturbo nervoso gli impedi di continuare la sua attività d'insegnamento. Insieme a un altro studente sostenni e passai l'esame orale nella sua villa di Währing. Al momento di andarcene, una volta finito l'esame. udimmo dal salone d'ingresso i suoi strazianti gemiti.»

Alois Höfler dice, riferendosi all'anno 1906: «Quando gli feci visita per l'ultima volta durante le vacanze di Pasqua, mi manifestò la sua sofferenza fisica e mentale con queste parole: "Non avrei mai creduto che fosse possibile una tale fine."»

Arrivando all'estate dello stesso anno apprendiamo nientemeno che da Ernst Mach che: «Boltzmann aveva annunciato lezioni per il semestre d'estate [1906], ma le dovette annullare, a causa delle sue condizioni nervose. In ambienti ben informati si sapeva che Boltzmann molto probabilmente non sarebbe mai stato in grado di esercitare ancora l'insegnamento. Si parlava di quanto fosse necessario tenerlo sotto costante sorveglianza medica, perché aveva già compiuto precedentemente tentativi di suicidio.»

Quando era a Duino, dove si era recato per soddisfare un vecchio desiderio della moglie Henriette (in *Venezien*, troviamo in una delle vecchie lettere speditegli da Henriette), Boltzmann era: «sconvolto e nervoso perché era ansioso di tornare a Vienna. Le sue condizioni sembravano altrimenti migliori. Il giorno della sua morte Boltzmann si mostrò particolarmente agitato. Mentre la moglie e la figlia stavano facendo il bagno, portò a compimento il suo gesto.»

Ecco un'ulteriore informazione: «Era stato assai melanconico per lungo tempo e non voleva far pulire il suo vestito perché questo avrebbe significato un ulteriore ritardo nel ritorno a Vienna. Dopo che sua moglie se ne andò, portando con sé il vestito, si impiccò.». Sul modo usato per compiere il gesto, lo apprendiamo da un quotidiano: «Ha usato una corda corta legata alle sbarre trasversali di un telaio di una finestra. La figlia è stata la prima a scoprire il suicidio.».

Riguardo al luogo dove Boltzmann s'impiccò, ci sono almeno due versioni. Sembra verosimile che il suicidio sia avvenuto nella sua stanza d'albergo. La sig.ra Auguste Dick, però, ha sostenuto che un collega di Boltzmann, il matematico Mertens, raccontava che il suicidio fosse avvenuto nella chiesa di Duino.

Henriette sopravvisse a lungo al marito. Morì il 3 dicembre 1938, a 85 anni,

dopo lunga malattia.

Tra le molte persone che furono sconvolte dalla notizia della morte di Boltzmann c'era anche Erwin Schrödinger, che aveva allora circa 19 anni. Si aspettava, come dice W. Moore nella sua biografia, di cominciare i suoi studi di fisica teorica entro pochi mesi sotto la guida del grande maestro. Schrödinger stesso

descrive i suoi sentimenti di quell'autunno, quando entrò nell'edificio di fisica, con queste parole:

«Il vecchio Istituto di Vienna, da cui poco prima Ludwig Boltzmann era stato strappato tragicamente, l'edificio dove Fritz Hasenöhrl e Franz Exner e molti altri allievi di Boltzmann entravano e uscivano, generarono in me una simpatia diretta per le idee di quel potente spirito. Per me la gamma delle sue idee giocò il ruolo di un amore giovanile scientifico, e nessun altro mi ha mai così affascinato.».

ufia, di cominciare i suoi studi di fisica el grande maestro. Schrödinger stesso dell'introduzione dell'euro e, sotto, in una fotografia giovanile.

TAUSEND
SCHILLING

Un'altra persona frustrata dal suicidio di Boltzmann fu Ludwig Wittgenstein (1889-1951), che, al momento di lasciare Linz nel 1906, aveva sperato di imparare da lui. Wittgenstein è famoso per il suo *Tractatus Logico-Philosophicus*, pubblicato subito dopo la prima guerra mondiale, dove, secondo alcuni autori, tenta di risolvere il problema di riconciliare le fisiche e le filosofie della scienza di Hertz e Boltzmann con le etiche di Kierkegaard e Tolstoi.

Riguardo la morte di Boltzmann a Duino, Moore cita appropriatamente i versi della prima delle *Elegie di Duino* di Rainer Maria Rilke (1875-1926):

Aber die Liebenden nimmt die erschöpfte Natur in sich zurück, als wären nicht zweimal die Kräfte, dieses zu leisten.

(Ma gli amanti sono ripresi dalla Natura esausta – dentro se stessa, come se una tal forza creativa – non potesse mai essere riesercitata).

Questa citazione probabilmente rende conto dei sentimenti di Boltzmann quando decise che la vita è più dura e pesante del peso di qualsiasi altra cosa. Era un amante tradito, che si era dedicato alla teoria atomica, ma il suo amore non era stato ricambiato perché i suoi contemporanei non erano in grado di capire la sua grande visione. Ma se guardiamo al suo suicidio col senno di poi possiamo forse vederlo come un eroe piuttosto che come un amante e ricordare i due versi che precedono quelli citati da Moore:

denk: es erhält sich der Held, selbst der Untergang war ihm nur ein Vorwand, zu sein: seine letzte Geburt.

(Pensa: l'eroe continua, anche la sua caduta era un pretesto per l'ulteriore esistenza, un'estrema nascita).



Erwin Schrödinger, scopritore

sempre di non aver potuto sentire

Sopra: Schrödinger nella banconota

le lezioni di Boltzmann, a causa

austriaca che lo ritraeva prima

della scomparsa prematura

del grande maestro.

della meccanica ondulatoria, rimpianse

Nella mente di un genio

Boltzmann fu apprezzato come insegnante, come scienziato e come filosofo, ma quali erano le sue idee politiche e che cosa, infine, lo portò al suicidio?

Boltzmann era un ottimo docente. Aveva una memoria eccezionale e faceva sempre lezione senza far alcun uso di appunti. Era un didatta nato e le sue dissertazioni erano di una chiarezza cristallina, piene di battute, di humor e di aneddoti stimolanti. Insaporiva la lezione usando espressioni del tipo «gigantescamente piccolo». Nelle sue lezioni di filosofia parlava anche di argomenti allora insoliti come gli spazi multidimensionali e curvi. Un giornaletto studentesco si riferiva a questo nel seguente distico:

Tritt der gewönliche Mensch auf den Wurm, so wird er sich krümmen; Ludwig Boltzmann tritt auf; Siehe, es krümmt sich der Raum! (Quando un uomo normale calca un verme, questo s'incurverà; ma se calca le scene Ludwig Boltzmann: oh! s'incurva lo spazio!).

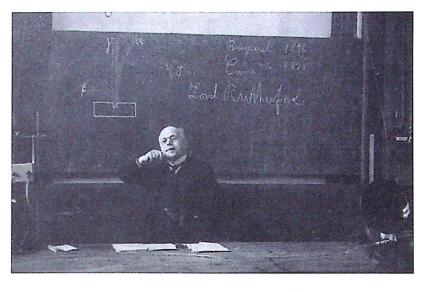
Questi versi scherzosi dipingono l'enorme effetto creato dall'eccezionale personalità di Boltzmann e dalle sue lezioni. A Vienna ebbe tra i suoi studenti

Lise Meitner (1878-1968), allieva di Boltzmann e scopritrice (insieme a Otto Hahn, con lei nella foto) della fissione nucleare.



Paul Ehrenfest, Fritz Hasenöhrl, Stefan Mayer e Lise Meitner, che avrebbe un giorno scoperto, in collaborazione con O. R. Frisch, la fissione dell'uranio da parte dei neutroni; a Graz Svante Arrhenius e Walter Nernst seguivano le sue lezioni.

Hasenöhrl (il cui lavoro più notevole anticipò nel 1904 l'equivalenza tra la massa e l'energia, anche se con un fattore numerico sbagliato) scriveva su di lui: «Non esibiva mai la sua superiorità. Chiunque era libero di fargli domande e anche di criticarlo. La conversazione si svolgeva tranquillamente e lo studente era trattato da pari a pari. Spesso ci si accorgeva solo in seguito quanto si era imparato da lui.». Si vedrà poi che fu proprio Hasenöhrl, dopo il suicidio di Boltzmann, a prendere il suo posto a Vienna.



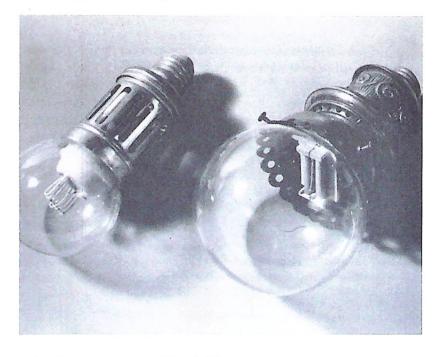
Walter Nernst (1864-1941), allievo di Boltzmann, noto per la sua attività scientifica e organizzativa. Sotto: la lampadina elettrica da lui inventata.

Il suo collega di Graz, F. Streintz scrive: «Dava consigli in ogni situazione difficile. Non se la prendeva neanche se uno studente lo disturbava a casa sua mentre lavorava. Il grande scienziato rimaneva per ore a disposizione del suo studente, mantenendosi sempre paziente e di buon umore».

Sulle sue lezioni Lise Meitner diceva: «Teneva un corso che durava quattro anni. Includeva la meccanica classica, l'idrodinamica, la teoria dell'elasticità, l'elettrodinamica e la teoria cinetica dei gas. Scriveva le equazioni principali su una lavagna molto grande. Ai lati aveva due lavagne più piccole, dove scriveva i calcoli intermedi. Tutto era scritto in una forma chiara e ben organizzata. Avevo spesso l'impressione che si potesse ricostruire l'intera lezione da quello che c'era sulle lavagne. Dopo ogni lezione ci sembrava di essere stati introdotti in un mondo nuovo e meraviglioso, tanto era l'entusiasmo che metteva in quel che insegnava».

Anche i seminari di Boltzmann erano molto stimolanti, come risulta, per esempio, da un'affermazione nella tesi di Ehrenfest.

Dopo la morte di Boltzmann, le lezioni di fisica teorica furono sospese per diciotto mesi, finche Hasenöhrl fu chiamato a coprire la posizione vacante. La sua lezione inaugurale fu una magistrale sintesi delle teorie statistiche di Boltzmann e



Ludwig Boltzmann: un genio nell'Austria felix

Dedicata a Beethoven

Questa finestra si occupa solo della poesia *Beethoven im Himmel* precedentemente ricordata. Fu scritta presumibilmente negli ultimi cinque o sei anni della vita di Boltzmann. La traduzione italiana cerca di mantenere il senso e la struttura metrica e di essere abbastanza fedele. Tutto questo può comportare un certo appiattimento, ma dovrebbe dare un'idea dell'originale.

Boltzmann la chiamò *Scherzgedicht* (poema scherzoso). Così infatti comincia. Ma non si può fare a meno di notare certi fatti. Parla di un viaggio dell'anima di Boltzmann, staccata dal corpo, in paradiso. Non è necessario essere un esperto di psicologia per vedere in questo un desiderio di morte (forse inconscio).

E, infatti, nell'ultima parte vediamo anche un esempio di improvviso cambiamento di umore (passaggio dal Carnevale alla Quaresimal): la cosa terrena che manca di più alle anime in paradiso è il dolore. E sono dati esempi espliciti di dolore e dispiacere. Esaminiamo la poesia più dettagliatamente. Comincia così:

L'anima mia dal corpo si è staccata con una lotta che sarà obliata. Ma dopo tanta angoscia e sofferenza, che gioia librarsi come pura essenza!

Le ultime parole costituiscono un più che esplicito accenno all'infelicità. Ma potrebbero considerarsi un riferimento casuale alle pene della vita umana. Questa interpretazione sembrerebbe giustificata dalle frasi successive, che hanno un tono piuttosto leggero, ma dolore e dispiacere sono il tema principale della poesia, come è indicato dalla seconda parte.

Boltzmann continua dicendo che passa vicino ad altri mondi, a cui non dedica quasi attenzione perché ha una meta più alta: il paradiso! Quando ci arriva sente un'armonia meravigliosa: i cori degli angeli cantano, ma Boltzmann non esita a dire che le loro canzoni gli sembrano monotone:

Ridon felici: – È un animo tedesco! La musica da voi sale fin qua! Dio glorifica, allor, l'eternità cantiamo; e veda che ce ne intendiamo! Ma di andare all'unìsono cerchiamo!

L'ultima frase sembra fosse familiare a casa di Boltzmann, quando suonava col figlio.

La poesia continua con gli angeli che cantano un possente inno corale. E Boltzmann riconosce lo stile di Beethoven, benché il pezzo gli risulti nuovo. Allora interroga gli angeli, che gli dicono che è stato composto da Beethoven in seguito a un «ordine avuto dal Signore» ed è la migliore fra le loro canzoni. Boltzmann esprime allora il desiderio di incontrare Beethoven, in maniera che il suo viaggio abbia un valido scopo. Così viene condotto a incontrare l'anima del grande musicista, che,

dopo qualche parola di benvenuto, gli chiede se il pezzo gli è piaciuto. Boltzmann è confuso e rimane in silenzio.

Beethoven lo incoraggia a parlare. Boltzmann confessa che nell' inno degli angeli non ha trovato la stessa bellezza a cui era abituato sulla Terra. Beethoven concorda col giudizio di Boltzmann e dice che ha smesso di scrivere musica, perché non gli riesce bene come prima. Solo per il Giudizio



Ludwig van Beethoven

Universale ha accettato di scrivere la parte per le trombe, «per non imbarazzare assai il buon Dio.».

Perché Beethoven ha perduto la scintilla creativa? è assente il tono più potente, quello dato dal dolore! è il dolore che «come un metallo forte suona e vibra, / e ti fa risuonare in ogni fibra.». Poi Beethoven cita esempi di dolori che ci fanno sentire esseri umani:

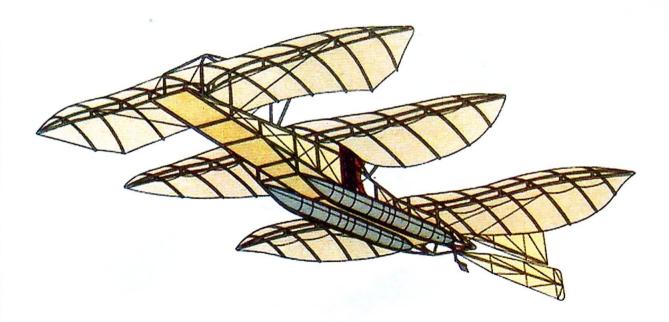
Cosa lega alla madre ogni bambino? La grandi pene della notte in cui c'è Dio soltanto in veglia con lei e lui. Non hai mai pianto insieme con tua moglie? Chi non lo fa l'amor vero non coalie, un dolore profondo e condiviso: il suo ricordo è come un paradiso. Sopporta il santo pena ed afflizione: brilla in lui il raggio della perfezione. Fama di eroe ottener sol ti è concesso, se fermamente domini te stesso. Tremi il tuo cuore nella sofferenza! Vivrai nel canto della discendenza. Dio stesso auando aui fra noi si scorse. fu forse un re, si volle ricco forse? Fu figlio d'uomo, pieno del dolore...

Beethoven afferma che la nota fondamentale della vita è il dolore e che ha costruito la sua musica su questa base. Ma in paradiso gli manca l'ispirazione, perché non c'è il dolore. Ed ecco i versi conclusivi:

Lo guardo ora atterrito: – Come è strano lo scorrere del mondo.

lo scorrere del mondo. Poche ore fa, chiedevo alla morte che il dolore al cuore mio venisse risparmiato.

Ora qui, in questo mondo alto e beato, si rimpiange il dolore! Oh, cuore umano, veramente insondabile e ben strano!



un vero e proprio omaggio: l'illustrazione della filosofia del suo grande maestro.

Boltzmann e le invenzioni

Boltzmann era affascinato non solo dai problemi scientifici, ma anche dalle invenzioni scientifiche promettenti. Sebbene fosse un eminente teorico, era anche uno studioso coi piedi per terra, con un'attitudine e un interesse speciali nell'attività sperimentale, forse ereditata dal nonno, che, come abbiamo visto, era un costruttore di carillon.

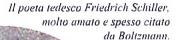
Egli era fortemente interessato alla tecnologia ed elogiò più d'una volta il ruolo della tecnologia nello sviluppo della scienza, come si può vedere da queste due citazioni: «Per quanto la scienza si vanti del carattere ideale del proprio scopo, volgendo lo sguardo dall'alto, in maniera alquanto sprezzante, sulla tecnologia e la pratica, non si può negare che prese l'avvio da una lotta per soddisfare bisogni puramente pratici. Inoltre la campagna vittoriosa della scienza naturale contemporanea non sarebbe stata così incomparabilmente brillante, se la scienza non avesse trovato nei tecnici pionieri così capaci.» (ottobre 1902).

«Per questo non considero le conquiste tecnologiche come un sottoprodotto poco importante della scienza naturale, ma come dimostrazioni logiche. Se non avessimo raggiunto questi risultati pratici, non sapremmo inferire logicamente. Le sole inferenze corrette sono quelle che portano a un successo pratico.» (gennaio 1905).

È chiaro che qui Boltzmann fa uso della sua visione darwiniana dello sviluppo del nostro cervello come strumento per produrre immagini del mondo, un organo che a causa della grande utilità di queste immagini per la sopravvivenza della specie si è sviluppato nell'uomo fino a un grado di particolare perfezione. Che questa non sia solo una posa filosofica è dimostrato da alcuni fatti che ora ricorderemo.

Quando, nel 1902, Nernst inventò la sua lampadina elettrica (ora praticamente dimenticata (si veda l'immagine a pagina 85), e fatta di un piccolo cilindro di ossidi di terre rare scaldate da una piccola spirale di platino), ne mandò alcuni esemplari a Boltzmann, che scrisse questi versi su una di esse:

L'aeroplano a galleggianti di Kress in un disegno di Shell-Casterman del 1954.









Secondo Boltzmann, le lotte di George Washington e dei suoi seguaci non hanno un significato patriottico locale, ma piuttosto uno storico universale. Sopra: Washington con Lafayette a Mount Vernon nel 1776 e, sotto, un ritratto del presidente americano.

Da Du den sprödesten Stoff Dir gewählt Und ihn zwangst, den elektrischen Strom zu leiten, Schufst Du das glänzendste Licht

(Poiché ti sei tu scelta il material più fragile, / e l'obblighi a condurte una corrente elettrica, / hai potuto creare la luce più splendente.).

Invitò anche i membri della Società viennese di fisica a casa sua per una dimostrazione della lampada. Furono spediti 55 inviti; molti panini e 50 litri di birra erano pronti per gli ospiti, ma ne arrivarono solo sette. Questo indica che il suo entusiasmo non era sempre condiviso dai suoi colleghi.

Boltzmann incoraggiò anche Kress, che nel 1880 aveva inventato un aeroplano (si veda il disegno alla pagina precedente). Nel 1894 fece anche una conferenza su questa invenzione alla Gesellschaft Deutscher Naturfoscher und Ärzte (Società tedesca degli scienziati e dei medici). In particolare, Boltzmann predisse la superiorità dell'aeroplano sul dirigibile. Sfortunatamente Kress condivise il fato di molti inventori, non solo austriaci; rimase senza soldi e fu dimenticato.

Riguardo alla possibilità del volo umano, Boltzmann era piuttosto ottimista e fece un paragone con uno dei suoi eroi favoriti, Cristoforo Colombo. Per rendere il paragone più forte citò anche i versi di Schiller su Colombo:

Zieh' hin, mutiger Segler, mag auch der Witz dich verhönen, Mag der Schiffer am Steuer senken die mutlose Hand, Immer, immer nach West, dort muß die Küste sich zeigen, Liegt sie doch schimernd und liegt deutlich vor deinem Verstand. Mit dem Genius steht die Natur in ewigem Bunde.

Was der eine verspricht, leistet die andre gewiß.

(Avanza, prode marinaio, non prestare attenzione agli scherzi su di te. / Che il navigatore pigro abbandoni la barra! / Avanza verso ponente, sempre verso ponente! / Là apparirà la costa. Guardala splendere nella tua testa! / Con la Natura il genio resta in eterna unione; / quello che l'uno promette, l'altra certo mantiene.).

Boltzmann stesso costrui una macchina da cucire elettrica per sua moglie, che faceva vestiti per tutta la famiglia.

Boltzmann, che anticipò sotto molti aspetti gli interessi culturali e le delusioni degli intellettuali del XX secolo, accettava la situazione determinatasi nel suo paese, benché i suoi croi non fossero certo imperatori e re.

Da un punto di vista politico, Boltzmann può considerarsi un radicale democratico e un repubblicano rassegnato. Perciò ammirava l'America dei suoi tempi (tranne che per la difficoltà di trovare un po' di vino), come si può vedere dal resoconto già ricordato del suo viaggio in California, in cui sostiene che le lotte di George Washington e dei suoi seguaci non hanno un significato patriottico locale, ma piuttosto uno storico universale.

Prosegue poi, citando il suo amato Schiller, che una volta disse: «Un paio di migliaia d'uomini come me, e la Germania diventerà una repubblica che farà sembrare conventi di monache Roma e Sparta». Ma obietta alla sua stessa citazione: «Non è successo: qualche migliaio d'uomini come te? Ma il mondo non ne ha visto neanche uno che ti stia a pari!». «Ma le idee non muoiono.», aggiunge, avendo sott'occhio l'esempio americano: «Quella repubblica in confronto della quale Roma e Sparta sembrano conventi di monache esiste, qui, oltre l'Oceano. Com'è colossale e come cresce», per concludere, citando ancora Schiller: «La libertà fa crescere i colossi».

Boltzmann amava la natura e le arti, ma lo scopo della sua vita restò sempre il suo lavoro scientifico. Il suo impegno può essere ben caratterizzato dalle parole, da lui poste all'inizio del suo libro *Principi della Meccanica*:

Bring' vor, was wahr ist; Schreib' so, daß klar ist

Und verficht's, bis es mit dir gar ist

(Sostieni, finche puoi, quello ch'è vero; / descrivilo in maniera che sia chiaro; / battiti, fino all'ultimo respiro!)

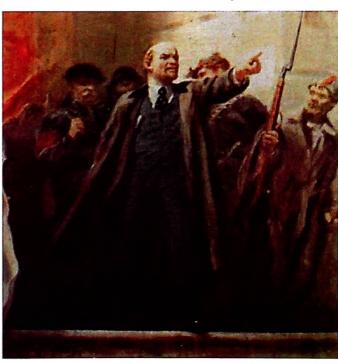
Il suo punto di vista filosofico, realista e materialista, avrebbe potuto trovare risposta tra i socialisti, in quanto le sue opinioni sul ruolo della teoria e sull'evoluzionismo (che Lenin cita con approvazione, col risultato che lo scienziato austria-

co venne considerato un eroe del materialismo scientifico nella defunta Unione Sovietica) richiamano singolarmente quelle espresse da Engels nell'*Anti-Dühring*, benché ci siano tutti i motivi per pensare che Boltzmann non solo non le conoscesse, ma che fosse addirittura all'oscuro dell'esistenza di Engels. Il concetto di lotta di classe, infatti, è completamente assente dai suoi scritti.

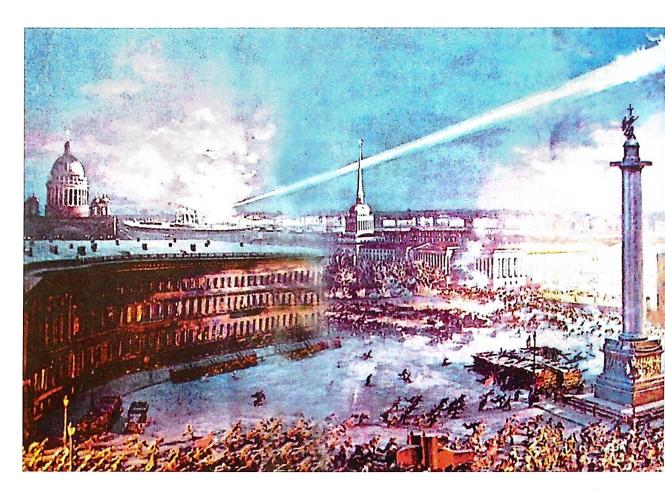
Per lui, scienza e filosofia erano una cosa unica, abbracciata dal termine, amplissimo nell'uso che ne faceva Boltzmann, di «meccanica». Talvolta non senza una certa ironia, come nel seguente passaggio:

«L'amore entusiastico per la libertà di un Catone, di un Bruto e di un Verrina nasce da sentimenti che erano germogliati nei loro cuori attraverso cause puramente meccaniche e possiamo anche spiegarci meccanicamente il fatto che pur vivendo con piacere in uno stato monarchico ordinato vediamo volentieri i nostri figli leggere Plutarco e Schiller ed entusiasmarsi per i discorsi e le azioni di fanatici repubblicani. Neanche questo possiamo modificare; ma impariamo a comprenderlo e a sopportarlo. Il Dio per la cui grazia regnano i re è la legge fondamentale della meccanica.».

Lenin cita con approvazione Boltzmann, che perciò veniva considerato un eroe del materialismo scientifico nella defunta Unione Sovietica.



(Notiamo che nessun grand'uomo chiamato Verrina sembra essere esistito. Questo sembra essere uno degli strani, non infrequenti errori nei *Populare Schriften*, presumibilmente collegati ai problemi di vista di Boltzmann. Potrebbe trattarsi quindi di un errore di stampa, oppure di Boltzmann che aveva in mente un riferimento alle orazioni di Cicerone contro Verre, note come *Verrinae*).



Il resoconto della vita di Boltzmann, col suo onnipresente *leitmotiv* del buonumore e della depressione, e il connesso entusiasmo per le sue teorie scientifiche, sempre sull'orlo tra un completo successo e un profondo fallimento, mostra che questo grande pensatore aveva una debolezza insolita, come conseguenza di una sensibilità molto umana. Abbiamo visto come era affascinato in maniera quasi infantile dai problemi scientifici e dalle invenzioni, com'era tenero e sensibile nelle sue relazioni con la moglie e i figli, come socializzava e intratteneva i suoi colleghi e i suoi studenti, com'era vasta la sua cultura e quant'erano ampi i suoi interessi: musica, letteratura, natura, e, naturalmente, scienza in tutti i suoi aspetti.

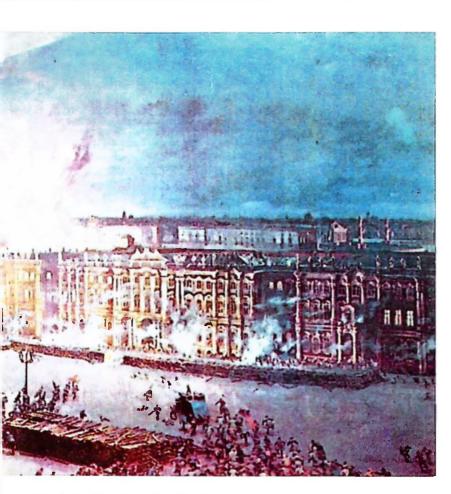
Non c'è scelta oggi, dopo aver letto le sue lettere: bisogna accettare un ritratto di uno dei più grandi personaggi della fisica che può sembrare una descrizione della sua personalità provocatoria, offensiva e denigratoria, perché la nostra immagine di Boltzmann è nebulosa e ambivalente, come la sua personalità è stata ambivalente e difficile da capire per i suoi contemporanei.

Questo fornisce una chiave d'interpretazione del fatto che molti suoi contributi sono noti attraverso la presentazione di qualcun altro, mentre i suoi ragionamenti e lavori originali sembrano dimenticati. Era in un certo senso una presenza fastidiosa. Scriveva lavori lunghissimi ed era sempre pronto a polemizzare per la sua priorità e per la correttezza del proprio punto di vista.

La caratteristica importante della personalità di Boltzmann era l'instabilità psicologica, così ben caratterizzata dalla sua stessa battuta sulla sua nascita nella notte tra il Carnevale e la Quaresima.

Fu questa instabilità che lo portò alla fine al suicidio. Le sue lettere e anche qualche frase nei suoi lavori scientifici e nei suoi libri ci danno un ritratto di un uomo pieno di ansia e di desiderio di perfezione, che si vuol mantenere al livello dell'immagine di se stesso formatasi nella prima parte della sua vita scientifica, quando era un professore ingegnoso, di successo, e fortunato, quando tutto gli andava bene. Come conseguenza dei primi, pronti successi, si considerava un grand'uomo, incompreso dai suoi contemporanei, ma occasionalmente gli sembrava di non essere all'altezza di questa immagine. A causa di questo lato





La ricostruzione della presa del Palazzo d'Inverno durante la rivoluzione russa, Boltzmann, in realtà, fu un radicale democratico ma il concetto di lotta di classe è completamente assente dai suoi scritti.

debole sembra, ai nostri occhi, più vicino a un normale essere umano che a un grande eroe della storia della fisica. Quando queste debolezze emergevano, era sommerso da sentimenti di paura, sofferenza, e depressione.

Tentò di reagire a questa situazione viaggiando, incontrando persone nuove, facendo conoscere le sue teorie a un pubblico più ampio; di qui lo sviluppo irrequieto dei suoi ultimi diciotto anni. In questa parte della vita, non si comportò in una maniera compatibile con un pensiero razionale e normale. Alcune delle sue mosse, come è stato sottolineato da diversi studiosi della sua vita, potrebbero essere il risultato delle preoccupazioni di sua moglie per il proprio futuro a causa dei problemi crescenti per la salute fisica e psicologica del marito, ma, anche concedendolo, si potrebbe obiettare che avrebbe dovuto pensare meglio alle conseguenze delle sue decisioni.

L'evoluzione del suo atteggiamento verso la vita può quasi leggersi nelle sue fotografie, da quella che mostra un giovane professore che ci guarda con occhi amichevoli, sicuro che noi capiamo la sua importanza, a quella dell'ultimo periodo della vita, in cui, oltre agli inevitabili cambiamenti dovuti al passare degli anni, sembra spaventato dal mondo intorno a lui: non guarda noi, né il mondo circostante, ma, con gli occhi sconvolti d'un uomo sconfitto dalla vita, a qualcosa di indefinito e terrorizzante.

I versi del suo amato poeta Schiller certamente lo ispirarono in gioventù e gli dettero il coraggio e la fede per affrontare i più difficili problemi dell'atomismo e risolverli in una maniera profonda. Quei versi erano ancora con lui negli ultimi anni, ma come il solo legame sopravvissuto con un mondo che sentiva estraneo e ostile.

Possiamo vedere il suicidio come la conclusione inevitabile della sua vita, ineluttabile come il Fato in una tragedia greca: l'ultima mossa, la mossa estrema. Con le parole di Höflechner, che per primo ha fatto emergere il problema delle sue instabilità e delle sue crisi, Boltzmann «cambiò università, per l'ultima volta, questa volta senza mancare alla parola data, entrando nella grande università dei giganti immortali della scienza».

Note biografiche

1844	Ludwig Eduard Boltzmann, nasce il 20 febbraio a Vienna. Suo padre viene successivamen- te trasferito a Wels e in seguito a Linz, dove Boltzmann inizia il ginnasio e prende lezioni di piano da Anton Bruckner.
1859	II padre di Boltzmann muore di tubercolosi.
1863	Boltzmann s'iscrive all'Università di Vienna come studente di matematica e fisica. Tre anni dopo l'iscrizione, ottiene il Dottorato.
1869	Ottiene la Cattedra di fisica matematica all'Università di Graz. Comincia un'intensa attività scientifica.
1872	Pubblicazione dell'articolo «Ulteriori ricerche sull'equilibrio termico delle molecole d'un gas», in cui viene introdotta la celebre equazione, detta appunto di Boltzmann.
1873	Boltzmann accetta una Cattedra a Vienna come professore di matematica.
1875	Loschmidt formula il «paradosso di reversibilità» che sembra inficiare l'equazione di Boltz- mann. Quest'ultimo pubblica immediatamente un breve lavoro, in cui replica spiegando meglio il significato della sua equazione.
1876	Boltzmann sposa Henriette von Aigentler e ritorna Graz come professore di fisica. Passerà 14 anni a Graz, dove gli nasceranno due figli e tre figlie.
1877	Pubblicazione del lavoro sui «Fondamenti probabilistici della teoria del calore», in cui viene formulata la relazione tra l'entropia e la probabilità. Nello stesso anno appare un lavoro fondamentale sugli stati di equilibrio macroscopico, poi ripreso da Gibbs.
1878	Boltzmann diventa Preside di Facoltà e Consigliere del Governo, nel 1885 membro dell' Accademia Imperiale delle Scienze, nel 1887 Rettore dell'Università di Graz e nel 1889 Consigliere di Corte.
1885	Muore la madre.
1886	Boltzmann ripete gli esperimenti di Hertz sulle onde elettromagnetiche.
1887	Gustav Kirchhoff muore a Berlino il 17 ottobre. A Boltzmann viene proposto di diventarne il successore. Egli accetta l'offerta e il Kaiser firma il contratto. Nel marzo 1888 Boltzmann chiede di scioglierlo. Il 9 luglio il Kaiser annulla la chiamata.
 1888	Boltzmann perde il figlio maggiore Ludwig, di undici anni.
 1890	Accetta una Cattedra di fisica teorica all'Università di Monaco.
1894	Boltzmann diviene Dottore <i>honoris causa</i> dell'Università di Oxford. Nel mese di giugno torna all'Istituto di fisica di Vienna.
1899	Comple il suo primo viaggio in America. Riceve un Dottorato <i>honoris causa</i> alla Clark University di Worchester nel Massachusetts.
1900	Accetta una chiamata a professore di fisica teorica a Lipsia.
1901	Mach va in pensione e Boltzmann torna a Vienna nel 1902, dove, a partire dal 1903, insegna anche il corso di filosofia che era stato di Mach. Nell'ottobre del 1904 partecipa a un congresso a St. Louis.
1905	Boltzmann va a trovare Brentano a Firenze. Nello stesso anno torna per l'ultima volta negli Stati Uniti, all'Università di California, a Berkeley.
1906	Il 5 settembre si suicida a Duino.

92

04

Letture consigliate

D. Flamm, ed., Hoch geehrter Herr Professor! Innig geliebter Louis! Ludwig Boltzmann, Henriette von Aigentler, Briefwechsel, Böhlau Verlag, Wien (1985). La corrispondenza di Boltzmann con la fidanzata, poi moglie, rivela molti aspetti della vita e del carattere di Boltzmann.

W. Stiller, *Ludwig Boltzmann*, Verlag Harri Deutsch (1989).

Una breve biografia di Boltzmann con profili della maggior parte dei personaggi che vi vengono nominati (in tedesco).

I. M. Fasol-Boltzmann, Ed., Ludwig Boltzmann Principien der Naturalfilosofi, Springer-Verlag, Berlin (1990). Gli appunti delle lezioni di filosofia naturale di Boltzmann erano stenografati. Qui il testo viene trascritto in tedesco normale. Con due saggi (in inglese) della curatrice (nipote di Boltzmann) e dello storico della scienza S. Brush.

L. Boltzmann, Viaggio di un professore tedesco all'Eldorado, Ibis, Como-Pavia (1993)

Traduzione italiana del più famoso tra gli scritti non scientifici di Boltzmann, contenuto nei *Populäre Schriften* (Lipsia, 1905).

W. Höflechner, ed., *Ludwig Boltzmann. Leben und Briefe*, Publikationen aus dem Archiv der Universität Graz, Band 30, Akademische Druck- und Verlagsanstalt, Graz (1994).

La vita di Boltzmann e soprattutto una collezione imponente della sua corrispondenza.

J. Blackmore, ed., Ludwig Boltzmann. His Later Life and Philosophy. Book One: A Documentary History, Kluwer, Dordrech (1995).

Unico libro con una significativa collezione delle lettere di (a, su) Boltzmann in inglese.

C. Cercignani, Ludwig Boltzmann e la meccanica statistica, La Goliardica Pavese, Pavia (1997). Biografia e ricerca scientifica di Boltzmann. Quest'ultima è vista anche alla luce degli sviluppi successivi.

C. Cercignani, Ludwig Boltzmann. The Man Who Trusted Atoms, Oxford University Press, Oxford (1998).

Versione inglese molto ampliata del riferimento precedente. Questo libro può essere consultato per trovare sviluppi più dettagliati e riferimenti bibliografici della materia trattata nel presente testo.

L. Boltzmann, Modelli matematici, fisica e filosofia. Scritti divulgativi [Traduzione italiana parziale dei Populäre Schriften (Lipsia, 1905)], Boringhieri, Torino (1999).

L'unica traduzione italiana, a parte il riferimento 4, delle lezioni "divulgative" di Boltzmann.

Crediti fotografici

I ritratti e le immagini scientifiche riguardanti la vita e le opere di Ludwig Boltzmann sono tratti dai seguenti testi.

C. Cercignani, *Ludwig Boltzmann*. The Man Who Trusted Atoms, Oxford University Press, Oxford (1998).

I.M. Fasol-Boltzmann, Ed., Ludwig Boltzmann Principien der Naturalfilosofi, Springer-Verlag, Berlin (1990).

D. Flamm, Ed., Hoch geehrter Herr Professor! Innig geliebter Louis! Ludwig Boltzmann, Henriette von Aigentler, , Briefwechsel, Böhlau Verlag, Wien (1985).

G. Gamow, Biografia della Fisica, Mondadori (1963)

G. Gamow e M. Ycas, Viaggio di Mr. Tompkins all'interno di se stesso, Zanichelli (1971).

W.Pauli, Meccanica Statistica, Boringhieri (1964).

R. Penrose, The Emperor's New Mind, Oxford University Press.

W. Stiller, Ludwig Boltzmann, Verlag Harri Deutsch (1989).

1. Stewart, From here to infinity, Oxford U.P. (1987)

R.C. Tolman, The Principles of Statistical Mechanics, Dover (1979) o Oxford University Press (1938).

Per le rimanenti immagini si fa riferimento all'ARCHI-VIO FOTOGRAFICO LE SCIENZE.