

La crisi del meccanicismo

dalla Seconda Legge della Termodinamica all'ipotesi dei quanti

CORSO DI STORIA DELLA FISICA I

Tesina d'esame di
Emanuele Cozzo
Luce Prignano

Indice

Introduzione	3
Il determinismo meccanicista ed il modello newtoniano di scienza . . .	3
Un nuovo paradigma	5
La Teoria Cinetica dei Gas	8
Le origini	8
Gli anni '60 del XIX secolo	10
Ludwig Boltzmann	13
Teorema- H , statistica ed irreversibilità	13
I paradossi	14
La dimostrazione	15
Interpretazioni successive	17
L'ipotesi di Caos Molecolare	19
Max Planck	22
Planck e la termodinamica	22
La Seconda Legge e la meccanica	25
Il programma di ricerca sul corpo nero	27
Un primo tentativo	29
Il teorema- H elettromagnetico	32
L'ipotesi di radiazione naturale e la scomparsa della freccia del tempo	34
Per non concludere	36
Bibliografia	42

Introduzione

Il determinismo meccanicista ed il modello newtoniano di scienza

Il XVIII secolo aveva visto affermarsi del modello newtoniano di scienza che, grazie soprattutto ai suoi numerosissimi successi empirici, era stato accettato dall'intera comunità scientifica come riferimento indiscusso, sia sul piano metodologico, sia su quello epistemologico. La visione del mondo naturale propugnata da questo modello si fonda sul determinismo meccanico, il cui manifesto fu scritto da Laplace nell'introduzione al suo *Essai philosophique des probabilités*:

Tutti gli eventi, anche quelli che per la loro piccolezza non sembrano dipendere dalle grandi leggi della natura, ne sono una conseguenza altrettanto necessaria delle rivoluzioni del sole. Nell'ignoranza dei legami che li uniscono all'intero sistema universo, li si è fatti dipendere dalle cause finali, o dal caso, secondo che accadessero e si succedessero con regolarità, o senza un ordine apparente; ma queste cause immaginarie sono state successivamente allontanate assieme ai confini delle nostre conoscenze, e svaniscono interamente davanti alla sana filosofia che non vede in esse altro che l'espressione della nostra ignoranza circa le vere cause.

Gli eventi attuali hanno un legame con quelli che li precedono, il quale è fondato sul principio evidente che una cosa non può cominciare ad essere senza una causa che la produca. Questo assioma, conosciuto con il nome di principio di ragion sufficiente, si estende alle azioni stesse che vengono giudicate indifferenti. [...]

Dobbiamo dunque considerare lo stato presente dell'universo come effetto del suo stato anteriore, e come causa di quello che seguirà. Una intelligenza che ad un dato istante conoscesse tutte le forze da cui è animata la natura e la situazione rispettiva degli esseri che la compongono, se fosse inoltre abbastanza vasta da sottoporre questi dati dell'analisi, abbraccerebbe nella stessa formula i moti dei più grandi corpi dell'universo e quelli dell'atomo più leggero: nulla sarebbe incerto per essa, e il futuro, come il passato, sarebbe presente ai suoi occhi. La mente umana offre, nella perfezione che ha saputo dare all'Astronomia, un flebile abbozzo di questa intelligenza. Le sue scoperte in Meccanica e in Geometria, unite a quella della gravitazione universale, l'hanno messa in condizione di capire nelle

stesse espressioni analitiche gli stati passati e futuri del sistema del mondo. Applicando lo stesso metodo ad alcuni altri oggetti della sua conoscenza, è riuscita a ricondurre a leggi generali i fenomeni osservati, e a prevedere quelli che delle circostanze date debbono provocare. Tutti questi sforzi nella ricerca della verità tendono ad avvicinarla senza posa all'intelligenza che abbiamo appena concepito, ma dalla quale resterà sempre infinitamente lontana. [...] La regolarità che l'Astronomia ci mostra nel moto delle comete ha luogo, senza alcun dubbio, in tutti i fenomeni. La curva descritta da una semplice molecola d'aria o di vapori è regolata in modo altrettanto certo delle orbite planetarie: non vi è alcuna differenza fra di esse se non quella che vi mette la nostra ignoranza.¹

Il pensiero scientifico giunse a questa concezione dell'universo dopo un lungo lavoro di schematizzazione e semplificazione che, a partire dal principio di causalità derivato dall'aristotelismo, che imperava nella meccanica pregalileana, ha portato al principio di ragion sufficiente di Leibniz. Un'importanza cruciale per l'avvio di questo processo l'ha avuta la matematizzazione dei fenomeni: i concetti di punto materiale e traiettoria introdotti da Galileo permettevano una descrizione dei fenomeni dinamici nel quadro di un causalismo fondato sui soli concetti di causalità efficiente, che si riferisce alla proprietà di muoversi di un corpo. Il concetto di causalità finale, che si riferisce al fatto che un corpo tende ad andare verso il suo luogo naturale, è stato il più duro a morire, persistendo nelle formulazioni dei vari principi di minimo in meccanica. Una rappresentazione matematica sempre più accurata di questi principi ha però permesso la riduzione anche di questo concetto a quello di causalità efficiente. Il quadro non era comunque ancora completo: solo il concetto newtoniano di forza poteva permettere la giustificazione dell'operato su scala globale del principio di causalità efficiente. Ma un simile concetto trovava difficoltà ad inserirsi nel quadro del pensiero occidentale del XVII secolo e solo attraverso una mediazione con la visione cartesiana di una realtà continua poté essere accettato. Questa mediazione, completata tra il XVII e il XVIII secolo, diede generò una rappresentazione matematica di tipo continuista – almeno dal punto di vista fenomenologico – lasciando comunque spazio a degli atomismi astratti².

Il determinismo di Laplace è figlio di questo lungo processo che aveva condotto la scienza ad adottare un ideale conoscitivo che coincideva con la possibilità di prevedere, almeno in linea di principio, l'evoluzione futura di ogni fenomeno a partire dalla conoscenza della legge che lo regola e delle condizioni iniziali o al contorno. Tali possibilità predittive spesso sono fatte discendere dal teorema di esistenza ed unicità della soluzione di un'equazione differenziale ordinaria, ma la dimostrazione completa di questo teorema è successiva alla pubblicazione del testo riportato ed inoltre fornisce solo una conoscibilità locale, mentre il causalismo fondato sul principio di ragion sufficiente si esplica su scala globale. Laplace

¹cit. in [1]pp. 45-46

²A tal proposito sono interessanti le riflessioni di Boltzmann che entrano nel dibattito tra l'atomismo e la fenomenologia fisico-matematica fondata sulle equazioni differenziali [2].

concepisce un determinismo ontologico [1], direttamente riferito alla realtà quale essa è: solo così poteva giustificare il modello newtoniano di scienza e il suo ideale di conoscenza altrimenti privo di senso ed affermare la possibilità stessa che esistesse una scienza così come questa era intesa. La convinzione di poter conoscere il passato e prevedere il futuro di ogni fenomeno, una volta che questo fosse stato sfrondata di tutti gli accidenti, date le sue condizioni in un certo istante ha portato ad un approccio metodologico di tipo riduzionista, fondato sui successi della meccanica. E' chiaro dal testo di Laplace che la meccanica rappresentava ciò che più avvicinava la mente umana all'intelligenza da lui concepita e che solo l'applicazione dei metodi di questa poteva far progredire la conoscenza anche in altri ambiti. Questo ideale di conoscenza e i successi empirici del modello newtoniano hanno fatto sì che questo divenisse nel corso dell'Ottocento un modello epistemologico e metodologico per tutte le altre scienze, soprattutto per quelle naturali e le nascenti scienze sociali. Le teorie di Darwin e di Marx rappresentano nei rispettivi campi le punte massime di questi sforzi di avvicinamento. Furono proprio queste scienze ed in primo luogo la teoria dell'evoluzionismo di Darwin a scontrarsi per prime con i limiti imposti da una concezione meccanicista e continuista della realtà, ma solo quando questi stessi problemi affiorarono in fisica si aprì una reale crisi [3].

Rimane da spiegare come all'interno di questo quadro concettuale e metodologico abbiano potuto affermarsi nel corso dell'Ottocento gli strumenti di calcolo probabilistici fino a divenire tra i più usati. La contraddizione è solo apparente e infatti non è un caso che quello che abbiamo chiamato il manifesto del determinismo meccanicista si trovi nell'introduzione ad un trattato di teoria della probabilità: solo la fede in un determinismo assoluto giustificava il ricorso a questi metodi per sopperire ad una connaturata ignoranza. Il compito della scienza, infatti, era sì quello di avvicinare l'uomo all'intelligenza che tutto comprende e tutto prevede, ma questo avvicinamento – come chiaramente afferma Laplace – sarebbe stato “senza posa” e la distanza tra queste due intelligenze sarebbe rimasta per sempre infinita. Lungo il cammino, dunque, laddove le difficoltà fossero risultate più ostiche, il ricorso a metodi probabilistici era pienamente legittimo in quanto lo stesso quadro epistemologico di riferimento ne assicurava l'attendibilità dei risultati. Come vedremo, però, l'irriducibilità dei risultati ottenuti attraverso questi metodi di calcolo al quadro generale apriranno alla fine del XIX secolo una crisi definitiva, anche se parziale.

Un nuovo paradigma

Già nei primi anni dell'Ottocento qualcosa nella scienza occidentale aveva però iniziato a muoversi su di un binario differente. Negli stessi anni in cui Laplace esplicitava in maniera compiuta la visione del mondo naturale e della scienza cui faceva riferimento la tradizione newtoniana, Sadi Carnot gettava le basi di

un modello di scienza diverso, sia dal punto di vista metodologico, sia da quello epistemologico.

Poiché qualsiasi ristabilimento dell'equilibrio del calorico può essere causa della produzione di potenza motrice, qualunque ristabilimento di equilibrio che avvenga senza produzione di questa potenza dovrà essere considerato come una vera e propria perdita; ossia, per poco che ci si rifletta, ci si accorge che qualunque cambiamento di temperatura, che non sia dovuto a un cambiamento di volume dei corpi, non può essere che un ristabilimento inutile di equilibrio del calorico³.

Questa frase, tratta dalle sue *Réflexions sur la puissance motrice du feu*, contiene elementi di innovazione importanti, evidenti innanzitutto sul piano lessicale: «perdita» e «inutilità» sono concetti relativi all'uomo, non al fenomeno “in sé”. Il calorico perduto è quello che non produce potenza (meccanica) motrice. La variazione di temperatura inutile è quella che non viene utilizzata per tale scopo. Le categorie concettuali introdotte per analizzare il fenomeno della conversione di calore in potenza motrice sono dunque espressione diretta dell'interesse a massimizzare quest'ultima a parità di combustibile bruciato [3]. E' importante notare come lo studio della fenomenologia del calore si elevi proprio con Carnot al rango di scienza, essendo stato relegato fino a quel momento – ancora con Newcomen e Watt – a mero problema tecnico connesso alla costruzione di macchine.

Carnot non è un costruttore di macchine. E' lo scienziato che cerca di formulare la teoria più generale possibile in grado di interpretare ciò che accade nel mondo reale. La contrapposizione non è perciò tra teoria e pratica, tra generale e particolare, tra universale e contingente, ma tra la concezione della tradizione galileiana, che considera la complessità del modo reale come una pura apparenza [...] e una concezione dell'intelligibilità del reale fondata sull'introduzione di categorie “fenomenologiche” più facilmente adattabili alla complessità dei fenomeni reali.⁴

Il cambiamento di punto di vista operato da Carnot in merito a cosa sia effettivamente rilevante, ovvero lo spostamento dell'oggetto dell'interesse della ricerca dal fenomeno “in sé” all'uomo che conosce e sfrutta le forze della natura, si ripercuote direttamente sulla tipologia di legge cercata, che sarà sostanzialmente differente. Viene così a cadere l'importanza attribuita ai dettagli, alla conoscenza minuziosa dei legami di causa ed effetto nell'ambito di una data fenomenologia. Diviene al contrario importante scoprire divieti e rintracciare vincoli: il processo conoscitivo ha quindi alla sua base un tipo di astrazione differente, rivolta ad abbracciare, operando una sintesi, il fenomeno nel suo complesso, piuttosto che non a spezzettarlo e ridurlo in una somma di elementi primi la cui caratteristica essenziale sia la semplicità.

³cit. in [3], p. 31

⁴*Ibid.* p. 32

Per Carnot è importante ciò che per altri è da scartare perché egli si muove nel mondo reale dove tutto è irreversibile piuttosto che nelle sfere celesti dove tutto si ripete identicamente ⁵.

Nel giro di una ventina d'anni nasce la termodinamica e si afferma come paradigma differente da quello newtoniano che progressivamente estende il suo ambito, inizialmente limitato alla fenomenologia del calore, tendendo ad abbracciare tutti gli aspetti delle proprietà macroscopiche della materia e costituendosi quindi come teoria di estrema generalità.

⁵*Ibid.* p. 32

La Teoria Cinetica dei Gas

Le origini

La scienza del XIX secolo aveva visto ampliarsi enormemente il suo campo d'azione: non solo i fenomeni legati ai flussi di calore, ma anche quelli elettrici, quelli magnetici e le strane trasformazioni della materia che avevano interessato solo gli alchimisti, da semplici curiosità adatte ad intrattenere signore nei salotti borghesi o grattacapi buoni per far rompere la testa agli ingegneri, erano stati elevati a legittimo oggetto degli studi scientifici. Conseguentemente, la ricerca scientifica si trovò a dover fronteggiare molteplici spinte disgregative, rischiando concretamente di decadere in una molteplicità di discipline separate, prive di un fondamento unitario anche dal punto di vista metodologico e dunque incapaci di utilizzare un linguaggio comune.

In questo contesto, come nota K. von Meyenn [4], la *Naturphilosophie* apportò un importante contributo unificante, benché fosse ormai quasi completamente rifiutata dai ricercatori tedeschi. Infatti, nonostante gli scienziati della nuova generazione la interpretassero essenzialmente come una reazione sbagliata alla supremazia francese degli anni precedenti, foriera di un approccio esasperatamente fenomenologico, le concezioni più generali di questo pensiero erano ancora largamente condivise. In particolare, per quanto concerneva le finalità della scienza, non era stato in quegli anni teorizzato nulla di nuovo in merito e dunque l'idea di Mucke per cui ciò che si deve ricercare è «una singola legge suprema della natura, dalla quale tutte le altre possono essere derivate, come supremo principio di tutta la conoscenza», aveva continuato ad essere un punto di riferimento importante ed anche Helmholtz, quando affermava che «Lo scopo finale delle scienze teoriche è scoprire l'ultima, invariabile causa dei fenomeni naturali»⁶, meritava ancora di essere ascoltato.

Non è quindi un fatto sorprendente che il Principio di Conservazione dell'Energia fosse tenuto in grande considerazione, in quanto principio generale della natura in grado di connettere le diverse forme di energia e di sancire la possibilità della loro mutua trasformazione. Conseguentemente l'antica idea che il calore fosse connesso al moto atomico tornò ad essere accreditata poiché permetteva di ricondurre la conservazione dell'energia nel caso dei processi termici a ben

⁶cit. in [4]

noti principi meccanici, contribuendo notevolmente alla causa dell'unificazione in senso riduzionista. Inoltre l'adozione generale della teoria ondulatoria della luce, combinata con la visione secondo la quale i fenomeni luminosi e quelli termici sono qualitativamente identici, suggerì che il calore fosse, come la luce, una forma di moto piuttosto che non una sostanza [5].

Rifiutare la teoria meccanica del calore era ancora logicamente possibile ed infatti alcuni scienziati, tra i quali J. R. Mayer e Ernst Mach, negavano la necessità di ridurre il calore a qualche altra forma di energia: questa istanza anti-riduzionista o positivista era alla base del movimento "energetista" che si sviluppò alla fine del XIX secolo, ma rimase sempre estremamente minoritario. Ad ogni modo, è rilevante notare che, sia che attribuisse al calore il significato di energia prima irriducibile, sia che lo identificasse con il moto delle particelle più elementari della materia, nessuno scienziato poteva esimersi dall'accordare alla sua fenomenologia un'attenzione particolare.

Chi accettava la teoria meccanica del calore, si trovava poi a dover vagliare diverse ipotesi: la tipologia del moto molecolare, ad esempio, poteva essere traslazionale, rotazionale, o vibrazionale, o anche una combinazione di tutte e tre; le molecole potevano essere puntiformi o possedere dimensioni finite e quindi urtarsi le une con le altre. . . Gli interrogativi aperti erano numerosi e tra questi fondamentale importanza era attribuita alla disquisizione in merito al ruolo dell'etere, la cui indispensabilità non era messa in discussione dai fisici del tempo. Si riteneva che la sua presenza fosse necessaria alla trasmissione di energia in forma di luce o calore radiante; inoltre, se l'etere riempiva anche lo spazio tra le molecole all'interno di un corpo, si poteva ragionevolmente supporre che avrebbe prodotto qualche effetto sul moto di queste. I modelli più diffusi interpretavano le molecole come particelle che "nuotano" nell'etere o che vibrano attorno a definiti punti di equilibrio. Intorno alla metà del secolo, quest'ultima concezione era ormai largamente la più accreditata: sembrava che le divergenze di opinioni potessero interessare solo dettagli marginali, quando il sistematico fallimento di ogni tentativo di derivare le leggi empiriche dei gas dalla teoria vibrazionale condusse, all'inizio degli anni '60, alla sua sostituzione con la teoria cinetica dei gas [4].

Rispetto alle altre ipotesi, questa teoria era forse la più semplice, ma non per questo la più plausibile. Al contrario, appariva fin troppo semplice per essere vera: richiedeva che si ignorasse l'etere ed asseriva che le molecole si muovono a velocità costante, senza incontrare altra resistenza se non quando collidono tra loro o con le superfici di bordo.

Il primo scienziato che fu in grado di superare la generale riluttanza a prendere in seria considerazione questa possibilità fu il fisico tedesco Rudolf Clausius (1822-1888). Nel suo primo scritto sulla teoria cinetica, pubblicato nel 1857, Clausius suggerì che nello stato gassoso ciascuna molecola si muove in linea retta, uscendo dal raggio di azione delle forze attrattive delle altre molecole, urtando però elasticamente con queste di quando in quando. Dedusse inoltre dai dati

sperimentali che le molecole dovevano essere estremamente piccole, affermando che «lo spazio materialmente riempito dalle molecole deve essere infinitesimo se comparato con l'intero spazio occupato dal gas» e che «l'influenza delle forze intermolecolari deve essere infinitesima». Infine calcolò la velocità media delle molecole dell'ossigeno, dell'azoto e dell'idrogeno alla temperatura di fusione del ghiaccio e trovò che queste erano rispettivamente 461 m/s, 492 m/s e 1844 m/s. Il meteorologo olandese C. H. D. Buys-Ballot esaminò questi valori e realizzò che se le molecole realmente si fossero mosse così rapidamente, il mescolamento di gas diversi mediante diffusione avrebbe dovuto essere molto più rapido di quanto non osservato.

Per aggirare quest'obiezione, Clausius dovette apportare un'importante modifica alla teoria. Abbandonato il suo precedente postulato per il quale le molecole avrebbero dimensioni infinitesime, fece l'assunzione che queste avessero un diametro o "sfera d'azione" sufficientemente grande da impedire che una molecola possa allontanarsi troppo senza urtarne un'altra. Quindi definì un nuovo parametro: il "cammino libero medio" (L) di un gas di molecole, che doveva essere stimato come la distanza media che una molecola può percorrere prima di interagire con un'altra. Egli arguì che L potesse essere abbastanza grande rispetto ai diametri molecolari di modo che i concetti basilari della teoria cinetica, utilizzati per derivare le leggi dei gas ideali, fossero fatti salvi, ma al tempo stesso fosse sufficientemente piccolo cosicché una molecola dovesse impiegare un tempo adeguatamente lungo per sfuggire da una data regione macroscopica dello spazio. In questo modo la lentezza dell'ordinaria diffusione dei gas, ferme restando le elevate velocità del moto molecolare, poteva trovare spiegazione[5].

Quando Clausius introdusse la nozione di cammino libero medio, nel 1858, questa poteva apparire come una mera ipotesi ad hoc introdotta per salvare la teoria, ma prima che qualcuno avesse la possibilità di criticarla su questo terreno, James Clerk Maxwell (1831-1879) la incorporò nella sua teoria cinetica e mostrò che poteva essere messa in relazione con alcune proprietà dei gas, quali la viscosità. Conseguentemente, il cammino libero medio divenne un concetto valutabile, utile non solo per interpretare dati sperimentali, ma anche per determinare le dimensioni delle molecole e in questo modo giustificarne la stessa esistenza [6].

Gli anni '60 del XIX secolo

La teoria cinetica forniva una soddisfacente interpretazione molecolare della Prima Legge della Termodinamica e volse perciò presto la sua attenzione alla Seconda Legge. Questa, così come era stata formulata da Clausius, implica che non è possibile ottenere lavoro meccanico dal calore eccetto nel caso in cui questo fluisca da un corpo a temperatura più alta verso uno a temperatura minore, secondo speciali modalità descritte da Sadi Carnot. Inoltre sanciva che il calore fluisce spontaneamente dal caldo verso il freddo, ma non in senso inverso, men-

tre una misteriosa quantità chiamata “entropia” tende a crescere verso un valore massimo. Per l'intero l'universo, questo stato di massima entropia fu chiamato da Clausius “Morte Termica”: tutta l'energia sarebbe uniformemente diffusa nello spazio a bassa temperatura, cosicché nessun lavoro meccanico potrebbe essere compiuto e la vita non potrebbe esistere [5].

Questa presentazione assiomatica non era considerata soddisfacente da gran parte degli scienziati, poiché era loro convincimento che se il calore aveva un'interpretazione meccanica, allora tutte le sue proprietà dovevano poter essere dedotte da puri principi meccanici. Particolarmente idoneo a questo ruolo sembrava essere il famoso “Principio di Minima Azione” di Maupertuis, che nel 1867 venne indicato da Peter Guthrie Tait e William Thomson come «un'utile guida nella ricerca cinetica». Questo punto di vista era condiviso dal giovane Boltzmann, il quale si impegnò già nel 1866 nel tentativo, non riuscito, di ottenere la Seconda Legge per questa via [4]. In seguito, studi ulteriori suoi e di altri non avevano conseguito successo maggiore, al contrario: era emerso come i soli principi meccanici fossero insufficienti per fornire un'interpretazione completa della Seconda Legge della Termodinamica, a causa del carattere intrinsecamente non meccanico di questa. L'elemento mancante era costituito dall'approccio statistico al moto atomico, introdotto da Maxwell a partire dallo stesso anno in una serie di pubblicazioni frutto di una profonda riflessione iniziata anni prima.

Maxwell aveva rapidamente fatto propria la teoria sviluppata da Clausius e l'aveva trasformata in un potente strumento matematico di ricerca, convertendola in una dottrina pienamente statistica. Se infatti Clausius ed i primi teorici cinetici avevano assunto che le molecole in un gas omogeneo ad una data temperatura si muovono tutte alla stessa velocità, Maxwell asserì che al contrario le collisioni dovevano produrre una distribuzione statistica di velocità. Per descrivere questa distribuzione, si basò sulla “legge degli errori” scoperta da Adrain e Gauss, convertendola in un legge di distribuzione per velocità molecolari. Ne dedusse che, così come nella teoria cinetica iniziale, la velocità media doveva essere proporzionale alla temperatura assoluta, ma evidenziò anche come un gas ad alta temperatura contenga molecole che si muovono a tutte le velocità, incluse quelle molto basse e, viceversa, in un gas a bassa temperatura si trovano, in piccole proporzioni, molecole molto veloci [6].

L'acuto pensiero deduttivo del fisico scozzese investì presto anche la natura stessa della Seconda Legge, conducendolo nel 1867 ad anticipare in una lettera scritta al suo amico Tait un primo suggerimento per una sua possibile violazione. Supponiamo che un essere immaginario dotato di facoltà speciali – divenuto noto con il nome di “Demone” di Maxwell – si trovi presso un'apertura priva di attriti tra due recipienti, uno contenente un gas caldo, l'altro un gas freddo con la medesima composizione chimica. In accordo con la legge di distribuzione, poche molecole nel gas caldo si muoveranno più lentamente della media delle molecole nel gas freddo, mentre alcune molecole nel gas freddo viaggeranno più velocemente della media di quelle del gas caldo. Il Demone identifica queste molecole

eccezionali quando si avvicinano all'apertura e le lascia passare dall'altra parte, mentre blocca tutte le altre. In questo modo provoca un aumento della velocità media delle molecole nel gas caldo e un decremento in quella del gas freddo, causando un flusso di calore dal lato freddo a quello caldo [7].

Maxwell proponeva quindi, per la prima volta, un modello cinetico per il principale processo irreversibile, trasformando i flussi di calore in mescolamento molecolare: l'ordinario fenomeno del calore che passa da un corpo caldo ad uno freddo, era ora considerato equivalente alla transizione da uno stato parzialmente ordinato (molecole più veloci da un lato, molecole più lente dall'altro) ad uno meno ordinato. I concetti di ordine e disordine molecolare, a questo punto, dovevano essere naturalmente associati al fluire del calore e all'entropia, benché Maxwell non esplicitò mai la connessione.

Egli concluse che la validità della Seconda Legge dipendeva dalla non esistenza di un Demone capace di distinguere e separare le molecole: in questo modo ne mise in discussione il carattere dinamico assoluto, facendola apparire come una legge statistica propria del mondo macroscopico.

Attribuire ad una legge un fondamento statistico non implica ovviamente che questa abbia per oggetto eventi casuali, tutt'altro: se il Demone di Maxwell non potesse prevedere il futuro comportamento delle molecole dall'osservazione effettuata quando queste si avvicinano all'apertura, non potrebbe svolgere il suo compito. In alcune discussioni successive, inoltre, emerse come un rilassamento del determinismo a livello molecolare avrebbe reso la completa irreversibilità più – e non meno – plausibile. Ciò nonostante, ad un livello più superficiale di analisi, la caratterizzazione “statistica” conferiva l'impressione che un elemento di casualità o disordine fosse in qualche modo coinvolto [7].

Ludwig Boltzmann

Quando Ludwig Boltzmann (1844-1906) nell'autunno del 1863, all'età di 19 anni, si recò a Vienna con il proposito di intraprendere gli studi in fisica presso l'Università, l'Istituto creato da Christian Doppler nel 1850 era già conosciuto a livello internazionale come un importante centro di ricerca.

Il direttore dell'Istituto, Josef Stefan (-), in quegli anni si interessava di elettrodinamica e di teoria dei gas: Boltzmann frequentò le sue lezioni di fisica teorica, che spaziavano dalla fisica delle forze molecolari alla teoria della luce, del calore e dell'elasticità, ed ebbe modo di apprezzare i suoi sforzi per stabilire connessioni tra la nuova teoria elettromagnetica di Maxwell e le vecchie visioni basate su interazioni a distanza veicolate da speciali modelli di etere. Stefan fu infatti tra i primi fisici fuori dalla Gran Bretagna a lavorare sull'elettrodinamica di Maxwell e contribuì considerevolmente all'accettazione delle nuove idee nel continente europeo. La sua attività di ricerca fu quindi per Boltzmann certamente rilevante rispetto alla scelta degli argomenti a cui dedicarsi nel momento di intraprendere la propria carriera scientifica: nel suo primo lavoro trattò un problema presentato nelle lezioni di questi sulle correnti elettriche; in seguito rivolse le sue attenzioni alla teoria del calore, altro campo di ricerca coltivato dal suo professore [4].

Messo da parte il Principio di Maupertuis, Boltzmann venne a conoscenza dei primi scritti di Maxwell sulla teoria cinetica e nel 1868 pubblicò una memoria sull'equilibrio termico nella quale estendeva la teoria della distribuzione delle velocità al caso in cui siano presenti forze esterne ed intermolecolari. Rimaneva da dimostrare che un gas fattualmente tende ad uno stato di equilibrio qualora non vi si trovi già: sia Maxwell, sia Boltzmann, ritenevano che sciogliere questo nodo fosse tra i compiti urgenti ai quali la teoria cinetica doveva adempiere, ma se il primo fece solo alcuni frammentari tentativi in tal senso, il secondo dedicò numerosi scritti alla ricerca di una soluzione generale. Inoltre, mentre Maxwell si riteneva soddisfatto dall'aver riconosciuto la validità limitata della Seconda Legge, il suo collega austriaco ricercava per una comprensione più quantitativa.

Teorema- H , statistica ed irreversibilità

Scrive Kuhn in *Alle origini della fisica contemporanea* [8]:

Se la distribuzione delle di velocità delle molecole di un gas è inizialmente diversa da quella di Maxwell, le collisioni intermolecolari produrranno col passare del tempo quella distribuzione e poi la manterranno. Per lo meno questo sarebbe ciò che succederebbe se la distribuzione di Maxwell fosse, come il suo autore affermava, l'unica che rimane stabile mentre le molecole continuano ad urtarsi dentro il gas.

È dunque chiaro perché il problema del raggiungimento dell'equilibrio non occupò Maxwell a lungo: essendo convinto dell'unicità della distribuzione da lui trovata, non aveva altre domande da porsi. Sotto questa ipotesi, infatti, sono stati di equilibrio tutti e soli quelli caratterizzati da tale distribuzione, mentre gli altri non saranno stabili e la distribuzione delle velocità delle loro molecole si modificherà progressivamente fino a trasformarsi in quella prevista da Maxwell: l'equilibrio sarà in questo modo raggiunto. Non era però stato matematicamente chiarito quest'ultimo punto, ovvero non era stato dimostrato come e perché una distribuzione iniziale arbitraria delle velocità molecolari dovrebbe, nel tempo, tendere alla forma individuata da Maxwell e su questa stabilizzarsi. Fino alla fine del XIX secolo, Boltzmann fu il solo a dedicare una significativa attenzione alla teoria cinetica dell'irreversibilità: negli anni tra il 1869 e il 1872 elaborò ulteriormente le sue idee e la loro applicazione al problema dell'entropia; alla fine del 1871 si recò a Berlino cercando di approfondire il suo rapporto professionale con l'impegnatissimo Helmholtz, col quale sentiva di avere una buona intesa, ed in questo periodo rese noti i suoi passi avanti nella risoluzione del problema [4]. Sui resoconti dell'accademia di Vienna apparve un lavoro di circa cento pagine che conteneva la distribuzione di Maxwell in un nuovo formalismo e una nuova definizione di entropia valida anche in condizioni di non-equilibrio, nonché il suo più famoso risultato: il Teorema- H , con il quale Boltzmann riteneva di aver ricavato la Seconda Legge per i processi reversibili partendo da premesse meccaniche.

In realtà, la dimostrazione di questo teorema si fonda anche su alcune ipotesi statistiche, nella cui specificazione e formalizzazione risiede il limite della prima trattazione proposta: molte di queste, infatti, furono introdotte in maniera implicita dando luogo ad interpretazioni errate dei risultati ottenuti. Conseguentemente, il Teorema- H fu oggetto di critiche spesso convincenti che obbligarono Boltzmann a tornare più volte su questo tema nel corso della sua vita professionale per difendere il suo primo risultato, ma anche per generalizzarlo ed estenderlo.

I paradossi

Il primo problema ad emergere dalla dimostrazione del Teorema- H è il cosiddetto paradosso della reversibilità, discusso per la prima volta da Thomson (Lord Kelvin) nel 1874 e portato all'attenzione di Boltzmann da Loschmidt nel 1876. L'obiezione posta si basava sulla contraddizione apparente tra una delle premesse di base della derivazione di Boltzmann – la reversibilità delle collisioni

individuali – e l’irreversibilità predetta dal teorema stesso per un sistema composto da molte molecole. Se – affermava Loschmidt – l’entropia è una funzione specificabile delle posizioni e delle velocità delle particelle di un sistema e se quella funzione aumenta durante qualche particolare movimento del sistema, allora l’inversione della direzione del tempo nelle equazioni del moto definirà una traiettoria attraverso la quale l’entropia deve diminuire. Per ciascun moto meccanicamente possibile che tende all’equilibrio, ne esiste un altro, ugualmente possibile, che va in senso inverso ed è incompatibile con la Seconda Legge [4]. Da un punto di vista più generale, la contraddizione tra ogni teoria molecolare basata sulla meccanica Newtoniana ed il principio generale della dissipazione dell’energia, era sotto gli occhi di tutti, ma il lavoro di Boltzmann ebbe il merito di essere il primo a permettere di affrontare questa inconsistenza esplicitamente. Poincaré e, successivamente, Zermelo (1896) arguirono inoltre che il Teorema della Ricorrenza rende ogni modello meccanico del calore, come ad esempio la teoria cinetica, incompatibile con la Seconda Legge della Termodinamica. In base a questo teorema, infatti, ogni sistema definito da equazioni differenziali ordinarie che possieda una quantità finita di energia e sia confinato in un volume spaziale limitato ritornerà, dopo un intervallo di tempo sufficientemente lungo, arbitrariamente vicino al suo stato iniziale. Un scatola contenente una quantità qualsiasi di palline che urtano elasticamente possiede tutti i requisiti richiesti dal teorema, ma Boltzmann riteneva di aver dimostrato che un simile sistema tende a raggiungere lo stato di equilibrio e a rimanervi, escludendo in questo modo – almeno apparentemente – che esso possa tornare arbitrariamente vicino allo stato iniziale. Zermelo ne concludeva che in qualche punto la dimostrazione dovesse contenere errori e che, dal momento che la termodinamica è stringentemente indotta dall’esperienza, l’unica via praticabile per rimuovere queste contraddizioni consisteva nel rigettare il punto di vista meccanicistico [4]. È necessario però prendere in considerazione la dimostrazione del Teorema- H , estrapolandone i passaggi logici essenziali, se si vuole analizzare l’origine delle diverse difficoltà concettuali.

La dimostrazione

Maxwell aveva ricavato la legge di distribuzione delle velocità semplicemente ipotizzando che non esistessero direzioni privilegiate per il moto atomico ed imponendo la conservazione dell’energia totale e del numero di particelle.

Boltzmann, per affrontare il problema dell’approccio all’equilibrio, prese in considerazione un gas in uno stato non-stazionario, quindi con una distribuzione di velocità non costante, e ricavò un’equazione a cui doveva soddisfare la derivata temporale di questa perché fosse compatibile con l’evoluzione temporale di un sistema composto da sfere dure che urtano elasticamente. Mostrò così che è condizione sufficiente perché la funzione di distribuzione sia costante che la sua forma sia quella determinata da Maxwell.

Quindi costruì una funzione del tempo, data dall'integrale della funzione di distribuzione f moltiplicata per il suo logaritmo $\log f$, nota oggi con il nome di funzione H , ma inizialmente chiamata E . Fece vedere come, se si annulla la derivata temporale di f , ovvero se il sistema si trova in uno stato di equilibrio, questo implica l'annullarsi anche della derivata di H . Mostrò poi che $\frac{dH}{dt}$ non può mai essere positiva e dunque H può solo diminuire nel tempo, assestandosi infine su di un certo valore costante, essendo limitata inferiormente. Con questa dimostrazione Boltzmann intendeva aver provato che un sistema, qualora non vi si trovi già, tende a raggiungere lo stato di equilibrio, per il quale la funzione H assume valore minimo. Inoltre aveva trovato che questo processo è irreversibile, dato che qualsiasi allontanamento dallo stato finale comporterebbe un'inversione del segno di $\frac{dH}{dt}$.

La condizione necessaria affinché $\frac{dH}{dt}$ si annulli è infine proprio la condizione sufficiente precedentemente trovata per l'equilibrio e che conduce univocamente alla distribuzione di Maxwell, la quale quindi, discendendo direttamente da una condizione necessaria e sufficiente per l'equilibrio stesso, è perciò unica.

Aggiuntivamente, Boltzmann dimostrò che quando $\frac{dH}{dt} = 0$ e la distribuzione è quella di Maxwell, allora le leggi di Boyle, di Charles e di Avogadro sono tutte verificate se la temperatura è uguale all'energia media di traslazione di una molecola [7]. Derivò poi un importante teorema sulla funzione H : quando questa ha raggiunto il suo valore minimo o di equilibrio H_{min} , può differire dal negativo dell'entropia del gas soltanto per una costante aggiuntiva arbitraria. Questo implica che la variazione di H_{min} lungo una traiettoria reversibile è uguale alla variazione dell'entropia, a meno del segno: di qui segue, almeno per i processi reversibili, la Seconda Legge della Termodinamica [8].

È opportuno a questo punto specificare meglio la definizione ed il significato fisico della funzione di distribuzione delle velocità.

Boltzmann chiede ai suoi lettori di prendere in considerazione un recipiente pieno di un gas che consiste di molecole sferiche identiche e perfettamente elastiche. Introduce quindi una funzione f delle tre componenti del vettore velocità, u , v , w , e del tempo t , tale che $f(u, v, w, t)du dv dw$ sia il numero di molecole per unità di volume che, al momento t , hanno le componenti della velocità comprese tra u e $u + du$, v e $v + dv$, w e $w + dw$. Questa funzione specifica la distribuzione delle velocità delle molecole nel recipiente ad ogni istante e la sua evoluzione è dovuta agli scambi di quantità di moto conseguenti agli urti. Supponendo quindi di conoscere f ad un dato momento, sarà possibile studiare la sua evoluzione "classificando" e "contando" le collisioni a cui vanno incontro le particelle del gas. La prima quantità da calcolare è perciò il numero di collisioni $d\nu$ che avvengono in una unità di volume, durante un certo intervallo di tempo dt , tra due qualsiasi molecole che si trovavano inizialmente in due dati elementi di volume dello spazio delle velocità - d^3w_1 e d^3w_2 - e che in seguito all'urto si andranno a trovare in altri due determinati volumetti $d^3w'_1$ e $d^3w'_2$ [8].

Qui sorge il primo equivoco: essendo nota la funzione di distribuzione, il numero di molecole contenuto in ciascun elemento di volume dello spazio delle velocità all'istante t_0 è specificato, ma ciò non coincide con la conoscenza dello stato in senso microscopico e non fornisce una condizione in grado di funzionare come le condizioni iniziali della meccanica classica. Di fatto f è una distribuzione a “grana grossa”: un numero infinito di diverse combinazioni delle molecole entro ciascuna celletta è compatibile con la stessa forma di f al momento t_0 . Ciascuna di queste combinazioni corrisponde ad una condizione iniziale diversa per un sistema meccanico interamente specificato, e ciascuna di esse porta ad una diversa traiettoria per quel sistema nel tempo [8].

Queste premesse chiariscono, senza che sia necessario addentrarsi nei dettagli tecnici del calcolo, come Boltzmann, benché intendesse calcolare il reale numero di collisioni del tipo indicato, non poteva in realtà che procedere ad una stima del numero medio di queste. Egli però inizialmente non distingue ed attribuisce valore strettamente deterministico alle equazioni che ricava per l'evoluzione temporale di f ed H , quando queste consentono solo il calcolo dei valori più probabili assunti dalle due funzioni in un momento successivo. Boltzmann, che come si è detto aveva cercato una prova strettamente meccanica della Seconda Legge negli anni '60, presumibilmente nel 1872 non aveva ancora potuto cogliere la dimensione delle implicazioni concettuali introdotte dal suo ricorso alle tecniche statistiche di Maxwell, la cui *Teoria del calore* – con la discussione sul Demone selettore – era appena stata pubblicata [4].

Interpretazioni successive

Nei dieci anni seguenti, questa situazione si modificò radicalmente: nel 1877, dopo aver esplorato tutte le possibilità di una riduzione strettamente meccanica dell'irreversibilità, Boltzmann arrivò ad una rottura di pensiero decisiva, verso una nuova spiegazione di tipo diverso.

Nella sua prima discussione del paradosso di Loschmidt, arrivò ad individuare un gruppo di condizioni iniziali a partire dalle quali H doveva necessariamente crescere per un certo periodo di tempo.

In un importante articolo, mostrò come la funzione H coincida con il negativo della misura di *permutabilità* di uno stato, una grandezza che differisce dal logaritmo della probabilità dello stato stesso per una costante additiva arbitraria [8]. Avviatosi quindi verso una comprensione dell'entropia nella sua generalità come misura di probabilità di uno stato macroscopico, poté pensare un nuovo tipo di legittimazione fisica per la Seconda Legge della Termodinamica, opposto alla tradizionale visione di legge assoluta.

A dispetto degli esempi e dei modelli visuali che usò per illustrare il suo nuovo punto di vista, i suoi contemporanei reagirono con grande esitazione. Negli anni '90, ai continui attacchi di Poincaré e Zermelo, si aggiunsero quelli dei fisici britannici che diedero nuovo impulso al mutamento delle sue opinioni, in parti-

colare con le discussioni sorte nell'incontro annuale della British Association nel 1894. Alla fine di quello stesso anno ebbe luogo anche una breve ma vivace controversia con Planck, in seguito alla quale le nuove idee di Boltzmann presero ulteriormente forma, sebbene non tutti i nodi fossero ancora sciolti.

In quel periodo stava lavorando ad un testo didattico, *Lezioni sulla teoria dei gas*, il cui primo volume venne pubblicato due anni dopo. La novità contenuta in questo lavoro riguarda soprattutto i passaggi interpretativi, nei quali si sovrappongono concezioni vecchie e nuove. Nel primo volume, a questo proposito troviamo scritto:

Il fatto che H ora aumenta non contraddice le leggi di probabilità, poiché esse implicano soltanto l'improbabilità, non l'impossibilità, di un aumento di H ⁷.

Tali affermazioni sono però ripetutamente affiancate ad altre con esse incompatibili, quali: «la quantità che abbiamo chiamato H può soltanto diminuire». Queste giustapposizioni sono dovute all'evidente difficoltà di Boltzmann a separarsi dalla fraseologia deterministica inizialmente adottata, cosicché le premesse essenzialmente statistiche sembrano svanire senza una traccia nei risultati. Kuhn [8] illustra come l'origine di questa reticenza risieda nella struttura stessa della derivazione che, come abbiamo visto, si fonda su un'ambiguità in merito al significato fisico-matematico della funzione di distribuzione.

Attraverso le controversie e discussioni che si svilupparono, mentre aumentava la comprensione generale del significato del teorema di Boltzmann, si andavano delineando i limiti di validità dei risultati ottenuti. Questi, infatti, in quanto risultati sui valori medi, sono da considerarsi attendibili solo per gas la cui densità si trovi in un determinato intervallo: non deve essere troppo bassa affinché la frequenza delle collisioni sia sufficientemente elevata ed i ritmi medi e ritmi reali coincidano strettamente, ma neppure troppo alta poiché in questo caso emergono nuovi problemi legati al ridursi del cammino libero medio. Queste considerazioni avrebbero potuto portare, in modo del tutto naturale, allo sviluppo di metodi matematici per lo studio delle fluttuazioni, permettendo all'intera trattazione di essere inserita in un quadro concettuale più organico e coerente, ma Boltzmann non se ne interessò mai.

Ad ogni modo, conseguì crescente consapevolezza delle difficoltà. Replicando alle critiche di Zermelo avanzò l'ipotesi che l'entropia potesse essere realmente la misura della probabilità di uno stato, definito macroscopicamente. Mentre tutti gli stati microscopici (specificati dalle posizioni e dalle velocità di tutte le molecole) possono essere assunti come equiprobabili, i macrostati che corrispondono all'equilibrio termico sono un insieme di un ampio numero di microstati e possono in questo modo avere alta probabilità, mentre i macrostati che deviano significativamente dall'equilibrio consistono solo di pochi microstati ed hanno perciò probabilità molto bassa. In un tipico processo irreversibile, il sistema

⁷cit. in [8] p. 95

passa da uno stato di nonequilibrio ad uno stato di equilibrio; cioè da uno stato poco probabile ad uno molto probabile. Per invertire questo processo non è sufficiente partire da uno stato di equilibrio ed invertire le velocità, perché quasi certamente questo condurrà ad un altro stato di equilibrio; si deve selezionare, tra l'immensa quantità di microstati che corrispondono all'equilibrio, un microstato la cui evoluzione sia partita da uno stato di non equilibrio, ed invertirne le velocità. In questo modo è possibile che l'entropia decresca, ma è estremamente improbabile. La distinzione tra macrostati e microstati è cruciale nella teoria di Boltzmann. Come il Demone di Maxwell, un osservatore che abbia a che fare direttamente con i microstati non percepirà l'irreversibilità come un'invariabile proprietà dei fenomeni naturali. È solo quando decidiamo di raggruppare insieme determinati microstati e li chiamiamo, collettivamente, macrostati "disordinati" o "di equilibrio", che possiamo parlare di evoluzione da stati "meno probabili" a stati "più probabili" [7].

L'ipotesi di Caos Molecolare

Si è spesso affermato che l'approccio statistico è stato utilizzato solo come un pratico strumento per trattare sistemi composti da un gran numero di particelle le cui posizioni e velocità ad un qualsiasi istante sono sconosciute o comunque, anche qualora fossero note, non possono essere utilizzate in pratica per calcolare il comportamento complessivo del sistema. I fisici del XIX secolo assumevano sempre che il gas fosse un sistema realmente deterministico: se l'intelligenza superiore immaginata da Laplace avesse avuto a disposizione informazioni complete su tutti gli atomi in un dato istante, avrebbe potuto calcolare le loro posizioni e velocità ad ogni altro istante, così come avrebbe potuto prevedere l'evoluzione delle proprietà macroscopiche del gas.

Boltzmann, nel dibattito sul paradosso della ricorrenza, aveva potuto aggirare la questione del determinismo finché E. P. Culverwell non sollevò, nel 1890 a Dublino, quella che si potrebbe chiamare "l'obiezione della reversibilità al Teorema- H ", da non confondersi con il Paradosso della Reversibilità discusso da Thomson, Loschmidt e Boltzmann negli anni '70. Culverwell si domandava come il Teorema- H potesse essere derivato dalla sola meccanica e se non fosse possibile che l'irreversibilità fosse presente già a livello molecolare, magari come risultato delle interazioni con l'etere [9].

La tendenza a risolvere le difficoltà teoriche facendo ricorso all'etere per giustificare le proprietà della materia e dell'energia che non si inserivano entro il quadro della fisica Newtoniana era ormai guardata con sospetto da molti scienziati, ma Culverwell poneva un interrogativo perfettamente pertinente. La sua obiezione fu discussa al congresso della British Association e, per alcuni anni, sulle colonne di *Nature*.

Fu S. H. Burbury (1831-1911) a puntualizzare, a Londra nel 1894, che la dimostrazione del Teorema- H dipendeva dall'assunzione di Maxwell e Boltzmann che

le molecole collidenti fossero scorrelate. Quest'assunzione, se sembrava plausibile da farsi prima della collisione, appariva una notevole forzatura nel caso delle velocità di due molecole che si fossero appena urtate, poiché si poteva supporre che la collisione stessa introducesse una correlazione tra queste. Boltzmann, che partecipò alle discussioni britanniche sul teorema- H , accettò la conclusione di Burbury sulla necessità di un'ipotesi aggiuntiva ed arguì che questa poteva essere giustificata assumendo che il cammino libero medio in un gas sia sufficientemente lungo rispetto alla distanza media tra due molecole: in questo modo una data molecola difficilmente incontrerà di nuovo la molecola con la quale ha colliso poco prima e alla quale si è così correlata. (Boltzmann 1896-1898, pp. 40-41). Allo stesso tempo ammise che la stessa ipotesi poteva non essere sempre valida nei gas reali, specialmente ad alte densità, e che la ricorrenza poteva effettivamente verificarsi.

Quest'ipotesi, detta Condizione A o *disordine molare*, si identificava inizialmente con la convenzione per cui le molecole sarebbero distribuite a caso tra gli elementi dello spazio delle velocità [8]. Boltzmann, sviluppando ulteriormente il suo punto di vista, comprese però che questa condizione non è sufficiente: nel I volume delle *Teoria dei gas* scriveva che, anche presupponendo il disordine molare,

coppie di molecole (o gruppi di parecchie molecole contenute in uno spazio infinitesimo) possono manifestare determinata regolarità. Una distribuzione che manifesta regolarità di questo tipo sarà detta molecularmente ordinata. Una distribuzione molecularmente ordinata (per citare soltanto due esempi dall'infinità di casi possibili) sarebbe quella nella quale la velocità di ogni molecola è diretto verso la più vicina di quelle contigue, o quell'altra per la quale ogni molecola con velocità inferiore a qualche valore prefissato abbia 10 molecole lente nelle sue vicinanze...⁸

Boltzmann evidenziò come il *disordine molecolare* sia necessario perché il numero di collisioni possa essere derivato mediante il calcolo delle probabilità e chiarì che assicurarsi che questa condizione sia verificata all'istante iniziale non è sufficiente poiché qualche tipo di ordinamento può generarsi anche attraverso processi del tutto casuali⁹. Non riuscendo a trovare una definizione esplicita per tale condizione, Boltzmann propose uno stratagemma: la validità dell'equazione per l'evoluzione temporale della funzione di distribuzione può «comunque essere considerata come una definizione dell'espressione: la distribuzione è molecularmente disordinata»¹⁰. Quest'operazione fu ripetuta da Planck due anni più tardi per definire il suo concetto di “radiazione naturale”. Kuhn suggerisce che

⁸cit. in [8] p. 122

⁹Nella terminologia moderna si fa distinzione tra “numeri random” e “numeri generati da un processo random”: preparando una tabella di numeri casuali da usarsi in studi statistici, si devono rigettare certi sottoinsiemi, per esempio quelli nei quali ciascuna cifra compaia con una frequenza che si discosta di molto dal 10 %, perché questi sono sconvenienti prodotti non-random di un processo random [9].

¹⁰cit. in [8]

uno dei modi in cui devono essere lette le ipotesi del disordine molecolare è quello di leggerci una proibizione al verificarsi di certe configurazioni reali delle molecole entro le singole celle, configurazioni che le leggi della meccanica, prese da sole, avrebbero altrimenti permesso. Visto in questo modo, il disordine molecolare è un'ipotesi fisica che deve essere provata con la sperimentazione. Questo, in ogni caso, è il modo in cui Planck lo lesse [...] ¹¹

La difficoltà su questo punto deriva dalla pretesa di utilizzare la statistica per trovare il numero esatto di urti, richiedere cioè che i valori medi e quelli reali coincidano strettamente, tentando di eliminare tutte quelle situazioni che si configurano come deviazioni consistenti dai valori previsti. Al di là delle parole spese in alcuni scritti interpretativi, introdurre l'ipotesi di disordine molecolare nella dimostrazione del Teorema- H «aveva come conseguenza il fatto che H non poteva mai aumentare, mentre in base alla meccanica H doveva aumentare nel moto inverso, e questa era una contraddizione», come evidenziò J. H. Jeans (1877-1946) a partire dal 1902. In quegli anni dunque, scrive ancora Kuhn,

Il concetto di Boltzmann di disordine molecolare inteso come proibizione di stati fisicamente ammissibili stava rapidamente scomparendo dalla teoria dei gas [...] Le difficoltà che avevano portato Boltzmann a quel concetto, comunque, rimanevano [...]. Qualche volta lo si è ritenuto come un'asserzione di casualità, ma questo modo di intenderlo di per se risolve ben poco, poiché non è chiaro che cosa possa significare dire che una funzione di distribuzione $f(u, v, w, t)$ descrive una distribuzione casuale di molecole al momento t_0 . In altre occasioni il termine è stato applicato all'una o all'altra condizione matematica che la funzione di distribuzione deve soddisfare al momento t_0 se l'equazione di Boltzmann si deve applicare durante un intervallo successivo $t_0 + \tau$. In questo caso la difficoltà è di specificare le condizioni su f al momento t_0 che, in circostanze di interesse fisico, garantiranno l'applicabilità dell'equazione di Boltzmann per una durata di tempo significativa.¹²

¹¹[8] p. 124

¹² *Ibid.* p. 127

Max Planck

Planck e la termodinamica

In uno scritto degli ultimi anni di vita di Planck leggiamo:

[...] è di fondamentale importanza che il mondo esterno sia qualcosa di indipendente dall'uomo, qualcosa di assoluto. La ricerca delle leggi che si applicano a questo assoluto mi parve lo scopo scientifico più alto della vita¹³.

Per quanto possa essere in generale fuorviante interpretare il lavoro di uno scienziato alla luce delle sue convinzioni esternate a posteriori, il pensiero espresso in queste righe si adatta molto bene all'intera attività di ricerca di Planck e soprattutto fornisce un'ottima chiave di lettura per interpretare ciò che egli fa nei primi quindici anni di ricerca. Possiamo affermare che rintracciò nella termodinamica il campo di ricerca più adatto a perseguire questo «scopo scientifico più alto» e, almeno per quanto riguarda i primi anni, nelle leggi di conservazione dell'energia e di aumento dell'entropia i prototipi «delle leggi che si applicano all'assoluto». A tal proposito riportiamo, con lo spirito appena esposto, ciò che scriveva sulla prima legge della termodinamica raccontando il suo primo incontro con essa quando ancora frequentava il ginnasio:

La mia mente assorbì avidamente, come una rivelazione, la prima legge che conobbi possedere una validità assoluta, universale, indipendente da tutte le influenze umane: il principio di conservazione dell'energia¹⁴.

La termodinamica che conobbe Planck non era più la nascente teoria di Carnot, ma, sebbene risultasse ancora una relativa novità, aveva già subito il lavoro di sistematizzazione di Clausius e Thomson, i quali riuscirono a derivare per altre vie i teoremi di Carnot, rendendoli compatibili con la prima legge.

La Seconda Legge della Termodinamica nacque proprio per permettere la riconciliazione della teoria di Carnot, che prevedeva la conservazione del calore, con il principio di conservazione dell'energia. Il nuovo principio fu così formulato da Clausius: «il calore non può di per se stesso passare da un corpo più freddo ad uno più caldo, rimanendo invariato il resto dell'universo.»

¹³[10] pag. 11

¹⁴*Ibid.* pag. 11

In qualità di enunciati su ciò che non può succedere nella natura [quello di Clausius che abbiamo riportato e quello equivalente di Thomson], la loro importanza fisica in positivo è ben lungi dall'essere trasparente, ed essi vengono quindi rapidamente sostituiti da alcune formulazioni più chiare, tali che possano essere applicate direttamente a varie situazioni fisiche. Questo tipo di formulazione fu sviluppato sistematicamente per la prima volta da Clausius in una serie di scritti che apparvero tra il 1854 e il 1865¹⁵.

Le parole di Kuhn descrivono bene la difficoltà della nascente teoria termodinamica ad inserirsi nel quadro epistemologico e metodologico dato dal modello di scienza di Newton-Laplace. «In qualità di enunciati su ciò che non può succedere nella natura», questi principi non possiedono le caratteristiche essenziali per soddisfare all'ideale conoscitivo vigente che si identifica «nell'obiettivo della scoperta delle leggi necessarie e universali che determinano il corso degli eventi in ogni dominio della realtà, e permettono quindi di prevederlo mediante l'uso del formalismo matematico che lo rappresenta»[3]. Come afferma Kuhn, tra il 1854 e il 1865 Clausius si dedica ad una riformulazione in tal senso della termodinamica, riavvicinando quel modello di scienza diverso, che stava nascendo pochi decenni prima con i lavori di Carnot, al modello newtoniano.

I lavori che Clausius pubblica in questo periodo vengono raccolti nella prima edizione della *Teoria meccanica del calore*. Nel 1876 viene pubblicata la seconda edizione di questo lavoro che è il primo testo apparso in questo campo di ricerca e nella cui prefazione Clausius esplicita la necessità di continuare il lavoro di riformulazione da lui iniziato.

Furono proprio i lavori di Clausius a formare Planck come scienziato e a costituire il punto di partenza per le sue ricerche. Planck si imbatte in questo testo nel 1877, quando studia all'università di Berlino. Diciamo si imbatte perché, sebbene Clausius stesso avesse inteso la seconda edizione della sua *Teoria meccanica del calore* come un libro di testo, non esisteva a Berlino un tale corso e Planck, poco interessato dalle lezioni di Weierstrass, Kirchhoff e Helmholtz, legge da solo gli argomenti che più lo interessano, tra cui il principio di conservazione dell'energia, che l'aveva interessato fin da adolescente, e così arriva a studiare da autodidatta il lavoro di Clausius[11].

Nel 1879 Planck presenta la sua tesi di dottorato sul secondo principio della termodinamica, basata sul lavoro di Clausius, ma riformulandone ulteriormente l'approccio come vedremo.

Dopo aver riconciliato la teoria di Carnot con il principio di conservazione dell'energia, Clausius aveva proceduto sulla strada del rinquadramento della termodinamica nel modello newtoniano, ma facendo uso degli stessi sistemi termodinamici primari di cui si serviva Carnot, cilindri e pistoni ideali in interazione termica e meccanica con l'ambiente circostante e tutte le formulazioni che egli dette della Seconda Legge erano asserzioni sul funzionamento di questi sistemi quando compiono un ciclo chiuso, pervenendo alla formulazione della Seconda

¹⁵[8] p. 44

Legge che diede nel 1854:

$$\oint \frac{dQ}{T} \leq 0$$

Successivamente, nel 1865, considerò il valore su percorsi aperti reversibili dell'integrale $\int \frac{dQ}{T}$ introducendo per esso il simbolo S e il nome entropia:

$$S_1 = S_0 + \int \frac{dQ}{T}$$

Planck apprezzava «soprattutto la sua [di Clausius] formulazione esatta dei due principi della termodinamica, e la loro netta distinzione», tuttavia avvertiva la necessità di dare una formulazione più generale della Seconda Legge, intendeva, in qualche modo, elevarla allo status di assoluta validità che riconosceva al principio di conservazione dell'energia. Per Planck l'ipotesi a partire dalla quale Clausius aveva dimostrato la Seconda Legge necessitava ancora di una spiegazione, infatti, quando si tratti di un processo non spontaneo, non è chiaro cosa debba accadere per far passare calore da un corpo freddo ad uno caldo. Egli considerò, quindi, sistemi in isolamento termico e meccanico dall'ambiente circostante e, a partire dall'ipotesi che «il processo della conduzione del calore non può essere in alcun modo reversibile» diede alla Seconda Legge della Termodinamica la seguente forma:

$$S' - S \geq 0 \tag{1}$$

Planck considerava il suo modo di esprimere l'ipotesi sul trasferimento del calore «più semplice e più conveniente», poiché non richiedeva alcuna spiegazione aggiuntiva e preferiva la sua formulazione della Seconda Legge a quella di Clausius, perché, pur riconoscendone l'equivalenza matematica, considerava la sua più fondamentale.

Divideva i processi in processi neutrali (reversibili) e processi naturali (irreversibili) e la funzione della Seconda Legge, nella sua formulazione, era quella di determinare la direzione nella quale i processi naturali si sviluppano «in modo tale che un ritorno del mondo ad uno stato precedentemente occupato sia impossibile.»

In questa riformulazione della termodinamica è riconoscibile lo sforzo di riportarla nell'alveo del paradigma determinista meccanicista. Planck, infatti, pur non seguendo Clausius nel tentativo di caratterizzare il tipo di moto detto calore e nel cercare una spiegazione meccanica della Seconda Legge, opera due passaggi fondamentali in linea con l'ideale conoscitivo del modello newtoniano: considerando sistemi isolati si richiama ad una visione “meccanicista” della realtà, in cui i fenomeni, per essere compresi e prevedibili, devono essere sfrondati di tutte le accidentalità che si crede non ne alterino l'evoluzione, ma che li rendono complicati da studiare; la sua interpretazione della Seconda Legge, invece, si riconosce nell'obiettivo della scoperta di quelle leggi universali e necessarie di cui prima dicevamo.

Nei quindici anni successivi la sua ricerca procedette nella stessa direzione. La Seconda Legge così riformulata, si rivelava particolarmente adatta allo studio dell'equilibrio e dell'approccio di un sistema chiuso all'equilibrio. In un articolo intitolato *Evaporazione, fusione e sublimazione*, pubblicato tre anni dopo la tesi, Planck così si esprimeva:

Tutti i teoremi precedentemente enumerati sono strette conseguenze di una singola proposizione: l'equilibrio stabile corrisponde al massimo di entropia. Questa proposizione, a sua volta, discende da quella più generale che in ogni processo naturale la somma delle entropie di tutti i corpi compresi è aumentata. Applicata ai fenomeni termici questa legge è l'espressione più generale della Seconda Legge della Teoria meccanica del calore¹⁶.

Fino al 1887 i suoi scritti sono tutti dedicati a chiarificare la sua teoria, ad estenderla e ad applicarla a fenomeni quali la saturazione, le transizioni di fase e l'equilibrio, mentre dal 1887 al 1894 si dedica ad applicarla al nuovo campo della fisica chimica[12]. In tutti questi articoli è assente ogni riferimento all'interpretazione statistica di Boltzmann della Seconda Legge. Come abbiamo detto, l'utilizzo di metodi statistici non era affatto in contraddizione col paradigma di Newton-Laplace, ma Boltzmann aveva fatto del principio dell'incremento di entropia solo un aspetto molto probabile della natura e questo non si adattava per nulla all'ideale di Planck di legge assoluta, che certamente era più in linea col determinismo meccanicista, mentre l'interpretazione che Boltzmann dava della Seconda Legge vi apriva un'incrinatura.

Dopo questi primi 15 anni Planck inizia ad occuparsi del problema del corpo nero. In questi anni aveva ottenuto la cattedra di fisica matematica che era stata di Kirchhoff a Berlino, pertanto era sicuramente a conoscenza dei lavori di Boltzmann e Wienn che decretavano l'applicabilità della termodinamica al problema della radiazione nera. La radiazione nera è un fenomeno di equilibrio e come abbiamo detto la formulazione di Planck della Seconda Legge era particolarmente adatta a studiare tale tipo di fenomeno. Pertanto sembra del tutto naturale che, proseguendo sulla strada di ampliare le basi e il dominio di applicabilità della sua teoria, Planck si dedicasse allo studio della radiazione, aspettandosi gli stessi risultati che aveva ottenuto nell'applicarla alla chimica.

La Seconda Legge e la meccanica

Come abbiamo appena visto trattando dei primi anni di ricerca di Planck, egli era un convinto sostenitore della visione meccanicista del mondo e aveva lavorato per riportare la termodinamica nell'alveo di questa visione. La termodinamica godeva di una generalità e di una base empirica che la meccanica non riusciva ancora a spiegare [3], tuttavia, lo sforzo della fisica teorica, secondo Planck, doveva essere quello di «sviluppare le conseguenze ultime del punto di vista meccanicista per tutti i settori della fisica, della chimica e così via», come scrive nel 1887.

¹⁶cit. in [8] p. 49

Questa visione dei compiti della fisica teorica lo portò ad avere numerose riserve nei riguardi della teoria cinetica dei gas, soprattutto riguardo al significato da attribuire alla Seconda Legge. Quando intraprese il suo programma di ricerca sulla radiazione di corpo nero il suo scopo fondamentale era proprio quello di dare una spiegazione meccanica rigorosa della Seconda Legge. Era sua opinione, infatti, che questa non fosse in contraddizione con la meccanica, ma con la sua formulazione atomica. Nell'articolo del 1882 che abbiamo già citato, oltre a sottolineare come la sua formulazione della Seconda Legge fosse particolarmente adatta a studiare i fenomeni di equilibrio, Planck esprimeva queste sue riserve: «Se sviluppata in modo coerente, la Seconda Legge della Teoria meccanica del calore è incompatibile con l'assunto degli atomi finiti. [...] Tuttavia, un insieme di segnali attuali sembra indicarmi che la teoria atomica, malgrado il suo grande successo, dovrà alla fine essere abbandonata in favore dell'ipotesi di una materia continua». In una nota a questo passo, Planck richiama il brano della *Teoria del calore* di Maxwell in cui questi presentava il Demone selettore in grado di violare la Seconda Legge: per Planck una formulazione continua della meccanica poteva ovviare a questo che per lui era un paradosso, ritenendo il principio dell'incremento dell'entropia assolutamente valido al pari della prima legge [8]. Mentre in Inghilterra la visione di Maxwell di una Seconda Legge dalla verità statistica e, quindi, continuamente violata a livello microscopico viene accettata senza riserve e il problema abbandonato, nel continente è in atto un'aspra battaglia riguardo la questione dell'irreversibilità. Da una parte c'erano Clausius e Boltzmann, che, pur essendo dello stesso avviso di Maxwell, continuavano a studiare sistemi che mostrano un accordo non-statistico con la Seconda Legge, anche se solo Boltzmann dà effettivamente un'interpretazione statistica dell'irreversibilità; dall'altra gli energetisti che semplicemente negavano l'esistenza di processi irreversibili. Planck non accetta né questo punto di vista, né quello di Clausius e Boltzmann. La sua visione strettamente meccanicista non gli permetteva di accettare l'approccio statistico: Planck, infatti, considerava la Seconda Legge valida in maniera assoluta alla stregua della prima. Si trovava, così, nella strana condizione di essere perfettamente in linea con il quadro epistemologico che andava per la maggiore e allo stesso tempo solo nella sua ricerca.

Tornando all'articolo del 1882 possiamo scoprire le ragioni di queste riserve:

Esiste in natura una funzione (per la quale noi possiamo mantenere la denominazione di entropia data da Clausius) che è in continuo aumento, nel senso che la somma delle entropie di tutti i corpi che fanno parte di qualsiasi processo è più grande alla fine che al principio del processo. Si deve quindi riconoscere l'entropia come completamente determinata dallo stato di un corpo (e cioè, dalla totalità delle posizioni e delle velocità di tutte le sue parti)[...] Quei processi per i quali l'entropia è la stessa sia allo stato iniziale che a quello finale, per esempio i processi direttamente reversibili, costituiscono un caso limite. In realtà, comunque, questi tipi di processi non si realizzano mai, ma devono essere presi in considerazione

come una idealizzazione¹⁷.

In questo passaggio si riconoscono i punti salienti del pensiero di Planck riguardo alla Seconda Legge. È una legge deterministica, in quanto l'entropia è determinata dallo stato di un corpo ed «è in continuo aumento»; si riconosce l'impianto meccanicista nel ricondurre l'entropia alle posizioni e alle velocità delle parti costituenti il corpo, rendendo inoltre l'irreversibilità, che è il nucleo della Seconda Legge, microscopica. Per tanto, una spiegazione accettabile della Seconda Legge, per Planck, deve essere una spiegazione meccanica di tipo microscopico dell'irreversibilità ed è proprio questo che un'interpretazione statistica non riesce a fare.

A questo punto abbiamo visto che sin dal 1882, quindi ben prima di dare avvio al suo programma di ricerca sul corpo nero, le posizioni di Planck riguardo alla Seconda Legge e alla sua interpretazione statistica erano ben definite e dettate, in ultima istanza, da un'aderenza totale al paradigma meccanicista. Queste posizioni si radicalizzeranno negli anni successivi anche grazie a dei confronti diretti con Boltzmann e soprattutto Planck indirizzerà la sua ricerca verso quei campi che egli crede gli permetteranno di trovare «un significato meccanico rigoroso per la Seconda Legge».

Abbiamo prima accennato all'idea di Planck che la Seconda Legge fosse in disaccordo non con la meccanica, ma con la sua formulazione atomica. Andare più nel dettaglio di queste considerazioni ci permetterà di meglio comprendere le convinzioni che spinsero Planck ad intraprendere il programma di ricerca sulla radiazione nera. In una materia concepita come una collezione di masse compatte non esistono moti disordinati, al contrario il moto è strettamente intercollerato su piccole distanze, per tanto, all'apertura del foro controllato dal Demone di Maxwell, l'energia può trasferirsi solo dal corpo più caldo, dove il moto delle particelle è più violento, al corpo più freddo, dove lo è meno. La possibilità, quindi, di violare la Seconda Legge a livello microscopico era così annullata. Planck non rese mai del tutto esplicite queste sue considerazioni, che sono ipotizzate da Kuhn. Ciò che dà corpo a queste ipotesi sono le idee che Helmholtz esprimeva sulla meccanica del continuo in alcune sue lezioni del '77 che Planck aveva seguito come attestano alcuni suoi appunti. Queste ipotesi, seppure in un contesto mutato, si ritrovano nei lavori di Planck quando inizia ad occuparsi del problema del corpo nero: per lui, l'elettromagnetismo sarà un particolare tipo di meccanica del continuo.

Il programma di ricerca sul corpo nero

Come e perché Planck si avvicini al problema del corpo nero è un dilemma privo di soluzione, un cruccio di scarso interesse o una semplice banalità a seconda di come si valuti la questione.

Nel marzo del 1895 Planck presentò un articolo all'Accademia delle Scienze che

¹⁷*Ibid.*

prendeva in esame il problema della diffusione di radiazione incidente da parte di un dipolo oscillante di dimensioni piccole rispetto alla lunghezza d'onda. Leggendo il paragrafo conclusivo dell'articolo, quello che sembrava essere un drastico cambiamento negli interessi dello scienziato, appare invece essere un lavoro preliminare per affrontare il problema della radiazione di corpo nero. Il vero problema di suo interesse era la termodinamica della radiazione e quindi quest'articolo rappresentava solo l'inizio di un ulteriore passo nel programma di Planck [11].

E' opinione di Kuhn, invece, che sin da questo primo lavoro Planck avesse in mente la possibilità di derivare l'irreversibilità da fenomeni conservativi o, per usare le parole dello stesso Planck, «la riduzione della variazione unidirezionale ad effetti conservativi», obiettivo che tuttavia egli rende esplicito solo nel 1897. Tuttavia, come fa notare sempre Kuhn, «l'enfasi su una teoria del corpo nero che tratti di "processi conservativi" (nel senso tutto particolare che il termine assume in Planck) appare nel primo scritto sull'elettromagnetismo, pubblicato nel 1895»[8].

Leggendo l'Autobiografia Scientifica di Planck, ci si presenta una terza possibilità. Egli scrive:

La mia attenzione fu quindi richiamata ben presto verso un altro problema, che mi avrebbe dominato e spinto verso molte ricerche differenti per un tempo assai lungo. Le misure fatte da Otto Lummer ed Ernst Pringsheim nell'Istituto tedesco di Fisica tecnica durante lo studio dello spettro termico rivolsero la mia attenzione alla legge di Kirchhoff[. . .]. Questa distribuzione "normale" dell'energia spettrale rappresenta qualcosa di assoluto; e poiché io avevo sempre considerato la ricerca di qualcosa di assoluto come lo scopo più elevato di tutte le attività scientifiche, mi misi attivamente al lavoro. Trovai un metodo diretto per risolvere il problema nell'applicazione della teoria elettromagnetica della luce di Maxwell¹⁸.

Alla luce di queste affermazioni, sembrerebbe che a spingerlo verso questo problema, che sembra egli veda come altro rispetto ai suoi lavori precedenti, sia stata quella "ricerca di qualcosa di assoluto" che pare abbia animato la sua intera attività. Tuttavia poche righe dopo fa riferimento alla speranza che lo stato stazionario fosse raggiunto grazie alla capacità dei risonatori di esercitare effetti unilaterali sul campo, speranze che vennero demolite dalle critiche di Boltzmann, e lascia quindi pensare che solo in un secondo momento, riprendendo il problema da capo, avesse fatto ricorso alla termodinamica. Scrive ancora, riguardo a questo secondo tentativo:

I miei studi precedenti sul secondo principio della termodinamica mi furono di grande aiuto, e fin dall'inizio mi gettai sull'idea di porre in relazione non la temperatura, ma l'entropia dell'oscillatore con la sua energia¹⁹.

¹⁸[10] pp. 22-23

¹⁹*Ibid.* p. 24

Quest'ultima visione della cosa sembra essere inquinata dalle necessità di chiarezza espositiva e di linearità di un'opera autobiografica, che richiede il disegno di uno sviluppo storico lineare rintracciabile solo a posteriori.

D'altra parte, la versione di Kuhn sembra un po' forzata e tesa a voler dare un indirizzo ben definito al procedere di Planck nella sua attività di ricerca, finalizzandola alla sola questione dell'irreversibilità e al dibattito con Boltzmann.

Senza voler dare un giudizio di merito, ci pare utile assumere qui un punto di vista vicino a quello esposto da Klein: ipotizzare, cioè, che l'articolo del '95 sia un lavoro preliminare al programma sul corpo nero, motivato dall'interesse di Planck ad estendere la termodinamica alla radiazione e che solo nell'articolo del febbraio seguente egli manifesti di essersi accorto dell'importanza che quel lavoro poteva avere per la questione per lui fondamentale dell'irreversibilità e della Seconda Legge, tenendo presente, però, che le sue convinzioni riguardo ai fenomeni irreversibili possano aver giocato un ruolo nello scegliere l'approccio al problema della radiazione nera, così come la sua affannosa ricerca di qualcosa di assoluto l'abbia potuto guidare a questo problema.

Un primo tentativo

Analizziamo ora, in sintesi, i lavori preliminari di Planck e il programma che egli espone nel 1897.²⁰

Nell'articolo del 1895 Planck definisce il suo risonatore senza resistenza, come quella corrente oscillatoria che ammette come soluzione delle equazioni di Maxwell un treno d'onde sferiche di velocità c e lunghezza d'onda λ , che si espande dall'origine, dove è collocato il risonatore stesso. Nell'articolo successivo chiamerà questo "campo secondario". L'energia all'oscillatore è fornita da un treno d'onde piane polarizzate, che chiamerà "campo primario". In condizioni di equilibrio il risonatore emette tanta energia quanta ne assorbe e il flusso netto attraverso una superficie intorno all'origine deve essere uguale a zero. In queste condizioni riuscì a calcolare il rapporto fra le ampiezze della radiazione primaria e della radiazione secondaria, dimostrando che non dipende dalla struttura del risonatore, cioè dalla sua costante di smorzamento, ma solo dalla lunghezza d'onda. Concludeva poi l'articolo esplicitando che questo lavoro gli era stato suggerito dallo studio dei processi di radiazione all'interno di un mezzo meccanico e dichiarando che l'indipendenza del rapporto tra le ampiezze dalla struttura delle "particelle emittenti" da lui trovato poteva essere la ragione della legge di proporzionalità tra le capacità di emissione e assorbimento di Kirchhoff.

Nell'articolo successivo, Planck rilassa le ipotesi particolari che aveva fatto nel primo e riesce a scrivere un'equazione differenziale per il momento di dipolo dell'oscillatore, ottenendo quello che ritiene un risultato importante perché «permetteva di semplificare tutto il problema, sostituendo all'energia della radiazio-

²⁰Non avendo potuto analizzare i testi originali facciamo riferimento a quanto di questi riportato in [8].

ne l'energia dell'oscillatore, e quindi, a una struttura complicata, che possedeva molti gradi di libertà, un sistema semplice a un solo grado di libertà.»

Le equazioni che Planck riesce a derivare in quest'articolo, come fa notare Kuhn, hanno una certa asimmetria rispetto al tempo, fatto che probabilmente gli fa sperare di poter dimostrare l'irreversibilità. Egli infatti scrive a conclusione dell'articolo «Lo studio dello smorzamento conservativo mi sembra essere di grande importanza, dal momento che apre la prospettiva di una possibile spiegazione generale dei processi irreversibili attraverso forze conservative».

Un anno più tardi, nel febbraio del 1897, comunicò all'Accademia la prima parte di quella che sarà una serie di scritti composta di cinque parti intitolata *Sui fenomeni irreversibili di radiazione*. In questa prima parte, che si presenta come l'esposizione del suo programma, presentava il suo modello di corpo nero, rappresentato da un sistema di uno o più risonatori in interazione con un campo e dichiarava l'obiettivo del suo programma come quello di riuscire a dimostrare l'irreversibilità da fenomeni conservativi e di ottenere delle importanti conclusioni sulla forma della funzione universale di Kirchhoff.

Il programma di Planck era, quindi, quello di riuscire dove la teoria cinetica dei gas aveva fallito, come del resto spiega egli stesso:

Senza dubbio, la teoria cinetica dei gas ha affrontato il compito di spiegare l'approccio all'equilibrio termico-meccanico [...] in termini di effetti conservativi, vale a dire come il risultato finale di tutte le collisioni tra le numerose molecole che, concepite come punti, interagiscono attraverso forze conservative. Ma uno studio più accurato [dovuto a Zermelo] fa vedere che i moti molecolari supposti dalla teoria cinetica dei gas non sono in nessun senso unidirezionali, e che, in maniera del tutto generalizzata, qualsiasi stato che sia esistito una volta, nel corso del tempo si verificherà con una frequenza talmente 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 [non meccanica] aggiuntiva²¹.

Per andare più a fondo nel dibattito riguardo alla possibilità di derivare l'irreversibilità da processi conservativi, analizzeremo ora una lettera che Planck scrive al suo amico Leo Graetz agli inizi del 1897, entrando nel merito della diatriba tra Zermelo e Boltzmann.

Riguardo al punto più importante sono dalla parte di Zermelo, in quanto ritengo che sia del tutto senza speranza il [cercare di] derivare la velocità di processi irreversibili [...] in un modo realmente rigoroso dalla teoria del gas contemporanea.[...] Il calcolo delle probabilità può servire, se non si sa nulla in anticipo, per determinare lo stato più probabile. Ma non può invece servire, se viene dato uno stato [iniziale] più probabile, per calcolare lo [stato] seguente. Ciò è determinato non dalla probabilità, ma dalla meccanica.²²

²¹cit. in [8] p. 139

²²cit. in [8] p. 62

Per Planck, quindi, appare del tutto privo di fondamento il tentativo di Boltzmann, in quanto non può essere la probabilità a determinare la direzione in cui un sistema si evolverà. L'aderenza al determinismo meccanicista è totalmente evidente in questo passo: la probabilità può servire "se non si sa nulla in anticipo", ma sono le leggi della meccanica a determinare l'evoluzione di un sistema. La spiegazione dell'irreversibilità, quindi, doveva essere meccanica e derivata da fenomeni conservativi. Il perché di quest'ultima affermazione lo spiega Planck stesso nell'articolo del 1896, in cui scrive:

Il principio di conservazione dell'energia richiede che tutti gli eventi naturali siano in definitiva analizzabili nei cosiddetti effetti conservativi [...] Le forze non conservative, d'altro canto [...] non sono elementari in natura, dal momento che esse non soddisfano in maniera indipendente il principio dell'energia.[...]

D'altra parte, il principio dell'incremento di entropia insegna che tutti i mutamenti in natura procedono in una direzione. Quando, per esempio, un sistema è isolato rispetto al suo spazio circostante, allora, dopo un tempo più o meno lungo, si deve instaurare una condizione dalla quale il sistema non si sposterà in alcun caso finché le condizioni esterne rimangono invariate.

Da questa contraddizione prende origine il compito fondamentale della fisica teorica, la riduzione di un mutamento unidirezionale ad effetti conservativi.²³

Questo che egli vedeva come il compito fondamentale della fisica teorica era lo scopo ultimo del suo programma.

Sempre nello stesso articolo Planck rivela ciò che lo aveva spinto a pensare di poter riuscire in questa impresa.

Credo di dover riconoscere come processo unidirezionale costituito da effetti del tutto conservativi l'influenza di un risonatore che vibra senza attrito o resistenza sull'onda che lo eccita²⁴.

Planck era conscio del fatto che le equazioni di Maxwell fossero invarianti per inversione temporale, tanto quanto le equazioni della meccanica, ma egli vedeva negli effetti prodotti da un risonatore sul campo la possibile rottura di questa simmetria. Per esempio, il fatto che il risonatore emettesse un'onda sferica, assorbendone una piana, era, per lui, una chiara manifestazione dell'unidirezionalità di questi effetti, come il fatto che un risonatore potesse eliminare le fluttuazioni del campo rispondendo lentamente alle eccitazioni. La speranza di ricavare la forma della funzione di Kirchhoff dal suo modello di corpo nero, invece, era riposta sul fatto che un risonatore, a causa dello smorzamento radiativo, potesse interagire attraverso il campo solo con risonatori su frequenze contigue, alterando in questo modo la distribuzione della lunghezza d'onda della radiazione.

²³cit. in [8] p. 64

²⁴*Ibid.*

Il primo modello di corpo nero di Planck era rappresentato da una sfera conduttrice al centro della quale si colloca un risonatore. In assenza di risonatori Planck definisce un campo libero attraverso una funzione potenziale sviluppata in serie di Fourier di periodo T , supponendo che contribuiscano al campo solo i coefficienti più alti della serie, cioè quelli corrispondenti a lunghezze d'onda piccole rispetto alla cavità. Sempre in assenza di risonatori calcola la funzione che descrive l'irraggiamento di energia al di fuori della sfera, tenendo le stesse restrizioni sui coefficienti di Fourier anche di questa serie. Nell'equazione da lui ottenuta per l'irraggiamento con quest'approssimazione si evidenzia un termine lentamente variabile ed uno velocemente variabile. Applicando i soliti argomenti sulle medie, Planck fa vedere che i termini velocemente variabili non contribuiscono a determinare l'irraggiamento e così ottiene una formula ulteriormente ridotta, che rappresenta l'intensità lentamente variabile di un campo che varia rapidamente nel tempo. La prima parte della serie non andava oltre.

A questo punto possiamo notare che Planck, scartando i termini rapidamente variabili, ha operato la stessa distinzione che nella teoria dei gas si fa tra grandezze macroscopiche e grandezze microscopiche e tenendo solo le prime, così come in teoria dei gas dato che le grandezze microscopiche non sono misurabili, ha legato alle prime l'irreversibilità. Una concessione fondamentale allo schema di Boltzmann, che tuttavia non è reso esplicitamente.

Il programma di Planck era ambizioso, ma se fosse riuscito a portarlo a termine così come lo aveva concepito, avrebbe concluso il lavoro sulla termodinamica iniziato da Clausius, avrebbe posto fine alla discussione sull'irreversibilità, demolendo tanto le visioni degli energetisti, quanto l'interpretazione statistica di Boltzmann, risolvendo le contraddizioni apertesi nel quadro del determinismo meccanicista, che ne sarebbe invece uscito completo e rinnovato.

Il teorema- H elettromagnetico

Questo programma viene direttamente attaccato da Boltzmann, che, quattro mesi dopo la presentazione di Planck, fa notare, in un'esposizione alla Accademia, che le equazioni che Planck aveva ottenuto erano inservibili per gli scopi dichiarati, in quanto erano invarianti per inversione temporale anche in presenza di un oscillatore.

Nella seconda parte, presentata nel luglio del 1897, Planck non aggiunge nulla di nuovo, liquidando le obiezioni come semplici equivoci che si sarebbero chiariti in seguito. Le tecniche derivate da Planck nella prima parte, le applica nella terza, presentata alla fine del 1897, alla cavità con il risonatore al centro. Usando le equazioni per il momento di dipolo dell'oscillatore che aveva ricavato negli articoli precedenti, trova una serie di Fourier per il momento di dipolo in funzione del tempo. Applicando poi le stesse tecniche usate per il campo primario al campo totale ottiene nuove formule per l'intensità del campo, che sono della stessa forma. L'equazione che ottiene è composta di due termini, entrambi delle sommatorie, uno costante ed uno variabile nel tempo. A questo punto Planck,

per dimostrare che l'intensità del campo tende irreversibilmente all'equilibrio, sostiene che il termine variabile deve essere sempre trascurabile rispetto a quello costante o che, alternativamente, se questo fosse grande all'istante iniziale, diventasse piccolo all'interno del periodo T e poi rimanesse tale. Perché questo accada, ammette Planck, sono necessarie delle ipotesi sulle condizioni iniziali della radiazione, in particolare sul "disordine" che deve regolare le fasi con cui varia il termine non costante. Senza menzionarlo, Planck è stato costretto a seguire l'indicazione di Boltzmann, tuttavia chiude questa terza parte senza approfondire oltre l'argomento:

Probabilmente sono anche possibili i casi in cui le costanti di fase possiedono valori tali che il processo di radiazione è disordinato all'inizio ma appare ordinato nei momenti successivi. In queste circostanze, l'intensità di radiazione sarebbe costante all'inizio, per poi essere soggetta a notevoli variazioni nel seguito. Che tale processo realmente si verifichi o meno in natura dipende dalla natura dello stato iniziale²⁵.

Probabilmente Planck sperava ancora di poter determinare in qualche modo la necessità che lo stato iniziale fosse della natura adatta e poter così dimostrare l'irreversibilità, senza ricorrere alla statistica.

La quarta parte, presentata nella metà del 1898, si apre con il chiarimento dell'ipotesi da fare sulla natura dello stato iniziale. L'obiettivo principale del suo programma, cioè una dimostrazione dell'irreversibilità attraverso fenomeni conservativi senza alcuna ipotesi particolare sulle condizioni iniziali, era fallito. L'ipotesi di "radiazione naturale" che è stato costretto ad inserire è una versione elettromagnetica del caos molecolare di Boltzmann. Fatta questa ipotesi l'intero lavoro di Planck è una riedizione elettromagnetica del Teorema- H , di cui ripercorre i passaggi fondamentali.

L'argomentazione di Planck per spiegare l'irreversibilità diventa statistica e fondata su un'ipotesi particolare in tutto simile al disordine molecolare, nella versione priva di interpretazione microscopica come detto nel capitolo su Boltzmann. Planck sostituisce le grandezze che variano rapidamente con i loro valori medi, che invece variano lentamente, ma perché questo sia possibile, le grandezze reali possono discostarsi dai loro valori medi solo modestamente e, soprattutto, in maniera irregolare. Planck chiama tutti i tipi di radiazione che si adattano a tali ipotesi "radiazione naturale" e solo per questa la teoria è valida.

Da questo punto in poi la derivazione di Planck riprende come in precedenza, cercando ora, però, una relazione che leghi l'energia del risonatore all'intensità fisica (mediata) del campo, anziché a quella reale. Si trova, cioè, nella stessa condizione di Boltzmann che, avendo mediato su tutti gli urti possibili, può calcolare la funzione di distribuzione. Planck può così produrre una prova (non una spiegazione) dell'irreversibilità, produrre una funzione entropia del campo elettromagnetico in analogia alla funzione H e dedurre da questa la distribuzione d'equilibrio.

²⁵cit. in [8] p. 145

Il primo passaggio di questa derivazione viene sviluppato nella quarta parte, mentre gli altri due li espone nella quinta, presentata all'Accademia nel 1899, completando, in un qualche senso, il suo programma di ricerca sul corpo nero. Rimaneva nella sua derivazione solo una certa arbitrarietà nella scelta della funzione entropia. Non era, infatti, stato in grado di dimostrare l'unicità di questa funzione. L'aveva introdotta con una definizione ed aveva mostrato che soddisfaceva le proprietà richieste, ma, per quanto riguarda l'unicità, non v'erano delle prove, ma solo delle argomentazioni euristiche su base termodinamica²⁶.

Nel 1900, quando pubblica i suoi articoli sugli *Annalen*, Planck farà ricorso alle tecniche combinatoriali di Boltzmann per derivare la funzione entropia, anziché definirla, legando definitivamente questa alla probabilità. Il ricorso alle tecniche combinatoriali è dovuto al fatto che misurazioni più accurate hanno dimostrato che la legge di Wien non era in accordo con i dati sperimentali a basse frequenze. Per trovare una nuova formula che riproduca bene i dati sperimentali, pur continuando ad usare la termodinamica come strumento euristico, Planck deve estremizzare e rendere esplicito il ricorso alle argomentazioni probabilistiche alla Boltzmann.

Sebbene sembrerebbe questo il momento in cui Planck abbandona la visione fenomenologica della termodinamica, e della Seconda Legge, in favore di un approccio statistico, quanto abbiamo visto in precedenza ci fa affermare che questa "conversione" era già avvenuta almeno quando stava preparando la quarta parte della sua serie *Sui fenomeni irreversibili elettromagnetici*. Ciò che accade dopo, e che porterà alla nascita della teoria dei quanti, deriva dall'aver condotto alle estreme conseguenze l'approccio di Boltzmann, chiudendo gli occhi sul problema dell'irreversibilità e affidandosi ai risultati sperimentali come unico metro di giudizio.

L'ipotesi di radiazione naturale e la scomparsa della freccia del tempo

Come abbiamo detto all'inizio dell'ultimo paragrafo, chiedersi come e perché Planck abbia dato inizio al programma di ricerca sul corpo nero, potrebbe sembrare privo di senso, come potrebbe sembrare privo di senso chiedersi quale era la reale posta in gioco nello scontro tra le diverse visioni del mondo che si sono confrontate negli ultimi decenni del XIX secolo e le ragioni delle sconfitte e delle vittorie. Se infatti si vede la scienza come un processo lineare di accumulazione di saperi la cui capacità di rappresentare la realtà naturale cresce al crescere dei dettagli della conoscenza, come vuole l'attuale pensiero dominante, non c'è nessun motivo di chiedersi come la scienza sceglie i suoi problemi e classifica le sue priorità. Se invece assumiamo un punto di vista diverso, tentando di far nostro ciò che Cini esprime chiaramente in *Un paradiso perduto*, intendendo, cioè, la

²⁶Si può notare comunque già una certa somiglianza tra la forma adottata in questo caso da Planck e quella della definizione probabilistica di entropia

storia della scienza come «un aspetto particolare della storia umana», queste domande diventano essenziali: le uniche, forse, che abbiano un senso.

Il programma di ricerca che inizia Planck nel 1895, e che terminerà cinque anni dopo, era fondato, come suggerisce Cini, su una scala di priorità che vedeva la termodinamica al primo posto, per la sua generalità e per l'ampio campo di validità che lo stesso Planck aveva contribuito ad estendere, seguita dall'elettromagnetismo e dalla meccanica. Ma il compimento del suo programma di ricerca, in positivo dal punto di vista dei riscontri empirici, decreta la morte della termodinamica per come essa era nata qualche decennio prima con Carnot e il fallimento dei suoi sostenitori.

Planck, con l'introduzione dell'ipotesi di "radiazione naturale" e il ricorso ai metodi statistici, si richiama direttamente al lavoro di Boltzmann, conservandone, peraltro, l'approccio riduzionista nella sua schematizzazione del corpo nero. In questa operazione, la termodinamica gli serve prima come strumento euristico, laddove lo stringente formalismo matematico non riesce a produrre prove dirette, e come giustificazione stessa del suo operato, poi solo come strumento euristico, essendo costretto a ricorrere, nell'articolo del 1900, ad argomenti probabilistici come giustificazione del suo lavoro sull'entropia. Nel fare questo, però, si disinteressa totalmente, a differenza di Boltzmann, ad un'indagine accurata degli strumenti usati. Accetta l'ipotesi di "radiazione naturale" senza preoccuparsi di dedurne le effettive conseguenze, come invece facevano Boltzmann e gli altri con l'ipotesi del disordine molecolare, accontentandosi dell'aderenza della teoria ai dati sperimentali. Ma può fare questo perché il problema che richiedeva una più accurata analisi di queste assunzioni era scomparso dal campo. Il problema dell'irreversibilità, cioè dell'approccio irreversibile all'equilibrio di un sistema, non aveva più interesse per lui e presto, con l'apparire dei quanti, cesserà di averne per la maggior parte dei fisici. Questa svolta, che si dà effettivamente con i lavori successivi di Planck, ma che è stata preparata e resa possibile dalla conclusione del suo programma di ricerca sul corpo nero, è una svolta radicale che darà vita alla nuova fisica. La nuova fisica nasce con, e forse nasce anche grazie alla scomparsa della "freccia del tempo".

Fu un radicale cambio di punto di vista le cui conseguenze non hanno investito solamente il linguaggio della fisica e il suo assetto epistemologico. Uno sguardo anche solo fugace allo stato attuale delle cose ci può dare una misura di quest'affermazione. Scrive sempre Cini:

[Lo] stato deplorabile dell'attuale nostra capacità di controllo ambientale, di utilizzazione delle risorse energetiche e naturali, di coordinamento e di gestione degli ecosistemi misti (naturali-artificiali) che costituiscono il mondo in cui viviamo [...] è anche (ovviamente non soltanto) conseguenza della detronizzazione della termodinamica dal ruolo epistemologico preminente che essa ebbe negli ultimi decenni del secolo scorso²⁷.

Ovviamente, quello ambientale, non è che uno degli aspetti del problema.

²⁷[3] p. 218

Per non concludere

Scrive Marcello Cini in *Un paradiso perduto* [3]:

La conoscenza scientifica ci offre una spiegazione del mondo fisico che è necessariamente mediata dalle risorse culturali disponibili, le quali a loro volta non sono in alcun modo definitive. [...] La scelta tra proposte alternative di sviluppo di una data disciplina viene sempre compiuta dalla comunità dei suoi cultori sulla base di *metacriteri* esterni alle regole che ne definiscono il linguaggio formalizzato²⁸.

Quando perciò avviene un mutamento radicale nel pensiero scientifico, sono proprio questi *metacriteri* ad essere messi in discussione, modificati o forse sostituiti:

Il mutamento dei criteri *metateorici* da parte delle comunità scientifiche per caratterizzare l'immagine delle rispettive discipline e preservarla nel corso dei successivi sviluppi non è frutto arbitrario del caso o del capriccio. Al contrario, questi criteri formano come un tessuto che ha trama e ordito. Da un lato, infatti, [...] ogni singola disciplina ha una storia che la costringe a conciliare i mutamenti del proprio linguaggio programmatico con alcuni elementi irrinunciabili di continuità con l'immagine tradizione. Dall'altro, la sollecitazione a mantenere questo linguaggio in sintonia con il contesto sociale e con l'immagine della scienza nel suo complesso interiorizzata degli stessi scienziati produce anche una correlazione diretta o indiretta fra i mutamenti dei linguaggi delle diverse discipline²⁹.

Il caso particolare qui preso in esame può essere considerato come un antefatto o un'anticipazione del mutamento di linguaggio avvenuto con la nascita della fisica quantistica ed era già stato scelto dagli autori dell'articolo *Sviluppo e crisi del meccanicismo, da Boltzmann a Planck* [13] come episodio significativo attraverso il quale «caratterizzare [...] gli elementi fondativi dello scontro *culturale, ideale e politico*³⁰, che sta oggettivamente dietro ogni mutamento radicale del pensiero scientifico». Questa chiave di lettura aveva condotto G. Ciccotti ed E. Donini ad asserire che la “storia interna”, «come meccanismo di spiegazione delle trasformazioni della teoria e della pratica scientifica» è insufficiente, mentre gli strumenti dell'analisi storica permettono di conseguire una comprensione

²⁸[3] p. 200,210

²⁹*Ibid.* p.217

³⁰corsivo nostro

maggiore. La tesi esplicitamente sostenuta, in diretto riferimento alla teoria marxista, afferma che

un ambiente selezionato – la comunità scientifica – raccogliendo gli stimoli che provengono dall’ambiente esterno alla comunità, [può] tradurli in una proposta scientifica di conoscenza della natura, coerente alle esigenze dei rapporti di produzione dominanti nella società [13].

Conseguentemente per gli autori, che perseguono «una teoria della riappropriazione della ricerca scientifica e dei suoi risultati a precise finalità di classe», ciò che è essenziale è

discutere se la scienza si sia sviluppata e si sviluppi in un arricchimento – oggettivamente progressivo – di conoscenze, pur subordinate a fini distorti; oppure se le successive sistematizzazioni siano connesse in modo essenziale a scelte ideologiche indotte dalle finalità storico-sociali e ne portino quindi in sé tutti i segni di classe.

Nell’analisi da loro sviluppata è messo in evidenza come il problema del corpo nero, trattando di equilibrio termico e radiazione, contenesse in sé le due problematiche centrali della fisica di fine ’800: «da un lato, il rapporto tra termodinamica e meccanica statistica; dall’altro, [...] la questione dell’esistenza dell’etere e, più in generale, del rapporto tra fenomeni ondulatori e meccanica.» Boltzmann aveva introdotto la possibilità di discretizzare l’energia per calcolare la probabilità di uno stato e si era occupato del corpo nero ricavando con Stefan la legge di proporzionalità che lega l’intensità della radiazione emessa alla quarta potenza della temperatura. Ciononostante, di fronte al problema ancora aperto della “distribuzione spettrale di energia” egli non adopera lo strumento che aveva appena messo appunto e che lo avrebbe condotto alla soluzione. Al contrario, si disinteressa al problema, lasciando sia Planck – che pure non nutriva alcuna fiducia nei metodi statistici – a ricorrervi. Ma se per Boltzmann la discretizzazione di una grandezza conosciuta come continua rappresentava un puro strumento di calcolo, la cui legittimità era vincolata alla possibilità di tornare al continuo attraverso un’operazione di limite che lasciasse il risultato inalterato, Planck ha un atteggiamento più spregiudicato. Ricercando per una formulazione compatta e semplice, è disposto ad ignorare totalmente il problema dell’interpretazione e, di fronte all’impossibilità di far tendere a zero le unità in cui aveva discretizzato l’energia, introduce – pur senza averne minimamente consapevolezza – un’innovazione: una nuova concezione del rapporto tra teoria fisica e strumenti di calcolo permessi. Se dunque Planck non avesse scelto di dare priorità assoluta al problema del corpo nero, è opinione degli autori di quest’articolo che la fisica dei quanti non si sarebbe sviluppata all’inizio del secolo scorso. Esistevano infatti molte altre possibilità: se fosse stata accordata priorità maggiore allo sviluppo del formalismo della meccanica statistica, probabilmente già da allora avrebbe potuto nascere una “teoria ergodica” per la quale si sono dovuti invece attendere gli anni ‘60 e ‘70 del XX secolo. La meccanica classica «può essere utilizzata

per spiegare certi “fatti” ritenuti in generale indizio inconfutabile dell’indispensabilità dell’ipotesi quantistica», ma «certe potenzialità esplicative di cui pure sono maturi gli strumenti, non sono praticate proprio perché muta il criterio di ciò che è significativo o rilevante per la scienza» [13]. Se nel nostro lavoro abbiamo chiarito – o almeno abbiamo tentato di farlo – i motivi individuali delle scelte di priorità di Planck e Boltzmann, Ciccotti e Donini sostengono però che per comprendere cosa abbia determinato la sconfitta di Boltzmann è necessario spostarsi su di un altro piano, quello storico appunto, e domandarsi quale fosse il significato dello scontro in atto: «occorre confrontare tra loro le diverse finalità sociali cui i diversi programmi scientifici sono in grado di rispondere.»

In Germania, alla fine del XIX si confrontavano tre posizioni principali: quella della meccanica statistica di Maxwell e Boltzmann, la scuola energetica di Helm e Ostwald e la nascente fisica teorica di Planck. Nello scontro tra meccanicismo ed energetica si contrapponevano due diversi modi di intendere la funzione ed i compiti della scienza. L’energetica, facendo capo al filone positivista e considerando quindi la natura come manifestazione dello spirito unitario, assegnava massima priorità all’unità dei principi e perseguiva l’abolizione di ogni struttura esplicativa a fondamento materialista. Per i seguaci di questa scuola il compito della teoria scientifica è ridotto a quello di classificare i fenomeni per sistemarli secondo le relazioni che li collegano. Nella costruzione delle teorie, sul criterio dell’efficienza esplicativa, prevale l’aspetto mistico-estetico al punto che l’inadeguatezza del Primo Principio della Termodinamica a spiegare i processi irreversibili non è considerata rilevante. Questa tendenza nell’articolo citato viene identificata come “conservatrice” e liquidata in quanto storicamente destinata ad essere sconfitta. In un altro contesto, avrebbe però potuto rappresentare una proposta interessante, come chiarisce Cini [3]:

la prospettiva degli energetisti e dei termodinamici era quella di sviluppare una scienza fenomenologica dotata di grande flessibilità interpretativa e forte potere di unificazione dei diversi aspetti della realtà naturale, ma al tempo stesso caratterizzata da una debole capacità predittiva a livello dei dettagli di ogni singolo fenomeno specifico. Uno sviluppo di questa scienza sarebbe stato possibile in un contesto socioeconomico e tecnico-produttivo in cui la conoscenza delle proprietà globali, degli aspetti sistemici, delle interconnessioni reciproche della realtà naturale e sociale fosse stata di interesse prevalente rispetto a quello dell’investigazione dettagliata della struttura e dei meccanismi interni di alcuni particolari frammenti di realtà [...] ³¹

Secondo Boltzmann, al contrario, è necessario affrontare e risolvere i problemi di interpretazione e previsione, anche utilizzando strumenti nuovi, ma non al prezzo di compromettere l’unità del quadro concettuale e quindi la possibilità di raggiungere una comprensione profonda dei fenomeni. Boltzmann non si è limitato a formulare una teoria, si è anche questionato profondamente sulle im-

³¹[3] p. 218

plicazioni dei risultati che aveva ottenuto e delle loro condizioni di validità, in particolare in connessione con la questione cosmologica della “Morte Termica” di Clausius [9]: nel suo pensiero è rintracciabile una tensione alla globalità ed alla coerenza fuori dal comune. Filosoficamente adotta un punto di vista materialista ed attribuisce massima priorità alla comprensione delle cose per come le percepiamo, piuttosto che non a svelare ciò che si nasconde dietro le apparenze e che le nostre facoltà limitate ci impediscono di comprendere [14]. A suo avviso questo tipo di interrogativi sono solo frutto di domande mal poste dovute alla pretesa degli scienziati di assolutizzare “le leggi del pensiero”, le quali in verità non sono altro che un prodotto dell’evoluzione al pari di ogni altra caratteristica della specie umana [15]. Boltzmann aspira a «liberare l’umanità da quel mal di testa chiamato metafisica» e quest’obiettivo, quantomeno molto ambizioso, non ammette compromessi: la comprensione è il vero fine, la previsione solo lo strumento di verifica. Lo stadio di sviluppo raggiunto dalla meccanica statistica alla fine del XIX secolo non era però adeguato a rispondere alle necessità del sistema socioeconomico.

L’alternativa fornita dagli atomisti e da B. in particolare aveva pregi e difetti opposti [alla termodinamica]. Il potere concettualmente unificante delle leggi universali della meccanica newtoniana era infatti del tutto illusorio di fronte all’impossibilità di dedurre da esse, mediante procedura matematicamente corretta, previsioni dettagliate ed attendibili per ogni fenomeno specifico ³²

La teoria cinetica non era infatti in grado di spiegare fatti sperimentali quali lo spettro di corpo nero, ritenuto fondamentale tanto sul piano teorico quanto su quello pratico applicativo. Per Planck invece «Il proposito è quelli di aumentare al massimo l’efficienza esplicativa della teoria, a costo di spezzare questa in una miriade di costrutti e teorie parziali tra loro indipendenti o addirittura contraddittorie». Quest’interpretazione dell’attività scientifica di Planck, anche se in contraddizione con le convinzioni personali di questi che – come si è visto – ricercava perennemente per qualcosa di assoluto, può trovare piena giustificazione all’interno del pensiero del fisico tedesco. Benché Ciccotti e Donini sostengano che “la ricerca dell’assoluto” fosse solo un’istanza estranea alla sua attività scientifica, operante solo sul piano soggettivo, proponiamo qui un’altra ipotesi: è infatti possibile che proprio quest’ossessione per una legge assoluta abbia indotto Planck ad accettare compromessi per altri – Boltzmann in primis – inaccettabili, purché fosse fatto salvo qualcosa, qualunque cosa e magari ogni volta qualcosa di diverso, la cui validità fosse completamente indipendente dall’uomo.

Il primo *metacriterio* a modificarsi in questo passaggio è quello della semplicità, che viene a collocarsi su di un piano diverso:

Nella tradizionale concezione boltzmaniana il criterio di semplicità implica che debba essere semplice ed universale la legge dinamica al livello

³²[3] p. 218-219

elementare, al costo di ottenere una formulazione complicata ed approssimata della descrizione di ogni fenomeno [...], per Planck invece, e dopo di lui per la comunità dei fisici, importa che sia semplice da descrizione dei fenomeni, anche a costo di rinunciare ad una formula semplice della legge elementare ³³

Senza averne consapevolezza, Planck venne quindi incontro alle necessità del sistema economico tedesco che attraversava in quegli anni una fase di imponente industrializzazione. Dal settore produttivo provenivano pressioni affinché fossero lasciate cadere le contrapposizioni teoriche generali per affrontare le questioni poste dallo sviluppo tecnologico, anche quando molto particolari. Contemporaneamente nel campo dell'istruzione si tendeva all'allargamento del reclutamento e allo sviluppo dell'istruzione tecnica, richiedendo alla scienza di lasciare che il suo *corpus* si frammentasse per consentire la diffusione di una formazione specialistica, acquisibile in tempi rapidi [13]. Questa volta la fisica teorica si trovava a fronteggiare nuove spinte disgregative provenienti dall'ambiente esterno – secondo modalità tutte da indagare – e né la *Naturphilosophie* né il positivismo potevano più essere lo strumento idoneo a salvaguardarne l'unità. Le cose ad ogni modo avrebbero potuto andare diversamente se – come spiega Cini – non fossero state tirate conclusioni troppo affrettate, ad esempio, sulla validità generale del principio di equipartizione dell'energia, in realtà tutta da verificare:

[...] se nel 1900 fosse stato disponibile il teorema dimostrato nel 1954 da Kolmogorov che forma condizioni assai stringenti perché un sistema dinamico sia in grado di spartire ugualmente tra tutte le sue componenti l'energia totale posseduta ad una data temperatura, ci si sarebbe accorti che il sistema di oscillatori della cavità non sempre soddisfa a queste condizioni. Tanto che, come è stato dimostrato recentemente, non è indispensabile l'ipotesi dei quanti di Planck per dedurre lo spettro delle frequenze della radiazione di corpo nero in accordo con le curve sperimentali. La tacita assunzione fatta allora che l'equipartizione dell'energia è una proprietà del tutto generale, portò invece ad adottare la soluzione di Planck come l'unica in grado di spiegare *subito* la discrepanza esistente tra teoria ed esperimento ³⁴.

In mancanza di una via d'uscita alternativa, questa scelta appariva come l'unica che

[...] permetteva di affrontare, sia pure a costo di rinunciare al quadro unificante della dinamica newtoniana, i numerosi rompicapo che lo sviluppo delle tecniche sperimentali andava accumulando, senza dovere, da una lato, attendere l'elaborazione a lunga scadenza di tecniche matematiche difficili ed elaborate, e dall'altro, rinunciare a quella concezione riduzionistica della realtà che sta [...] alle basi stesse della scienza moderna ³⁵.

³³[3] p.220

³⁴[3] p. 219

³⁵[3] p. 220

In conclusione, possiamo concordare con quanto affermato in *Sviluppo e crisi del meccanicismo*:

Non sono state le difficoltà interne allo sviluppo della meccanica statistica ad imporre una rivoluzione di concetti fondamentali in fisica. È stata invece la nascita di un'esigenza socialmente diffusa di semplificazione e frammentazione dell'attività scientifica a favorire questa rivoluzione, che comportava anche un aumento del potere predittivo della teoria [13].

Questo punto di vista è forse però ancora parziale, in quanto basato su una suddivisione gerarchica dei livelli di realtà che vede al primo posto il livello dei modi di produzione e da questo fa discendere ogni trasformazione di qualsiasi altro aspetto del reale. Si dovrebbe in effetti «riconoscere che una svolta nella storia della cultura (e la scienza non è che una delle sue componenti) è il frutto della concomitanza di condizioni sociali favorevoli e di proposte di innovazioni “convincenti”.»

Di questa concomitanza Planck è un protagonista inconsapevole, mentre Boltzmann, che rifiuta di accettare acriticamente uno stato di necessità ma «aveva compreso che per superare la crisi (soprattutto dei compiti istituzionali della ricerca scientifica) occorre realizzare una mediazione tra vecchio e nuovo» [13], ne è tagliato fuori. È comunque possibile che le «domande poste dall'incalzare dei problemi pratici ed ideali nella vita degli individui e della collettività»³⁶ che Cini menziona non si esaurissero a quelle del sistema economico. Tra «le nuove domande che nascono dall'evoluzione del tessuto sociale»³⁷ è facile pensare ce ne fossero di diverse che non hanno potuto giocare un ruolo determinante. Da un lato, infatti, Boltzmann non può rintracciarle poiché «si riferisce alla società come un tutto e non tiene conto delle contraddizioni di classe»³⁸ in essa presenti, che generano contrapposte finalità» [13]; dall'altro, le soggettività sociali eventualmente portatrici di istanze differenti non hanno in quel contesto modo di relazionarsi direttamente con la cultura e la comunità scientifica, dalle quali sono in larga parte escluse. Si tratta ovviamente di una semplice possibilità, che qui avanziamo come ipotesi plausibile senza avere i mezzi necessari per sostenerla e che probabilmente non aveva, in ogni caso, alcuna speranza di realizzarsi. «Del resto questi problemi [...] non erano maturi all'epoca di Boltzmann.» [13]

³⁶Marcello Cini nella prefazione a [16]

³⁷ibid.

³⁸forse non solo di classe

Bibliografia

- [1] Giorgio Israel. Il determinismo meccanico ed il suo ruolo nelle scienze. In *Caso. Necessità. Libertà (Seminari AA. 1997-1998)*. CUEN, 1998.
- [2] Ludwig Boltzmann. Sull'indispensabilità dell'atomismo nella scienza. In *Modelli matematici fisica e filosofia*. Universale Bollati Boringhieri, 1897.
- [3] Marcello Cini. *Un paradiso perduto*. Feltrinelli, 2004.
- [4] K. von Meyenn. Dynamical and statistical conceptions in Boltzmann physics. In *Proceedings of the international symposium on Ludwig Boltzmann*, 1989.
- [5] D. Levermore. Revival of kinetic theory by Clausius (1857-1858).
<http://www.math.umd.edu/lvrmr/History/Revival.html>
- [6] D. Levermore. New foundations laid by Maxwell and Boltzmann (1860-1872).
<http://www.math.umd.edu/lvrmr/History/Foundations.html>
- [7] D. Levermore. Irreversibility (1867-1875).
<http://www.math.umd.edu/lvrmr/History/Irreversibility.html>
- [8] Thomas S. Kuhn. *Alle origini della fisica contemporanea. La teoria del corpo nero e discontinuità quantica*. Il Mulino, 1981.
- [9] D. Levermore. Molecular chaos and determinism (1890-1894).
<http://www.math.umd.edu/lvrmr/History/MolecularChaos.html>
- [10] Max Planck. Autobiografia scientifica. In *La conoscenza del mondo fisico*. Universale Bollati Boringhieri, Saggio Postumo.
- [11] M. J. Klein. Thermodynamical and quanta in Planck's work. *Physics Today*, 19(11), 1963.
- [12] H. Kangro. Planck, max karl ernst ludwig. *Enciclopedia delle Biografie Scientifiche*.
- [13] E. Donini G. Ciccotti. Sviluppo e crisi del meccanicismo. Da Boltzmann a Planck. In Feltrinelli, editor, *L'ape e l'architetto. Paradigmi scientifici e materialismo storico*. Feltrinelli, 1976.

- [14] Ludwig Boltzmann. Il secondo principio della teoria meccanica del calore. In *Modelli matematici fisica e filosofia*. Universale Bollati Boringhieri, 1886.
- [15] Ludwig Boltzmann. Sulla meccanica statistica. In *modelli matematici fisica e filosofia*, Universale Bollati Boringhieri, 1903.
- [16] Tito Tonietti. *Catastrofi. Il preludio alla complessità*. edizioni dedalo, 2002.