

messa e il fondamento di quanto possiamo chiamare la « forma dell'esperienza ». Già nel confronto delle varie e disparate teorie empiriche si vede che nel loro succedersi non regna il disordine o l'arbitrio ma una continuità metodica. Le teorie posteriori non si limitano a soppiantare e respingere le precedenti ma assorbono in sé il contenuto di quelle. La teoria einsteiniana della gravitazione non è sorta da un crollo del sistema astronomico newtoniano ma da un suo perfezionamento che ha permesso di includere nell'ambito della spiegazione anche fenomeni che la teoria precedente non era riuscita a spiegare. Il moto del perielio di Mercurio, ad esempio, non vi figura più come un caso particolare, come una anomalia spiegabile solo con assunti speciali introdotti *ad hoc*, ma come una proprietà generale delle orbite ellittiche planetarie rigorosamente deducibile in via teorica, quand'anche nel caso degli altri pianeti questa rotazione sia troppo piccola per l'osservazione diretta. Allo stesso modo la teoria della relatività generale pone concettualmente in una luce affatto nuova quella eguaglianza tra la massa pesante di un corpo e la sua massa inerte, che prima era nota e assodata come semplice fatto d'esperienza: tale eguaglianza, come ha detto Einstein, non viene più solo registrata ma interpretata³. In questa oscillazione continua si dimostra e si conferma la natura della « forma mobile » — di una forma che non riceve né include in sé passivamente la materia, ma ne va in cerca e in virtù di tale ricerca la foggia e la organizza.

Ho premesso queste note d'ordine generale perché ci possono servire nel valutare quella trasformazione dello schema causale che subentra nella fisica più recente. Neppure tale trasformazione è arbitraria ma ha luogo « sotto la pressione dell'esperienza ». Ma a questa pressione corrisponde una « pressione contraria » da parte della teoria; ed azione e reazione cercano anche qui

³ EINSTEIN, *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie* [cfr. trad. it. Calisse, Bologna 1921], § 19.

di equilibrarsi. Se nella fisica odierna tale equilibrio sia già raggiunto, resta indeciso — ma come compito, come fine metodico generale esso è ben certo. In questa direzione volgono anche la genesi e lo sviluppo graduale del problema. Se domandiamo quali siano stati i problemi e i fenomeni particolari che hanno avviato il processo di pensiero in proposito, ci vediamo indirizzati alle questioni che hanno trovato la loro espressione teoretica nel secondo principio della termodinamica. Questo principio è emerso in un primo momento da singole esperienze ben determinate. Il trattato fondamentale di Sadi Carnot *Sur la puissance motrice du feu* (1824), che ha aperto la via al secondo principio, si pone un problema speciale nettamente limitato, che muove da interessi tecnici. Esso ricerca il rendimento-in-lavoro del calore e stabilisce che ogni rendimento siffatto è legato al passaggio di calore da un corpo più caldo a uno più freddo. Con l'introdurre il concetto limite di « processo ciclico reversibile » per determinare il massimo rendimento termico, Carnot ha creato al tempo stesso un nuovo strumento teoretico che si è dimostrato sommamente fecondo nel prosieguo. Ma la portata affatto generale del problema venne in luce solo quando Clausius avanzò il concetto fondamentale di entropia ed enunciò il principio per cui l'entropia cosmica tende a un massimo. Qui noi prescindiamo di proposito da quelle conseguenze del principio di Clausius che hanno condotto alle note speculazioni filosofiche sulla « morte termica del mondo ». Molto più significativi di tali speculazioni, sfociate non di rado in confuse conclusioni metafisiche, si dimostrano i nuovi « momenti » gnoseologici che il principio di Clausius celava in sé. Dal secondo principio e dalle considerazioni teoriche connessevi il pensiero scientifico si vide condotto a una differenza fondamentale entro l'accadere naturale, differenza che nel sistema della meccanica classica non aveva trovato nessuna espressione adeguata. Ora spiccava a chiare note l'antitesi fra processi « reversibili » e processi « irreversibili ». Si delinea-

va una direzione dell'accadere naturale nel suo complesso, una certa tendenza che esso porta in sé immutabilmente. Nella formula di Clausius per l'aumento dell'entropia questo fatto fondamentale trova un'espressione esatta ma è ancora ben lontano dall'essere « compreso » in senso proprio. Per questa sua comprensione occorre che il fatto fosse dedotto dai principi fondamentali della conoscenza fisica o per lo meno apparisse senz'altro compatibile con essi. Ma sulle prime da tali principi nessuna via sembra condurre al secondo principio della termodinamica. Ci tocca riconoscere quest'ultimo nella sua validità fattuale senza poterlo dedurre per via teorica, anzi senza poterlo neppure rappresentare in senso stretto, se ci atteniamo alle premesse generali fin qui vigenti nel sistema della natura. Le equazioni differenziali della meccanica classica qui non offrono alcun punto d'appoggio né di avvio; secondo esse il corso dell'accadere si può invertire col semplice dare il segno contrario alle velocità dei singoli punti materiali. Un qualche aspetto o elemento che rinvii alla caratteristica determinatezza di direzione dell'accadere che si esprime nel fatto della dispersione dell'energia, non si può mostrare neppure nelle equazioni maxwelliane dell'elettrodinamica. E così nel sistema tanto saldamente connesso della meccanica e dell'elettrodinamica classiche il principio dell'entropia resta una specie di residuo irrazionale, un estraneo e un intruso.

Ma proprio a questo punto interviene di nuovo la « reazione » autonoma della teoria, subentra un lavoro di pensiero che è significativo nell'aspetto gnoseologico come in quello proprio della fisica. È il lavoro compiuto dalla teoria cinetica dei gas, in sostanza legato al nome di Ludwig Boltzmann. Boltzmann riesce a eliminare il carattere estraneo e paradossale del principio dell'entropia. Egli è uno dei più coerenti rappresentanti della meccanica classica; pertanto deve imprendere il tentativo di inquadrare il fenomeno della « unilateralità » [*Einseitigkeit*] dell'accadere naturale della meccanica e renderlo concepibile a partire dai

concetti fondamentali di essa. E il tentativo riesce in quanto Boltzmann dà una nuova interpretazione alla « preferenza della natura » per un determinato stato. Un'inversione dell'accadere sarebbe compatibile coi principi meccanici e con quello di conservazione dell'energia, ma Boltzmann mostra che e perché essa è enormemente improbabile. « Il fatto che nella natura l'entropia tenda a un massimo, prova che in ogni interazione di gas reali (diffusione, conduzione termica, ecc.) le singole molecole interagiscono secondo le leggi della probabilità »⁴. Il primo a dare questa interpretazione del secondo principio come principio probabilistico era stato Gibbs, che su di essa aveva fondato la nuova scienza della meccanica statistica⁵; Boltzmann le dà la forma esatta con l'equazione in cui l'entropia risulta proporzionale al logaritmo della probabilità ($S = k \log W$).

Con questa visione tuttavia, nel riguardo puramente gnoseologico, l'enigma non era ancora sciolto ma solo posto in modo tanto più stringente. La soluzione di Boltzmann infatti era riuscita solo grazie all'introdurre una nuova specie di legalità fisica da affiancare alle leggi « dinamiche » vigenti fin qui, come una loro pari. Ma i principi probabilistici su cui egli fondava la teoria cinetica dei gas, non hanno la stessa qualità e « dignità » gnoseologica fin qui attribuita alle leggi di natura. Come carattere fondamentale di ogni legge di natura fin qui si era vista la necessità ad essa intrinseca: una necessità che escludeva ogni eccezione. Ma quando passiamo a leggi di sola probabilità, proprio questo tratto va sacrificato. Un evento anche improbabile non è un evento impossibile: non solo può aver luogo ma in genere, se estendiamo la nostra osservazione

⁴ BOLTZMANN, *Vorlesungen über Gastheorie*, Leipzig 1896, vol. I, § 9, p. 60.

⁵ Ulteriori particolari in proposito nella memoria di BOLTZMANN, *Statistische Mechanik in Populäre Schriften*, Leipzig 1905, p. 345 ss., come pure nell'articolo di MAX VON LAUE, *Statistische Physik in Handwörterbuch der Naturwissenschaften*, 2^a ed., vol. IX, p. 537 ss.

a un periodo di tempo abbastanza lungo, essa avrà luogo per davvero. Donde si vede che con l'attribuire la legge dell'entropia alla probabilità la dottrina dei principi propria della fisica ha introdotto nel concetto stesso di legge un dualismo del tutto estraneo al suo significato originario. Tale dualismo è illustrato dall'immagine del « demone di Maxwell », un demone in grado di invertire la direzione dell'accadere cosmico e di abolire così il principio dell'entropia senza violare alcuna legge dinamica, senza andare né contro le leggi della meccanica né contro il principio di conservazione dell'energia. I nuovi problemi qui imponentisi si fondano su ciò: che nelle impostazioni probabilistiche della teoria cinetica dei gas non abbiamo più a che fare con un enunciato intorno al comportamento delle singole particelle ma per noi conta solo quello che risulta complessivamente da tutti i singoli moti delle molecole per il gas come intero. Qui ci limitiamo fin da principio a certi valori medi, come la velocità media, il numero medio degli urti per molecola al secondo, il tratto medio di « cammino libero » delle molecole, dai quali tuttavia si può dedurre esattamente il comportamento complessivo del gas e si possono ottenere dati precisi intorno alla sua pressione, densità, calore specifico ecc. Il che sta a provare la fecondità empirica della teoria cinetica dei gas; ma permane intatto il problema gnoseologico che essa cela in sé. Infatti proprio la circostanza che siano possibili enunciati a raggio così vasto su un tutto fisico rinunciando alla conoscenza delle singole parti, nella prospettiva della pura meccanica di punto, suona paradossale e comporta una trasformazione dell'ideale di conoscenza da essa fin qui perseguito.

In Boltzmann questa trasformazione non spicca ancora nettamente perché il compito che egli si pose consisteva appunto nel ristabilire la piena armonia fra meccanica e termodinamica rendendo intelligibile il secondo principio a partire da premesse meccaniche. Quindi i campi di applicazione di leggi statistiche e di leggi dinamiche per lui

restavano semplicemente separati anche dopo l'introduzione del concetto di probabilità. Il punto di vista statistico interveniva solo nella formulazione delle condizioni iniziali, mentre il decorso ulteriore dell'accadere resta dominato completamente da rigide leggi dinamiche, dalle leggi di conservazione dell'energia e dell'impulso nell'urto delle molecole. Dalle equazioni del moto vigenti per le molecole l'« unilateralità » del processo stabilita dal secondo principio non era rilevabile, perché esse non mutano se diamo al tempo il segno contrario. Essa dunque si doveva cercare esclusivamente nelle condizioni iniziali, il che tuttavia non è da intendere come se per ogni esperimento si dovesse assumere di nuovo in via speciale il sussistere di queste condizioni ben determinate e non delle condizioni opposte, altrettanto possibili. Bastava piuttosto « un'assunzione unitaria di fondo sulla natura iniziale del quadro meccanico dell'universo », donde poi viene da sé con necessità logica che in ogni interazione di corpi ha luogo un passaggio da uno stato ordinato improbabile a uno stato non ordinato « probabile »⁶.

Certo, se si segue lo sviluppo della teoria cinetica dei gas, si vede che l'ideale gnoseologico perseguito da Boltzmann non vi ha trovato una realizzazione completa. Infatti le diverse parti componenti che entrano nella teoria, non si poterono mai sostenere le une accanto alle altre del tutto senza attrito. I risultati empirici che la teoria raggiunse — riuscendo ad esempio a determinare con rigorosa esattezza le funzioni di stato del calore specifico, del coefficiente di conduzione termica e di attrito interno (= viscosità), ecc. — furono tanto straordinari quanto poco il progresso sul piano dei principi tenne il passo con quello empirico. Nei fondamenti della teoria continuarono a risultare certe difficoltà e oscurità che si potevano espungere solo a stento con l'introduzione di speciali assunti

⁶ Cfr. BOLTZMANN, *Vorlesungen über Gastheorie* cit., vol. II, § 87, p. 251 ss.