

ERNST CASSIRER

3

DETERMINISMO
E INDETERMINISMO
NELLA FISICA MODERNA

Presentazione di
GIULIO PRETI



« LA NUOVA ITALIA » EDITRICE
FIRENZE

I^a edizione: ottobre 1970

Titolo originale dell'opera:

Determinismus und Indeterminismus in der modernen Physik
Elanders Boktryckeri Aktiebolag, Göteborg 1937

Traduzione di

GIAN ANTONIO DE TONI

PRINTED IN ITALY

© 1937 by Elanders Boktryckeri Aktiebolag, Göteborg
& 1970 by « La Nuova Italia » Editrice, Firenze

PRESENTAZIONE

Ernst Cassirer, l'illustre filosofo e storico della filosofia morto a New York nel 1945 (era nato a Breslavia nel 1878), non ha certo bisogno di essere presentato al pubblico italiano. Molte delle sue opere principali, sia di carattere storico sia di carattere teoretico, sono già state tradotte in italiano. La Nuova Italia ne ha già pubblicate le tre grandi opere storiche: La filosofia dell'Ulluminismo (1935), Individuo e cosmo nella filosofia del Rinascimento (1935), La rinascenza platonica in Inghilterra e la scuola di Cambridge (1947); e recentemente ha ultimata l'edizione italiana della sua massima opera teoretica, la Filosofia delle forme simboliche (3 voll. [5 tomi], 1961-1966). Einaudi ha fatto l'edizione dell'altra sua grande opera teoretica-storica, Das Erkenntnisproblem in der Philosophie und Wissenschaft der neueren Zeit con il titolo di Storia della filosofia moderna (4 voll., rist. 1954); e Longanesi ne ha pubblicato il Saggio sull'Uomo (1948).

Cassirer dunque ci è già noto e come storico della filosofia — uno storico geniale, finissimo, originalissimo, anche se (o forse proprio per questo) a volte discutibile, e di fatto molto discusso; e come filosofo teoretico, filosofo dalla vasta gamma di interessi: della conoscenza, della scienza, della cultura, dell'arte, etc. Due attività, del resto, che nel suo particolare storicismo (che richiama quello di altri neokantiani contemporanei — per esempio, da noi, del Banfi) si fondono tanto intimamente da essere difficilmente separabili. Il lettore trova in tutte le sue opere teoretiche una vasta parte storica, non accademicamente accettata, ma parte integrante nello svolgimento stesso delle idee; e in ogni sua

opera storica, anche in quelle piú apparentemente erudite, dei precisi interessi teoretici, anzi una tesi teoretica da sostenere. Questo soprattutto per quanto riguarda la filosofia moderna: come molti altri neokantiani, Cassirer sente profondamente l'unità del pensiero moderno — unità avente il suo perno o centro appunto in Kant, considerato come il punto d'arrivo della storia del pensiero moderno dalla « rivoluzione copernicana » in poi, e come la matrice di tutta la problematica del pensiero contemporaneo.

Abbiamo così caratterizzato, peraltro in maniera inevitabilmente generica (come sono tutte le etichette), il pensiero di Cassirer come « kantiano ». Piú precisamente, si tratta di quel tipo di neokantismo che si suole chiamare della « scuola di Marburg » — della quale fu l'iniziatore H. Cohen, ma il maggior rappresentante P. Natorp. Un neokantismo che sviluppa l'eredità di Kant in senso razionalistico-critico, d'altra parte con decise tendenze storicistiche di palese origine hegeliana, in largo contatto (e, naturalmente, anche in polemica) con altre correnti analogamente razionalistiche e critiche, come la fenomenologia e il neopositivismo.

La struttura mentale e il fondo teoretico del pensiero di Cassirer lo collocano senz'altro in questa scuola, accanto al suo quasi-coetaneo N. Hartmann: ma, come quest'ultimo, in una posizione alquanto indipendente. Cassirer è immune dal pesante scolasticismo kantiano, dal gusto per la « deduzione », dal sistematicismo a volte alquanto dogmatico e mistificante che caratterizzano le opere di H. Cohen e, sebbene in misura minore, anche quelle di P. Natorp; e per quanto piú vecchio di età, è in un certo senso piú « moderno », piú sensibile al complesso movimento della scienza e della filosofia contemporanee (europee e anglosassoni) che non N. Hartmann. Soprattutto, sottolineiamolo (e la sottolineatura viene a proposito trattandosi qui della presentazione di un'opera di filosofia della scienza), molto aperto al movimento della scienza contemporanea, alle sue crisi successi-

ve e all'effettiva portata scientifica e filosofica di tali crisi; ma anche molto attento, pur senza aderirvi, alla sistemazione logica ed epistemologica che i gruppi di Vienna e di Berlino venivano tentando, sulla base delle esperienze storiche e delle implicazioni teoretiche di tali crisi, della filosofia della scienza.

La stessa massima opera teoretico-sistemica del Nostro, la Filosofia delle forme simboliche, nasce, come egli stesso ebbe a dichiarare, da uno sviluppo e da un approfondimento critico di precedenti indagini sulla filosofia della scienza, le indagini raccolte nel volume Substanzbegriff und Funktionsbegriff (1910), e d'altra parte culmina in una « fenomenologia del conoscere » che è un'esposizione delle forme del pensiero scientifico; e così con un capitolo dedicato alla scienza termina il Saggio sull'Uomo, mentre l'ultima parte dell'Erkenntnisproblem è dedicata esclusivamente al pensiero scientifico contemporaneo.

Ed è proprio dalla filosofia della scienza, dalle riflessioni epistemologiche di Hertz e di Helmholtz, che Cassirer prese lo spunto per quella nozione fondamentale e centrale della sua filosofia che è la nozione di " forma simbolica ". Hertz aveva affermato che « il procedimento di cui essa [la scienza] si serve per dedurre il futuro dal passato consiste in questo, che noi ci facciamo degli oggetti esteriori " simulacri o simboli " tali che le conseguenze idealmente necessarie delle immagini siano sempre a loro volta le immagini delle conseguenze naturalmente rappresentate »¹. Questa teoria epistemologica, secondo Cassirer, porta al superamento dell'antica concezione del « rispecchiamento »: « al posto di una pretesa " somiglianza " di contenuto tra immagine e cosa è subentrata l'espressione di un rapporto logico estremamente complesso, una universale " condizione " intellettuale alla quale devono soddisfare i concetti fondamentali della conoscenza fisica »².

¹ E. CASSIRER, *Filosofia delle forme simboliche*, vol. I, Firenze, La Nuova Italia, 1961, p. 6.

² *Ibid.*, pp. 6-7.

La sfera del simbolo si interpone, per così dire, tra il pensiero e l'esperienza, o meglio tra l'esperienza e l'esperienza: e in questa mediazione simbolica le esperienze acquistano ordine razionale, connessione. La stessa oggettività, come, anzi tutto, « costituzione dell'oggetto », è mediata dal sistema di simboli.

Questo fatto ha per Cassirer un'importanza grandissima. Esso rompe l'immagine tradizionale del mondo come costituito di oggetti sostanziali, di un unico piano dell'essere, di un unico livello a cui si pongono tutte le conoscenze e tutti i problemi. Invece sono possibili sistemi multipli di simboli, e ciascuno di essi costituisce gli oggetti secondo il reticolato categoriale diverso, cioè secondo diversi nessi « oggettivi », secondo diversi « significati ».

Di qui quella concezione che secondo Cassirer stesso costituì la sua più grande scoperta filosofica. « Il mondo del conoscere (della scienza) non esaurisce la sfera d'azione del simbolo ». In ogni campo della cultura — arte, religione, mito, etc. —, oltre che in quello della scienza, si operano processi simbolici, ciascuno con forme, strutture, connessioni, leggi ed esigenze sue proprie. Tra ciascuna di queste forme della cultura resta un'invincibile diversità categoriale, e quindi oggettiva: ma tutte hanno in comune questo, di essere tutte forme simboliche. Alla veneranda definizione dell'uomo come animal rationale Cassirer sostituisce la sua nuova definizione: l'uomo è animal symbolicum (la ragione stessa è processo simbolico).

Di qui l'orientamento, affatto moderno, che rivolge il fuoco dell'attenzione filosofica sul linguaggio. Certo, non si può attribuire a Cassirer la concezione della filosofia per cui questa si riduce ad « analisi del linguaggio »; ed è anche vero che egli, per quanto (soprattutto nel Saggio sull'Uomo) tenga conto di molte ricerche moderne sul linguaggio, non fa mai dell'analisi del linguaggio in uno qualunque dei sensi che oggi può avere una tale espressione. Tuttavia ha in comune con il fronte compatto della filosofia di oggi proprio la chiara consapevolezza dell'importanza del linguaggio, del-

le sue strutture formali, delle sue regole, nella costituzione di ogni interpretazione culturale dell'esperienza (e nella costituzione dell'« esperienza » stessa).

Cassirer presenta così una versione molto moderna del kantismo: in un certo senso, anche più moderna di quelle di uno Hartmann o di un Banfi. Tuttavia (agli occhi di chi segue oggi indirizzi di pensiero meno tradizionali) i limiti della sua filosofia restano quelli di un kantiano-hegeliano: di un procedere che è ancora troppo storicistico, e ancora troppo mentalistico; di un trapassare troppo rapido dai piani della riflessione pragmatica culturale a quelli della riflessione filosofica; il che, tra l'altro, conduce spesso ad accostamenti tra posizioni filosofiche arcaiche e posizioni contemporanee che non possono non lasciare perplessi.

Tuttavia oggi è un momento particolarmente opportuno per leggere, o rileggere, Cassirer: il suo piano di ricerca è ridivenuto attuale. L'epistemologia vera e propria segna il passo: dopo la sua splendida fioritura nei decenni immediatamente precedenti, tra il '30 e il '50 (circa), forse a causa del suo stesso rapidissimo sviluppo, essa appare come esaurita. Non che, di fatto, appaia erronea o « superata » — al contrario: ma è giunta ai suoi limiti. Al di là dei quali si apre una problematica che, a detta degli stessi epistemologi più esperti, come uno Hempel, come un Quine, appartiene propriamente alla filosofia — in primo luogo, naturalmente, alla filosofia della scienza (in quanto distinta dall'epistemologia, sebbene connessa con questa). E qui i punti di vista, i metodi, i concetti direttivi di Cassirer hanno ancora molto da insegnarci: come il lettore potrà vedere in questo bel saggio sul Determinismo e indeterminismo che per la prima volta vede la luce in veste italiana.

A differenza di altri neokantiani, come filosofo della scienza Cassirer è particolarmente aperto all'epistemologia contemporanea, in particolare a quella di marca neopositivistica (o empiristico-logica): ne cita spesso gli autori (fino al 1936, naturalmente), ne assume spesso posizioni

e risultati. Ma trasvalutandoli da un punto di vista trascendentalistico: il che oggi, per le ragioni cui abbiamo accennato sopra, può essere utile e istruttivo — per lo meno, una via da tentare.

Quello che negli empiristi logici è convenzionale, in Cassirer diventa trascendentale; quello che là è schema sintattico o semantico, qui diventa categoria, in un senso chiaramente derivato da Kant. Però, come contropartita, la « metafisica della mente » che, ahimè, indubbiamente era presente e operante nei sacri testi di Immanuel Kant, qui viene in gran parte eliminata, o per lo meno attenuata. Quelle che in Kant erano le forme a priori — con l'equivoco inerente a questo termine « a priori », formanti un sistema unico ed eterno dell'intelletto e della ragione come « facoltà della mente » (umana) — in Cassirer divengono « simboli » o sistemi di simboli, attualmente e possibilmente molteplici, storicamente variabili, caratterizzati dall'operare (non « essere ») come funzioni metodologico-trascedentali.

È questa, appunto, la posizione da cui muove Cassirer nelle sue ricerche di epistemologia e filosofia della scienza. Questa posizione era già operante nei suoi primi scritti, prima ancora che fosse giunto alla cosciente elaborazione del suo concetto di « simbolo » e alla conseguente fenomenologia delle forme simboliche.

Come accenna lo stesso Cassirer nella Prefazione della presente opera, i suoi scritti principali e più strettamente teoretici di filosofia della scienza costituiscono una trilogia: Substanzbegriff und Funktionsbegriff (1910), Zur Einsteinschen Relativitätstheorie (1921) e l'attuale Determinismus und Indeterminismus in der modernen Physik (1937). Il primo era dedicato all'analisi della formazione dei concetti nelle scienze matematiche e naturali: ma in quell'epoca la teoria della relatività e la fisica quantistica erano ancora ai loro inizi, e perciò l'autore aveva avuto di mira, nelle sue ricerche storiche e teoriche, esclusivamente la struttura teorica della fisica classica del Sette ed Ottocento. Ma lo sviluppo e il successo delle dottrine einsteiniane lo spinsero ad esami-

nare la situazione teorica della teoria della relatività (speciale e generale). Poi, la più grande rivoluzione (almeno stando alle apparenze) introdotta nel campo dell'epistemologia dall'ultima rivoluzione della fisica, quella quantistica, lo ha indotto a riprendere il problema in Determinismus und Indeterminismus.

Ora, già in Substanzbegriff und Funktionsbegriff, anche se allora Cassirer non era ancora giunto pienamente a formulare la sua filosofia delle forme simboliche, appariva chiara la funzione di « simboli », ossia la funzione metodologico-trascendentale, dei concetti più teorici e astratti (categorie) della scienza. I concetti scientifici non sono « astratti » (induttivamente) dall'esperienza, bensì sono formule che funzionano come regole mediante cui i particolari possono venir rappresentati come serie di elementi identificabili in una reciproca connessione conforme a una legge. Ma questo è un processo dinamico, che non solo si estende nel suo campo di azione (i fenomeni), bensì si ripete, per così dire, a diversi livelli logici. Così le misure fisiche e le leggi di natura devono venire a loro volta unificati, e a questo scopo si richiedono « costanti di ordine superiore », ossia concetti e leggi ad un ulteriore livello di astrazione — le quali però rielaborano tutto il sistema secondo nuovi punti di vista unitari, trasvalutando gli stessi concetti metrici e le stesse leggi del primo livello.

Di qui l'idea, che però verrà sviluppata soprattutto in Determinismus und Indeterminismus: le categorie della scienza rappresentano un ulteriore, terzo, livello teorico: un livello però in cui i simboli non portano più, mediatamente o immediatamente, sull'esperienza, ma sugli stessi simboli scientifici di livello inferiore — su determinazioni di misure e leggi empiriche (1° livello) e principii o assiomi teorici (2° livello): non aggiungono alcun contenuto nuovo omogeneo e integrante rispetto ai precedenti enunciati di livello inferiore, ma costituiscono condizioni (regole) per l'unità sistematica dei contenuti empirici e teorici (e sul loro nesso).

In questo senso le categorie non sono piú, come per Kant, forme immobili di una immobile « coscienza in generale », bensì funzioni logiche (simboliche) unitarie « funzionali » — funzionali entro il concreto storico del sapere, e relative ai contenuti e ai livelli di astrazione teorica raggiunti dal sapere stesso.

In Substanzbegriff la categoria di « sostanza » veniva ridotta ad una categoria piú generale e fondamentale, quella di « funzione » o « correlazione funzionale »: ed in tal modo veniva, mi si permetta l'espressione, dis-ontologizzata e intesa nella sua essenza categoriale, ossia come trascendentale (o meglio, metodico-trascendentale). Lo stesso procedimento Cassirer usa nella presente opera a proposito della categoria di « causa » e della correlativa concezione « deterministica » della scienza.

Il principio di indeterminazione e quello di complementarietà sembrano aver messe in crisi le nozioni classiche di « determinismo » e « causalità ». Filosofi, divulgatori, fisici in vena di fare i filosofi, si sono affrettati a proclamare il fallimento del determinismo, e con ciò del materialismo, della fisica sette-ottocentesca; hanno voluto credere e far credere che fosse un « risultato » della fisica la restaurazione del liberum arbitrium indifferentiae di medievale memoria.

Cassirer ha avuto il merito di essere stato tra i primi filosofi (se non addirittura il primo) a smontare questa mitologia. Per quanto riguarda il determinismo, si suole indicare come determinismo fisico (entrato in crisi con la fisica del XX secolo) quello correlato al noto mito (tra l'altro, settecentesco) del « demone » di Laplace. Cassirer mostra che questo non è stato mai una cosa seria, e che non ha mai veramente rappresentato una struttura effettiva della scienza; e comunque già la fisica dell'Ottocento (soprattutto la terminologia) lo avrebbe abbondantemente messo in scacco. Se « causalità » e « determinismo » si intendono invece nel senso categoriale, funzionale (cioè metodologico-trascendentale), la fisica odierna non li ha messi realmente in

crisi. Causalità (e determinismo) non significano altro che una forma di unificazione sistematica delle misure e delle leggi empiriche secondo la prospettiva di una legalità, conformità a leggi di tipo funzionale (matematico). Si tratti di leggi dinamiche o di leggi stocastiche, di misure di quantità o di misure (distribuzioni) di probabilità, la struttura della scienza — coordinazione di tali misure secondo leggi che le rendono connesse e interdipendenti — tale struttura formale non è mutata.

Non che la nuova scienza, secondo Cassirer, non contenga importanti e rivoluzionarie novità formali — al contrario, effettivamente essa porta nel pensiero fisico (e in genere scientifico) una ben profonda rivoluzione. Ma tale rivoluzione non va ravvisata tanto in una crisi della categoria di « causa » o del determinismo, quanto piuttosto in una crisi della nozione, ben più fondamentale, di « oggetto » (fisico), soprattutto nei riguardi del venir meno della forma e del criterio dell'identità (e quindi della distinzione) degli « oggetti » a livelli sub-atomici. L'atomo tradizionale era ancora un « oggetto », era ancora qualcosa di immaginabile: p. es., come una piccolissima pallina piena individua. Ma non così l'elettrone e le altre particelle: in molti esperimenti non ha persino senso parlare della storia e del destino di un determinato elettrone. Le particelle sub-atomiche non sono più qualcosa di immaginabile — la funzione simbolica del pensiero ha raggiunto un nuovo livello.

L'emozione suscitata nel mondo filosofico dalla formulazione del principio di Heisenberg era assai legata ad una venerabile problematica morale, che aveva trovato proprio in Kant la sua canonizzazione. Il mondo della natura, con il suo determinismo « meccanicistico » (cioè dinamico) e, « di conseguenza », materialistico, veniva messo in contrasto con il mondo morale, il quale appariva fondato sul postulato della libertà — libertà di qualcosa come il volere, o l'anima o lo spirito. L'assunzione del determinismo sembrava,

ove si respingesse il tradizionale compromesso dualistico o non si accettasse la concorrente ipotesi idealistica, la negazione del postulato stesso della moralità — donde la polemica degli spiritualisti (p. es., V. Cousin e i suoi seguaci) e, in parte, di alcune correnti idealistiche contro il materialismo scientifico, che sembrava, negando quel postulato, dichiarare infondata la morale e illusoria la moralità. Così che, introducendo qualcosa come la « libertà » nel mondo stesso della natura fisica, il materialismo stesso veniva posto in scacco, e si veniva a riaprire la possibilità di un accordo tra la scienza esatta della natura e i cosiddetti postulati della coscienza morale. Persino illustri fisici come P. Jordan si espressero in questo senso.

Qui si rivela uno degli aspetti più interessanti e geniali del peculiare neokantismo di Cassirer, che dedica al problema in questione l'ultimo capitolo del *Determinismus*. Abbiamo visto, a proposito della filosofia delle forme simboliche, come ogni forma di cultura si elabori secondo sistemi simbolici suoi propri: come, insomma, ci sia una specie di « incomunicabilità », o per lo meno irriducibilità, di sistemi categoriali diversi. Questo punto di vista interviene qui, nella discussione delle implicazioni etiche del determinismo o indeterminismo nella fisica.

Come sappiamo, Cassirer non crede che nella fisica quantistica si tratti di un vero e proprio indeterminismo: le categorie connesse di « legge » e « funzione » continuano a funzionarvi come postulati di una conoscibilità della natura in generale. E in ultima analisi ha ben poco senso parlare di un *liberum arbitrium indifferentiae* dell'elettrone...

« Ma anche se fosse così », osserva Cassirer « la cosa avrebbe ben poco rilievo dal punto di vista morale »; come aveva, realmente, ben poco rilievo il vecchio determinismo materialista. Siamo in due piani categoriali diversi: la libertà come presupposto del valore morale ha ben poco a che fare con il determinismo o meno come presupposto formale della scienza. La legge morale non si fonda su alcun presupposto naturalistico, né su condizioni naturali: in que-

sto senso Cassirer sviluppa la filosofia kantiana della morale, abbandonandone certi presupposti metafisici.

Non so se il lettore proverà la stessa impressione che ho provato io: che il capitolo non svolga completamente l'importante idea che esso contiene. L'argomento meritava forse uno sviluppo più a fondo. Lo stesso Kant accenna in alcuni punti della Fondazione della metafisica dei costumi che il postulato formale del giudizio morale non è tanto il « fatto » quanto l'« idea » della libertà (autonomia); che si giudica l'azione dalla massima di una volontà « come se » questa fosse la legge di una volontà legislatrice universale.

Ma, naturalmente, le interpretazioni dei « sacri testi » dei grandi filosofi sono sempre controvertibili. Abbandonando Kant, si può dire che quella « libertà » che è postulata dal giudizio morale è tanto poco il liberum arbitrium indifferentiae, che anzi, con questa ipotesi, la nozione stessa di « persona morale » si vuoterebbe di senso, come perderebbe di senso qualsiasi seria concezione pedagogica della morale — l'idea della moralità richiede piuttosto che la causalità dell'azione risieda nella « qualità » della persona concreta cui si attribuisce l'azione stessa.

Il discorso sarebbe troppo lungo, e qui, ovviamente, non può venir proseguito. Però il lettore, leggendo le pagine di Cassirer dedicate a questo importante problema, potrà vedere in esse la fecondità del suo metodo, e come con questo ci si apra ad una problematica completamente attuale.

GIULIO PRETI

A Malte Jacobsson

PREFAZIONE

Renouveler la notion de cause, c'est transformer la pensée humaine.

H. TAINÉ

La prefazione a uno scritto non ha da trattare solo problemi di contenuto: le è lecito e doveroso contenere anche qualche parola di carattere personale. Vorrei dunque introdurre il presente scritto con la confessione che a redigerlo mi spinse anzitutto un motivo personale. In questi ultimi tempi ho sentito sempre più urgentemente il desiderio e l'impegno di riprendere le questioni donde in origine aveva preso le mosse il mio primo lavoro filosofico. Il primo scritto sistematico, che ho pubblicato più di venticinque anni fa, col titolo Substanzbegriff und Funktionsbegriff trattava il problema della formazione dei concetti nella matematica e nella scienza della natura. Esso cercava di mostrare una tendenza metodica unitaria nel contenuto sistematico e nella storia di tale formazione di concetti, e di individuarne il significato per la critica della conoscenza. Così il « fatto della scienza » vi era preso per base nella forma in cui esso si trovava all'inizio della svolta di secolo. In quel tempo il sistema della fisica classica vigeva ancora in modo indiscusso. La teoria della relatività e quella dei quanti erano ancora ai loro primi inizi; e sarebbe stato azzardato scegliere questi inizi come punti di partenza di un'analisi puramente gnoseologica. Per questo motivo mi astenni allora dal trattarne e cercai di svolgere e fondare la mia tesi principale di gnoseologia critica indipendentemente da tali teorie.

Ma alla lunga la limitazione adottata non si poteva tenere. Col nuovo sviluppo della fisica teorica si spostò sem-

pre piú chiaramente anche il suo baricentro gnoseologico. Si vide sempre meglio che neppure la considerazione filosofica poteva allontanare dalla sua soglia le questioni qui affollantisi da ogni lato, quand'anche non fosse stato che per opporsi a certe affrettate conclusioni « speculative » che ne tiravano. Da tale situazione problematica nacquero gli studi che ho pubblicato nel 1920 col titolo Zur Einsteinschen Relativitätstheorie, Erkenntnistheoretische Betrachtungen. Ma anch'essi valevano solo per la trasformazione e la nuova formazione che la fisica moderna aveva subito nel frattempo da parte della teoria della relatività speciale e generale. Tali studi non tenevano ancora conto dell'« esplosivo » potente e pericoloso, come ebbe a chiamarlo una volta Planck, della teoria quantistica. Oggi che gli effetti di questo esplosivo si rendono sempre piú chiaramente visibili e si estendono all'intero campo della fisica, si impone sempre piú fortemente ed imperiosamente la richiesta di approfondirne le cause storiche e le basi sistematiche. Ai primi passi verso questo libro mi ha portato il desiderio di soddisfare a tale richiesta. In un primo momento essi non erano destinati alla pubblicazione; dovevano servire solo alla mia propria formazione e a verifica critica dei principî gnoseologici generali donde ero partito.

Certamente si può mettere tuttora in dubbio e contestare con seri motivi, come non mi nascondo, che ora sia giunto il momento di pubblicare il libro. Anche all'odierna situazione problematica si può riferire con qualche ragione il detto che Schiller ha coniato alla fine del sec. XVIII a proposito della relazione fra indagine della natura e filosofia trascendentale. « Corra fra voi cattivo sangue! È ancora troppo presto per l'alleanza: la verità si conosce solo se voi vi separate nel cercare ». Questa separazione sembra darsi piú che mai in un momento in cui dal lato teorico la nuova fisica è ancora per così dire in statu nascendi ed ha ancora da lottare senza tregua intorno ai propri concetti di base e per fissarne il significato. Nel noto libro The Nature of the Physical World (1928) Eddington ha detto

che sulla porta d'entrata della nuova fisica si dovrebbe mettere un cartello con la scritta: « Trasformazioni architettoniche in corso — l'ingresso è severamente vietato a persone non autorizzate ». E bisognerebbe anche raccomandare al portinaio di non lasciar entrare in nessun caso « filosofi curiosi ». Esistono di sicuro ancor oggi molti fisici che saranno d'accordo con questo ammonimento. Ma dipende precisamente dall'essenza e dal compito della filosofia che alla lunga essa non possa dar retta a tali avvertimenti. Non è semplice curiosità quanto la induce a occuparsi sempre di nuovo di quello che accade fra le baracche e i recinti delle singole scienze. Senza tali occhiate essa non potrebbe soddisfare al proprio ideale: all'ideale dell'analisi metodica e della fondazione gnoseologico-critica. Così avviene che essa debba trascurare sempre di nuovo i confini drizzati fra le singole scienze e indispensabili dal lato della « prassi » della conoscenza, di una giusta e sana divisione del lavoro. Non è lecito che questi confini divengano barriere ostacolanti per la teoria come tale. Essa li deve varcare — anche col pericolo che da questa trasgressione sorgano conflitti e controversie di confine. Desidererei che anche le esposizioni di questo libro fossero intese e prese in questo senso. Per me non si trattava affatto di voler osservare la fisica dall'esterno o tenerle lezioni « dall'alto ». Ciò a cui ho mirato è anzitutto preparare almeno il terreno a un lavoro d'indagine comune. Alla fin fine solo in un simile lavoro comune e nella continua critica materiale reciproca si potrà ottenere la risposta a determinate questioni di fondo della nuova fisica che oggi, come in genere si sente e si conviene, sono ancora molto lontane da una soluzione conclusiva.

Per quanto riguarda la concezione di base secondo cui cerco da parte mia di trattare tali questioni, nei tratti propriamente essenziali essa non è mutata rispetto allo scritto Substanzbegriff und Funktionsbegriff (1910). Credo di poter mantenere ancor oggi tale concezione; anzi, in base allo sviluppo della fisica moderna credo di poterla formulare più nettamente e giustificare meglio di prima. Dalle esposi-

zioni di questo scritto si noterà, spero, come io non mi sia lasciato guidare dall'intenzione di salvare in tutti i casi il mio proprio « punto di vista » nei confronti di tale sviluppo. Per me non si trattava di voler « avere ragione » ad ogni costo di fronte alla nuova fisica: per la critica gnoseologica che ha da orientarsi costantemente sul progresso della scienza, un siffatto « aver ragione » mi apparirebbe un pregio molto discutibile. La gnoseologia non può né deve chiudere gli occhi sull'arricchimento e l'approfondimento che la fisica moderna ha trovato nella nuova e più rigorosa formulazione dei suoi concetti fondamentali, deve venirle incontro con costante prontezza nel rivedere i propri presupposti. Quindi nel mio libro precedente vi sono di sicuro molte cose che oggi io non affermerei più nello stesso senso o che per lo meno giustificherei altrimenti; — credo di potermi attenere ancor oggi solo alla sua tendenza fondamentale, quella che si esprime, più che nelle risposte particolari, nell'impostazione generale del problema.

Passo quindi ad un altro punto su cui vorrei soffermarmi brevemente per prevenire una possibile obiezione e un possibile malinteso. Quando pubblicai il mio scritto Zur Einsteinschen Relativitätstheorie vi furono molti critici i quali nelle conclusioni che avevo tirato dallo sviluppo della nuova fisica si trovavano d'accordo con me, ma a tale accordo connettevano la domanda se io « avessi il diritto » di tirare conseguenze siffatte in qualità di « neo-kantiano ». A tali quesiti e dubbi il presente scritto sarà forse esposto in grado anche molto maggiore. Ma io credo che obiezioni del genere disconoscano l'essenza e la tendenza storica del « neokantismo » quale l'hanno inteso i fondatori della « scuola di Marburgo », Hermann Cohen e Paul Natorp. Nel saggio Kant und die Marburger Schule, in « Kant-Studien », XVII, 1910, Natorp ha dichiarato esplicitamente non essere mai stata l'intenzione di tale scuola dovere o voler attenersi a ogni costo ai principî di Kant. « Non vi è mai stato motivo di parlare di un kantismo ortodosso — egli insiste — e lo sviluppo ulteriore della

scuola ha tolto a un discorrere del genere anche la piú pallida parvenza di giustificazione... A Kant si poteva voler ritornare solo per poi andare avanti nella direzione della conoscenza fondamentale con lui indelebilmente acquisita alla filosofia, in pura coerenza con l'approfondimento con lui raggiunto degli eterni problemi di questa... Chi intendesse la cosa altrimenti sarebbe un cattivo scolaro di Kant ». Qui Natorp come si vede sta a Kant come un fisico moderno a Galilei o a Newton, a Maxwell o a Helmholtz. Egli ripudia ogni dogmatismo — appellandosi a quello stesso Kant che pone sempre di nuovo in risalto non potervi essere in filosofia « alcun autore classico ». Così anche il mio rapporto coi fondatori della « scuola di Marburgo » non è allentato, né diminuisce il mio debito di riconoscenza verso di loro se dalle seguenti ricerche risulta che nell'interpretazione critica dei concetti fondamentali della scienza moderna io sono giunto a risultati sostanzialmente diversi da quelli esposti nella *Logik der reinen Erkenntnis* (1902) di Cohen o nell'opera *Die logischen Grundlagen der exakten Wissenschaften* (1910) di Natorp.

Non so congedare questo libro senza un'ultima aggiunta d'ordine personale. Con la dedica a Malte Jacobsson ho inteso manifestare la mia gratitudine per l'interesse che egli ha sempre prestato alla mia attività filosofica e per i modi da vero amico con cui mi ha accolto e sostenuto l'anno scorso al mio entrare in un nuovo ambiente di lavoro e di azione. Ringrazio anche la direzione della Högskola di Göteborg, il suo rettore d'allora Prof. Dott. Bernhard Karlgren e il Consiglio accademico per l'alto onore fattomi con la nomina a Göteborg e la dimostrazione di fiducia personale che con ciò mi hanno dato. Ma del resto questo libro è in debito anche con molti di cui non si adducono i nomi per filo e per segno. Senza la cordiale accoglienza che ho trovato nella mia nuova sede di lavoro, senza l'appoggio offertomi da ogni parte, io non avrei avuto né il modo né l'animo di condurre a termine questo scritto.

Ringrazio il direttore e i collaboratori della Stadsbiblio-

tek di Göteborg della costante premura con cui hanno risposto a tutte le mie richieste di acquisto dei libri necessari. In proposito vorrei far notare che il manoscritto fu terminato nell'aprile del 1936, cosicché non mi sono più potuto valere in modo sistematico della letteratura apparsa più tardi, ma ho potuto tenerne conto solo in accenni occasionali. Ringrazio il Dott. Manfred Moritz dell'aiuto prestatomi nella revisione delle bozze.

ERNST CASSIRER

Göteborg, dicembre 1936

PARTE PRIMA

CONSIDERAZIONI STORICHE PRELIMINARI

CAPITOLO I

LO « SPIRITO DI LAPLACE »

Chetati, chetati, spirito turbato!
W. SHAKESPEARE, *Amleto*, I 5

Nell'introduzione alla *Tbéorie analytique des probabilités* Laplace ha delineato l'immagine di uno spirito onni-comprendente che avesse la conoscenza completa di un determinato stato del mondo in un dato momento e per il quale dunque il mondo come intero fosse al tempo stesso determinato completamente in ogni singolo tratto della sua esistenza e del suo decorso. A uno spirito siffatto che conoscesse tutte le forze agenti nella natura e le condizioni precise di tutte le singole cose costituenti il mondo, occorrerebbe solo sottoporre questi dati all'analisi matematica per giungere a una formola dell'universo comprendente ad un tempo il moto dei corpi celesti piú grandi come quello dell'atomo piú leggero. Per lui nulla sarebbe incerto; futuro e passato si stenderebbero dinanzi al suo sguardo con la stessa chiarezza. Nel compimento che ha saputo dare all'astronomia l'intelletto umano si può considerare la debole copia di uno spirito simile, una copia che certo non può mai raggiungere la perfezione dell'originale; in ogni sforzo di avvicinarsi esso rimane sempre infinitamente piú indietro.

Prendo le mosse da questa immagine dello spirito di Laplace non perché io stimi un simile avvio come logicamente appropriato o anche solo particolarmente felice dal lato psicologico, ma per il motivo esattamente opposto.

L'immagine coniata da Laplace ha svolto una parte importante, anzi decisiva in tutte le discussioni suscitate dall'odierna situazione della fisica atomica intorno al problema generale della causalità. Tanto i sostenitori quanto i negatori del principio causale della « fisica classica » si mostrarono concordi per lo meno in questo: che tale immagine valesse come espressione adeguata del problema — che da essa fosse lecito partire senza sospetto per chiarire in rapporto ad essa la natura caratteristica di una concezione strettamente « deterministica » dell'accadere cosmico. Le trattazioni seguenti cercheranno di mostrare nei dettagli che io non posso condividere questo parere, e perché. Ma prima di iniziare tali trattazioni mi pare utile dare uno sguardo alla storia del problema. Solo un siffatto sguardo retrospettivo può chiarire l'importanza che la « formula dell'universo » di Laplace ha acquistato nell'attuale discussione del concetto di casualità da parte della gnoseologia e della filosofia della natura. Nel pensiero stesso di Laplace l'idea di questa formula dell'universo era difficilmente qualcosa di più d'una metafora ingegnosa con cui chiarire e illustrare la differenza fra il concetto di probabilità e quello di certezza. L'esigenza di dare a questa metafora estensione e validità più ampie — l'esigenza di farne l'espressione di un principio gnoseologico generale, per quanto mi riesca di vedere, gli era ancora affatto estranea. Tale svolta si compie solo in un'epoca molto posteriore; e il momento si può indicare esattamente. Nel celebre discorso *Sui limiti della conoscenza della natura* (1872) Emil Du Bois-Reymond ha tolto per primo la formula di Laplace dal suo lungo oblio per metterla al centro della considerazione da parte della gnoseologia e della filosofia della natura. Questo discorso ha suscitato dovunque il massimo scalpore ed esercitato la più forte efficacia. Ancora mezzo secolo dopo W. Nernst in un saggio *Sull'ambito di validità delle leggi di natura* ha celebrato l'« elegante eloquenza » con cui Du Bois-Reymond avrebbe descritto la potenzialità pratica

della formula dell'universo escogitata da Laplace. Ma quell'eloquenza comportava gravi rischi. Sotto il suo manto di facile splendore determinati problemi di fondo della conoscenza filosofica e scientifica della natura ricevettero una trattazione non intesa a chiarirli analiticamente bensì a portarli a una risoluzione spiccia e conclusiva ma del tutto dogmatica.

Fu una risoluzione in senso positivo e insieme negativo. Essa credette di poter fissare una volta per sempre la forma costante, immutabile e incontrovertibile di ogni conoscenza scientifica della natura; ma dall'altra parte concepì proprio questa forma anche come un limite invalicabile. Du Bois-Reymond solleva la conoscenza della natura molto oltre tutti i limiti contingenti, puramente empirici; all'interno del suo proprio ambito le attribuisce una specie di onniscienza. Ma questa elevazione è solo l'inizio del suo grave abbassamento. Dal vertice del sapere piú strettamente esatto essa viene rovesciata nell'abisso dell'ignoranza — di un non sapere di fronte al quale non c'è scampo perché non è momentaneo né relativo ma assoluto e definitivo. Se alla conoscenza umana riuscisse di sollevarsi all'ideale dello spirito di Laplace, il corso del mondo con tutte le sue peculiarità le sarebbe pienamente chiaro, nel passato e nel futuro. « Uno spirito siffatto saprebbe quanti capelli abbiamo in capo e non un passero cadrebbe a terra senza che questi lo sapesse. Profeta rivolto al futuro come al passato, il tutto del mondo per lui sarebbe un unico fatto e una sola grande verità ». Eppure quest'ultima verità offrirebbe solo un aspetto parziale, ristretto e meschino dell'essere, della « realtà » [*Wirklichkeit*] vera e propria nella sua totalità. Infatti quest'ultima contiene vasti e importanti settori che alla forma qui descritta di conoscenza scientifica della natura devono restare per principio e per sempre inaccessibili. Non vi è incremento né potenziamento di tale conoscenza che ci avvicini d'un sol passo ai veri misteri dell'essere. Non appena dal mondo degli atomi

¹ Vedi « Naturwissenschaften », X, 1922, p. 492.

materiali entriamo nel mondo dello « spirituale », della coscienza, il nostro sapere si dissolve in nulla. Qui finisce il nostro intendere: poiché anche in una conoscenza completa, di « astronomica esattezza », di tutti i sistemi materiali del mondo, incluso il sistema del nostro cervello, ci sarebbe impossibile comprendere come l'essere materiale possa far scaturire da sé il fenomeno inesplicabile della coscienza. L'esigenza di « spiegare » in questo punto non solo non può essere soddisfatta ma, a rigore, neppure essere posta: *l'ignorabimus* è l'unica risposta che la scienza della natura sappia dare alla questione dell'essenza e dell'origine della coscienza.

L'impostazione data al problema da Du Bois-Reymond ha esercitato una forte influenza anche sulla filosofia e sulla dottrina dei principi delle scienze naturali negli ultimi decenni del secolo decimonono. Si cercò, è vero, di sottrarsi alle conseguenze radicali che qui venivano tirate; non ci si volle dare prigionieri alla risoluzione apodittico-dogmatica del discorso di Du Bois-Reymond. Ma che in esso si ponesse una questione importante e pertinente per la cui soluzione gnoseologia e scienza della natura avessero da lottare con tutte le loro forze — questo sulle prime sembrò fuori dubbio. Lo stesso movimento neokantiano che subentrò all'inizio dell'ottavo decennio, quasi contemporaneo al discorso di Du Bois-Reymond, sulle prime non portò in proposito nessuna variazione. Otto Liebmann — uno dei primi a chiedere il « ritorno a Kant » — nell'analisi del problema causale si muove esattamente sugli stessi binari. Anche per lui la formula di Laplace diviene l'espressione compiuta e pienamente valida di quanto egli ama designare « logica dei fatti ».

Se in via ipotetica si prende per base un'intelligenza assoluta del mondo — così egli dichiara — a questa intelligenza l'intero processo cosmico, per noi disteso nello spazio infinito, sarà dato veramente fin nelle sue più minute particolarità come logica atemporale del mondo sub specie aeternitatis. Questa sarebbe dunque la logica

compiuta dei fatti nella ragione oggettiva del mondo [*Weltvernunft*]; e Spinoza avrebbe ragione in un senso che certo a lui non poteva riuscire perfettamente chiaro essendo egli morto dieci anni prima della pubblicazione dei *Principi* di Newton e un secolo prima di quella della *Mécanique céleste* di Laplace².

Donde si scorge che la « formula di Laplace » era suscettibile d'essere interpretata tanto nel senso della scienza naturale quanto in un senso puramente metafisico: — e proprio da questo suo duplice aspetto dipende la forte azione che essa ha esercitato. Tale azione riesce ben comprensibile se si pone mente alla complessiva situazione culturale dell'epoca in cui è apparso il discorso di Du Bois-Reymond. Era l'epoca della controversia intorno al materialismo: l'epoca in cui la filosofia si vedeva nella necessità di decidere se lasciarsi guidare dalla scienza naturale, una guida che sembrava condurre inevitabilmente a una concezione strettamente meccanicistica della natura — o difendere e mantenere la propria posizione nei confronti della scienza naturale e accordare allo « spirituale » uno speciale posto d'eccezione. Qui intervenne il discorso di Du Bois-Reymond, che si poteva intendere come un chiarimento dei dubbi e una via d'uscita dal dilemma. Infatti esso pareva soddisfare a entrambe le esigenze; in un certo senso sembrava appagare nella stessa misura sia le richieste del materialismo sia quelle dello spiritualismo. Il materialismo e il meccanicismo potevano andar contenti della definizione data da Du Bois-Reymond alla conoscenza della natura, perché nell'ambito di questa la sua massima fondamentale non solo era riconosciuta ma anche elevata a norma esclusiva e assoluta. « Per noi non c'è alcun altro conoscere che quello meccanicistico — così ribadisce Du Bois-Reymond — quand'anche sia un misero succedaneo del conoscere vero, e corrispondente-

² O. LIEBMANN, *Zur Analysis der Wirklichkeit*, 2^a ed., Strassburg 1880, p. 205.

mente solo una forma veramente scientifica di pensiero: quella fisico-matematica». Ma d'altra parte questa forma di pensiero veniva respinta quando si trattava dei problemi « propriamente trascendenti ». Di fronte a questi problemi il naturalista doveva rassegnare le dimissioni una volta per sempre: e tali dimissioni lasciavano via libera a tutti gli altri tentativi di soluzione, puramente « speculativi ». Così sia i radicali difensori del materialismo sia i loro più accaniti avversari sembravano potersi appellare con pari diritto alla tesi fondamentale di Du Bois-Reymond: gli uni perché vi trovavano accentuata l'identità fra pensiero scientifico e pensiero materialistico-meccanicistico, gli altri perché al di fuori di questo si ammetteva una realtà [*Realität*] che per principio si sottraeva ad ogni conoscenza propria delle scienze naturali e permaneva salda come un residuo oscuro e impenetrabile.

Ma con questo ci vediamo condotti al tempo stesso a una questione la cui importanza trascende di molto la particolare situazione problematica donde è sorto il discorso di Du Bois-Reymond. Già qui affiora un nesso sistematico che si confermerà sempre di nuovo nel prosieguo della nostra ricerca. La risposta al problema della causalità quale ci viene data da una gnoseologia scientifica, non sta mai a sé ma dipende sempre da una determinata assunzione intorno al concetto che quella scienza abbia dell' oggetto. I due momenti si implicano strettamente e si condizionano a vicenda. Non possiamo mai intendere nel suo significato e nella sua fondazione il concetto di causalità proprio di una determinata epoca o di un determinato indirizzo della scienza naturale senza far leva su questo punto — senza rimettere in questione il concetto di « realtà » fisica che essi presuppongono. Più avanti cercherò di mostrare che questa relazione vige anche nella moderna meccanica dei quanti: — che nella « crisi del concetto di causalità » quale sembra per essa caratteristico, abbiamo molto più a che fare con una trasformazione critica, con una nuova versione del concetto di og-

g e t t o . Per ora mi contento di illustrare questa relazione quanto al rapporto risultante dalla teoria che Du Bois-Reymond ha dato della conoscenza scientifica. Col sollevare in tale teoria il postulato della causalità oltre tutti i limiti dell'applicabilità empirica, con l'allacciarlo nella sua esplicitazione e definizione al presupposto di uno « spirito infinito », anche la realtà con ciò scivola in una lontananza irraggiungibile. Resta sganciata da ogni comprensibilità effettiva, da ogni possibilità di rilievo coi mezzi teoretici fondamentali della nostra conoscenza. Con tutto il nostro comprendere, con ogni raffinamento e potenziamento dei mezzi conoscitivi della nostra fisica noi non ci moviamo di un passo; ci rinchiodiamo piuttosto solo nella ragna sempre piú fitta dei nostri concetti. Poiché secondo Du Bois-Reymond l'inconoscibilità non comincia affatto solo là dove mettiamo il piede nel campo dello spirituale, della coscienza. Essa è per principio un'inconoscibilità della stessa specie non appena, invece che alla coscienza, rivolgiamo la questione dell'essenza al mondo materiale e ai suoi elementi fondamentali, gli atomi. Lo spirito di Laplace che disponesse della conoscenza completa di tutti i punti materiali, di tutte le loro posizioni e velocità, da tale conoscenza non avrebbe il menomo appiglio per comprendere l'« essenza » [*Wesen*] della massa e della forza.

Nessuno che vi abbia meditato un poco piú a fondo — così spiega Du Bois-Reymond — disconosce la natura trascendente dell'ostacolo. Contro di esso tutti i progressi della scienza naturale non hanno potuto nulla, a nulla gioveranno tutti i progressi ulteriori. Non sapremo mai meglio di quanto sappiamo oggi che cosa « si aggiri nello spazio » qui dove c'è materia. A questo proposito infatti neppure lo spirito di Laplace si raccapezzerebbe meglio³.

Qui risalta a chiare note il tipo di ragionamento di cui Du Bois-Reymond si serve in tutte le sue deduzioni.

³ *Über die Grenzen des Naturerkennens*, in *Reden*, serie I, Leipzig 1886, p. 114.

A prima vista è sorprendente, anzi quasi incomprensibile: che cosa può esservi infatti di piú strano di un tipo di considerazione che taccia di inconoscibile proprio i principî e gli elementi primi della conoscenza scientifica? che di concetti come materia e forza, i quali certo non sono altro che strumenti per comprendere la natura, fa qualche cosa di spettrale che misteriosamente « si aggira nello spazio »? Eppure in questo strano tipo di ragionamento la scienza della natura soccombe a un destino che essa condivide con tutte le forme della conoscenza simbolica. Si ripete qui, in uno stadio molto avanzato del sapere, anzi in uno dei suoi autentici vertici, un processo che possiamo seguire all'indietro fin nei primi inizi della comprensione del mondo. Dovunque cerchiamo di analizzare i simboli disparati per mezzo dei quali si giunge a una « comprensione » del mondo — della natura come della « realtà spirituale » — urtiamo sempre in questo dualismo nell'interpretazione dei mezzi principali su cui tale comprendere si fonda. Linguaggio e immagine sono i primi mezzi che lo spirito umano ha creato per tale comprendere. Solo mediante questi esso riesce a discriminare, differenziare, padroneggiare la « sequela sempre fluttuante » dell'accadere. Ma sono per l'appunto questi mezzi di padronanza ad acquistare subito da parte loro un proprio essere, una propria realtà e importanza con cui retroagiscono sullo spirito umano e lo assoggettano. Lo strumento comincia ad assumere quasi una vita propria: si ipostatizza e nell'ipostasi diviene una forza indipendente, peculiare ed autosufficiente, che attira l'uomo in sua balía. Quanto piú cerchiamo di risalire alle origini del linguaggio e del mito tanto piú chiaramente ci si impone carattere fondamentale dei simboli del linguaggio e dell'immagine. Il simbolico diviene magico: è la magia della parola e dell'immagine a foggiare i principî di ogni conoscenza magica e di ogni magia padronanza della realtà⁴. Per quanto singolare

⁴ Per una fondazione piú dettagliata devo rimandare al mio

e paradossale possa sembrare, neppure la « piú astratta » formazione di simboli è esente da questa coazione ineluttabile verso l'immediatamente immaginoso e quindi verso la concretizzazione. Anch'essa deve combattere di continuo contro il pericolo del sostanzializzare e dell'ipostatizzare; e quando soccombe a tale pericolo, il processo conoscitivo subisce un rovesciamento caratteristico. Da *primum* della conoscenza i principî divengono l'« ultimo » — quando essa cerca sí di afferrare ma da essa quasi si ritrae sempre piú e infine minaccia di addentrarsi in una irraggiungibile lontananza. I simboli si spogliano del carattere immediatamente « magico »; ma inerisce loro pur sempre il carattere del misterioso, dell'« incomprensibile ». Ancor piú duramente e piú apertamente che non nel discorso di Emil Du Bois-Reymond questa conclusione viene tratta nello scritto Über die Grundlagen der Erkenntnis in den exakten Wissenschaften di suo fratello, il matematico Paul Du Bois-Reymond. Qui si deve dimostrare come ogni tentativo della fisica di cogliere e descrivere la realtà sia destinato a fallire fin da principio. Ogni tentativo del genere torna di bel nuovo a farci sapere « quanto siano impenetrabili le mura della nostra prigione intrafenomenica ». « Il nostro pensiero, affaticantesi in un procedere nebulosamente conforme, con ciò non fa un passo avanti, come paralizzato. Noi siamo rinchiusi nella gabbia delle nostre percezioni e come ciechi dalla nascita per quanto è al di fuori. Di questo non possiamo avere neppure un barlume, perché il barlume somiglia già alla luce: ma che cosa corrisponde alla luce nel reale effettuale? »⁵.

La fisica moderna ha posto in rilievo da molto tempo con crescente vigore che è perché una siffatta visione di fondo non è piú obbligatoria per essa né piú oltre

scritto *Sprache und Mythos* in « Studien der Bibl. Warburg », vol. VI, Leipzig 1924 [cfr. trad. it. di V. E. Alfieri, Milano 1961], ed alla mia *Philosophie der symbolischen Formen*, voll. LIII, Berlin 1923 ss. [cfr. trad. it. di E. Arnaud, Firenze 1961-66].

⁵ Paul Du Bois-Reymond, op. cit., Tübingen 1890, cap. VIII.

possibile. Essa ha abbandonato i presupposti in cui si concepiva l'ideale di conoscenza dello spirito di Laplace; essa contesta la possibilità di comprendere tutto l'accadere fisico col ridurlo al moto di semplici punti materiali. E in modo ancor piú decisivo respinge le conseguenze ulteriori che Du Bois-Reymond aveva allacciato alla formula dell'universo di Laplace. « Il suo *ignorabimus* — così dichiara uno scienziato moderno — non ha per noi altra portata che per il matematico la conoscenza disincantata dell'impossibilità della quadratura del cerchio e di altre consimili impostazioni di problemi che si risolvono e annullano non appena collocate nella forma giusta »⁶. Per arrivare a questa scoperta d'ordine schiettamente gnoseologico-critico non vi era certo bisogno delle nuove costruzioni concettuali della meccanica quantistica; la si poteva raggiungere già sul terreno della fisica classica e dimostrare in base alle premesse di questa⁷. Si può dire in genere che l'immagine dello spirito di Laplace dà luogo a gravi dubbi non solo dal punto di vista della fisica sperimentale, ma già in quello della logica e dell'analisi gnoseologica. Sottoposta a un esame piú serrato tale immagine si rivela composta da elementi disparati. Come vogliamo figurarci soddisfatte le condizioni a cui è legata la prospettiva dello spirito di Laplace? Come se la deve essere procurata, lui, la conoscenza completa delle posizioni iniziali e delle velocità di tutte le singole particelle di massa? A questa informazione è giunto per via umana o « sovrumana »? In modo empirico oppure « trascendente »? Nel primo caso le condizioni vigenti per il nostro conoscere empirico non sarebbero tolte neppure per lui. Allora si sarebbero dovute eseguire delle misurazioni, usare per esse determinati strumenti di

⁶ R. V. MISES, *Über das naturwissenschaftliche Weltbild der Gegenwart* in « Naturwissenschaften », XVIII, 1930, p. 892.

⁷ Ho cercato io stesso di addurre questa dimostrazione a partire dal punto di vista della « fisica classica » nello scritto *Substanzbegriff und Funktionsbegriff*, Berlin 1910; cfr. specialmente pp. 162 ss. e 219 ss.

fisica. Ma non si riesce a vedere come, in questo modo, si potrebbe raggiungere e consolidare altro che una conoscenza relativa. La precisione delle misurazioni in parola non potrebbe mai essere aumentata oltre un determinato limite: e in ogni caso l'impiego di apparecchiature scientifiche farebbe dipendere il risultato della natura di tali apparecchi e lo renderebbe definibile solo in rapporto ad essa natura, non in senso assoluto. A questa difficoltà si può sfuggire solo se all'intelletto di cui parlava Laplace non assegnamo una conoscenza solo mediata bensì immediata, « intuitiva » delle condizioni iniziali. Ma con questa risoluzione l'intero problema in campo ci si dissolverebbe per così dire tra le mani e infine svanirebbe in nulla. Infatti un intelletto che fosse dotato di una simile conoscenza intuitiva, con ciò stesso sarebbe insieme dispensato da ogni fatica della deduzione mediata di conclusioni, da ogni fatica di calcolo preventivo. Non avrebbe bisogno di « inferire » dal presente il passato o il futuro; in un unico atto indivisibile avrebbe la conoscenza completa, la visione immediata della serie temporale complessiva e della sua infinità. Cosicché nell'immagine dello « spirito di Laplace » si allacciano e si compenetrano due predicati qualificativi eterogenei, fra loro incompatibili. Per dirla in termini kantiani, in tale immagine è contenuta la rappresentazione di un intelletto « discorsivo » e al tempo stesso « intuitivo »: di un intelletto discorsivo vincolato alla forma del comprendere mediato, del « calcolare » — e di un intelletto intuitivo in grado di liberarsi di ogni calcolo perché va dall'« universale sintetico » (della visione di un tutto come tale) al particolare, cioè dal tutto alle parti. Così quell'ideale di conoscenza scientifica della natura che Laplace ha delineato e Du Bois-Reymond ha svolto ulteriormente e infiorato, ad una piú serrata analisi critica si dissolve in un idolo. Il limite a cui lo spirito umano doveva avvicinarsi incessantemente nella sua progressiva conoscenza della natura, non si dimostra neppure un limite: è chiaro che già lo stesso porlo in via puramente

ipotetica a rigore porta a un'idea irrealizzabile, a una contraddizione. Se dunque tale principio deve enunciare alcunché di coerente sul piano logico e di utilizzabile sul piano empirico, qualcosa di applicabile nei procedimenti e nell'elaborazione concettuale della fisica quale si costruisce « effettivamente » [*wirkliche Physik*] — allora dobbiamo formulare l'ideale e il principio della conoscenza scientifica della natura in un altro modo e da un nuovo lato.

CAPITOLO II

DETERMINISMO METAFISICO E DETERMINISMO CRITICO

Con quanto abbiamo detto sinora tuttavia non siamo ancora entrati in nessun modo nel nocciolo vero e proprio che sta alla base della formula dell'universo di Laplace. Nello stesso Laplace tale formula compare solo come una spiritosa trovata occasionale, un esperimento di pensiero descritto per disteso e sviluppato nelle sue conseguenze ma le cui « ragioni » vere e proprie restano nel buio. Eppure la formula di Laplace è di gran lunga più di quanto appaia in questo nesso. Essa è nientemeno che l'espressione complessiva e il pregnante riepilogo di quella visione del mondo da cui sono sorti i grandi sistemi filosofici del secolo decimosettimo: i sistemi del razionalismo classico. Se dunque vogliamo prendere veramente sul serio la formula di Laplace, se vogliamo giudicarne rettamente il contenuto e i motivi di pensiero, dobbiamo risalire a questa base. Molto tempo prima di Laplace, Leibniz aveva già formulato in tutto rigore il pensiero che sta alla base delle deduzioni di lui — anzi aveva già creato anche il simbolo caratteristico di cui tale pensiero si veste.

Che tutto sia prodotto da un destino fissato — così si dice in un breve saggio di Leibniz — è altrettanto certo quanto che tre volte tre fa nove. Il destino consiste in ciò, che ogni evento dipende da ogni altro come una catena, e prima di accadere accadrà altrettanto infallibilmente quanto infallibilmente è accaduto una volta accaduto.. Cioè ogni causa ha una certa azione sua che da essa sarebbe svolta con successo

se essa fosse sola; ma non essendo sola, dall'azione d'insieme risulta un certo effetto infallibile... secondo la misura delle forze, e questo è vero non solo quando nell'agire concorrono due o dieci o cento cose ma anche quando agiscono insieme infinitamente molte cose, come poi accade veramente nel mondo. La matematica... è in grado di interpretare benissimo cose siffatte perché in natura tutto trova, per così dire, una delimitazione in numero, misura e peso o forza. Se ad esempio una palla ne incontra un'altra senza altri ostacoli, e prima dell'incontro se ne conosce la grandezza, la direzione e la velocità, allora si può predire e calcolare come esse rimbalzeranno l'una dall'altra e quale corso prenderanno dopo l'urto. Il che ha regole ben precise; così deve accadere si prendano quante palle si voglia oppure anche figure diverse dalle palle. Da qui dunque si vede che nel mondo intero tutto avviene matematicamente, cioè infallibilmente, tanto è vero che se qualcuno potesse avere una visione sufficiente delle parti interne delle cose ed inoltre avesse memoria e intelletto a sufficienza per avere presenti tutte le circostanze e per tenerne conto, egli sarebbe un profeta e nel presente vedrebbe il futuro quasi come in uno specchio¹.

Qui di nuovo risalta nel modo più chiaro che la formulazione data da Leibniz alla legge di causalità e al determinismo sta nella relazione più stretta possibile col suo concetto di realtà, anzi essa appunto non è altro se non una semplice trascrizione di questo stesso concetto. Il concetto leibniziano di realtà poggia su due diverse premesse di base che però ai suoi occhi formano un'unità indissolubile e si sono compenstrate pienamente a vicenda. Tale concetto è di natura sia matematica che metafisica ed è l'una cosa mentre è l'altra. Il determinismo leibniziano è matematicismo metafisico. Alla natura deve inerire la stessa « infallibilità » che si esprime nelle regole del pensie-

¹ G. W. LEIBNIZ, *Von dem Verhängnisse in Hauptschriften zur Grundlegung der Philosophie*, trad. in tedesco da Arthur Buchenau, a cura di Ernst Cassirer, 2 voll., Leipzig 1904-06 (vedi vol. II, p. 129).

ro e dell'inferenza matematici; se infatti la natura non possedesse questa infallibilità, sarebbe impenetrabile per il pensiero matematico. In questa argomentazione si esprime il caratteristico pathos soggettivo che anima i primi fondatori e propugnatori del razionalismo classico. Filosofia e scienza della natura in questo pathos si sentono una cosa sola; qui Keplero e Galilei parlano lo stesso linguaggio di Descartes o Leibniz. A coniare questo linguaggio è stato il primo esuberante entusiasmo, direi quasi l'ebbrezza della conoscenza matematica da poco fondata e consolidata. Il postulato della causalità di Keplero e Galilei, di Descartes e Leibniz, non esprime altro che la convinzione dell'identità di matematica e natura. Chi pensa e argomenta matematicamente non coltiva con ciò un vuoto gioco speculativo, non si aggira in un ristretto mondo di concetti fattisi da sé, ma tocca il fondamento della stessa realtà effettuale. Qui ci troviamo nel punto in cui pensiero ed essere sono in contatto diretto, dove quindi scompare anche la differenza tra l'intelletto « finito » e quello « infinito ». La prerogativa dell'intelletto infinito — quello divino — sta nel suo conoscere le cose non perché le consideri e le osservi dall'esterno bensì perché esso è il loro proprio fondamento. Esso pensa l'essere mentre e in quanto crea l'essere: e appunto questo atto creatore originario è definito dai concetti fondamentali della matematica: grandezza, numero e misura. Ben lungi dall'essere semplici copie [Abbilder] della realtà questi concetti sono dunque i prototipi [Urbilder] veri e propri, gli « archetipi » eterni ed immutabili dell'essere. Su questo presupposto poggia la teoria di Keplero dell'« armonia cosmica », che per lui diviene lo stimolo e il principio animatore di tutto quanto il suo pensiero astronomico, della sua indagine sia empirica che matematica. Per Keplero matematica e astronomia sono le due « ali della filosofia ». Grazie a queste ali lo spirito umano si solleva nella sola regione in cui si avvede della sua vera somiglianza con Dio, perché gli riesce di pensare i pensieri della creazione divina: *Creator Deus*

*mathematica ut archetypus secum ab aeterno habuit in abstractione simplicissima et divina, ab ipsis etiam quantitatibus materialiter consideratis*². E lo stesso pensiero pervade l'esposizione e la giustificazione galileiane del sistema copernicano. Nel *Dialogo sui massimi sistemi* Galilei rileva che per quanto riguarda la conoscenza matematica fra lo spirito umano e quello divino non sussiste nessuna differenza fondamentale, nessuna differenza qualitativa. Quanto all'estensione del sapere il secondo è certo infinitamente superiore al primo — ma il grado della certezza nella conoscenza matematica è lo stesso per Dio e per l'uomo: infatti non è pensabile un incremento ulteriore oltre quel massimo di sapere che conseguiamo nella dimostrazione matematica rigorosa³.

Ma in Leibniz a questa intuizione dei fondatori della nuova scienza matematica della natura si accompagna ancora un altro motivo che solo dà al suo « determinismo » la vera impronta caratteristica. Se una volta Leibniz ha detto che tutta quanta la sua metafisica è matematica, di questa proposizione vale anche l'inverso: anche la concezione leibniziana della matematica appoggia su fondamenti metafisici. Quello stretto nesso matematico che scorgiamo nei fenomeni e che la conoscenza esatta della natura cerca di stabilire, per Leibniz è solo un risultato derivato. Per comprendere veramente quel nesso dobbiamo risalire ai fondamenti ultimi dell'essere, alle sostanze semplici. In queste cogliamo il senso e l'origine autentici della determinazione dell'accadere naturale. Matematica e meccanica possono contentarsi di seguire il nesso tra cause ed effetti

² Nota di Keplero alla seconda edizione del suo *Mysterium Cosmographicum* (1621); cfr. *Opera*, ed. Frisch, vol. I, p. 136.

³ G. GALILEI, *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, ed. nazionale, vol. VII, p. 129. Altri particolari su questo luogo importante anche dal punto di vista storico (poiché ha svolto una parte di rilievo nel processo contro Galilei) si trovano nel mio *Individuum und Kosmos in der Philosophie der Renaissance* in « Studien der Bibl. Warburg », vol. X, Leipzig 1927, p. 171 ss. [cfr. trad. it. di E. Pocar, Firenze 1967³, p. 256 ss.].

all'interno del mondo materiale, entro l'ordine spazio-temporale. Ma questo universo spazio-temporale ci offre sempre solo « forze derivate » che noi, per intenderle veramente, dobbiamo ricondurre alla loro origine ultima, a « forze primitive ». Tali forze primitive non appartengono piú al mondo dell'apparenza ma a quello delle sostanze semplici, delle monadi. Il mondo di cui parla la scienza della natura e per il quale essa conia i suoi concetti di estensione e moto, di forza e massa, non è assoluto ma relativo: è fenomeno, ma un fenomeno che non è vuota apparenza bensí è « fondato nelle monadi » e con ciò è un *phaenomenon bene fundatum*. Cosí il vero e proprio determinismo di Leibniz si sposta su uno strato diverso e anteriore. Ogni sostanza semplice è dotata di una forza originaria di rappresentazione, cioè possiede la forza di generare da se stessa il tutto dei suoi fenomeni e di svilupparlo progressivamente. In tale generazione e sviluppo domina dovunque la piú stretta necessità. Per Leibniz la sostanza non « è » assolutamente null'altro che questa legge necessaria del dispiegamento di sé — e solo a ciò deve limitarsi il concetto rigoroso di causalità. La causalità non esprime alcuna relazione fra sostanze singole — infatti il sistema di Leibniz esclude un influsso immediato, un *influxus physicus* da monade a monade —; essa afferma unicamente un rapporto da ammettersi nella stessa sostanza semplice tra la sua forza originaria e i risultati e gli effetti di questa. E che qui non sussistano lacune, che nella catena di causa ed effetto non possa mai darsi una frattura, ciò consegue direttamente dal fatto che con tale frattura andrebbe perduta al tempo stesso anche l'identità della sostanza. Quello che garantisce tale identità, anzi quello che solo la definisce propriamente, è il rigore del nesso causale. L'essere della sostanza non è quiete bensí un essere dinamico, mosso dall'interno. La sostanza è solo nel suo mutarsi, nel suo passaggio continuo da uno stato all'altro. Il permanente sta solo nella legge del passaggio, la quale domina tutta quanta la successione di questo processo e resta dovunque

uguale a se stessa. Così la sostanza quale « forza primitiva » di Leibniz è paragonata al « membro universale » di determinate serie algebriche, il quale dà la regola per cui la serie procede da un elemento all'altro, mentre la « forza derivata » è da paragonare ai singoli membri della serie. « L'identità della sostanza si è che persiste una determinata legge la quale comprende in sé tutti gli statl futuri del soggetto che noi pensiamo identico »⁴. Ora si comprende che e perché il rigido e inviolabile determinismo dell'accadere è per Leibniz una conseguenza inevitabile e un postulato assoluto. Se il legame della causalità si spezzasse in un luogo qualsiasi dell'accadere cosmico, ne andrebbero distrutte anche la realtà e la sostanzialità. Un accadere che non fosse più determinabile mediante la legge della serie né deducibile dalla serie, neppure ricadrebbe più nella serie — non potrebbe più ascriversi a nessun soggetto determinato e pertanto resterebbe come sospeso nel vuoto. Ma questo vuoto comporterebbe insieme la morte di ogni conoscenza. Il « principio di ragion sufficiente » dev'essere applicabile dovunque e a stretto rigore, perché non si dà alcun vero essere, non esiste nessuna realtà oggettiva se non nella forma dell'unità. « Ciò che non è veramente un ente, neppure è veramente un ente »⁵. Così per Leibniz il determinismo diviene il fondamento ultimo e irrevocabile di ogni conoscenza metafisica: su questo si fonda ogni enunciato che non verta solo sulla connessione dell'effetto ma sull'essere, sulla realtà in generale.

Ma di punto in bianco in questa salda teoria dogmatica

⁴ Cfr. in proposito il carteggio fra Leibniz e de Volder, specialmente la lettera di Leibniz del 21 gennaio 1704 in *Philosoph. Schriften*, ed. Gerhardt, vol. II, p. 261 ss., e in *Hauptschriften*, ed. Cassirer-Buchenau, vol. II, p. 334 ss.

⁵ Leibniz ad Arnauld: « Je tiens pour un axiome cette proposition identique, qui n'est diversifiée que par l'accent, sçavoir que ce qui n'est pas véritablement un estre, n'est pas non plus véritablement un estre ». Vedi *Philosoph. Schriften*, ed. Gerhardt, vol. II, p. 97 e *Hauptschriften*, ed. Cassirer-Buchenau, vol. II, p. 223.

dell'essere e dell'accadere apre ora una breccia la scepsi humanana. E di bel nuovo è il mutamento del primo momento a condizionare il secondo e tirarlo a sé. Hume rivolge il suo dubbio soprattutto contrò la versione razionalistica del « principio di ragione »; ma egli può scuotere tale principio solo togliendogli il fondamento ontologico. Per Hume quell'« essere » sul quale Leibniz aveva fondato l'affermazione del determinismo universale, non c'è più. Egli non conosce nessun mondo di « sostanze semplici » che da sé facciano venir fuori i fenomeni e per questo debbano valere da principi ultimi per la spiegazione dei fenomeni. Per lui il reale è tutto nelle percezioni semplici: e pertanto, se mai vi è un luogo dove dobbiamo cercare la giustificazione del principio di causalità, sarà nelle percezioni. Ma ecco che quando rivolgiamo la domanda a questa sola istanza competente, si vede subito che da essa non c'è da ottenere né da sperare mai alcuna specie di risposta. Invano cerchiamo qui un qualche « prototipo » della causalità; invano frughiamo in cerca di una « impressione » che corrisponda all'idea della « connessione necessaria ». Pertanto questa presunta idea si dissolve in fantasmagoria, in un puro e semplice prodotto della « immaginazione ». Possiamo indagare il processo in cui l'immaginazione crea questo strano prodotto; ma la conoscenza di tale processo non ci porta avanti di un passo nel problema vero e proprio: nella questione della portata e validità oggettiva del concetto di causalità. E allora perde ogni sostegno oggettivo anche quella concezione meccanicistica della natura quale l'avevano insegnata la fisica di Galilei e Keplero e la filosofia di Descartes e Leibniz. Non si riesce a vedere come la matematica potrebbe offrirle questo sostegno: la matematica ha a che fare sempre solo con il collegamento di concetti [*relations of ideas*] che non sono in grado di stabilire assolutamente nulla intorno a rapporti di contenuto materiale come causa e effetto, intorno a rapporti di *matter of fact*. Per noi una necessità nel reale e del

reale resta quindi inintelligibile. Se analizziamo il fenomeno standard su cui si costruisce la « spiegazione » meccanicistica della natura, troviamo che proprio questo fenomeno fondamentale non contiene neppure l'ombra di una spiegazione effettiva. Quanto ci dice l'unica fonte di certezza, la percezione, intorno al processo dell'urto elastico è solo che due masse prima si avvicinano e dopo essersi incontrate rimbalzano l'una dall'altra e proseguono il loro corso in direzione opposta. Ma in nessun punto del processo si può mai addurre come *dall'una cosa risulti l'altra*. Se nel momento dell'urto, invece di mutare la direzione del moto, le due palle da biliardo si scambiasero i colori rispettivi, questo fatto sarebbe proprio altrettanto ed esattamente altrettanto poco concepibile quanto l'altro. È solo l'esperienza reiterata a farci apparire il primo caso più intelligibile del secondo; è unicamente la coazione dell'abitudine a darci l'illusione di una forma di intuizione. A tale coazione noi non possiamo sottrarci; non possiamo mai rinunciare alla « credenza » nella causalità perché senza di essa non sussisterebbe alcuna possibilità, non solo teorica ma neppure pratica, di orientarci. Ma non appena tentiamo di dare a tale credenza un qualche fondamento oggettivo, oltrepassiamo i limiti posti alla conoscenza umana. Pertanto una « fondazione » della rappresentazione causale che voglia essere qualcos'altro dalla descrizione dell'origine psicologica di essa, resta in ogni caso una pura illusione. Non ci è dato di spezzare il cerchio della soggettività in nessun punto; ogni presunta inferenza oggettiva si radica alla fin fine soltanto in un sentimento per il quale non si possono più addurre ulteriori « ragioni ».

« Non è solo in poesia e in musica che dobbiamo seguire il nostro gusto e il nostro sentimento, ma così pure in filosofia. Quando sono convinto di qualche principio, è solo un'idea che mi colpisce più fortemente... Gli oggetti non hanno fra loro alcuna connessione scopribile; il nostro inferire dall'apparizione di un oggetto l'esistenza di un altro

non viene da altro principio che dalla consuetudine agente sull'immaginazione »⁶.

A questo punto subentra la svolta critica di Kant. Essa conferma l'analisi di Hume in tutta la sua estensione in quanto anch'essa respinge ogni fondazione razionalistico-metafisica del principio causale, ogni deduzione di questo da « soli concetti ». Su tale via, per lo meno, non si può mai dedurre un particolare rapporto causale e dimostrarlo necessario. Per ogni conoscenza siffatta non abbiamo mai altra risorsa che i dati empirici, i quali ci informano sempre solo intorno a quanto accade ma non intorno al « perché » esso accade o « doveva » accadere. Ma nella sua argomentazione Kant va anche piú oltre; egli la estende anche al concetto universale di causalità. « Come qualcosa in generale possa cangiare — così egli dichiara — come sia possibile che a uno stato in un punto del tempo succeda in un altro punto uno stato opposto, noi non ne possiamo avere il minimo concetto a priori. A ciò si richiede la conoscenza di forze reali, che può esserci data solo empiricamente, per es. delle forze motrici, o, che è tutt'uno, di certi fenomeni successivi (come movimenti) che indicano tali forze »⁷. Giustamente dunque Hume sosteneva che con la ragione non possiamo scorgere in nessun modo la possibilità della causalità, ossia della relazione fra l'esistenza di una cosa e l'esistenza di un qualcos'altro qual si sia, che dalla prima sia posto necessariamente.

Ma una volta concesso tanto, che altro resta ancora della presunta « apriorità » del concetto di causalità? Che altro rimane della sua universalità e necessità? Come può essere « universale » questo concetto se non può essere provato per « cose in generale »? E come può valere « necessaria-

⁶ Vedi *Treatise of Human Nature*, libro I, parte III, sez. 8^a, a cura di Selby-Bigge, Oxford 1951, p. 103.

⁷ *Critica della ragion pura*, 2^a ed. tedesca, p. 252; ed. a cura di E. Cassirer, vol. III, p. 186 [cfr. trad. it. di G. Gentile e G. Lombardo-Radice, Bari 1949, vol. I, p. 220].

mente » se, per dargli un determinato contenuto concreto, dobbiamo prendere tale contenuto dall'esperienza, che invece resta sempre « accidentale »? Si può mai scansare la conseguenza di Hume dopo aver ammesso tutte le sue premesse? Non dobbiamo forse concedere che la necessità da noi ascritta al principio causale sia « attribuita solo come una finzione » che sia una semplice apparenza quale ci dà ad intendere una lunga abitudine? ⁸ A tutte queste obiezioni non si potrebbe trovare di fatto alcuna risposta: — a meno che non modifichiamo radicalmente l'impostazione del problema. Se ci domandiamo come una cosa possa essere la causa di un'altra, ricadiamo senza scampo nella scepsi di Hume; anzi, secondo Kant, lungi dallo scorgere a priori come una cosa eserciti qualche azione su un'altra, a priori non si può vedere neppure la possibilità che una cosa in generale possa essere mutata. Ma la prima mossa d'avvio e la prima esigenza di Kant consistarono per l'appunto nel non riferire la questione critica direttamente alle cose bensì piuttosto alla conoscenza. È questa la svolta e la conversione che egli vuole esprimere e fissare nel suo concetto cardine di « trascendentale ». « Chiamo trascendentale ogni conoscenza che non si occupa degli oggetti ma del nostro modo di conoscenza degli oggetti in quanto questa deve essere possibile a priori » ⁹. Pertanto l'analisi trascendentale del concetto di causalità che Kant pone di fronte e contro l'analisi psicologica di Hume, non può concernere l'essere delle cose e la loro dipendenza reciproca, bensì solo la forma della conoscenza delle cose, la forma del sapere oggettivo. Se riferiamo la questione all'« interno della natura », se ad esempio ci domandiamo con Leibniz come la « sostanza semplice » produca la serie dei suoi vari stati — allora il principio di causalità, una volta inteso nel

⁸ Cfr. *Prolegomeni*, § 27.

⁹ *Critica della ragion pura*, 2^a ed. ted., p. 25; ed. Cassirer, vol. III, p. 49; trad. it. cit., vol. I, p. 58.

suo senso « trascendentale », ci pianta completamente in asso. Esso ci nega ogni ragguaglio intorno al come i singoli stati individuali si annodino gli uni agli altri entro le sostanze assolute e in qual modo si condizionino a vicenda. Il principio di causalità non vale per « cose in generale », per quell'essere di cui trattano la metafisica e l'ontologia razionalistiche, bensì vale solo per « oggetti di esperienza possibile ». Esso non è altro che una determinata direttiva, la quale serve « a sillabare fenomeni per poterli leggere come esperienze ». « Io scorgo dunque benissimo... il concetto di causa come un concetto appartenente necessariamente alla semplice forma dell'esperienza; ma non scorgo affatto la possibilità di una cosa in generale come causa, e precisamente per la ragione che il concetto di causa non indica per nulla affatto una determinazione inerente alle cose bensì solo all'esperienza ». Dunque secondo Kant il principio di causalità vale per la « natura » solo nella misura in cui definiamo la natura considerata *materialiter* come l'insieme di tutti gli oggetti dell'esperienza, considerata formalmente come l'esigenza delle cose in quanto è determinata secondo leggi universali (Prolegomeni, §§ 14-16 e 19). Ma questa deduzione del principio di causalità non si riduce forse a un semplice circolo? Provare che solo nel presupposto di essa i fenomeni si possono ordinare sotto leggi e quindi riunire in un sistema, in una « unità sintetica », significa forse « intendere » la causalità? L'accusa di circolo vizioso sarebbe di fatto giustificata — se pensassimo il concetto di « intendere » ancora nel senso in cui l'avevano usato i sistemi dommatici della metafisica. Ma è proprio questo ideale del « comprendere » ciò che Kant respinge e cerca di sostituire con un altro. Certo nella teoria di Kant i concetti di « legalità » e di « oggettività » si rapportano l'uno all'altro in stretta correlazione; ma non si annodano a vicenda in circolo. Infatti essi non sono l'uno l'equivalente analitico dell'altro bensì l'uno il presupposto dell'altro, la sintetica « condizione della sua possibilità ». È possibile

riferire i fenomeni a un « oggetto » solo nella misura in cui è possibile inserirli in un ordinamento legale. I giudizi d'esperienza non possono mai mutuare la loro validità oggettiva dalla conoscenza immediata dell'oggetto bensì dalla validità universale dei giudizi empirici (*Proleg.*, § 19).

Circa il modo di argomentare del quale ci siamo valse in queste leggi trascendentali della natura — dice Kant a proposito della sua deduzione delle « analogie dell'esperienza » — c'è da fare una osservazione che deve essere nello stesso tempo molto importante come norma per ogni altro tentativo di dimostrare a priori proposizioni intellettuali e insieme sintetiche. Se avessimo voluto dimostrare queste analogie dogmaticamente, cioè per concetti... sarebbe stata tutta fatica sprecata. Infatti, da un oggetto e dalla sua esistenza non si può assolutamente venire all'esistenza o al modo di esistere dell'altro, per via di semplici concetti di queste cose, in qualunque modo si analizzano questi concetti. Che cosa ci restava dunque? La possibilità dell'esperienza come conoscenza, nella quale tutti gli oggetti ci devono infine poter essere dati, se la loro rappresentazione deve avere per noi realtà oggettiva... In mancanza di questo metodo e nell'illusione che proposizioni sintetiche, che l'uso empirico dell'intelletto raccomanda come suoi principi, si dovessero dimostrare dogmaticamente, è dunque accaduto questo fatto: che si sia cercata tanto spesso, ma sempre invano, una prova del principio di ragion sufficiente¹⁰.

Con ciò è enunciato il principio di fondo del nuovo « determinismo critico », il solo che Kant vuole sostenere e difendere. Tale determinismo non afferma nulla intorno al « fondamento delle cose », anzi nemmeno si riferisce immediatamente alle cose empiriche come tali. Esso è piuttosto un principio della formazione di concetti empirici: un'affermazione e una norma intorno al come dobbiamo prendere e foggiate i nostri concetti empirici affinché essi siano all'altezza del loro compito,

¹⁰ *Ibidem*, p. 263; ed. Cassirer, vol. III, p. 193 ss.; trad. cit., vol. I, p. 228.

il compito della « oggettivazione » dei fenomeni. Quando i nostri concetti di causalità soddisfano questa richiesta, è inutile cercare per essi un'altra giustificazione e una presunta dignità superiore. Ciò che chiamiamo l'« esistenza » delle cose — se interpretiamo questo concetto nel senso « critico » — non è un essere che stia prima di ogni esperienza e indipendentemente dalle condizioni di questa: non è altro che l'idea di un'esperienza possibile nella sua compiutezza assoluta¹¹. La specie di « verità oggettiva » che ci è lecito assegnare al principio di causalità, è quindi rigorosamente determinata ma al tempo stesso rigorosamente limitata. Contro Hume Kant tiene fermo che una deduzione semplicemente soggettiva di questo principio non può mai riuscire adeguata a quanto esso significa. La causalità è un'affermazione sull'accadere naturale, non sul semplice decorso della nostra rappresentazione di esso. La riduzione a quest'ultimo pertanto è impossibile già perché ad una analisi più approfondita risulta che la tesi apparentemente solo psicologica di Hume implica una tesi « trascendentale » e non può essere resa intelligibile senza di essa. Se non nelle forze della natura, Hume doveva presupporre una regolarità oggettiva per lo meno nel gioco delle nostre forze conoscitive. Abitudine ed esercizio, memoria e immaginazione secondo lui sono le vere fonti della causalità. Ma esse tutte non designano propriamente altro se non concetti psicologici generali che Hume contrappone ai concetti generali propri della fisica. Per poter formare questi concetti generali deve darsi una costanza nell'accadere psichico. Se mai si deve rendere comprensibile l'origine della rappresentazione della causalità, memoria e immaginazione devono agire secondo regole, non devono essere attive a casaccio bensì in un determinato modo costante. E a questo riguardo il « meccanismo delle associazioni » non è minor problema né più

¹¹ *Ibidem*, p. 523; ed. Cassirer, vol. III, p. 352; trad. cit., vol. II, p. 484 ss.

facilmente solubile di quel meccanismo che è presupposto dalla scienza della natura. Almeno qui secondo Hume domina un rigoroso determinismo: immaginazione e intelletto non possono sottrarsi alla coazione dell'associazione, all'impulso dell'abitudine. Ma Kant va ancora un passo piú oltre. Contro Hume egli mostra che non è lecito fare di questa determinazione psicologica il fondamento della determinazione oggettiva, proprio perché essa presuppone già quest'ultima. Se in generale non vi fosse nessuna costanza dell'accadere « esterno », allora non si riuscirebbe a intendere come poter venire a quella costanza dell'accadere « interno » a cui Hume tiene fermo. « Se il cinabro fosse or rosso or nero, ora leggero ora pesante... la mia immaginazione empirica non potrebbe nemmeno avere occasione di far venire alla mente il cinabro pesante nella rappresentazione del color rosso »¹² Donde si vede che la scepsi di Hume infine è incorsa in un circolo: che essa per la sua dimostrazione rinvia implicitamente a uno stato di cose che esplicitamente essa doveva negare.

Se ora tiriamo le somme di queste considerazioni, ne risultano due corollari importanti per il seguito della nostra ricerca¹³. Da un lato è chiaro che dopo il decisivo progresso segnato da Hume e da Kant nell'analisi del problema della causalità, non è piú possibile concepire la relazione causale come una semplice relazione fra cose né volerla dimostrare o confutare in questo senso. Dopo Hume e Kant siffatta posizione del problema risulta anacronistica e, per

¹² *Critica della ragion pura*, 1ª ed. ted., p. 100; ed. Cassirer, vol. III, p. 613.

¹³ Qui non si mirava a una completa analisi storica della teoria kantiana della causalità; si trattava solo di metterne in rilievo alcuni momenti significativi rispetto alla discussione moderna. Per quanto concerne il primo compito rimando a esposizioni precedenti: *Das Erkenntnisproblem in der Philosophie und Wissenschaft der neueren Zeit*, vol. II, Berlin 1922 [trad. it. di G. Colli col titolo *Storia della filosofia moderna*, Torino 1955] e *Kants Leben und Lehre*, Berlin 1918.

lo meno, non può accampare alcuna pretesa di dare espressione adeguata al senso e all'uso scientifici del concetto di causalità. Che cionondimeno essa ancora non sia affatto superata pienamente vuoi nella discussione filosofica, vuoi in quella della fisica ma ricorra sempre di nuovo, non può stupire quando si rifletta che l'uso comune del concetto di causalità, l'uso vigente nella vita quotidiana, si muove quasi esclusivamente in questa sfera. In ogni nostro commercio pratico con la natura, in ogni nostro agire, si tratta sempre soprattutto di esercitare su di essa qualche azione nel senso di introdurre determinate trasformazioni nel mondo delle cose; — nel senso di portare le cose da uno stato in un altro. E così tale prospettiva ci si impone sempre di nuovo, pur senza volerlo, anche in ogni ricerca teoretica, di pura « gnoseologia critica ». Eppure una simile prospettiva, come dimostra un'analisi rigorosa, può offrire solo una prima formula insufficiente, che non basta in nessun modo a una definizione esatta e a una legittimazione realmente scientifica del concetto di causalità. Le cose del *common sense*, dell'esperienza quotidiana, che noi tanto in fretta stimiamo « cause » senza stare a pensarci molto, per lo più cessano di essere tali non appena ad esse si volga la conoscenza strettamente scientifica per studiarle *sub specie* dei suoi concetti fondamentali. Per lo meno è chiaro che quanto l'esperienza quotidiana suole prendere come una cosa, come un tutto a sé stante non suddiviso in parti, in realtà è in sé eterogeneo e molteplice — è un insieme molto complesso non tanto di « cose » quanto piuttosto di « condizioni ». Se vogliamo arrivare ad autentici giudizi di causalità fecondi sul piano scientifico, dobbiamo seguire queste condizioni una per una fino a risolverle nei loro elementi primi. Hume e Kant si rendono perfettamente conto di questo stato di cose — ma anche loro certo continuano a parlare il linguaggio comune della vita quotidiana. Ciò accade soprattutto là dove essi cercano di trattare la relazione causale in esempi concreti. Movendo da un suo generale atteggiamento

metodico Hume a questo proposito si adopera per restare il piú vicino possibile alla sfera dell'attestazione immediata, di quanto è « dato » dalla percezione sensibile. Egli stabilisce il principio che tra « causa » ed « effetto » debba sussistere un nesso immediato, quasi da vedere e toccare con mano; che i due debbano essere allacciati l'una all'altro dalla loro vicinanza diretta nello spazio e dalla loro successione immediata nel tempo. Il processo della associazione su cui si fonda la formazione del concetto di causalità, può farsi valido solo in una « contiguità » siffatta. « Tutti gli oggetti considerati cause o effetti sono contigui; né alcuna cosa può agire in un tempo o in uno spazio che sia spostato anche di pochissimo da quelli della sua esistenza. Ci è dunque lecito considerare la relazione di contiguità come essenziale a quella di causalità »¹⁴. Anche Kant parla non di rado come se a definire un nesso causale bastasse considerare stati differenti di una medesima cosa nella loro semplice successione e come se in tale considerazione potessimo qualificare immediatamente come « causa » del successivo uno stato precedente. Se ad esempio vediamo una nave scendere lungo la corrente, non possiamo scambiare a piacere le percezioni che ne abbiamo in momenti diversi. Piuttosto la percezione di una sua posizione sottostante succede sempre alla percezione della nave in una posizione soprastante lungo il corso del fiume: e questa successione « oggettiva », diversa dalla *apprehensio* puramente soggettiva, si può stabilire solo ponendo l'uno stato come « causa » e il secondo come « effetto ». Ma è facile scorgere che dal punto di vista della spiegazione causale delle scienze questo esempio è una semplificazione inammissibile. Per allacciare l'una all'altra le due posizioni della nave sopra e sotto, non possiamo certo accontentarci di seguirle nella semplice sequenza temporale ma dobbiamo cercare le « forze » con cui abbiamo a che fare in tale

microm

in

Treatise, libro I, parte III, sezione 2^a; ed. Selby-Bigge cit. p. 75.

processo. Se escludiamo dalla rappresentazione di queste « forze » tutte le rappresentazioni secondarie di cose-sostanze, ci vediamo condotti unicamente a certe leggi generali — la legge di gravitazione, le leggi dell'idrostatica e dell'idrodinamica, ecc. — dalle quali pensiamo determinato il moto della nave. Queste leggi sono i veri e propri elementi componenti della relazione causale assunta; ma per formularle esattamente la fisica deve servirsi di un suo proprio linguaggio simbolico che è molto lontano dal linguaggio delle « cose ».

Un secondo corollario che dobbiamo dedurre dalle considerazioni avanzate fin qui, concerne il problema da cui abbiamo preso le mosse: la questione della « formula dell'universo di Laplace ». Ora questa formula entra in una connessione nuova. Cessa di essere un semplice caso particolare per divenire un caso tipico in cui possiamo studiare in estensione generale il carattere e la formazione di determinate strutture concettuali metafisiche. La formula di Laplace non fa altro che fissare l'uso empirico di un determinato concetto ma poi eleva questo uso « all'incondizionato » col perseguirlo fin oltre i limiti sempre presenti nell'esperienza, e alla fine lo disimpegna da tutte le limitazioni vigenti nell'empiria. Ma ciò caratterizza appunto quella forma di « passaggio al limite » di cui l'analisi critica nega e contesta la legittimità. Una delle parti principali della *Critica della ragion pura*, la dialettica trascendentale, è dedicata all'esplicitazione delle contraddizioni e delle « surrezioni » in cui la ragione incorre in tale procedimento. Queste contraddizioni sono seguite dal lato dell'idea di mondo come da quello dell'idea di anima e dell'idea di Dio. Ma secondo Kant, d'altra parte, in questo sconfinamento non si tratta di un semplice errore di concetto o di argomentazione bensì di una illusione quasi inevitabile. È questa illusione che accanto alla « logica trascendentale » quale logica della verità ci spinge a porne una seconda: la « logica dell'apparenza ». Quest'ultima deve essere intesa a servire da « critica dell'intelletto e della ragione rispetto

al loro uso iperfisico »¹⁵. Si riconosce subito che tale « uso iperfisico » di un principio che in apparenza ha un contenuto puramente fisico e pertinente alla scienza fisica, è la vera e propria caratteristica distintiva della formula di Laplace. Il dettato di questa formula segue in tutto la via della formazione dogmatica di concetti che Kant ha già descritto nelle prime pagine della *Critica della ragion pura*. La ragione comincia con principi il cui uso è inevitabile nel corso dell'esperienza e al tempo stesso sufficientemente garantito da questa. Con tali principi essa sale sempre più in alto a condizioni sempre più remote per giungere infine a proposizioni che oltrepassano ogni possibile uso empirico e nondimeno appaiono tanto insospettabili che vi acconsente anche il senso comune. Ma con ciò cade in oscurità e contraddizioni perché ora essa è spinta oltre verso conseguenze che non riconoscono più alcuna « pietra di paragone dell'esperienza ». « Il campo di queste lotte senza fine si chiama metafisica ». Se vogliamo evitare tali questioni insolubili e tali lotte senza speranza, non resta altro che ricondurre di nuovo indietro la questione nel suo campo originario e trattenerla rigorosamente all'interno di esso. Il problema della causalità va preso quale un problema dell'intelletto « discorsivo », non di quello « intuitivo »: dell'intelletto finito, non di quello infinito. Se l'intelletto finito è « limitato », tale limitazione certo non significa affatto un contrassegno solo negativo, ma anche positivo. Non indica nell'intelletto solo un limite accidentale ed esteriore; bensì è la condizione necessaria della sua attività e fecondità. Non è lecito pensare il limite come semplice ostacolo a cui noi ci si debba sottrarre non appena e per quanto possibile: esso piuttosto delimita il solo campo in cui il nostro pensiero e il nostro conoscere si compiono — quello in cui essi ottengono il loro significato concreto.

¹⁵ *Critica della ragion pura*, 2^a ed. ted., p. 88; ed. Cassirer, vol. III, p. 88; trad. it. cit., vol. I, p. 105.

La « restrizione » dell'intelletto alle condizioni e al limite dell'esperienza possibile è dunque al tempo stesso la sua unica « realizzazione ». Da questo punto di vista, che è quello del « determinismo critico », si riesce ora a specificare con precisione il difetto della formula di Laplace. Tale formula toglie la « restrizione » del conoscere causale — ma con ciò perde anche la sua « realizzazione », la sua unica attuazione empirica possibile¹⁶. Allora un concetto come quello dello « spirito di Laplace » è sì l o g i c a m e n t e incontestabile, in quanto non implica alcuna contraddizione immediata. Ma nondimeno resta un « concetto vuoto » — un concetto a cui non corrisponde alcun oggetto empirico e neppure è da usare come ideale, come massima e direttiva metodica per la nostra conoscenza. Lo si può ammettere come puro oggetto di pensiero [*Gedankending*], come noumeno; ma poi — per dirla nel linguaggio della *Critica della ragion pura* — resta un noumeno nel senso negativo, non in quello positivo. Possiamo figurarci un'intelligenza che invece di dover ricorrere alla forma faticosa delle nostre argomentazioni causali ed essere condotta da un fenomeno all'altro, abbracci in un solo sguardo la totalità dei fenomeni, il tutto di tutti gli stati possibili del cosmo. Ma con ciò non avanziamo di un passo: non guadagnamo nessun particolare « oggetto intelligibile » bensì « un intelletto al quale appartenesse un oggetto siffatto sarebbe già di per sé un problema in quanto intelletto capace di conoscere il proprio oggetto non discorsivamente, mediante categorie, ma in modo intuitivo, con una intuizione non sensibile; né della possibilità di tale oggetto noi possiamo farci la più piccola idea »¹⁷. Ora dunque la concezione lebniziana del « destino » come ininterrotta determinazione matematica e insieme metafisica dell'accadere co-

¹⁶ Intorno alla « restrizione » e alla « realizzazione » cfr. specialmente *ibidem*, p. 185; ed. Cassirer, vol. III, p. 146 ss.; trad. it. cit., vol. I, p. 151 ss.

¹⁷ *Ibidem*, p. 311; ed. Cassirer, vol. IV, p. 222; trad. it. cit., vol. I, p. 263.

smico ha perduto il suo significato e la sua applicabilità: è riconosciuta come l'ipostasi inammissibile di un ideale della ragion pura. Simili ipostasi sono allettanti perché con esse parrebbe che noi potessimo raggiungere la meta, il « compimento » della conoscenza: ma proprio questo presunto compimento si dissolve in un inganno. Una formula come quella di Laplace sembra riunire in un sol punto focale tutti i raggi dispersi della nostra conoscenza empiricamente causale: ma ad una considerazione piú serrata esso si dimostra un punto solo immaginario, un *focus imaginarius*¹⁸. La via piana che il determinismo metafisico credeva di poter battere per arrivare al mondo dell'« incondizionato » con un netto sconfinamento dal mondo del « condizionato », si basa dunque su un « falso appagamento di sé da parte della ragione »: « infatti metter da parte, con la parola *i n c o n d i z i o n a t o*, tutte le condizioni di cui l'intelletto ha sempre bisogno, per ritenere qualcosa come necessario, è ancora tutt'altro che sufficiente a far intendere se col concetto d'un essere incondizionatamente necessario io poi pensi tuttavia qualcosa o se per avventura non pensi piú nulla »¹⁹.

Con ciò interrompo queste considerazioni d'ordine storico che qui non ho avanzato per se stesse bensí per averne una determinata direttiva per la seguente ricerca sistematica. Tale ricerca non ha a che fare col problema della causalità *in toto*, bensí col problema della causalità propria della scienza fisica. Quindi solo il determinismo « critico », non quello « metafisico », può costituire il punto di partenza e di impostazione per questa nostra ricerca. Se al di fuori del campo della fisica il determinismo metafisico possieda un significato autonomo — è questione che qui anzitutto non si deve neppure proporre. Nel prosieguo il problema della causalità si dovrà intendere circoscrit-

¹⁸ *Ibidem*, p. 672; ed. Cassirer, vol. III, p. 441; trad. it. cit., vol. II, p. 517.

¹⁹ *Ibidem*, p. 621; ed. Cassirer, vol. III, p. 410; trad. it. cit., vol. II, p. 482.

to esclusivamente alla sua portata gnoseologico-critica, come una questione della *metodologia fisica*. Per tale esame non ci occorre risalire oltre la formulazione che al principio causale è stata data nelle ricerche critiche di Hume e Kant. Ma d'altra parte non ci possiamo accontentare di tale versione astratta e generica bensì dobbiamo seguire il concetto di causalità dovunque fin nelle sue applicazioni determinate e fin nella specializzazione che in queste esso subisce. Solo da tali specializzazioni del concetto risalta con chiarezza il suo uso caratteristico e la sua caratteristica delimitazione: uso e delimitazione non tracciati ad arbitrio ma dal compito stesso della conoscenza fisica, dal suo ideale di sapere empiricamente oggettivo.

PARTE SECONDA

IL PRINCIPIO CAUSALE DELLA FISICA CLASSICA

CAPITOLO I

I TIPI FONDAMENTALI DI ENUNCIATI FISICI: GLI ENUNCIATI DI MISURA

Se conformemente a quanto risulta dall'analisi non intendiamo il concetto di causalità come un concetto empirico nel senso che esso appartenga immediatamente a quanto consta nel « dato » e si possa esibire come la copia diretta di una semplice « impressione » o « percezione » — e se d'altro lato non lo possiamo intendere come un concetto a priori nel senso che esso contenga un enunciato incondizionatamente certo e necessario intorno a « tutti gli oggetti in generale » — allora non resta altro che pensarlo come una condizione inerente non alle cose ma solo all'esperienza. E allora il principio di causalità non enuncia nulla intorno all'« essere » metafisico delle cose, intorno all'« interno sostanziale della natura »; esso indica solo « come anzitutto si possa avere un determinato concetto empirico di ciò che accade » (vedi, qui sopra, p. 32 ss.). Tuttavia una simile indicazione generica è certo ben lungi dal bastare. Si impone ora il compito di seguire come essa si espliciti in concreto — come ottenga una vita autonoma nel costruire e portare avanti l'indagine fisica. Quale via batte la fisica e quali direttive metodiche segue non per descrivere solo vagamente ciò che accade coi concetti dell'esperienza quotidiana e del linguaggio comune ma per averne un concetto sperimentale esatto, veramente definito? E quale funzione spetta al principio causale in tale procedere? Pare che questa domanda ammetta una soluzione semplice: per ottenere informazioni circa i principî metodici sui quali è fondato l'effettivo procedere della fisica, non abbiamo

che da analizzarlo quale òi si presenta nella storia di essa, non abbiamo che da interrogare in proposito il « fatto » scientifico della fisica. Ma qui certo subentra una nuova difficoltà. Se infatti passiamo in rassegna la serie dei grandi studiosi della natura che hanno concorso alla costruzione della fisica classica e ne hanno gettato le fondamenta in una continua collaborazione, vediamo quanto poco essi concordino fra loro a proposito di ciò che chiediamo. Tutti loro non si limitarono a compiere semplicemente la loro opera di osservatori sperimentali e di teorici della fisica ma insieme cercarono anche di intenderla e giustificarla sul piano della critica gnoseologica. Ma in qualità di teorici della conoscenza essi non di rado sembrano abbandonare e dimenticare completamente il terreno comune su cui si trovano. Si dividono in « correnti » e « scuole » diverse che quasi non sembrano piú tenute insieme dal vincolo di un compito comune. Galilei e Keplero, Huyghens e Newton, Robert Mayer e Helmholtz, Kirchhoff e Mach, hanno meditato tutti quanti sulla natura della « spiegazione » fisica e hanno cercato di scoprire e definire il principio che sta alla base di tale spiegazione. Ma le loro definizioni non si lasciano ridurre a « un » solo denominatore: divergono in elementi determinati di essenziale importanza. Eppure, d'altro canto, da queste differenze e divergenze la fisica non è stata né arrestata nel suo « continuo passaggio » a scienza né deviata dal suo scopo. Il suo operare presenta in proposito una propria continuità interna, una organicità metodica immanente che alla fine si fa valere sempre di nuovo — anche là dove i giudizi intorno a tale operare si differenziano ampiamente gli uni dagli altri. Pertanto dobbiamo cominciare anche noi da questo operare e interrogarlo direttamente. Se invece che le teorie intorno alla fisica seguiremo il processo dell'elaborazione concettuale propria della fisica stessa, forse potremo attenerci e sperare di scoprire in tale processo certi tratti fondamentali invarianti rispetto al variare dei diversi sistemi gnoseologici di riferimento.

Prima di addentrarci in questo esame dobbiamo tuttavia tener conto di un altro fatto d'ordine generale. Una parte non trascurabile delle difficoltà con cui ha da lottare la discussione moderna del problema della causalità nella fisica, a mio avviso dipende dal fatto che fin qui la gnoseologia generale non ha portato a una distinzione chiara e netta dei diversi tipi di enunciati fisici. Qui c'è una lacuna che si fa sentire sempre di nuovo e impedisce di guardare addentro nella « articolazione », nell'organica struttura metodica del sistema della fisica. Quanto servano nei diversi campi della conoscenza siffatte considerazioni « tipologiche » ce lo dice lo sviluppo moderno della matematica e della logica matematica. È noto che la « crisi dei fondamenti » apertasi nella matematica è cominciata dalle elaborazioni concettuali della teoria degli insiemi e che una delle lacune essenziali di queste elaborazioni concettuali stava in ciò, che nella formazione delle classi si trascuravano certe condizioni le quali, come si dimostrò in seguito, sono indispensabili per una definizione corretta degli insiemi stessi. Russell ha cercato di sanare le lacune emergenti in questo campo, che portavano ai paradossi della teoria degli insiemi, costruendo la sua « teoria dei tipi ». Qui si stabilì nettamente che non si potevano raccogliere in classi elementi a piacere ma che il diritto di tale raccolta doveva essere deciso secondo determinati criteri. Soprattutto si vide che non è ammissibile trattare elementi e classi come oggetti di uno stesso ordine — che piuttosto essi sono eterogenei gli uni rispetto alle altre e « appartengono a sfere reciprocamente estranee ». A evitare le antinomie della teoria degli insiemi si riuscì solo con la prescrizione che gli elementi di una classe non appartenessero a tipi diversi, e con l'assetto completo di una definita « gerarchia di tipi », distinguendo da un lato individui, dall'altro classi di primo grado, di secondo grado, ecc.¹.

¹ Per la « teoria dei tipi » di Russell vedi *Principia Mathematica*, Cambridge 1910, vol. I, p. 39 ss., 168 ss.; e *Introduction to*

Qui io non mi occupo dello sviluppo di questa teoria; me ne valgo solo per richiamare l'attenzione su questo: che anche gli enunciati della fisica conducono a un problema simile. Se esaminati e analizzati criticamente, anche di essi è chiaro che non appartengono affatto tutti quanti al medesimo piano del sapere. Piuttosto domina anche qui una [netta differenza] — anzi, una specie di « eterogeneità » che spesso viene ignorata o trascurata solo perché siamo abituati ad assegnare tutti i giudizi fisici, senz'altra distinzione, a un concetto superiore comune, al concetto di « giudizio empirico », e a sussumerli sotto di questo. Il diritto di tale sussunzione è incontestabile: infatti la relazione di tutti gli enunciati fisici all'esperienza è realmente un elemento comune e essenziale per tutti loro. Ma proprio tale relazione non si può raggiungere con una semplice somma di dati particolari bensì esige l'addentellarsi di momenti che appartengono a diversi tipi e ordini del sapere e che per conseguenza si devono tenere accuratamente distinti.

Quale prima forma di giudizi fisici incontriamo quegli enunciati che in genere si possono designare come enunciati di misura. Essi sono il primo passo di quel passaggio decisivo che dal mondo del « dato » ci porta nel mondo della conoscenza scientifica della natura, dal « mondo sensibile » al « mondo fisico ». La trasformazione dei dati percettivi immediati in determinazioni tali in cui entrino concetti di misura e di numero, è la condizione preliminare per ogni giudizio fisico; essa è costitutiva per il « senso » in cui prendere tale giudizio e secondo cui interpretarlo e intenderlo. È evidente che già questa prima definizione di senso contiene in sé una quantità di problemi

Mathematical Philosophy, London 1920², p. 135 ss. [cfr. trad. it. di L. Pavolini, Milano, Longanesi, 1951]. Sul concetto di « estraneità » e « mescolanza » di sfere vedi R. CARNAP, *Der logische Aufbau der Welt*, Berlin 1928, §§ 29 e 30.

logici e metodologici. Quell'empirismo che credeva di poter interpretare gli enunciati fisici semplicemente come una riproduzione immediata dei dati sensibili, come una « copia » di determinate « impressioni », oggi non ha più bisogno di essere confutato per disteso. Proprio attraverso lo sviluppo compiuto dalla fisica negli ultimi decenni non si è mai veduto così chiaramente come ai giorni nostri quanto poco riesca soddisfacente questa semplice teoria della « riproduzione ». Tra i primi enunciati di misura della fisica e quello che ci è dato nella semplice osservazione ed è descrivibile nel linguaggio di questa, ci corre una bella distanza. Per misurare con lo sguardo tale distanza e gettare un ponte fra i due termini di tale contrasto occorrono procedimenti di pensiero sommamente complessi, accertare la forma dei quali è comunque già un compito proprio ed autonomo della critica gnoseologica. Ma per la ricerca seguente possiamo prescindere da questo compito. La sua soluzione riguarda il problema della struttura concettuale della fisica² — mentre nel seguito noi avremo a che fare essenzialmente con la questione della sua struttura proposizionale. Per venire a una decisione in questo secondo campo, non abbiamo bisogno di risalire oltre gli enunciati fisici di misura; infatti questi formano per così dire il materiale di base con cui il fisico costruisce il suo mondo, sono gli elementi semplici di quella « realtà » che egli cerca di denotare e qualificare nei propri giudizi.

Il passaggio dalla concezione sensibile immediata all'osservazione e alla valutazione metodico-sistematica di questa, visto dal lato puramente estensivo segna un arricchimento straordinario del nostro sapere. In tale passaggio

² Per questo problema rimando alla precedente trattazione nel mio scritto *Substanzbegriff und Funktionsbegriff*, Berlin 1910, cap. IV. Della più recente letteratura in proposito si tengano presenti soprattutto gli scritti di R. CARNAP, *Physikalische Begriffsbildung*, Karlsruhe 1926, e le esposizioni di H. WEYL, *Philos. der Mathematik u. Naturwissenschaft in Handbuch der Philosophie*, 1926, p. 106 ss.

ci liberiamo di quei limiti contingenti che dipendono dalla nostra organizzazione vincolata ai singoli organi di senso. Si può cercare di spiegare questo ampliamento addirittura come il progresso essenziale e il senso vero e proprio della indagine fisica. Nei *Principi di psicologia* Herbert Spencer ha cercato di svolgere la tesi che tutti i nostri strumenti fisici non sono altro che « estensioni dei nostri organi di senso » — come tutte le nostre leve e viti, tutti i nostri cunei e torni sono estensioni artificiali dei nostri arti. « La lente di ingrandimento non fa che aggiungere una lente più larga a quella di cui dispone il nostro occhio; così come la leva è solo una leva in più aggiunta al sistema di leve formato dal braccio e dalla mano. L'affinità tanto chiara e tangibile in questi primi passi, vale del tutto in generale »³ Il risultato più importante degli strumenti fisici di misura sarebbe allora che essi ci permettono di togliere quei limiti che ci sono imposti dalla nostra costituzione organica, dalla specie e dalla conformazione dei nostri apparati sensorî. La percezione in quanto processo psico-fisico è soggetta alle leggi psico-fisiche fondamentali, specialmente alla legge di Fechner-Weber della soglia assoluta dello stimolo e della soglia differenziale. Il progresso verso l'osservazione fisica sembra emanciparci da tale condizione. La « sensibilità » dei nostri sensi viene sostituita dalla sensibilità delle nostre apparecchiature fisiche — e quest'ultima sembra suscettibile di un ampliamento quasi illimitato. A 10 cm. di distanza l'occhio riesce appena a distinguere due righe staccate di 1/40 di millimetro, laddove col microscopio nota ancora l'intervallo di 1/7000 di millimetro — l'orecchio è in grado di rilevare l'intervallo temporale di 1/500 di secondo fra due scintille elettriche, mentre con uno specchio rotante sono possibili cronometraggi ottici fino a $\left(\frac{1}{10}\right)^8$ di secondo⁴. Ma questo potenziamento

³ H. SPENCER, *Principles of Psychology*, London 1870, voi. I, § 164.

⁴ Ulteriori informazioni in proposito nella lezione di O. WIE-

della percezione sensibile con l'incremento che ne viene, questa estensione di tutto quanto il nostro orizzonte di realtà effettuale è nondimeno solo uno e in nessun modo l'unico motivo determinante del processo di pensiero e d'indagine proprio della fisica. Non meno importante ed essenziale è un altro tratto, che a prima vista sembra addirittura opposto a questo motivo. All'ampliamento del quadro dell'universo che si compie nella fisica, corrisponde dall'altro lato una concentrazione di somma importanza. Il materiale nuovo che ora si accalca innanzi da ogni lato, non porta affatto a un allentamento della forma bensì a una formalizzazione molto piú serrata e piú rigida. Al crescente ambito estensivo del sapere corrispondono la sua compenetrazione e il suo compimento intensivi sempre piú forti. La forma tipica della conoscenza fisica si fa valere nel fatto che i due momenti non solo mantengono l'equilibrio ma anche si mostrano l'uno superiore all'altro, nel fatto che l'uno, come principio organizzante, compenetra e plasma la molteplicità delle osservazioni particolari. Ogni passo avanti nella proliferazione di varietà diverse è al tempo stesso l'invito a una nuova formazione unitaria e indica la strada verso una siffatta formazione unitaria. In tal modo il mondo « fisico » si differenzia dal « mondo sensibile » in una direzione che è direttamente opposta a quella considerata per prima. Quanto piú avanza il processo di pensiero della fisica, tanto piú il mondo sensibile sembra sbiadire; tanto piú questo sembra perdere tutta la sua pienezza iniziale e la sua originaria « varietà di colori ». In confronto con tale varietà e pienezza il mondo fisico, il mondo dei concetti fisici di misura e di legge, sembra solo un « regno delle ombre »⁵. Ma proprio su tale carattere puramente simbolico si fonda la sua precisione e la sua efficienza specifica.

NER, *Die Erweiterung der Sinne*, Leipzig 1900; e anche E. MACH, *Erkenntnis und Irrtum*, Leipzig 1905, p. 144 ss.

⁵ Espressione di Eddington; cfr. l'introduzione alla sua opera *The Nature of the Physical World*.

Mentre in genere la descrizione sensibile resta ferma al porre semplicemente le une accanto alle altre le diverse « caratteristiche » di un oggetto, la descrizione fisica non si accontenta mai di una simile collocazione di elementi in parallelo l'uno accanto all'altro. Dall'« aggregato » essa tende al « sistema »; vuole ridurre la pienezza dei fenomeni particolari e delle « proprietà » particolari a un piccolo numero di predicati qualificativi di base e derivarla da questi.

Tale riduzione, tale caratteristica « compressione » quasi violenta, è un tratto tipico di tutta la struttura concettuale e proposizionale della fisica. Nel sistema del « meccanismo cosmico » quale fu avanzato da Newton in un primo abbozzo grandioso e poi eretto a modello logico esemplare di ogni spiegazione della natura, questo processo sembrava già immediatamente alle soglie di una sua conclusione definitiva. Qui la descrizione assume la forma piú semplice pensabile. Quando si prendano a base le « definizioni » e gli « assiomi » quali Newton li ha enunciati nei *Philosophiae naturalis principia mathematica*, con essi si ha l'impalcatura fondamentale per ogni costruzione della conoscenza della natura. Infatti le « forze » presenti nella natura qui sono misurate dalle accelerazioni che esse imprimono ai singoli punti materiali — e tali accelerazioni sono funzioni della distanza delle masse e delle loro velocità relative. Così lo stato presente di un sistema fisico come il suo passato e il suo futuro, il suo « essere » e il suo « destino » sono definiti dalla indicazione di poche grandezze. Un nuovo problema sorse quando dalla descrizione dei fenomeni meccanici la fisica passò a quella dei fenomeni elettromagnetici. Qui comparve una nuova realtà fisica, la realtà [*Realität*] del « campo », i cui stati non si potevano piú ridurre semplicemente ai moti delle particelle di massa. Già nella legge fondamentale enunciata da Coulomb (1785) per l'attrazione e repulsione elettrostatica, e fissata formalmente in piena conformità al modello della legge newtoniana della gravitazione, compare un nuovo valore numerico carat-

teristico. La formula di Coulomb $K = f \frac{e_1 e_2}{r^2}$ dice come calcolare la forza con cui si attraggono o si respingono due cariche elettriche. Quanto piú questo nuovo valore numerico venne in primo piano e quanto piú attentamente fu analizzato, tanto piú la fisica si vide posta con ciò sulla via lungo la quale alla fine fu condotta dalla precedente teoria sostanzialistica della materia alla teoria moderna del campo. A questo riguardo dapprima predomina ancora una rappresentazione dualistica: « materia » e « campo » stanno, è vero, in continua interazione reciproca, ma ciascuno dei due segue leggi sue proprie. Una concezione posteriore ha cercato di superare anche questo dualismo; essa non considera piú la materia un essere autonomo, ma cerca di derivare tutte le caratteristiche di questo essere dalle leggi del campo e quindi di intendere la materia come un « parto del campo »⁶. Anche qui la descrizione fisica e la teoria fisica mostrano da capo la dote ammirevole della concentrazione. Per definire infatti lo stato del campo e determinare la sua propagazione basta la conoscenza di poche grandezze semplici, quelle dell'intensità elettrica e magnetica del campo. Se poi ad esse si aggiungono ancora le grandezze di campo della gravitazione, ne viene un quadro capace di abbracciare l'accadere della natura in tutta la sua vastità e di determinarlo nei suoi tratti piú minuti con un numero relativamente piccolo di elementi, con la conoscenza di poche grandezze caratteristiche.

Se chiamiamo gli enunciati fisici di misura « enunciati di primo grado », per dire con questo che tutti gli altri giudizi fisici devono ricorrere ad essi e in essi provarsi, tuttavia per evitare un equivoco dobbiamo aggiungere subito una restrizione importante. Non è lecito intendere la relazione fra questi « primi » enunciati e gli enunciati di « ordine superiore », come suggerisce di fare l'immagine

⁶ Per questo passaggio dalla teoria sostanzialistica della materia alla teoria del campo, cfr. le esposizioni di H. Weyl, istruttive sia dal lato storico che da quello sistematico, nello scritto *Was ist Materie? Zwei Aufsätze zur Naturphilosophie*, Berlin 1924.

puramente spaziale. Piuttosto, tutti gli enunciati della fisica si determinano a vicenda: si condizionano e si sorreggono reciprocamente e la loro « verità » specifica sta appunto in questo legamento correlativo. In questo intreccio e sviluppo reciproco sta uno dei tratti fondamentali del sistema fisico. In esso non c'è alcun vero e proprio sostegno sostanziale — nulla che *per se est et per se concipitur*; si dà solo un coordinamento funzionale a cui partecipano nella stessa misura tutti gli elementi, tutti i fattori determinanti della verità fisica. Pertanto i gradi « superiori » sono già impliciti e, in un certo senso, presupposti nei gradi « inferiori ». Se vogliamo scegliere un analogo spaziale per la struttura della fisica, non dobbiamo pensarla simile a una piramide che appoggi su un'ampia base di « fatti » immediatamente dati, sussistenti per sé, e che da questa base salga a poco a poco sempre più in alto per finire forse da ultimo in un vertice supremo, in una semplice « formula dell'universo ». In tal caso infatti resterebbe ignorato proprio quell'« intreccio » correlativo; si dimenticherebbe che « ogni fatto è già una teoria ». Sussisterebbe sempre la possibilità di pensare demoliti gli strati superiori senza che con ciò fosse distrutto e anche solo modificato in alcunché di essenziale quello di base. Ma cercheremo di mostrare più avanti in dettaglio che e perché un'assunzione simile non può essere ammessa né soddisfatta per tutta quanta la conoscenza fisica. Invece che a una piramide dunque l'essere della fisica — se proprio volessimo credere sufficiente e ammissibile per esso un simbolo spaziale — sarebbe da paragonare piuttosto a quella « sfera ben arrotondata » con cui descrive il suo « mondo » Parmenide: *εὐκύκλου σφαιρῆς ἐναλίγκιον ὄγκῳ, μεσσοῦδεν ἰσοπαλές πάντῃ.* Il che non può né deve certo impedirgli di dargli un assetto determinato, un ordinamento degli elementi in gradi superiori e inferiori; ma non è lecito interpretare questa distinzione logica degli elementi come la possibilità di una loro separazione materiale, di una loro consistenza autonoma.

Intanto con questa riserva metodica gli enunciati di

misura si possono però chiamare di fatto l'alfa e l'omega della fisica, il suo cominciamento e il suo termine. Da essi prendono le mosse e ad essi devono ricondurre tutti i suoi giudizi. Il sistema della fisica non si può certo intendere come una semplice collocazione in parallelo di enunciati l'uno accanto all'altro, una semplice somma di tali enunciati. Esso si fonda su elementi formali caratteristici, l'esplicito rilievo e delucidazione dei quali costituisce un compito a sé dell'analisi logica. Ma tali forme trovano ancor esse il loro « riempimento » vero e proprio solo in quegli accertamenti concreti che vengono offerti dagli enunciati di misura. Solo nella loro mediazione i concetti e i giudizi fisici si possono « riferire a un oggetto » e innalzare a portata e validità oggettive. Ciò che la fisica chiama un « oggetto » infine si risolve in un insieme di valori numerici caratteristici. Nessun « essere » né alcuna « proprietà » si può definire altrimenti che attraverso l'indicazione di tali numeri caratteristici. Quando determiniamo in questo modo la pressione, il volume, la temperatura di un gas, l'energia potenziale o cinetica di un sistema, l'intensità elettrica o magnetica del campo, in queste determinazioni noi abbiamo ciò che la fisica intende per suoi diversi oggetti; dietro di questi non abbiamo bisogno di presupporre qualcosa come un essere in sé, separato ed astratto. Quanto a questo proposito contrassegna gli enunciati « di primo grado », quanto li distacca nettamente da tutti gli altri, è il tratto della individualità che loro appartiene. Tutti gli enunciati di misura si riferiscono a un determinato qui e ora, a un certo punto dello spazio e del tempo e vi sono, per così dire, attaccati. Nella teoria del campo la descrizione dell'universo consta — per usare un termine di Hilbert — delle « relazioni « qui — così » »: il « qui » rappresentato dalle coordinate spazio-temporali, il « così » dalle grandezze dello stato in questione⁷. Ma con questo ci vediamo condotti al tempo stesso

un passo piú oltre: infatti quello che è puramente individuale può sí costituire il contenuto di una determinata informazione, ma è ben lungi dall'esaurire il senso di quanto intendiamo per « conoscenza fisica ». In nessun campo la « conoscenza » si risolve in una pura e semplice raccolta di accertamenti individuali, di enunciati vertenti sul qui e ora, e tantò meno nel campo della fisica. Essa si risolve nel modo in cui questi accertamenti si condizionano a vicenda, nel modo in cui si allacciano e legano gli uni agli altri e negli altri. Per tale relazione occorre un mezzo nuovo e apposito: ora ci volgeremo all'esame di questo mezzo.

CAPITOLO II

GLI ENUNCIATI DI LEGGE

Un momento essenziale e un essenziale profitto logico del progresso dal « mondo sensibile » al mondo fisico sta, come cercava di mostrare la trattazione svolta sin qui, nel fatto che in esso all'ambito crescente del sapere corrisponde una progressiva concentrazione intensiva. Il sapere riesce a serbare la sua salda forma e determinatezza solo grazie a tale compensazione. Lo stesso caratteristico processo duplice si può mostrare anche in tutti gli sviluppi ulteriori che hanno luogo all'interno del pensiero fisico. A ogni estensione della conoscenza quale si consegue con l'incessante aumento dei dati di osservazione e col perfezionamento degli strumenti di misura, corrisponde sull'altro lato una semplificazione caratteristica. Quanto più ricco si fa il materiale empirico tanto più facilmente e meno forzatamente esso si inserisce in poche grandi forme fondamentali. La molteplicità non è disparatezza: è l'invito a nuove formazioni unitarie ed è essa sola a rendere possibili tali formazioni nuove. Come l'abbondanza di « proprietà » offertaci dal mondo della percezione si concentra in determinati valori di misura e numerici che si ordinano in certe classi e per questa via si possono calcolare e dominare a pieno — così anche per questi stessi valori si riapre la possibilità di una compressione ulteriore. Essi infatti non stanno per se stessi, non sono elementi del reale isolati gli uni dagli altri e separati materialmente. Già nell'antica filosofia della natura emerge la esigenza di non pensare gli elementi primi di cui consta il cosmo, come separati e quasi « tagliati

con l'accetta». Si afferma piuttosto che nella realtà fisica « tutto è in tutto » (έν παντί πάντα); che non si dà nessuna esistenza singola nettamente separata ma tutto partecipa a tutto (ούδὲ χωρὶς ἔστιν εἶναι, ἀλλὰ πάντα παντός μοῖραν μετέχει). Anassagora, che di questo pensiero fa il principio fondamentale della spiegazione della natura¹, concepisce l'essere come strettamente qualificativo e sostanziale; per lui l'affermazione di questa « partecipazione » universale deve dunque unirsi alla rappresentazione che in ogni essere apparentemente separato in realtà siano contenuti e, per così dire, presenti in pezzi tutti gli elementi dell'essere. Ogni cosa cosiddetta individuale è una « panspermia »: contiene in sé tutti i germi dai quali è composto l'universo come tutto, cosicché la carne non è solo carne ma al tempo stesso anche sangue e osso, e sangue e osso sono insieme anche carne². Non appena la scienza si emancipa dallo schema ingenuo di cosa e sostanza, tale fusione degli elementi dell'essere gli uni negli altri deve cedere il passo a un'altra concezione. Al postulato del « tutto in tutto » ora non si può più soddisfare con una reciproca inclusione di cose o qualità originarie bensì con una reciproca inclusione di leggi. Ora gli enunciati di legge sono l'unica via e la sola ammissibile per congiungere l'individuale al tutto e fondere il tutto con l'individuale, per instaurare così fra essi quella « armonia » che costituisce il fine vero e proprio di ogni conoscenza della natura.

Dall'epoca del Rinascimento, a partire da Keplero e Galilei, Descartes e Leibniz, il pensiero scientifico e filosofico si è creato nel concetto matematico di funzione il mezzo ideale per soddisfare a tale esigenza. Con esso è data una forma universale in cui il contenuto incessantemente nuovo può affluire senza distruggerla, anzi senza nep-

¹ Anassagora (Diels 46 B), fr. 6 e 8.

² Altri particolari nella mia esposizione della filosofia greca nel *Lehrbuch der Philosophie* a cura di M. Dessoir, Berlin 1925, vol. I, p. 59 ss.

pure modificarla nei suoi tratti essenziali. Quello che viene colto da questa forma e determinato nella sua relazione reciproca, per Galilei sono spazi e tempi di caduta, per Keplero distanze e velocità, per Huyghens lunghezza e periodo del pendolo, per Boyle, Mariotte, Gay-Lussac il volume, la pressione, la temperatura di un gas ideale. Ma questa modalità universale e fondamentale di enunciazione fisica non muta né nel passaggio a gruppi affatto nuovi di fenomeni né in una completa trasformazione delle premesse teoretiche della descrizione della natura. Le equazioni differenziali parziali con cui Maxwell descrive gli stati del campo elettromagnetico e la loro dipendenza reciproca, nella loro struttura non sono essenzialmente diverse dalle equazioni stabilite da Lagrange per il moto, che costituiscono l'impalcatura fondamentale della meccanica classica. Una volta entrati in questa forma i fenomeni della natura sono fermati in « pensieri che durano » — in pensieri di una durata che spesso si estende molto oltre quanto ha costituito la prima occasione di stabilire quelle forme determinate. Così, ad esempio, nella *Théorie analytique de la chaleur* (1822) Fourier ha enunciato una teoria della conduzione termica, interamente fondata sull'idea che il calore si potesse concepire come un fluido trascorrente nei due sensi fra corpi diversi³. Ma la descrizione matematica che egli diede in base a tale modo di vedere i fatti della conduzione termica, si dimostrò del tutto indipendente dai particolari presupposti ipotetici di lui. Essa coglieva i fenomeni come risultato di rapporti puramente geometrici e corrispondentemente non era vincolata a una assunzione speciale intorno alla « natura » del calore. Pertanto le equazioni fondamentali di Fourier si poterono mantenere anche nel passaggio alla moderna teoria cinetica; si dovettero modificare o sostituire con altre determinazioni solo

³ Intorno al contenuto e all'evoluzione storica della teoria del calore di Fourier, vedi MACH, *Die Prinzipien der Wärmelehre*, Leipzig 1896, p. 82 ss. Cfr. anche AUERBACH, *Entwicklungsgeschichte der modernen Physik*, Berlin 1923, p. 92 ss.

in singoli casi estremi, come in quello di gas estremamente rarefatti. In base a questa circostanza, delle formule di Fourier W. Nernst una volta disse che contenevano quasi dei « valori eterni » di cui il loro autore non poteva ancora rendersi conto. Questa osservazione di Nernst si trova in un saggio del 1922⁴; pochi anni dopo, le formule di Fourier conobbero una nuova rinascita quando Heisenberg ne fece il punto di partenza della nuova meccanica quantistica, quando cioè esse furono impiegate in un campo lontanissimo da quello in cui avevano fatto le loro prime prove. Questa portata caratteristica delle formule, questa « forza indiziale » insita in loro, è uno dei problemi più singolari e affascinanti della gnoseologia della scienza. Ma dietro tutto ciò sta in primo luogo la questione propriamente decisiva: come si compie il passaggio fra i diversi tipi di enunciati fisici e come va inteso logicamente? Come si possono derivare da « enunciati di misura » quegli altri giudizi che enunciano una relazione esatta fra gruppi diversi di enunciati di misura e che in genere chiamiamo « enunciati di legge »?

La risposta tradizionale che si suol dare a tale questione, è semplice, ma in questa semplicità anche affatto inutile. Il passaggio dagli enunciati di misura agli enunciati di legge deve effettuarsi ed essere giustificato mediante il cosiddetto « ragionamento induttivo ». Ma quando domandiamo che cosa sia tale ragionamento induttivo, non troviamo due logici che ci diano la stessa risposta. Il problema dell'induzione è divenuto sempre di più l'autentica pietra dello scandalo per tutta quanta la gnoseologia e la filosofia delle scienze naturali. È vero che verso la metà del sec. XIX si giunse a un punto in cui pareva che il problema si potesse risolvere con una specie di inversione: come se non fosse l'induzione a potersi ricondurre a una forma fondamentale del pensiero logico ma tutto il pensiero logico a induzione.

⁴ *Zum Gültigkeitsbereich der Naturgesetze* in « Naturwissenschaften », X, 1922, p. 489.

Ma la logica di John Stuart Mill, che sostenne questa tesi, nonostante tutti i suoi sforzi non ha raggiunto lo scopo. Proprio i piú energici e coerenti seguaci dell'empirismo si videro costretti ad abbandonare la via battuta da Mill: si vide che per tale via non si riusciva a raggiungere una congiunzione con l'effettivo pensiero scientifico, specialmente col pensiero della fisica esatta. Le cinque famose regole fondamentali dell'induzione date da Mill (Method of Agreement, Method of Difference, Joint Method of Agreement and Difference, Method of « Residues » and « Concomitant Variations ») sono tutte avanzate e svolte con grande acume. Ma tali regole, pensate come direttive [*Canons*] per l'induzione, in fondo sono rimaste solo finzioni metodologiche. L'effettivo pensiero e ragionamento induttivo si muove su sentieri affatto diversi da quelli qui tracciati. Inoltre la « logica induttiva » di Mill ricadeva in un circolo che Hume aveva già scoperto e criticato in tutto rigore. Essa assumeva come « fondamento dell'induzione » il principio che il corso della natura sia uniforme, e lo chiamava principio fondamentale o assioma generale dell'induzione. Ma dall'altro lato presentava appunto quella generalizzazione che ci porta a credere nella uniformità della natura, come essa stessa una specie di induzione — e per giunta di un'induzione che non sarebbe proprio della specie piú chiara e perspicua⁵. Teorie posteriori del ragionamento induttivo in forza del quale noi dobbiamo essere condotti dal particolare all'universale, dai fatti alle leggi, cercarono di evitare il circolo, ma in ciò si videro costrette a rinunciare a ogni vera giustificazione della validità oggettiva di tale ragionamento. La questione del *quid juris* venne tacitamente lasciata cadere, spostata e sostituita da considerazioni psicologiche. Dunque la « logica dell'induzione » è essa stessa un enigma assai piú di quanto non fosse una soluzione coerente e precisa; se vogliamo intendere il pas-

⁵ JOHN STUART MILL, *A System of Logic, Ratiocinative and Inductive*, libro III, cap. III, 7^a ed., London 1868, p. 342 ss.

saggio dagli enunciati fisici del primo tipo a quelli del secondo, dagli enunciati di misura a quelli di legge, di essa non ci possiamo fidare.

Contro l'idea di Mill che una legge di natura sia sempre solo un « aggregato di verità particolari », aveva già sollevato un'obiezione decisiva Galilei all'inizio della scienza moderna della natura. Se così fosse — osserva Galilei — dei giudizi universali intorno alla realtà sarebbero o impossibili o superflui. Sarebbero impossibili quando la serie dei casi individuali da noi considerati è infinita, perché una serie siffatta non si può esaurire per enumerazione (*per enumerationem simplicem*); sarebbero superflui quando la serie fosse limitata, poiché in tal caso potremmo accontentarci benissimo di constatare ciascuno dei suoi singoli membri in particolare⁶. Con ciò il principio di Mill: « All inference is from particulars to particulars » è dichiarato inammissibile, per lo meno nel campo della fisica esatta. Negli enunciati di legge il semplice « qui-così » contenuto nei singoli enunciati di misura subisce una trasformazione caratteristica: si converte in un « se-allora ». E questo se-allora, questo giudizio ipotetico « se x , allora y » non si allaccia più a sole grandezze singole che noi pensiamo appartenenti a determinati punti spazio-temporali e in essi localizzate, ma riguarda intere classi di grandezze che in genere constano di infiniti elementi. Come, secondo la teoria dei tipi di Russell, le classi sono di tutt'altra specie che i loro elementi e in nessun modo è lecito pensarle come semplici aggregati di questi⁷, così non può avere effetto neppure la concezione di Mill che gli enunciati di legge siano solo un'espressione comprensiva con cui si afferma o si nega un numero indefinito di fatti individuali (« a comprehensive expression by which an indefinite number of individual facts are affirmed or denied at once »). Infatti

⁶ GALILEI, *Opere*, ed. Albèri, voi. XII, p. 513.

⁷ Cfr. in proposito ad esempio CARNAP, *Der log. Aufbau der Welt* cit., § 37.

qui resta sempre aperta la questione del diritto con cui sia lecito enunciare qualcosa in generale intorno a un « numero indefinito di casi individuali » se prima ciascuno di essi non sia stato osservato e provato. Ma è evidente che l'esperimento fisico, che è il vero e l'unico fondamento legittimo di tutti gli enunciati di legge, non solo non contiene una prova siffatta ma addirittura la esclude. Quanto l'esperimento richiede si è certamente che a un accertamento in sé e per sé relativo a un qui e ora individuale, e vincolato a questo, sia lecito connettere una conseguenza esente da tale limitazione, riferibile ad altri luoghi spazio-temporali. Una ricerca sperimentale che volesse descrivere solo quanto è accaduto in un determinato laboratorio al momento della lettura di determinati strumenti, nel riguardo metodologico evidentemente non avrebbe nessun valore: qualificherebbe unicamente un caso singolare che non si lascerebbe inserire nella catena della continua osservazione o inferenza scientifica. Per tale inserimento bisogna presupporre la nostra possibilità di trasferire da luogo a luogo, da momento a momento quanto è stato accertato nell'esperimento singolo, la possibilità — direi quasi — di spostarlo liberamente senza con questo mutare alcunché nella « natura » dell'accertamento stesso, nella sua verità. Qui non compare in nessun punto l'inferenza discutibile e precaria da « alcuni » casi a « molti », da « molti » a « tutti »: infatti in quello che l'esperimento enuncia non si conclude da un qui a un non-qui, da un ora a un non-ora, ma si oltrepassa di proposito il punto di vista del semplice qui e ora. Non ha luogo un ampliamento entro la sfera spazio-temporale ma quasi una sospensione di tutta quanta questa sfera; ha luogo il progresso a una dimensione nuova: ed è questo mutamento della dimensione a differenziare gli enunciati di legge dai semplici enunciati di misura.

Fra i grandi scienziati Maxwell ha colto nel modo piú netto questo passaggio, questa caratteristica *μετάβασις εἰς ἄλλο γένος* presente in ogni formulazione rigorosa

di una legge di natura, e ha posto il problema critico qui in campo nella forma più pregnante. In questo passaggio Maxwell vede addirittura il senso e il contenuto essenziale del principio generale di causalità. « La differenza fra due eventi — così egli formula tale principio — non dipende dalla semplice differenza dei tempi o dei luoghi nei quali o rispetto ai quali essi accadono, ma solo da differenze nell'essenza [*Wesen*], nella configurazione o nel moto dei corpi in gioco ». Questa formulazione implica la possibilità in generale di estrarre una siffatta « essenza » dei corpi dalla continua « corrente del divenire », dal fiume eracliteo dell'accadere — presuppone la nostra possibilità di caratterizzare la « materia » con proprietà e relazioni invarianti al mutare dei singoli punti spazio-temporali. Quindi i valori di questi punti non devono figurare esplicitamente nelle equazioni di funzione con cui connettiamo insieme le diverse classi in grandezze-di-misura. Se ad esempio la relazione intercorrente fra la pressione, il volume e la temperatura di un gas ideale dipendesse dal valore assoluto delle coordinate spazio-temporali e mutasse con queste, il constatare che per determinati punti tale relazione può essere espressa dalla formula di Boyle-Mariotte o di Gay-Lussac, evidentemente non vorrebbe dire nulla — sarebbe ancora solo un enunciato di misura ma non più un enunciato di legge. In un trattato di meccanica Painlevé ha dato una definizione, concordante in linea di principio con Maxwell, di ciò che dobbiamo intendere per legge di natura e in genere per causalità fisica. « Lorsque les mêmes conditions sont réalisées, à deux instants différents, en deux lieux différents de l'espace, les mêmes phénomènes se reproduisent transportés seulement dans l'espace et le temps ». Quando per esempio in un giorno qualsiasi, a Parigi oppure a Versailles si mette un grammo di zinco in lamina in un litro di vetriolo, posto che le condizioni di temperatura e di pressione siano le stesse, al grammo di zinco occorrerà lo stesso tempo per sciogliersi e ne risul-

terà lo stesso sale⁸. Contro la validità di questa formula talora si è obiettato che essa è troppo estesa. Una natura che non le obbedisse — si è detto — con ciò non dovrebbe cessare necessariamente di essere descrivibile in un qualche tipo di leggi. Misurazioni regolari della carica elettronica — argomenta Schlick — si potrebbe pensare che per tale grandezza dessero valori sempre uguali una prima volta per 7 ore e una seconda per altre sette ore, e che poi invece in 10 ore tali valori oscillassero del 5% in più o in meno, senza possibilità di trovare la menoma causa del fenomeno. Alla fine dovremmo accontentarci anche di tale oscillazione; potremmo accettarla solo a titolo di pura e semplice constatazione⁹. Ma se nessuno scienziato ha mai cercato di trovare leggi che corrispondono a una « ipotesi » siffatta, come mette in rilievo lo stesso Schlick, ciò deve pur avere una ragione più profonda — una ragione connessa in qualche modo con la forma complessiva della nostra esperienza e risalente a una peculiarità non diciamo « metafisica » ma metodologica di questa. E un simile nesso si può mostrare realmente. Per poter applicare concetti di legge della specie sopra accennata, per poterli riferire all'accadere empirico, anzitutto dovremmo sapere in quale fase dell'accadere cosmico ci troviamo di volta in volta — dovremmo dunque possedere determinazioni di spazio e tempo non solo relative ma assolute. E con la struttura dell'universo ivi assunta noi entremmo in conflitto con una determinata struttura della conoscenza — giungeremmo a una assunzione contrastante con certe condizioni del tutto universali dell'accertamento empirico di valori spaziali e temporali. Quando si rifletta esaurientemente sull'obiezione di Schlick, a mio avviso non ne segue che il criterio di Maxwell non sia necessario o non sia valido

⁸ MAXWELL, *Matter and Motion*, art. XIX; PAINLEVÉ, *Mécanique*, nella raccolta miscellanea *De la Méthode dans les sciences*, Paris 1909, p. 371 ss.

⁹ Cfr. SCHLICK, *Die Kausalität in der gegenwärtigen Physik* in « *Naturwissenschaften* », XIX, 1931, p. 148.

ma soltanto che da solo non basta. Deve essere integrato da un altro criterio, che è offerto dal « principio dell'osservabilità » [*principe de l'observabilité*] già enunciato da Leibniz¹⁰. Maxwell del resto sembra essersi reso conto molto chiaramente di questo nesso metodico; infatti, sebbene nello scritto *Matter and Motion* in genere si attenga strettamente ai concetti newtoniani « ortodossi » di spazio assoluto e tempo assoluto, tuttavia nel passo in cui dà la spiegazione sopra citata della causalità, aggiunge una nota singolare di forte sapore « relativistico ». Egli osserva che « chiunque avesse mai cercato di rappresentarsi la condizione di una mente che sappia di conoscere la posizione assoluta di un punto, per tutto il tempo di poi si accontenterebbe del nostro conoscere relativo »¹¹.

Il passaggio dagli enunciati di misura, che sono individuali, agli enunciati di legge, che sono generali, costituisce un momento integrante del processo conoscitivo proprio della fisica, ma non costituisce affatto la sua conclusione. Anche gli enunciati di legge hanno una loro articolazione interna — un ordinamento in gradi superiori e inferiori che si tratta di scoprire e di garantire. Neppure questo compito può essere assolto da una semplice espansione della base del sapere ma esige che si muti ancora una volta il punto di vista della considerazione: esige una nuova

¹⁰ Intorno a questo principio vedi più oltre, p. 184 ss.

¹¹ Sull'importanza del « principio di Maxwell » per la teoria generale dell'induzione e della causalità ho già richiamato l'attenzione altrove (*Substanzbegriff und Funktionsbegriff* cit., p. 330 ss.). Ma non trovo che la portata del principio sia stata riconosciuta e apprezzata a pieno nelle discussioni moderne in proposito. Sembra farvi eccezione solo Keynes, che nel *Treatise on Probability* ha raccolto il concetto fondamentale di Maxwell nel trattare il problema dell'induzione. Egli vede nel « principio della uniformità della natura » solo l'espressione della convinzione metodica che la sola differenza di posizione nello spazio e nel tempo non possa includere nessuna causa determinante: « La generalizzazione che è vera di un caso dev'essere vera anche di un altro che differisca dal primo soltanto per la sua posizione nel tempo e nello spazio ». Cfr. Keynes, *A Treatise on Probability*, London 1921, p. 255 ss.

compenetrazione intensiva della materia del sapere data nelle leggi. Qui subentra quel lavoro incessante che Hilbert ha definito la « gettata-in-profondità dei fondamenti » [*Tieferlegung der Fundamente*] e nel quale egli scorge il vero e proprio compito di ogni scienza. La sintesi non riguarda piú fatti singoli o determinate classi di fatti ma abbraccia interi campi della scienza fisica — quei campi che sogliamo chiamare con le espressioni « meccanica », « ottica », « elettrodinamica ». Si dichiara puramente relativa la divisione di tali campi, si chiede un principio che convalidi sí questa divisione ma che d'altro canto la faccia scaturire da unà superiore unità comprensiva. E le proposizioni che stabiliscono questa unità superiore, appartengono da capo a un nuovo tipo di conoscenza fisica, all'esame del quale ora dobbiamo rivolgerci.

CAPITOLO III

GLI ENUNCIATI DI PRINCIPI

L'indagine fisica non si accontenta mai di riunire fatti osservati in leggi e di collocare queste in un determinato ordinamento le une accanto alle altre. Essa domanda come le leggi risultino le une dalle altre; cerca una regola dalla cui variazione il pensiero sia condotto da una legge all'altra. Questo « condurre » è una nuova forma fondamentale di « induzione » che non va identificata né confusa col processo induttivo da particolare a particolare [from particulars to particulars]. Fu un'induzione siffatta a permettere a Maxwell di dare inizio nella sua teoria a quella unificazione di luce ed elettricità che solo in seguito fu confermata e provata sperimentalmente da Heinrich Hertz; fu un'induzione siffatta quella con cui Schrödinger poté costruire una nuova forma di meccanica ondulatoria partendo da fatti ottici e forte del principio di Fermat del tempo di luce minimo. La guida in audaci trapassi del genere non è data tanto dai fatti dei singoli campi quanto piuttosto dalle equazioni in cui si rappresenta la struttura complessiva dei campi in questione. Dalla forma di tali equazioni e dalle costanti che vi figurano, Maxwell ha potuto cogliere immediatamente l'identità di « essenza » della luce e dell'elettricità. Lo stesso principio logico possiamo seguire all'indietro fin nei primordi dell'indagine fisica esatta. Per poco che riesca la prima raccolta di fatti in leggi, si desta subito l'altra tendenza, non meno forte, a unire le leggi in principi e concepirle come casi speciali di questi. Nella meccanica è un esempio di tale svi-

luppo la storia del « principio virtuale ». Con Archimede, Galilei e Stevin la statica aveva già formulato leggi precise dell'equilibrio per singoli casi: la leva, la carrucola fissa e mobile, il piano inclinato, ecc. Ma solo con d'Alembert e Lagrange viene fissato un principio, il « principio degli spostamenti virtuali », che non si limita a portare tutti questi diversi fenomeni della statica sotto un solo punto di vista ma anche getta d'un colpo il ponte fra statica e dinamica — sottopone fenomeni statici e dinamici a una medesima regola. Una vera prova di questa regola non può essere addotta dalla semplice fusione dei casi speciali: « si è dunque costretti a ritenere questo principio, per il caso di equazioni condizionanti lasciate affatto indeterminate, come una regola le cui conseguenze concordano di fatto con l'esperienza »¹. Questo fondamentale tratto caratteristico spicca non meno chiaramente nello sviluppo del principio che era destinato a compiere il passaggio dalla meccanica alla fisica generale. Quando si segua la genesi storica del principio dell'energia, come l'ha esposta ad esempio Mach nella scritto *La storia e l'origine del principio della conservazione del lavoro* (1872), si resta colpiti da una circostanza che anche Mach, non ostante la sua tendenza « empiristica » radicale, riconosce a pieno e mette in rilievo con l'imparzialità e l'oggettività che gli sono proprie. Al tempo in cui emerge il principio della energia, la sua prova puramente sperimentale non era ancora assicurata in nessun modo. Nella deduzione e fondazione datagli da Robert Mayer ciò spicca con particolare rigore e chiarezza. Mentre in Helmholtz prevale l'interesse teoretico e in Joule quello empirico-sperimentale, Robert Mayer prese fin dall'inizio una strada diversa, che gli è caratteristica. Della verità del suo nuovo principio egli non si è convinto attraverso ricerche sperimentali ad ampio raggio ma sulla base di una sola osservazio-

¹ A. Voss, *Die Prinzipien der rationalen Mechanik* in *Enzyklop. d. math. Wissensch.*, vol. IV 1, p. 57.

ne: un'osservazione che per giunta non apparteneva all'ambito della fisica, ma a quello della fisiologia. In salassi praticati come medico di bordo a Giava egli osservò che il sangue venoso presentava un arrossamento molto più forte del normale; — e in accordo con la teoria di Lavoisier per cui il calore animale viene da un processo di combustione, attribuì questo fenomeno al fatto che nel clima meridionale, in cui è minore la dispersione del calore del corpo nell'ambiente, dovesse diminuire anche il processo di combustione che dà origine al calore animale. Mayer si sentì « quasi ispirato » da questa osservazione; essa gli schiuse di colpo un mondo completamente nuovo². Ciò è stato sentito non di rado come un difetto della sua mentalità; si è detto che egli non ha dimostrato teoricamente il suo principio né lo ha derivato per induzione, ma vi è giunto solo intuitivamente e dunque « non attraverso metodi scientifici »³. Ma un simile giudizio si fonda su una restrizione del tutto inammissibile di ciò che è scientificamente permesso e scientificamente ammissibile. In proposito il giudizio di Mach è sostanzialmente più equo e più libero; egli dichiara che « difficilmente un altro scienziato ha mai visto qualcosa di più importante con un colpo d'occhio più ampio » e attribuisce tale colpo d'occhio al forte « istinto formale » da cui Mayer sarebbe stato guidato⁴. Ma come un semplice istinto potesse produrre un'intuizione pertinente e fondamentale per la fisica, resta un problema non risoluto. In realtà la mentalità e il modo d'indagine di Robert Mayer non sono affatto isolati nella cerchia dei grandi ricercatori scientifici — e sarebbe del tutto errato volerli spiegare solo dal lato psicologico e considerarli quasi lo sfogo di una « idiosincrasia » personale. Troviamo piuttosto che dovunque si tratti del passaggio a

² Cfr. la lettera di Mayer a Griesinger del 16 giugno 1844 in *Kleinere Schriften und Briefe von Robert Mayer* a cura di Weyrauch, Stuttgart 1893, p. 213.

³ Vedi L. KÖNIGSBERGER, *Helmholtz*, Braunschweig 1902, vol. I, p. 87.

⁴ MACH, *Prinzipien der Wärmelehre*, pp. 252, 248.

« principî », a un nuovo tipo di conoscenza fisica, tale mentalità riesce efficace e adeguata. « Chi non si accorge — dice Goethe nella sua critica del metodo induttivo di Bacone — che spesso un caso ne vale mille e li contiene tutti in sé, ... costui non potrà mai scoprire alcunché di piacevole o di utile né per sé né per altri ». E di Galilei, la cui mentalità egli contrappone al « metodo verulamico della dispersione », Goethe celebra l'aver dimostrato fin dalla prima giovinezza che « per il genio un caso ne vale mille » con lo sviluppo della teoria del pendolo dall'oscillare di un lampadario nel duomo di Pisa. « Nella scienza tutto dipende da ciò che si chiama una trovata, da un rendersi conto di quello che propriamente sta alla base dei fenomeni. E un tale rendersi conto è infinitamente fecondo »⁵. Su una trovata del genere Robert Mayer iniziò e portò avanti la sua costruzione. Egli stesso una volta ha detto di aver trovato la nuova teoria perché ne aveva vissuto intensamente la mancanza⁶: e questa mancanza proveniva da una esigenza metodico-universale, dal postulato di una ininterrotta unità del quadro fisico dell'universo.

Mi limiterò a illustrare la forma tipica dei principî fisici e il problema gnoseologico latente in questa forma, con un esempio singolo: il principio del minimo effetto. Nella sua applicazione a casi particolari questo principio è già noto nell'antichità. Se ne è già valso Erone di Alessandria per trovare le leggi della riflessione di raggi luminosi; egli derivò tali leggi dall'assunto che il cammino della luce fosse un minimo. In versione ampliata e approfondita il problema si presenta in Fermat, che riuscì a derivare la legge della rifrazione nel modo piú semplice dal presupposto che nel passare da un punto all'altro la luce impieghi sempre il tempo piú breve possibile. Il significato meccanico del principio dell'ef-

⁵ *Zur Farbenlehre*, Histor. Teil, nell'edizione di Weimar, parte II, vol. III, pp. 236, 246 ss.

⁶ Vedi la lettera a Griesinger del 5 e 6 dicembre 1842, ed. Weyrauch cit., p. 194.

fetto fu afferrato per la prima volta da Leibniz, che ne parlò sia in un trattato di dinamica del 1689⁷ sia nella sua corrispondenza scientifica⁸. Leibniz enuncia il principio che in tutti gli effetti meccanici divenga un massimo o un minimo la grandezza dell'azione che va misurata col prodotto della massa per lo spazio percorso e la velocità del corpo mosso, ovvero anche col prodotto della forza viva per il tempo. Il « principio dell'azione minima » divenne di dominio generale solo quando Maupertuis, nel 1756, cercò di farne il fondamento di una nuova prova dell'esistenza di Dio che egli qualificava la sola prova esatta e l'unica convincente. Ma, a parte questo impiego puramente metafisico del principio, già la sua formulazione presentava oscurità e inesattezze tanto grandi che con ciò esso riuscì inservibile per ogni precisa applicazione fisico-matematica⁹. Il principio dell'azione ottenne una formulazione più rigorosa e un senso fisico esatto solo con una serie di opere di Eulero. La prima esposizione completa e precisa di tale principio è stata data da Lagrange¹⁰. Da allora in poi questo principio ha

⁷ Il trattato, rimasto allo stato di frammento e non pubblicato da Leibniz, si trova ora nell'edizione delle *Mathematische Schriften* curata dal Gerhardt, op. cit., parte II, vol. II, p. 281 ss.

⁸ Cfr. specialmente la lettera pubblicata da Samuel König nel 1751, pubblicazione che poi condusse alla nota controversia con Maupertuis e l'Accademia di Berlino. Intorno all'autenticità di questa lettera cfr. le osservazioni di HELMHOLTZ, *Zur Geschichte des Prinzips der kleinsten Aktion* (1887) in *Wiss. Abhandl.*, Leipzig 1895, vol. III, p. 249 ss.; vedi anche COUTURAT, *La logique de Leibniz*, Paris 1901, Note XVI^e, p. 577 ss. Probabilmente la lettera non è indirizzata al matematico Hermann di Basilea ma appartiene al carteggio con Varignon; ulteriori particolari in proposito in GERHARDT, « Sitzungsberichte der Akad. d. Wiss. zu Berlin », 23 giugno 1898, e nella mia edizione delle *Hauptschriften* di Leibniz (« Philos. Biblioth. », vol. CVIII), II, p. 24.

⁹ La formulazione di Maupertuis fu presentata per la prima volta all'Accademia di Parigi nel 1744 e svolta più tardi nelle dissertazioni dell'Accademia di Berlino e nell'*Essai de Cosmologie* (*Oeuvres*, Lyon 1756, vol. I, p. 3 ss.); ulteriori particolari in proposito nella mia opera *Das Erkenntnisproblem* cit., II², p. 424 ss. [trad. it. cit., vol. II, pp. 465-468].

¹⁰ Intorno alla deduzione di Lagrange vedi HELMHOLTZ, art. cit., in *Wiss. Abb.*, vol. III, p. 257 ss.

dominato tutto lo sviluppo successivo della meccanica scientifica nelle varie forme in cui fu impiegato da Gauss, Hamilton, Jacobi, Dirichlet: nella forma di « principio di Hamilton » è divenuto addirittura il principio fondamentale della meccanica.

Una fondazione metafisica del « principio del minimo effetto » qui veniva lasciata sempre più da parte. Nella *Mécanique analytique* Lagrange dichiara che le applicazioni fatte da Maupertuis del suo principio erano troppo speciali per poter provare la verità di un enunciato universale; inoltre avevano qualcosa di vago e di arbitrario che poteva solo rendere sospetto il rigore del principio. Egli ne dà quindi la propria formulazione precisa, ma aggiunge che con essa non vuole affermare un principio metafisico bensì solo enunciare un risultato semplice e generale delle leggi della meccanica". Ma sebbene ora la scienza esatta si tenesse di proposito lontana da tutti gli impazienti dibattiti metafisici, l'universalità metodica e gnoseologico-critica del principio risaltava però in misura sempre più chiara e convincente. Il principio entrò in una fase del tutto nuova del suo sviluppo quando Helmholtz, negli *Studi sulla statica di sistemi monociclici* e poco dopo nel saggio *Sul significato fisico del principio del minimo effetto* (1886), lo svincolò dalla limitazione alla meccanica di corpi ponderabili per esprimerlo invece come un principio fisico di validità affatto universale. In quest'epoca nel principio della energia e in quello dell'effetto Helmholtz vedeva riassunta la totalità dell'accadere naturale. « Ogni accadere — così egli dice nel discorso accademico *Sulla storia del principio dell'azione minima* — è rappresentato dall'alternare fluttuare della provvista di energie, eternamente indistruttibile e non aumentabile, del mondo; le leggi di questo fluttuare si riassumono completamente nel principio dell'azione mini-

" *Mécanique analytique*, parte II, sezione I, § 17 (*Oeuvres*, ed. Serret, Paris 1888, vol. XI, p. 261 ss.).

ma »¹². Questo si rivela dunque un principio complementare accanto alla legge generale di conservazione della energia e anzi si dimostra superiore a questa perché, come osserva Helmholtz, la legge dell'energia si può dedurre dal principio dell'effetto ma non viceversa questo da quella. Helmholtz ne conclude che il campo di validità del principio oltrepassa di molto il limite della meccanica e che con ogni probabilità si deve pensare fin d'ora che esso comprenda anche l'elettrodinamica e la termodinamica. « In ogni caso — così egli riassume il suo esame — la validità universale del principio mi sembra tanto garantita che gli è lecito rivendicare un alto valore come principio euristico e come guida agli sforzi per formulare le leggi di nuove classi di fenomeni »¹³.

Le speranze nell'alto valore « euristico » che Helmholtz attribuì al principio, si sono realizzate straordinariamente presto. Nel 1915, in un riassunto storico e sistematico del principio dell'effetto, Planck dichiarò che ci si sarebbe resi colpevoli di unilateralità quando si fosse voluto persistere nell'intenderlo più oltre come un principio specifico della meccanica¹⁴. Egli vi vede piuttosto la legge fisica suprema che contiene le quattro coordinate cosmiche disposte in ordine perfettamente simmetrico e si dimostra con ciò « il coronamento dell'intero sistema della fisica »¹⁵.

I più recenti sviluppi della fisica hanno confermato questa concezione sia nella teoria della relatività generale sia nella meccanica dei quanti, e le hanno aggiunto nuove prove sorprendenti. La teoria della relatività generale ha

¹² Il discorso non venne stampato mentre l'autore era in vita e manca anche nelle sue *Wissenschaftl. Abhandlungen*; fu pubblicato più tardi da Harnack nella sua *Geschichte der Berliner Akademie*, voi. II, p. 287.

¹³ *Die physikal. Bedeutung des Prinzips der kleinsten Wirkung in Wissenschaftl. Abhandlungen*, Leipzig 1895, vol. III, p. 210.

¹⁴ *Kultur der Gegenwart*, 1915; ora in *Physikalische Rundblicke*, Leipzig 1922, p. 117 ss.

¹⁵ PLANCK, *Die Stellung der neueren Physik zur mechanischen Naturanschauung* (1910) in *Physikal. Rundblicke* cit., p. 58.

preso le mosse dal principio di Hamilton per dedurne le proprietà delle grandezze che definiscono il « campo metrico »; e per questa via è giunta alla sua « legge d'inerzia generalizzata » che permette di unire in una sola espressione i fenomeni dell'inerzia e quelli della gravitazione. Per ogni moto di un punto soggetto a inerzia e a gravità ora vale assolutamente il principio che la sua linea cosmica sia sempre una « linea geodetica » nel continuo spazio-temporale¹⁶. Per ciò che concerne la meccanica dei quanti, Schrödinger si riallaccia direttamente al principio di Fermat e movendo da qui compie il passaggio dall'ottica geometrica di Fermat, di raggi luminosi rettilinei, a una nuova « ottica fisica ondulatoria » in cui si spiega come processo ondulatorio la materia stessa. Egli getta il ponte fra il principio ottico di Fermat e quello generale che Hamilton aveva enunciato per la meccanica. Con ciò si attua una generalizzazione di quest'ultimo, la quale permette di pensare i processi materiali del moto e i processi ondulatori come immediatamente affini tra loro e soggetti alle stesse leggi. L'impostazione di Schrödinger fonde in una sola due equazioni che fin qui sembravano riguardare classi del tutto separate di fenomeni; stabilisce una coincidenza completa tra le leggi dinamiche del moto di un punto materiale e le leggi ottiche del moto di un raggio luminoso¹⁷. Con ciò la materia è « divenuta » onda — infatti l'essere di un oggetto della fisica è definito solo dalle leggi a cui esso ubbidisce.

Ma io non starò a seguire più oltre il principio dell'effetto nelle sue applicazioni fisiche: a noi esso doveva

¹⁶ Cfr. EINSTEIN, *Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie*, 1916, § 15. [Si noti che la traduzione esatta di « die allgemeine Relativitätstheorie » è « la teoria generale della relatività » ma nelle versioni italiane sia dall'inglese che dal tedesco si è ormai affermata la dizione « teoria della relatività generale », a cui ci atteniamo. — N.d.T.].

¹⁷ Altri particolari in SCHRÖDINGER, *Vier Vorlesungen über Wellenmechanik*, Berlin 1928, prima lezione; e in DE BROGLIE, *Einführung in die Wellenmechanik*, Leipzig 1929, cap. III.

servire fin dall'inizio solo da istanza metodica, da paradigma rispetto al quale studiare e mostrare la natura degli enunciati di principi, degli « enunciati di terzo grado ». A prima vista l'« universalità » del principio dell'effetto appare alquanto problematica. Essa si poteva attuare solo accettando in aggiunta una circostanza che proprio dal solo punto di vista fisico portava sempre di nuovo a difficoltà e dava adito a dubbi. Quanto più generale era l'estensione in cui si prendeva il principio, tanto più difficile riusciva indicarne con precisione il vero e proprio contenuto concreto. Alla fine il principio dell'effetto diviene un Proteo che mostra un volto nuovo a ogni nuovo stadio della conoscenza scientifica della natura. Se domandiamo che cosa sia propriamente quel « qualcosa » a cui debba inerire la proprietà del massimo o del minimo, non riceviamo nessuna risposta definitiva ed univoca. Il « soggetto » dei diversi principi dell'effetto varia da epoca a epoca. E forse fu questa cangiante indeterminatezza a far dubitare più di uno scienziato quanto al valore del principio in generale: ancora nel 1837 Poisson dichiarava che esso era « solo una regola superflua »¹⁸. E di fatto una regola sembra significare poco se non indica un particolare oggetto relativamente al quale essa valga. Ma era difficile indicare tale oggetto: da Fermat a Leibniz, da Maupertuis a Eulero, Lagrange, Hamilton, Gauss, Helmholtz, esso viene cercato via via in un luogo diverso. Ciò a cui veniva assegnata la proprietà del minimo, in Erone di Alessandria era il cammino percorso dalla luce, in Fermat era il tempo impiegato dalla luce. In Maupertuis è il prodotto della velocità per lo spazio percorso a apparire la nota determinante per l'« economia della natura », mentre Eulero nel saggio del 1751¹⁹, in cui cerca di perfezionare l'impostazione di Maupertuis, parte dell'assunto che nel moto il valore tempo-

¹⁸ Cfr. PLANCK, *Phys. Rundbl.* cit., p. 114.

¹⁹ *Harmonie entre les principes généraux de repos et de mouvement de M. de Maupertuis*, Berlin 1751.

rale medio dell'energia potenziale divenga un minimo per quanto è possibile secondo le condizioni vigenti per il moto stesso. In proposito egli non ha ancora trovato la condizione generale determinante nel confronto tra il cammino effettivo e quello rettificato: che cioè tutti questi moti devono essere tali che non riesca mutata la grandezza dell'energia complessiva. Lagrange raggiunge la formulazione esatta del principio con l'aggiunta di questa condizione²⁰ Per lui i moti virtuali devono soddisfare al principio della energia e in cambio possono impiegare un tempo qualsiasi. Nell'esposizione della *Mécanique analytique* di Lagrange quella che deve divenire il massimo o il minimo è la somma dei prodotti delle masse per gli integrali delle velocità, moltiplicata per gli elementi degli spazî percorsi. Il principio della minima costrizione formulato da Gauss afferma che nel moto non libero è in ogni istante un minimo la somma dei prodotti delle masse per i quadrati delle deviazioni dal moto libero. Nella formula di Hamilton al posto della somma dell'energia cinetica e di quella potenziale figura la loro differenza: il « momento » determinante è l'eccesso di energia cinetica su quella potenziale. A ciò si allaccia Helmholtz che chiama « potenziale cinetico » la grandezza il cui integrale di tempo rappresenta l'azione hamiltoniana, e allora ne deduce il principio che il valore medio negativo, calcolato per elementi di tempo uguali, del potenziale cinetico sul percorso effettivo di un sistema mosso è un minimo (oppure, per tratti piú lunghi è un valore limite) in confronto con tutti gli altri percorsi vicini che dalla posizione iniziale portano in quella finale in un tempo uguale²¹.

Ne risulta dunque una straordinaria varietà, anzi disparatezza di impostazioni; eppure tale varietà non è in alcun modo un semplice difetto ma si dimostra estremamente feconda per una piú profonda concezione del contenuto

²⁰ Altri particolari nel discorso cit. di Helmholtz, in HARNACK, op. cit., vol. II, p. 293.

²¹ *Wiss. Abhandl.* cit., vol. III, p. 203 ss.

e del carattere metodico del principio stesso. Nel passaggio a ogni nuovo campo, specialmente nel superamento della semplice meccanica di punto, si richiese sempre la definizione di una certa grandezza che coi suoi estremi o valori distinti faccia risultare esatto il decorso di un certo gruppo di fenomeni. A tale riguardo si poneva un compito analogo a quello presente nelle applicazioni del principio dell'energia, dove parimenti non sono dati senz'altro gli equivalenti di una determinata somma di lavoro meccanico, ma prima si ha da « trovare » in ogni campo una certa grandezza che rispetto all'energia meccanica muti secondo il principio di conservazione²². Qui di fatto emerge un fondamentale carattere metodico che è comune a tutti i veri enunciati di principi. I principi non stanno sullo stesso piano delle leggi, che sono enunciati intorno a determinati fenomeni concreti. Essi neppure sono leggi, ma regole in conformità alle quali cercare leggi e secondo cui trovarle. Questo aspetto euristico è determinante per tutti i principi. Essi partono dal presupposto di certe determinazioni comuni, vigenti per tutto l'accadere della natura, e domandano se nei singoli campi si possa trovare qualcosa di corrispondente a tali determinazioni, e come esso vada definito in particolare.

La forza e il valore dei principi fisici stanno in questa capacità di « sinossi », di visione d'insieme di interi campi della realtà. Quando apparve la dissertazione di Helmholtz *Sul significato fisico del principio del minimo effetto*, Heinrich Hertz dichiarò che era già una scoperta il compito stesso che Helmholtz si era posto in tale dissertazione: « infatti aveva realmente bisogno di essere scoperto il conoscere che da presupposti tanto generali si possono

²² Su questo momento e sulla sua importanza gnoseologica ha richiamato l'attenzione specialmente ADOLF KNESER nello scritto *Das Prinzip der kleinsten Wirkung von Leibniz bis zur Gegenwart in Wissensch. Grundfragen* a cura di R. Hönigswald, voi. IX, specialmente p. 29 s.

tirare conseguenze esatte e pertinenti tanto particolari»²³. I principî sono sempre audaci anticipazioni siffatte, le quali trovano la loro garanzia in ciò che riescono a rendere per l'assetto e l'organizzazione interna di tutta quanta la materia del sapere. Essi non riguardano direttamente i fenomeni ma la forma delle leggi secondo cui ordiniamo tali fenomeni. Quindi un autentico principio non sta sullo stesso piano di una legge di natura: è piuttosto il luogo di nascita per leggi di natura, per così dire una matrice da cui possono nascere sempre nuove leggi di natura. Donde pure consegue immediatamente che e perché un principio non va inteso come una mera collezione di enunciati di legge. Come le leggi (gli « enunciati di secondo grado ») non nascono da una semplice addizione di enunciati di misura individuali ma in qualità di classi possiedono un significato autonomo, un essere logico *sui generis*, allo stesso modo ciò vale dei principî in rapporto alle leggi. Anche queste « classi di classi » hanno un proprio contenuto caratteristico: con esse passiamo per la seconda volta in una « dimensione » nuova. Nella misura in cui poggia su basi sensistiche e l'empirismo stretto ha cercato sempre di nuovo di contestare o cancellare questa pluridimensionalità caratteristica. Ha ritenuto potesse bastare un « unico » piano, il piano a cui appartiene la percezione immediata dei sensi — e su questo ha richiamato sempre di nuovo il pensiero fisico. Bacon qualificava assurdo consigliare agli uomini di salire su alte torri per osservare gli oggetti da lassù invece di andare direttamente alle cose e osservarle in una vicinanza immediata²⁴. Mill dichiara parimenti che il sapere relativo ai casi individuali costituisce l'unica conoscenza sicura, non ampliabile da nessuna forma logica in cui la cogliamo. « Pertanto non vedo — soggiunge ironicamente — perché mai dovrebbe essere proibito scegliere la via piú corta né per quale motivo dovremmo essere

²³ H. HERTZ, *Die Prinzipien der Mechanik*, Leipzig 1894, p. 20.

²⁴ *Redargutio philosophiarum* (*Works*, a cura di Ellis-Spedding, vol. III, p. 581).

indotti da una qualche disposizione autoritaria dei logici a battere la strada alta dell'apriori [*the high priori road*]. Non vedo perché debba essere impossibile andare da un luogo all'altro se non salendo il colle dall'una parte per poi ridiscenderlo dell'altra »²⁵. Ma a questa domanda si può dare una risposta chiara e precisa. Forse sarebbe consigliabile scegliere la via di Mill, la via *from particulars to particulars* ed evitare in tal modo la strada alta, faticosa e rischiosa della conoscenza. Ma ciò potrebbe accadere solo se la meta da raggiungere fosse già fissata e conosciutissimo in anticipo il luogo in cui vogliamo arrivare. Ed è proprio questa conoscenza a mancarci. Noi possiamo solo prendere una determinata direzione nella speranza che essa ci porti più vicino a una certa meta da noi supposta; ma non possiamo fissare in anticipo il luogo preciso di tale meta. Per questo occorrono le strade alte: esse ci sono indispensabili per orientarci sul terreno che dobbiamo attraversare. In fondo i principî della fisica non sono altro che mezzi siffatti di orientamento: mezzi per fare giri di orizzonte dall'alto [*Mittel der Umschau und Überschau*]. Sulle prime essi hanno un valore ipotetico; non possono fissare già dall'inizio, dogmaticamente, un determinato risultato dell'indagine ma ci insegnano a trovare la direzione in cui procedere oltre. Noi ci dobbiamo sollevare sempre di nuovo oltre il piano delle percezioni immediate, anzi anche oltre quello dei dati sperimentali e delle singole determinazioni di legge, per poi ritornare a muoverci con sicurezza entro tutti questi piani. La salita e il superamento che qui si richiedono, non servono ai fini di una qualche specie di trascendenza ma alla pura immanenza: a strutturare e garantire l'esperienza stessa.

Se ora diamo ancora una volta uno sguardo ai gradi di enunciati fisici che abbiamo distinto, in cerca di una

²⁵ MILL, *System of Logic* cit., libro I, cap. III, § 3 (vol. I, p. 207 ss.).

loro caratterizzazione dal lato formale e metodico, possiamo dire che gli enunciati di misura sono individuali, gli enunciati di legge sono generali, i principi sono universali. Ci si potrebbe obiettare che in tutte e tre le classi senza dubbio si tratta di enunciati empirici, i quali pertanto non sarebbero capaci di alcuna universalità e necessità in senso stretto. Ma tale obiezione si fonda su un'ambiguità vigente nel concetto stesso di « empirico ». Certo per nessun giudizio d'esperienza, per quanto in alto esso stia nell'ordinamento della conoscenza empirica, possiamo pretendere il carattere della « absolutezza », dalla validità definitiva; dobbiamo sempre tenere aperta la possibilità che il progresso della conoscenza ci porti a integrarlo o a rettificarlo. Ma ciò non significa affatto che ci sia lecito cancellare e livellare tutte le differenze logiche all'interno della conoscenza empirica. Dopo una simile cancellazione non si potrebbe più compiere proprio quel processo dell'esperienza da cui dipende ogni possibilità di rettificazione: tale processo infatti non può compiersi altrimenti che in un determinato ritmo logico, nel passo triplo di « fatti », « leggi » e « principi ». Questo ritmo esprime un'articolazione entro la conoscenza empirica, un'articolazione che appartiene al pieno concetto di essa e le è indispensabile. Il difetto dell'empirismo dogmatico non sta nel suo voler ancorare tutto il sapere all'esperienza né nel vedere in questa l'unico criterio della verità, ma nel non portare abbastanza avanti l'analisi dell'esperienza e quindi nell'arrestarsi a un concetto non chiarito di essa. Non di rado inoltre tale empirismo trova motivo in una vaga assunzione di continuità: esso non vuole staccare nettamente i diversi gradi di conoscenza per poterli invece sviluppare l'uno dall'altro. Ma, se si cerca di intenderlo come una pura e semplice riproduzione dell'omogeneo, questo sviluppo è illusorio. In qualche punto del progresso della conoscenza dobbiamo riconoscere un'autentica mutazione che porta a qualcosa di nuovo e di autonomo. Anche il nostro pensiero si muove per così dire su « binari discreti » — e ciascuno

di essi gli prescrive un ben determinato atteggiamento. Se esso vuol passare dall'uno all'altro di questi binari — se vuol salire dagli enunciati di misura a leggi e da queste a principi — ciò può avvenire sempre solo con un « salto » che richiede l'intervento di una certa energia spirituale. Questo salto non si può evitare — né possiamo lasciarci indurre a « disfarcene » semplicemente, per amore di un preconetto gnoseologico. Il « rasoio » di Occam è certo uno strumento prezioso e indispensabile per tutta quanta la gnoseologia; ma se esso viene usato fuori luogo, corriamo il rischio di tagliare quei legamenti e tendini naturali che tengono insieme l'organismo della conoscenza.

Un criterio storico per la natura peculiare dei principi si può trovare anche in ciò: che nella storia della conoscenza filosofica e scientifica della natura emerge sempre di nuovo il tentativo di assegnare loro la forma piú alta di « universalità », di identificarle cioè in qualche modo con lo stesso principio generale di causalità o di dedurle direttamente da questo. A tale proposito ritorna sempre chiaro che e perché una deduzione del genere non può riuscire — ma nondimeno continua a sussistere la tendenza a compierla. Quanto piú in alto saliamo nella « gerarchia » delle proposizioni scientifiche, tanto piú difficile diviene il distinguere queste proposizioni dal vertice della gerarchia, dal principio di causalità. Ai primordi della nuova scienza della natura, nella fondazione della dinamica, quello a cui spetta una posizione dominante è il principio d'inerzia. E subito intervengono anche i tentativi di fonderlo in un qualche modo col principio causale. Un corpo abbandonato a se stesso, si dichiara, « deve » persistere nel suo stato di quiete e di moto rettilineo uniforme, perché ogni deviazione da questo implicherebbe un accadere « infondato » e perciò impossibile. Ad una argomentazione del genere propende persino Leibniz che pur insiste incessantemente sulla netta distinzione tra « verità di fatto » [*vérités de fait*] e « verità di ragione » [*vérités de raison*]. In diversi luoghi dei suoi scritti Leibniz si riattacca alla

legge d'inerzia per esemplificare *ex contrario* quanto si debba intendere per « miracolo ». Se Dio volesse fare in modo — così egli spiega ad esempio nel carteggio con Clarke — che un corpo libero girasse nell'etere intorno a un centro fisso senza che su di esso agisse alcun'altra forza, ciò sarebbe possibile solo per un miracolo. Infatti è un miracolo tutto ciò che non si può spiegare movendo dalla natura dei corpi e tale natura esige che un corpo libero si allontani nella direzione della tangente della curva²⁶. Una dichiarazione siffatta attesta quanto profondamente il principio di inerzia fosse radicato nella generale coscienza filosofica e scientifica già all'epoca di Leibniz: fatto questo tanto più notevole quando si consideri quanto paradossale esso appariva ancora pochi decenni prima. Quando Galilei lo enunciò per la prima volta, agli avversari peripatetici di lui esso apparve una novità audace e inaudita — e lo stesso Galilei sembra esser giunto alla convinzione della sua verità ed alla sua formulazione generale solo lentamente, un poco alla volta²⁷. Per quanto concerne il principio dell'effetto, certo oggi in genere, dopo gli energici ammonimenti contro false « digressioni » del genere dati da spiriti critici come Heinrich Hertz, si è rinunciato alle deduzioni teleologiche prima in uso²⁸. Ma spesso

²⁶ Vedi carteggio con Clarke, lettera III, § 17, in *Hauptschriften*, ed. Cassirer, vol. I, p. 139; cfr. lettera IV, *ibidem*, vol. I, p. 152, § 45; vedi inoltre *ibidem*, vol. II, pp. 218, 281, e la lettera a Hartsoecker del 6 febbraio 1711 in *Philos. Schriften*, ed. Gerhard, vol. III, p. 518. Tentativi di intendere il principio di inerzia come un immediato corollario del principio generale di causalità e di dedurlo da questo sono stati ripetuti spesso anche in seguito; cfr. ad esempio SCHOPENHAUER, *Über die vierfache Wurzel des Satzes vom zureichenden Grunde*, e APELT, *Theorie der Induktion* (1854), pp. 60 ss., 93 ss.

²⁷ Altri particolari in E. WOHLWILL, *Die Entdeckung des Beharrungsgesetzes* in « *Zeitschr. f. Völkerpsychol.* », XIV e XV, 1883-84.

²⁸ « Certo — nota Heinrich Hertz a proposito della denominazione gaussiana del principio come " principio della minima costrizione " — in siffatte digressioni vi è senz'altro una attrattiva particolare, e lo stesso Gauss vi ha dato rilievo nella gioia legittima della sua bella scoperta. Ma dobbiamo tuttavia riconoscere che

persino nella cerchia del piú rigoroso positivismo il significato dei diversi principi di massimo e di minimo si è visto in ciò, che essi stabilirebbero solo il postulato della univocità dell'accadere e dunque in sostanza esprimerebbero un'esigenza indispensabile per ogni comprensione causale. Così il Petzoldt ad esempio dichiara che nessuna speculazione teologica o teleologica di sorta troverebbe il menomo appoggio né nella versione euleriana del principio dell'effetto né in quella di Hamilton-Gauss; tutti questi principi non sarebbero altro che espressioni analitiche del fatto empirico che i processi naturali sono determinati univocamente. « In tutti i principi accennati intravediamo... il fatto della univocità dei processi... Ma solo da essa è resa possibile la scienza; se essa non ci fosse, non si potrebbe parlare di leggi di natura... Pertanto il principio dell'azione minima e quelli ad esso affini entro il loro campo di validità si possono interpretare anche come espressioni analitiche del principio di ragion sufficiente »²⁹. A questa concezione aderisce anche Mach; egli dichiara che il principio del minimo effetto e così tutti gli altri principi di minimo della meccanica non esprimono altro se non che nei casi in questione accade proprio tanto quanto « può accadere » nelle circostanze date, quanto da queste è determinato ed univocamente determinato³⁰. Ma è chiaro che con tale spiegazione egli si ingolfa in un circolo. Se infatti seguiamo Mach, naturalmente non è lecito intendere in senso razionalistico o metafisico il « può » della espressione « può accadere », e quindi non resta altro che dargli un senso puramente empirico, e farlo dunque risalire proprio a quei principi di cui qui è in questione il fondamento.

questa attrattiva è solo un giuoco col misterioso e da parte nostra non crediamo seriamente alla nostra capacità di sciogliere l'enigma del mondo con simili allusioni tenute a metà». Vedi *Prinzipien der Mechanik* cit., p. 38.

²⁹ PETZOLDT, *Maxima Minima und Oekonomie*, Altenburg 1891, 12 ss.

³⁰ *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*, cap. III.

Dunque la differenza fra enunciati-di-principî, pur cosí universali, e il principio causale stesso resta incancellabile. Anche il principio dell'energia, benché abbia dato molte ottime prove della sua universalità, è e resta una « particolare legge di natura », la cui negazione non equivarrebbe affatto all'annullamento del « principio causale in generale ». A quest'ultimo dunque, anche partendo dal piano dei principî universali, possiamo arrivare sempre solo con un « salto »: con una *μετὰ βασιν εἰς ἄλλο γένος* che corrisponde a quelle con cui siamo condotti dagli enunciati di misura agli enunciati di legge e dagli enunciati di legge agli enunciati di principî.

CAPITOLO IV

IL PRINCIPIO GENERALE DI CAUSALITÀ *

Il passaggio al principio generale di causalità ci pone di fronte a un problema molto piú serio e difficile di quelli emergenti negli analoghi passaggi dai « fatti » alle « leggi » e da queste ai « principi ». Esso pare in certo modo un salto nel nulla; che cosa otteniamo infatti quando ci lasciamo dietro ogni particolarità sia dei fatti fisici sia delle leggi e dei principi fisici? Con ciò non cadiamo forse completamente nel vuoto? Possiamo mai enunciare alcunché intorno alla realtà fisica senza che tale enunciato abbia la forma di un determinato reperto sperimentale né di una determinata legge che esprima la dipendenza fra certe classi di grandezze-di-misura? Dopo che ciò abbia avuto luogo, dopo che le leggi siano state raccolte e unite a loro volta in principi, resta forse ancora un qualche perché? Di fatto dobbiamo convenire che il principio causale non è una « legge di natura » nel senso consueto dell'espressione. In proposito ha ragione Mach quando afferma che nella natura non esistono né causa né effetto perché la

* [Der allgemeine Kausalsatz — dove *allgemein* significa insieme « universale » e « generale »; ma mentre a questo punto della presente trattazione è ormai chiaro e definito che tutti i principi come tali sono universali, viceversa il principio di causalità in quanto qui è posto al vertice di tutti gli altri con un « salto » ulteriore rispetto ad essi, in quanto principio di e su principi (e quindi classe di classi di classi), non solo è ovviamente « universale » per *definitionem*, ma anche e piú specificamente « generale » rispetto a tutti gli altri. Per questo motivo traduciamo « generale ». — N.d.T.].

natura si dà fattualmente solo una volta e quei « casi uguali » a cui ci riferiamo nel dire che in circostanze uguali si presentano risultati uguali, non sussistono in essa ma solo nella nostra riproduzione schematica di essa¹. Ma che cosa resta della causalità, se non possiamo intenderla né immediatamente come enunciato sulla natura, né come enunciato metafisico, come un enunciato intorno al mondo delle « cose assolute »? Essa si può intendere solo come enunciato « trascendentale », che non riguarda tanto degli oggetti quanto piuttosto la nostra conoscenza di oggetti in generale (vedi qui sopra, p. 32 s.). Anziché come un enunciato diretto riguardante cose, essa va concepita come un enunciato intorno alla conoscenza empirica delle cose, intorno all'esperienza. Il timore che in tale condizione di mediatezza trascendentale essa perda qualcosa del suo significato oggettivo, è confutato dall'analisi critica del concetto di oggetto. Tale analisi infatti mostra che ogni oggettività presenta questo stesso legamento caratteristico, anzi si fonda su questo legamento. L'esperienza si presenta come momento definiente dell'oggettività — e per conseguenza le sue condizioni si dimostrano *eo ipso* condizioni della possibilità degli oggetti dell'esperienza; solo esse costituiscono tali oggetti.

Il « determinismo critico » per lo meno non conosce altro modo di « fondare » un principio generale della conoscenza della natura. Esso non può accogliere dei principî siffatti con l'ingenuità di una fede cieca [*auf Treu und Glauben*]: per essi non può appellarsi a una semplice costrizione del pensiero, a una necessità fondata nella nostra « organizzazione » mentale. Kant era ben lontano dal ricorrere a un appello simile, nel quale non di rado si è vista l'essenza dello a priori kantiano e della soluzione kantiana del problema della causalità — anzi lo ha respinto energicamente. Dove si volesse sostenere che

¹ Die ökonomische Natur der physikalischen Forschung in Populärwissensch. Vorlesungen, 2^a ed., 1892, p. 221.

le categorie siano... disposizioni soggettive del pensare, piantate in noi col nascere, e [tuttavia] così ordinate dal nostro Creatore che il loro uso si accordi esattamente con le leggi della natura secondo le quali si svolge l'esperienza — così egli dichiara esplicitamente — in tal caso alle categorie mancherebbe la necessità che è essenziale al loro concetto [in questo modo non si potrebbe mai attribuire loro una vera necessità oggettiva]. Infatti il concetto, ad es., di causa... sarebbe falso, qualora riposasse [solo] su una necessità soggettiva, arbitraria e innata in noi... Io non potrei dire: l'effetto è collegato con la causa nell'oggetto (cioè, necessariamente); ma: io sono così fatto da non poter pensare questa rappresentazione se non così collegata; che è proprio ciò che più desidera lo scettico².

Pertanto non è lecito intendere la legge causale nel senso di una « idea innata » di cui fidarci in base alla sua « evidenza »; piuttosto la sua validità per la « natura », per le cose dell'esperienza, va dimostrata ma al tempo stesso anche ristretta a queste ultime. Nel suo senso kantiano questa restrizione non comporta nessuna diminuzione: noi non possiamo far funzionare il concetto di oggettività oltre il campo dell'esperienza. « Fin dove giunge la percezione e ciò che dipende da lei secondo leggi empiriche, giunge pure la nostra conoscenza dell'esistenza delle cose. Ma se non cominciamo dall'esperienza, oppure se non procediamo secondo leggi della connessione empirica dei fenomeni, invano facciamo pompa di voler indovinare e ricercare l'esistenza di una cosa qualsiasi »³.

Ma abbiamo già visto che sulla via battuta nella soluzione del problema humiano Kant non ha continuato sino alla fine. Nella « deduzione » del principio causale data

² *Critica della ragion pura*, 2^a ed. tedesca, p. 167; ed. Cassirer, voi. III, p. 136; [trad. it. cit. Gentile e Lombardo-Radice, vol. I, pp. 161-162; in parentesi quadra alcuni luoghi dove la traduzione citata si scosta sensibilmente dal testo. — N.d.T.].

³ *Ibidem*, p. 273; ed. Cassirer, voi. III, p. 199; trad. it. cit., voi. I, p. 234.

nelle « analogie dell'esperienza », egli rivolge di nuovo la questione alle cose e agli eventi empirici invece di riferirla unicamente alle conoscenze empiriche, alla « forma dell'esperienza » (vedi qui sopra, p. 38 s.). Poniamo dunque il problema esclusivamente in « questo » senso: che cosa dice allora il principio causale e quale nuova intuizione aggiunge a ciò che abbiamo appreso dall'analisi critica della conoscenza condotta fin qui? Quale passo ulteriore resta da fare, quale nuovo insegnamento dobbiamo ancora attendere intorno alla conoscenza della natura, dopo che abbiamo percorso gli stadi precedenti, — dopo essere progrediti dagli enunciati di misura agli enunciati di legge e da questi agli enunciati di principi? A questa domanda vorrei dare una risposta che a prima vista appare forse paradossale. In realtà non resta più nulla; alla descrizione della struttura e del processo della conoscenza vigenti nella scienza della natura non vi è da aggiungere nessun momento fondamentale nuovo. Ciò che dice il principio causale — è questa la tesi che intendo svolgere e giustificare nel seguito — non è una intuizione nuova nel contenuto ma nuova solo nel riguardo metodico. Esso non aggiunge alcun tratto determinante ulteriore che sia omogeneo ai precedenti e ad essi si affianchi a titolo di integrazione materiale. Visto puramente nel suo contenuto il principio causale non va oltre quanto si è già acquisito; solo lo convalida e gli imprime per così dire il sigillo dal punto di vista della critica gnoseologica. In questo senso, per dirla nel linguaggio di Kant, esso rientra nei principi modali: è un « postulato del pensiero empirico ». E tale postulato in fondo non vuol dire altro se non che quel procedimento che abbiamo cercato di descrivere nei particolari, è possibile illimitatamente. Che il processo della traslazione dei dati d'osservazione in enunciati di misura esatti, il processo della raccolta dei risultati di misurazione in equazioni di funzione e quello dell'unione sistematica di queste equazioni in forza di principi universali, sia mai concluso, ciò non è affermato dal principio

causale. Quanto esso esige e presuppone in forma assiomatica è solo che la conclusione si può e si deve cercare, che i fenomeni della natura non sono fatti in modo da escludere in linea di principio la possibilità di un ordinamento mediante il processo suddetto, né in modo da opporvisi. In questo senso vogliamo intendere il principio causale: e in tal senso intendiamo sottoporlo nel seguito a una prova critica. Per noi in tanto il principio causale appartiene a un nuovo tipo di enunciati fisici in quanto è un enunciato « su » determinazioni di misura, « su » leggi di principi: esso afferma che tutti questi « momenti » si possono riferire e allacciare gli uni agli altri in modo tale che da questo allacciamento non risulti un semplice aggregato di conoscenze isolate ma un sistema della conoscenza fisica⁴.

Ma prima di procedere nella nostra ricerca dobbiamo ancora affrontare una possibile obiezione. Se questa spiegazione della causalità non è un'arbitraria definizione nominale — così ci si può forse domandare — coglie essa

⁴ Nel concepire la causalità « non tanto come una " legge " quanto piuttosto come un " punto di vista " da cui parlare di leggi » io concordo con R. Hoenigswald; cfr. il suo saggio *Kausalität und Physik* in « Sitzungsber. der Akad. der Wiss. in Berlin », Phys.-math. Klasse, XVII, 1933, p. 568 ss. — Vi si chiarisce che il principio generale di causalità non ha bisogno di rientrare nella esposizione del contenuto scientifico oggettivo della fisica, che esso anzi neppure vi può entrare. Ma non ci si può valere di questa circostanza per concludere — come a volte si è fatto — che questo principio sia sterile e non necessario. Nel trattare il problema del determinismo Eddington adduce la circostanza che in un'opera come i *Principles of Quantum Mechanics* di Dirac il « principio causale » non è più citato in nessun luogo a titolo di assioma particolare, come se ciò provasse che la fisica moderna prende ad abbandonare definitivamente il determinismo (cfr. EDDINGTON, *New Pathways in Science*, Cambridge 1935, p. 81; trad. it. Dell'Oro, Milano 1936). Ma questo argomento evidentemente non regge. Grazie alla situazione metodica indicata il principio causale non soleva figurare esplicitamente come « assioma », come parte della « dottrina » fisica, neppure nel contesto della fisica classica. Sotto tale titolo esso non manca solo nelle esposizioni moderne ma anche nei precedenti sistemi « classici » — in Newton e Eulero, in d'Alembert e Lagrange.

ed esaurisce ciò che l'effettiva conoscenza fisica intende per « legge di causalità »? Nel rispondere a questa domanda in un primo momento mi limito all'ambito della « fisica classica »: dei nuovi problemi creati dalla teoria dei quanti e dalla fisica atomica moderna si dovrà parlare solo più avanti. Ora, è vero, anche all'interno della fisica classica è difficile individuare un uso linguistico unitario che fissi univocamente il concetto di causalità in essa impiegato. Le spiegazioni che ne hanno dato i singoli scienziati, differiscono molto le une dalle altre. Ma l'operare della fisica segue nondimeno una direzione unitaria; e da questa, non dalle parole dei singoli scienziati, possiamo cogliere la sua visione fondamentale (cfr. sopra, p. 48). La riflessione intorno a questo operare è stata portata da Helmholtz al massimo grado di chiarezza e di penetrazione. Possiamo dunque ricorrere a lui: le sue formulazioni sono le ultime e più mature conoscenze a cui esso abbia portato la fisica classica nelle sue determinazioni concettuali di « causa » e « effetto ». È strano e sorprendente che nelle discussioni moderne intorno al problema della causalità ricorra quasi sempre il nome di Laplace e molto spesso quello di Du Bois-Reymond, mentre il nome di Helmholtz non si incontra mai o solo di rado. Questa, a mio avviso, è una lacuna considerevole poiché per intuizione e profondità critica ben difficilmente si può paragonare a Helmholtz un qualsiasi altro scienziato del sec. XIX. Helmholtz è il rappresentante classico, in senso proprio, dell'empirismo moderno: da un lato abbraccia l'intero campo della scienza della natura — è un fisico, un elettrochimico, un fisiologo e uno psicologo — ; dall'altro in tutte le sue indagini particolari mira ad ampliare e rafforzare le prove dell'empirismo. In questo senso egli ha trattato sia il problema generale dello spazio sia la questione dei fondamenti della geometria da punti di vista di una rigorosa critica della conoscenza. Se dunque cerchiamo un'espressione realmente « rappresentativa » di ciò che la fisica abbia inteso per concetto di causa e in quale

senso lo abbia usato, in questo luogo se mai in alcuno ci è lecito sperare di incontrarla. Certo Helmholtz non è partito fin dall'inizio da un concetto di causalità già precostituito e pronto, ma esso gli si è formato solo a poco a poco in base al concreto lavoro d'indagine. In gioventù egli segue la concezione che dominava tutta quanta la fisica dell'epoca: è un newtoniano convinto e un rigido meccanicista. Da questo punto di vista egli abbozza un programma completo della scienza della natura nella parte introduttiva della sua relazione *Sulla conservazione della forza* (1847). Il fine teoretico principale della scienza della natura si può riassumere nel trovare le cause sconosciute degli eventi movendo dai loro effetti visibili: e ciò può aver luogo in maniera del tutto soddisfacente solo se riusciamo a ridurre tutti i fenomeni naturali a moti di materie soggette a forze invariabili che dipendono solo da relazioni spaziali. Il compito della conoscenza fisica si definisce dunque nel ridurre i fenomeni naturali a forze invariabili di attrazione e repulsione, la cui intensità dipende dalla distanza; la possibilità di assolvere questo compito è al tempo stesso la condizione della concepibilità completa della natura. La concezione del problema della causalità che Helmholtz ha svolto e giustificato esaurientemente una generazione più tardi nel discorso su *I dati di fatto della percezione* (1878), è molto più libera e ampia, molto meno legata a particolari presupposti ipotetici. Dalle sue lettere sappiamo quanto intensamente lo abbia impegnato il tema di questo discorso e quale importanza fondamentale egli gli attribuisse⁵. Qui ogni assunto speciale intorno alla forma dell'accadere naturale è eliminato a partire dall'enunciato generale della legge di causalità. Ciò che noi possiamo trovare inequivocamente come dato di fatto senza interpolazioni ipotetiche — vi si dichiara — è la legalità dei fenomeni. Questa è il primo prodotto della comprensione della natura da parte del pensiero. Ciò che

⁵ Cfr. KOENIGSBERGER, *Helmholtz* cit., vol. II, p. 246.

chiamiamo « causa » si può intendere e legittimare solo in tale senso, anche se l'uso linguistico comune adopera questa parola in modo molto distorto come sinonimo di « antecedente » o di « occasione ». Noi non possiamo raggiungere altra conoscenza che quella dell'ordinamento legale del regno della realtà, rappresentato ovviamente solo nel sistema segnico delle nostre impressioni sensibili. Se è formata in modo corretto, ogni ipotesi secondo il suo senso effettivo pone una legge dei fenomeni più generale di quanto abbiamo osservato fin qui, è un tentativo di salire a una legalità sempre più generale e comprensiva. Fino a che punto tale tentativo riesca, non si può stabilire a priori; in proposito dobbiamo lasciare all'esperienza la decisione in ogni caso singolo. Ma il cercare leggi sempre più generali è un tratto fondamentale del nostro pensiero, un suo principio regolativo. E appunto questo principio regolativo e null'altro che questo è quanto chiamiamo legge di causalità. In questo senso essa è una legge data a priori, trascendentale, perché non è possibile provarla movendo dall'esperienza. Ma dall'altro lato è chiaro che della sua applicabilità non abbiamo altra garanzia che il suo successo. Potremmo vivere in un mondo in cui ogni atomo fosse diverso da ogni altro: in esso non vi sarebbe da scoprire nessuna specie di regolarità e la nostra attività pensante dovrebbe restare ferma. Ma di un mondo simile lo scienziato non tiene conto: egli confida nella comprensibilità dei fenomeni naturali, e ogni singola argomentazione induttiva sarebbe priva di forza quando alla base non le stesse questa fiducia generale. « Qui vale solo un avviso: " abbi fiducia e agisci "; allora il precarlo diviene evento reale » ⁶.

— Come si vede, questa formulazione del principio causale della fisica classica conferma il risultato della nostra analisi precedente in ogni particolare. Quanto Helmholtz richiede

⁶ *Die Tatsachen in der Wahrnehmung in Worträge u. Reden*, 4^a ed., Braunschweig 1896, voi. II, p. 240 ss.; vedi anche *Handbuch der physiolog. Optik*, 2^a ed. 1896, vol. II, p. 591 ss.

e quanto ritiene condizione necessaria e sufficiente per la validità del principio, è appunto quell'itinerario graduale della conoscenza che noi abbiamo cercato di esporre nei dettagli: il procedere dal reperto sperimentale e dalla sua formulazione esatta a enunciati di legge sempre più rigorosi ed a enunciati-di-principi sempre più universali. In Helmholtz non si trova alcun appello alla « formula dell'universo di Laplace ». Evidentemente egli ha evitato di proposito questa formula, che dal tempo del discorso di Du Bois-Reymond era di nuovo al centro della discussione, per non confondere né gravare la propria analisi critica con problematiche metafisiche. Nelle considerazioni di Helmholtz non ha mai nessuna parte decisiva neppure il momento della predizione completa del futuro dal passato. Spesso nella formulazione della legge di causalità tale momento si è preso come la nota determinante essenziale, anzi l'unica: si è creduto che la predizione sia un « contrassegno sufficiente della causalità », dove certo si doveva aggiungere che l'avverarsi di una profezia sia un fatto ultimo, non ulteriormente analizzabile⁷. Se così fosse, nel momento in cui la fisica si trovasse in una situazione conoscitiva che in determinati campi non le permettesse più delle predizioni assolutamente esatte, dovremmo rinunciare al principio causale. Ma qui mi sembra che la portata teoretica del momento predittivo venga ampiamente sopravvalutata. Il desiderio di predefinire il futuro in un senso qualsiasi è certamente uno dei motivi più importanti, che ci spinge a produrre serie « causali » di ragionamenti; ma non è affatto l'unico senso, l'esclusivo contenuto di pensiero di tali serie. Se volessimo elevare a « principio » questo motivo, cadremmo in uno di quegli antropomorfismi che il sistema teoretico della fisica si sente in dovere di neutralizzare. Dovunque l'uomo colga il nesso causale dell'accadere, dovunque per lui si tratti di ottenere

⁷ Vedi SCHLICK, *Die Kausalität in der gegenwärtigen Physik* in « Naturwissenschaften », XIX, 1931, p. 150 ss.

un determinato « effetto » — certamente ciò è possibile solo grazie al suo « anticipare » tale effetto nella rappresentazione. Nella sua immaginazione egli deve fare esperimenti col futuro, deve raffigurarsi quale forma prenderà l'effetto nel presupposto di determinate misurazioni da parte sua. Le predizioni del futuro sono dunque un fattore indispensabile in ogni padroneggiamento tecnico della natura, sono una componente necessaria in ogni e qualsiasi orientamento pratico nel mondo. Che si prenda questo fattore per il tutto, che vi si veda esaurito il fine della conoscenza causale, dipende da questo: che fin dall'inizio dell'« era della tecnica » ci si è troppo avvezzati a definire il significato di concetti unicamente mediante il loro uso — che se ne scambia il senso logico con quello prammatico. Qui il precursore è Bacone col suo motto: *scientia propter potentiam*. Egli combatte l'abitudine nociva di far cominciare la scienza con una parte puramente « contemplativa » e solo da questa farla procedere alla parte « attiva »: egli vuole la gradazione inversa e la gerarchia inversa⁸. Il potere dell'uomo sulla natura va fondato mettendo al posto della vecchia una logica nuova: la « logica dell'invenzione ». « Quod in religione verissime requiritur, ut fidem quis ex operibus monstret: idem in naturali Philosophia competit, ut scientia simpliciter ex operibus monstretur »⁹.

Il positivismo moderno ha adottato questa prescrizione in tutta la sua ampiezza: non solo ha posto il postulato del *savoir pour prévoir* ma infine ha addirittura spiegato il *savoir* col *prévoir*. A Helmholtz invece una siffatta restrizione prammatica è ignota. Egli sostiene per la fisica un ideale di verità puramente teoretico e « contemplativo » in senso proprio, e questo ideale costituisce la direttiva anche nella sua analisi del concetto di causalità. « Ogni singolo fatto per sé preso — così egli dice in un luogo — tutt'al più può suscitare la nostra curiosità, la nostra mera-

⁸ BACONE, *Novum Organon*, libro II, aforisma IV.

⁹ BACONE, *Cogitata et Visa* in *Opera omnia*, Lipsiae 1694, fol. 593.

viglia, o avere per noi qualche utilità pratica. Ma solo la connessione del tutto offre una soddisfazione spirituale, appunto mediante la sua legalità»¹⁰. Nella predizione del futuro noi dimostriamo e proviamo di sapere questa legalità; ma tale predizione, come la conseguente padronanza tecnica della natura, non è l'unico né l'essenziale contenuto di quel sapere. Neppure la fisica classica nel suo edificio dottrinario ha mai ristretto il concetto di causalità al punto di rinunciare ad usarlo in campi dove per ragioni qualsiasi non sussistesse la possibilità pratica di fare predizioni rigorose. Anzi, predizioni siffatte non comportano mai la sola conoscenza delle leggi generali ma la conoscenza esatta delle condizioni iniziali che è raggiungibile sempre solo entro certi limiti. Perciò il rigido « ideale di Laplace » ha avuto validità sempre solo in certi campi particolari, come ad esempio nella astronomia, mentre l'ha perduta in altri, come nell'idrodinamica o nella teoria dell'elasticità¹¹. Da questo fatto è partito Planck nelle sue note osservazioni intorno alla causalità, per avanzare in via di prova una prima spiegazione del concetto causale nel senso che un evento dovrebbe valere come condizionato causalmente quando lo si possa predire con sicurezza. Ma egli aggiunge subito che questa semplice spiegazione non basta: la possibilità di fare una predizione vera per il futuro sarebbe certamente un criterio infallibile per l'agire di un nesso causale, ma concluderne per converso che la prima « equivalga » al secondo non sarebbe lecito. Una conclusione simile in sostanza renderebbe illusorio ogni uso del concetto poiché predire proprio esattamente un evento fisico non sarebbe possibile in nessun caso, nemmeno nella fisica classica. Qui allora, nell'aspetto gnoseologico, ci troviamo di fronte a un dilemma caratteristico: si produce un criterio della causalità che, preso alla lettera e seguito fin nelle sue con-

¹⁰ *Über die Erhaltung der Kraft*, ciclo di conferenze del 1862, in *Vorträge u. Reden*, cit., vol. I, p. 191.

¹¹ Vedi in proposito l'esposizione di P. FRANK, *Das Kausalgesetz und seine Grenzen*, Wien 1932, p. 41 ss.

sequenze ultime, non è in grado di indicare nessun caso concreto in cui di fatto esso sia applicato e provato¹².

Il dilemma scompare quando, secondo le precedenti considerazioni metodiche, formuliamo il principio di causalità in tutto rigore come un principio intorno a conoscenze invece di intenderlo come un principio intorno a cose ed eventi. Dobbiamo pensarlo come una guida che ci conduce da conoscenza a conoscenza e solo in tale mediazione anche da evento a evento; dobbiamo pensarlo come un principio che ci permette di ridurre enunciati individuali ad altri enunciati, generali e universali, e di rappresentare i primi mediante questi ultimi. Intesa in questo senso ogni vera proposizione causale, ogni legge di natura non contiene tanto una predizione di eventi futuri quanto piuttosto una ~~promessa di future conoscenze~~. Una legge siffatta è « gravida di futuro »: *praegnans futuri*, per usare un'espressione cara a Leibniz. Ma ciò vuol dire in primo luogo che essa cela in sé una grande copia di sapere che si svilupperà per intero e giungerà a piena maturazione solo più tardi. L'essenziale nella « predizione » è l' *estrapolazione* di cui una legge di natura è suscettibile. Il suo campo di validità non si limita a quelle osservazioni da cui è stata derivata direttamente, ma si estende oltre questa cerchia. E la sua vera e propria autenticazione sta in ciò: che questo ampliamento riesce, che essa conduce a fenomeni fin qui sconosciuti e apre nuove classi di leggi. La direzione temporale di tale apertura qui non ha importanza decisiva: la via in questione non conduce dal passato

¹² PLANCK, *Die Kausalität in der Natur, Wege zur physikal. Erkenntnis*, Leipzig 1933, p. 236 [cfr. trad. it. di Persico e Gamba, Torino 1964]. Che la legge di causalità come tale vada distinta dal « criterio della sua applicabilità », pone recentemente in forte rilievo anche GRETE HERMANN in *Die naturphilosophischen Grundlagen der Quantenmechanik*, Berlin 1935, p. 50 ss. In quest'opera tuttavia si assume — secondo me, a torto — che per lo meno nel campo della fisica classica « causalità » e « precalcolabilità » coincidano ancora per intero, e solo la meccanica dei quanti abbia dimostrato la necessità gnoseologica di separarle l'una dall'altra (cfr. op. cit., p. 11 ss.).

nel futuro ma da un ambito ristretto di conoscenze a un ambito piú vasto. Cosí ad esempio le equazioni del campo di Maxwell, implicitamente contenevano già tutto quel tesoro di conoscenze che Heinrich Hertz ha fatto emergere in seguito nel suo lavoro sperimentale. Lo stesso Hertz una volta ha detto che non si può studiare la teoria maxwelliana senza avere a volte la sensazione che alle formule matematiche inerisca una vita autonoma e un proprio intelletto, la sensazione che esse siano piú avvedute di noi, piú avvedute persino del loro inventore, che ci diano piú di quanto vi sia stato messo a suo tempo¹³. Ciò risalta in modo particolarmente chiaro e convincente quando la formula è tale da non esprimere solo quel campo speciale per cui è stata avanzata sulle prime, ma la sua validità e la sua applicabilità si mostrano in campi molto lontani, anzi affatto disparati. Di tal fatta erano ad esempio le equazioni prodotte da Fourier per il problema della conduzione termica¹⁴; ma del resto la fisica è ricca di esempi siffatti in cui si esprime la produttività autentica e peculiare del suo pensiero.

Ciò si esprime anche nel postulato della semplicità delle leggi di natura — un postulato, questo, la cui interpretazione e motivazione puramente gnoseologiche incontrano senza dubbio difficoltà peculiari. Per sfuggire a tali difficoltà a volte si è cercato di tagliare il nodo gordiano: si è deciso che il postulato della semplicità non è suscettibile di formulazione rigorosa e pertanto deve essere espunto dalla dottrina scientifica dei principi in generale. Per lo meno non gli si voleva concedere alcun posto nella compagine logica di tale dottrina; lo si ridusse a una esigenza puramente estetica, non suscettibile di un'autentica fondazione oggettiva¹⁵. Ma contro questo modo di

¹³ HERTZ, *Über die Beziehungen zwischen Licht und Elektrizität* in *Ges. Werke*, vol. I, p. 344.

¹⁴ Vedi sopra, p. 61 ss.

¹⁵ Questo punto di vista è sostenuto ad es. da SCHLICK, art. cit., « *Naturwissenschaften* », XIX, 1931, p. 148.

vedere depone lo stesso decorso storico della conoscenza fisica: nello sviluppo della fisica infatti il postulato della semplicità si è fatto valere sempre di nuovo e si è dimostrato un momento altamente fecondo. Tale processo si può seguire dai primordi della conoscenza scientifica esatta della natura fino all'indagine moderna. Galilei e Keplero usano un criterio della semplicità ancora del tutto spontaneo e non gravato da dubbi e scrupoli gnoseologici di sorta. Costoro sono convinti sin dall'inizio che sia lecito valersi della semplicità come pietra di paragone della verità. E questo argomento svolge una parte importante specialmente nella difesa del sistema copernicano. « Hae Copernici hypotheses — dice Keplero — non solum in naturam rerum non peccant, sed illam multo magis juvant. Amat illa simplicitatem, amat unitatem... Penes usitatas hypotheses orbium fingendorum finis nullus est: penes Copernicum plurimi motus ex paucissimis sequuntur orbibus »¹⁶. Con ciò si raggiunge al tempo stesso una prima netta precisazione di quanto si debba intendere per ideale metodico della semplicità. Il motto *plurima ex paucissimis* è il tratto decisivo: una grande quantità di conseguenze deve essere deducibile dal minor numero possibile di ipotesi singole. Presso gli scienziati moderni le formulazioni di questo postulato si tengono più caute, ma in fondo vogliono dire la stessa cosa.

« Il sistema concettuale univocamente coordinato del mondo empirico — ha detto Einstein nel suo discorso per il sessantesimo compleanno di Planck — è riducibile a poche leggi fondamentali da cui si può sviluppare logicamente l'intero sistema. Qui in ogni nuovo progresso importante il ricercatore vede le sue aspettative superate dal progressivo semplificarsi di quelle leggi fondamentali sotto la pressione dell'esperienza. Egli vede con stupore il caos apparente sottomesso a un ordinamento sublime che non è da attribuire all'azione della propria mente ma alla natura stessa del mondo empirico ».

¹⁶ *Mysterium Cosmographicum* (1596), cap. I, vedi *Opera*, ed. Frisch, vol. I, p. 113.

Tanta è la forza e tanto il rigore con cui il principio della semplicità viene ancora tenuto fermo nella fisica moderna, e tanto è imperturbata la credenza in un suo significato « oggettivo »¹⁷. Ma appunto perciò dobbiamo distinguere fra l'esigenza meramente prammatica del principio e la sua esigenza di verità, che è puramente metodica. Se gettiamo uno sguardo sulle considerazioni avanzate fin qui, un certo lato di tale esigenza metodica si può intendere e fondare già a partire da queste. Abbiamo visto che in ogni passaggio a un nuovo tipo di enunciati fisici interviene un duplice processo: all'allargamento estensivo del sapere corrisponde sempre sull'altro lato una sua considerazione intensiva. Ogni ampliamento conduce al tempo stesso a una concentrazione prima ancora ignota; e solo in virtù di quest'ultima è possibile farsi padroni del nuovo materiale via via accalcantesi e adattarlo alla forma del sapere fisico. Ma allora la « semplificazione » inizia già quando raccogliamo insieme i dati del « mondo sensibile » in concetti fisici; ed essa aumenta sempre più quanto più ci innalziamo nella gerarchia di questi concetti, quanto più oltre progrediamo nella direzione degli enunciati di legge e degli enunciati di principi. La storia del principio del minimo effetto ci ha mostrato, ad esempio, come grazie ad esso le equazioni poste per i moti di sistemi meccanici affatto eterogenei ed estremamente complessi si lascino

¹⁷ Fra gli studiosi moderni ha posto in rilievo l'importanza del postulato della semplicità specialmente Hermann Weyl. « L'asserzione che la natura è governata da leggi rigide — così egli dice — è priva di ogni contenuto se non vi aggiungiamo l'affermazione che essa è governata da leggi matematicamente semplici... Non ci si può esimere dall'ammettere che questo attivo principio della semplicità ha retto bene alla prova. La cosa stupefacente non è che esistano leggi naturali ma che quanto più l'analisi procede, quanto più sottili divengono i dettagli e gli elementi a cui sono ridotti i fenomeni, tanto più semplici — e non tanto più complesse, come sulle prime ci si attenderebbe — divengono le relazioni fondamentali e tanto più esattamente esse descrivono gli eventi effettivi » (H. WEYL, *The Open World*, New Haven 1932, p. 40 ss.).

condensare in un unico principio di variazione e derivare da questo. Sotto tale aspetto il postulato della semplicità trae origine dal piú chiaro postulato fondamentale della « assiomatizzazione », come lo ha enunciato Hilbert, e a questo corrisponde. « Io credo — dice Hilbert — che tutto quanto può essere oggetto del pensiero scientifico in generale, non appena sia maturo per la costruzione di una teoria, divenga di pertinenza del metodo assiomatico e quindi mediatamente della matematica »¹⁸. Pertanto la stessa formulazione matematica dei giudizi fisici è già di per sé sola una condizione e una garanzia della loro progressiva semplificazione. Essa permette ed esige che si riducano le proposizioni singole a « funzioni proposizionali » e le funzioni proposizionali a funzioni di teorie [*doctrinal functions*], e che con ciò si raggiunga una incessante « gettata in profondità » dei fondamenti¹⁹.

Tale approfondimento resta misconosciuto quando al principio della semplicità si dà una versione puramente economica. Non è affatto vero che nel passaggio da un tipo all'altro di enunciati fisici si risparmi lavoro mentale; piuttosto per esso si richiede ogni volta un notevole « dispendio » di energia. Solo con tale dispendio si può compiere il « salto » dal piano degli enunciati di misura a quello degli enunciati di legge, e da questo al piano degli enunciati di principi (cfr. sopra, p. 68 ss. del testo). La teoria di Mach vuole evitare o escludere questo salto col ridurre le dimensioni « superiori » alle « inferiori » — insistendo essa nell'affermare che gli enunciati di legge e di principi non sono altro che « enunciati collettivi ». Ma i concetti di legge sono concetti di classi; e le « classi », secondo un postulato fondamentale della teoria dei tipi, non si possono mai prendere per semplici aggregati di

¹⁸ *Axiomatisches Denken* in « *Mathemat. Annalen* », 1917, p. 415.

¹⁹ Per la teoria delle *doctrinal functions* cfr. specialmente la trattazione di C. J. KEYSER, *Mathematical Philosophy*, New York 1922, terza lezione.

elementi. La fisica stessa incorre in contraddizioni, se non evita con cura la confusione di gradi consistente nel mettere la semplice somma dei particolari al posto dell'unità intensiva che una legge afferma. Secondo la sua *intentio* logica una legge è qualcos'altro e qualcosa di piú che un semplice registro o catalogo di casi particolari. La regola di deduzione, la formula, la legge — cosí dichiara Mach — « non ha in nulla piú valore materiale dei singoli fatti riuniti. Il suo valore sta unicamente nella comodità dell'uso. Essa ha un valore economico »²⁰. Ma se seguiamo piú oltre questa interpretazione puramente soggettivistica e pragmatistica, la vediamo coinvolgersi da sola in contraddizioni difficilmente risolvibili. Se infatti il compito dell'indagine consistesse realmente nell'acquisire una conoscenza completa di tutti i fatti singoli, come potrebbe allora l'indagine « risparmiarsi » del lavoro nell'adempimento di tale richiesta? Come le sarebbe lecito interrompere prematuramente il processo della rassegna dei casi singoli e contentarsi di una formula generale? Questa presunta « generalità » sarebbe forse qualcosa di diverso dalla superficialità, dell'arrestarsi ad un'assunzione vaga e arbitraria, non sostenuta né giustificata da alcuna osservazione effettiva? Se si vuole evitare questa conseguenza, ci si vede spinti sempre di nuovo a non intendere la « semplicità » della formula in senso puramente psicologico-soggettivo, ma a darle una qualche portata oggettiva. Se ad esempio si dice che con formule siffatte si raggiunge un progressivo « adattamento del pensiero ai fatti »²¹, allora l'ordinamento, l'articolazione, la connessione sistematica dei fatti a questo punto sono trattati di nuovo come qualcosa di « oggettivo » a cui il pensiero in certo qual modo puó ambire e « adattarsi ». Allora la costanza e la semplicità sono collocate negli stessi fenomeni naturali invece che nella nostra sola rappresentazione; l'associazione

²⁰ MACH, *Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit*, p. 31.

²¹ Cfr. MACH, *Über Umbildung und Anpassung im naturwissenschaftlichen Denken in Populärwissensch. Vorlesungen*, p. 237 ss.

soggettiva è spiegata, per dirla con Kant, con la « affinità » oggettiva.

Per giungere a una formulazione soddisfacente e ad una analisi effettiva del concetto di semplicità, si deve certo tenere accuratamente conto in ogni caso della differenza tipologica degli enunciati fisici. Non possiamo mai assegnare la « semplicità » a un « singolo » enunciato fisico, anzi neppure a un'intera classe di enunciati siffatti: essa è un predicato che riguarda il sistema complessivo. Questo sistema è talmente equilibrato e in sé concluso che ogni intervento in una qualunque delle sue parti si comunica subito al tutto e vi si fa sentire logicamente. E qui si tratta essenzialmente di vedere in quale punto facciamo leva. Non è affatto raro che in un certo luogo del sistema conoscitivo della fisica si introduca una variazione che dal punto di vista di questo luogo particolare non si dimostra affatto una semplificazione ma una complicazione molto vasta. Se il sistema complessivo non è toccato da tale complicazione, ma anzi si fa più organico e ordinato, con ciò si soddisfa al postulato della semplicità. Questa infatti non riguarda uno strato particolare dell'apparato concettuale e conoscitivo della fisica ma l'addentellarsi di tutti i suoi momenti singoli gli uni negli altri. Pertanto non appena isoliamo questi momenti l'uno rispetto agli altri, a stretto rigore non è più possibile rispondere con chiarezza alla domanda se una determinata variazione entro il sistema fisico porti a una sua autentica semplificazione. Così, ad esempio, risulta una valutazione diversa a seconda che vogliamo siano il più possibile semplici i « processi » fisici che riferiamo ai contenuti sensibili e ai dati immediati di osservazione come loro correlati concettuali, oppure poniamo questa richiesta agli « assiomi » fisici. Quella introduzione della geometria riemanniana che ha luogo nella teoria della relatività generale, sulle prime contiene una complicazione perché rispetto alle geometrie non-euclidee quella euclidea ha senza dubbio il vantaggio della semplicità. Ma questo apparente difetto è ampiamente compensato dal fatto

che con l'introduzione della geometria riemanniana assumono una forma particolarmente semplice la legge fondamentale dell'accadere e le definizioni di corrispondenza²². Secondo il principio dell'« intreccio reciproco », enunciati di misura ed enunciati di legge e di principî sono interdipendenti. Perciò il postulato della semplicità non si può mai rivolgere a una sola di queste parti componenti: piuttosto esso vuol dire che tutti questi tre momenti si devono « accordare » in modo tale da soddisfare alla condizione *plurima ex paucissimis*, in modo che si abbracci l'ambito più vasto possibile di fenomeni con il minor numero possibile di note determinanti che lo descrivono esattamente. La possibilità di questa determinazione è e resta un problema; ma nel principio di causalità questo problema si erge a postulato. È innegabile che tale postulato determina tutto quanto l'assetto della fisica classica ed è stato l'impulso decisivo per il pensiero di questa. Ora ci troviamo di fronte alla questione se l'indagine fisica possa fidarsi più oltre di questo impulso e lasciarsi condurre da esso, oppure si veda indotta dai nuovi compiti che le sono imposti, a una trasformazione essenziale, se non a un radicale abbandono, del concetto di causalità.

²² Che il postulato della « semplicità » si possa riferire alla parte assiomatica della fisica oppure alle correlazioni tra fenomeni ed enunciati fisici e quindi alla parte descrittiva, ha spiegato con molta pertinenza soprattutto R. CARNAP, *Über die Aufgabe der Physik* in « Kant-Studien », XXVIII, 1923, p. 90 ss.

PARTE TERZA

CAUSALITÀ E PROBABILITÀ

CAPITOLO I

REGOLARITÀ DINAMICA E REGOLARITÀ STATISTICA

I

Nel positivismo stretto il rapporto fra teoria ed esperienza è inteso in modo che la teoria non debba essere solo una espressione ma anche una copia dell'esperienza, cioè di quanto risulta nei dati sensoriali immediati. La verità della teoria sta nel suo adattarsi il più possibile ai fatti: né alcun adattamento può essere più completo di quello che ai fatti non aggiunge nulla di nuovo e di proprio ma li riproduce con la massima fedeltà possibile. Le teorie sono espedienti mnemonici, rappresentano un inventario del dato. E questo inventario evidentemente varia a ogni nuovo elemento che accoglie in sé. Dall'esperienza non c'è da attendersi né da sperare una « costanza » vera e propria. Essa muta incessantemente la sua forma — nella misura in cui si amplia la sfera del dato e sempre nuovo materiale si accalca via via sotto l'osservazione. Questa crescita è mera « epigenesi »; gli elementi vengono introdotti da fuori e si accostano gli uni agli altri uno per uno, pezzo per pezzo.

A tale concezione la gnoseologia critica contrappone una visione di fondo per principio diversa. Essa non definisce l'esperienza con la sua materia ma con la sua forma — e cerca di mostrare che tale forma è vincolata una volta per sempre a determinate condizioni. « La nostra ragione — dice Kant contro Hume — non è, per dir così,

un piano di estensione indeterminata, i cui limiti perciò si conoscano soltanto in generale, ma deve piuttosto paragonarsi a una sfera, il cui raggio si può trovare in base alla curvatura del suolo [arco] alla sua superficie (in base cioè alla natura di proposizioni sintetiche a priori): donde per altro anche il contenuto e i limiti di essa si possono assegnare con sicurezza »¹. Le proposizioni sintetiche a priori danno all'esperienza una forma salda e un limite definito. Non la inchiodano a un certo patrimonio, ma permettono un ampliamento continuo; e tuttavia questo ampliamento non sfuma nell'indeterminato. Per quanto ampiamente l'esperienza possa estendersi a sempre nuovi campi, essa nondimeno è sicura di ritrovare sempre « se stessa » anche in questi ultimi, di ritrovarvi la sua propria struttura e i suoi caratteristici principî costruttivi.

Kant ha creduto di poter delineare per disteso il sistema di questi principî. In tale operazione egli si è fondato per un verso sulla logica classica e per l'altro sulla meccanica classica. Come stabilisce le categorie sul modello della tavola dei giudizi, così egli stabilisce i principî sintetici secondo il modello delle leggi newtoniane del moto: principio d'inerzia, principio della proporzionalità fra la variazione del moto e della forza motrice, principio dell'eguaglianza di azione e reazione. Secondo questo schema di base si compie la costruzione dei « principî metafisici della scienza naturale ». Ogni vera scienza della natura secondo Kant ha bisogno di una parte pura, e nei confronti del metodo è un dovere imprescindibile esporre questa parte separatamente in tutta la sua completezza « per poter definire con esattezza che cosa sia capace di fare la ragione presa per sé stessa e dove la sua capacità cominci ad

¹ *Critica della ragion pura*, 2^a ed. tedesca, p. 790; ed. Cassirer, vol. III, p. 514; trad. it. cit., vol. II, p. 598-599. [Nel testo citato dal Cassirer si legge « curvatura dell'arco » (*Krümmung des Bogens*), non « del suolo » (*Bodens*) come nella traduzione citata — N.d.T.].

aver bisogno del sussidio dei principî empirici »². Oggi-giorno noi vediamo bene che e perché questa « parte pura » non poteva soddisfare il compito che Kant le ha posto. Essa è legata strettamente a una certa forma di conoscenza della natura, che per il razionalismo classico valeva come quella « schiettamente razionale ». Per Kant è fuori dubbio che ogni « razionalità » è chiusa entro un certo ambito che da un lato è determinato dagli assiomi della geometria euclidea e dall'altro dagli assiomi della fisica newtoniana. Se dunque si lasciano cadere queste condizioni assiomatiche, con ciò sembrano risultare impotenti anche tutti i tratti razionali. E tuttavia questa conclusione evidentemente sarebbe valida solo quando la fisica moderna avesse semplicemente tolto di mezzo quei presupposti senza mettere qualcos'altro al loro posto. Ma in realtà un'eliminazione simile non vi è stata affatto. La fisica non ha rinunciato ai « momenti » razionali: li ha solo definiti in modo diverso, e in tale definizione li ha essenzialmente generalizzati con lo svincolarli da legami accidentali. Nell'ampliare e trasformare il proprio apparato concettuale in base al nuovo materiale di fatti e ai nuovi compiti teoretici di fronte a cui si vide posta, la fisica non abbandona la propria struttura generale. Semplicemente ora si chiarisce che quest'ultima non si può pensare come struttura rigida ma mobile; che la sua portata e la sua forza non si fondano su una sua solidità sostanziale data una volta per sempre, ma piuttosto proprio sulla sua plasticità, sulla sua plasmabilità. Lo « a priori » che si può cercare ed a cui soltanto si può tener fermo ancor oggi, deve soddisfare a questa plasmabilità. Esso va inteso in senso puramente metodico; non è fissato al contenuto di un determinato sistema di assiomi ma riguarda il processo in cui l'un sistema vien fuori dall'altro nel progressivo lavoro teoretico. Tale processo ha una sua regola — e questa costituisce la pre-

² *Metaphys. Anfangsgründe der Naturwiss. in Werke*, ed. Cassirer, vol. IV, p. 371.

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 e 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 piú caldo a uno piú 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 piú 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 principî 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 intraprendere 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 principî 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 piú 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 principî 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 improbalissimo 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 principî 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.

ipotesi ausiliari. Il « teorema H » di Boltzmann sembrava destinato a gettare un ponte fra i principi generali della meccanica e il secondo principio della termodinamica perché vi si dimostrava l'irreversibilità di un determinato processo meccanico. Ma per altro verso fu proprio questo teorema ad essere esposto a gravi eccezioni di principio (come quella dell'« inversione » di Loschmidt e quella del « ritorno » di Zermelo). Le speciali impostazioni statistiche da cui Boltzmann era partito nella costruzione della sua teoria, mantennero sempre un certo carattere di precarietà, di non rigorosa dimostrabilità. E le difficoltà interne della teoria risaltarono con particolare chiarezza quando si cercò di estenderla a un nuovo campo, quello dell'irraggiamento. La legge dell'equipartizione dell'energia, che in altro riguardo aveva fatto ottime prove, come ad esempio nella deduzione della legge di Dulong-Petit sul calore atomico, nella teoria del moto browniano, ecc., ora parve naufragare definitivamente⁷. Le difficoltà presentatesi a questo punto si poterono risolvere solo quando nell'anno 1900 Planck enunciò la sua legge dinamica elementare per le oscillazioni di un oscillatore ideale. Con questa legge si poterono eliminare di colpo le contraddizioni con l'esperienza nelle quali era caduto il principio dell'equipartizione dell'energia proprio della meccanica statistica classica; ma la soluzione di tali contraddizioni riuscì solo accogliendo un corpo estraneo nel sistema delle premesse di base con l'assunzione del « quanto d'azione elementare ». Ma prima di affrontare questi inizi della teoria dei quanti dobbiamo prendere in considerazione anche un altro tentativo, significativo nell'aspetto gnoseologico, di chiarire il problema del rapporto fra regolarità dinamica e regolarità statistica. È il tentativo compiuto da Franz Exner nelle *Lezioni sui principi fisici delle scienze naturali* (1917). Per lo sviluppo della

⁷ Qui non mi addentro nei particolari poiché non sono essenziali per il nostro problema generale; per essi rimando alla esposizione riassuntiva di M. VON LAUE nell'articolo *Statistische Physik* cit., p. 96.

successiva meccanica dei quanti egli ha una particolare importanza perché Schrödinger si è riattaccato a lui nella prolusione zurighese del 1922 ed in rapporto a lui ha formulato la propria concezione di fondo⁸.

II

Il secondo principio della termodinamica e le conseguenze connessevi avevano condotto il pensiero scientifico a un'antitesi fondamentale: l'antitesi fra accadere « reversibile » e « irreversibile ». Di fronte ad essa non occorre che la scienza rinunziasse all'esigenza della sua unità metodica, ma neppure poteva più sperare di mantenere questa esigenza nello stesso modo e con gli stessi mezzi usati fin qui. Se l'unità poteva sostenersi, tuttavia quella *u n i f o r m i t à* che regnava nella meccanica classica e che anche l'energetica cercava ancora di salvare e far valere, era perduta una volta per sempre. Quando Planck nella conferenza di Leida del 1908 svolse la sua concezione dell'unità del quadro fisico dell'universo, non mancò di chiarire che in un certo senso l'antitesi fra processi reversibili e irreversibili era insuperabile — che la si poteva erigere a primo criterio di ripartizione di tutti i processi fisici a maggior diritto di ogni altro criterio e che presumibilmente essa avrebbe finito con lo svolgere la parte principale nella fisica del futuro⁹.

Ma quando la conoscenza della natura giunge a siffatte differenze fondamentali nel *c o n t e n u t o* della realtà empirica, le sorge sempre anche un problema generale di *m e t o d o*. Tutto il pensiero scientifico è dominato e guidato

⁸ Il testo di questa prolusione zurighese di Schrödinger è apparso più tardi in « *Naturwissenschaften* », 17 settembre 1929; ora si trova anche in traduzione inglese nella raccolta *Science and the Human Temperament*, London 1935, p. 107 ss.

⁹ *Wege zur physikal. Erkenntnis*, Leipzig 1933, p. 15.

da due tendenze opposte, in continuo conflitto. L'esigenza della « specificazione » contrasta con l'istanza della « omogeneità ». La lotta fra le due non è risolvibile in senso puramente oggettivo, a partire dall'oggetto. Si tratta di una discordia e di una controversia che non appartengono tanto alla natura delle cose quanto piuttosto alla stessa ragione scientifica. In questo senso nella critica kantiana della ragione la « omogeneità » e la « specificazione » non sono introdotte come principi costitutivi della conoscenza di oggetti ma come principi regolativi, come « massime » per l'indagine. Esse sono « principî soggettivi », non ricavati dalla natura dell'oggetto ma dall'« interesse della ragione ». Perciò secondo Kant non può stupire se in uno scienziato prevale l'interesse della molteplicità e in un altro invece l'interesse dell'unità. Fra i due imperativi non sussiste un'opposizione reale: questa può instaurarsi solo se essi, che propriamente sono solo « regole logiche di scuola », si fraintendono come « sentenze di sapienza metafisica ». Nell'effettivo lavoro dell'indagine empirica i due indirizzi non solo sono fra loro conciliabili ma anche l'uno l'indispensabile risorsa dell'altro; non stanno in un rapporto di opposizione ma di complementarità. « Ciò si vede anche nei metodi molto differenti dei naturalisti, alcuni dei quali (che sono sopra tutto speculativi), nemici in certo modo della eterogeneità, mirano sempre all'unità del genere, gli altri (menti sopra tutto empiriche) cercano incessantemente di suddividere la natura in una molteplicità così svariata, che si dovrebbe quasi smettere la speranza di giudicare i fenomeni di essa secondo principî universali »¹⁰.

In base a questa divisione si vede che il tentativo di Exner di riformulare il concetto di « legge di natura » implica in sé un momento « speculativo » o, meglio, puramente metodologico. Egli non si fondò su nuovi fatti empi-

¹⁰ *Critica della ragion pura*, 2ª ed. tedesca, p. 682 ss. (ed. Cassirer, vol. III, p. 448; trad. it. cit., vol. II, pp. 524-525). Cfr. *Critica del giudizio*, introduzione, V (ed. Cassirer, vol. V, p. 251; trad. it. Gargiulo, Bari 1923², p. 19).

rici e nelle condizioni in cui versava allora l'indagine ben difficilmente avrebbe potuto trovare una fondazione bastante nel patrimonio effettivo del sapere. Quanto guidava Exner era soprattutto quell'« interesse della ragione » che si crucciava del dualismo irrevocabile fra leggi « dinamiche » e leggi « statistiche ». Dove si fosse rimasti fermi alle considerazioni esposte fin qui, dove si fossero concepite le leggi dinamiche come gli autentici e indispensabili fondamenti di ogni vera conoscenza della natura, non pareva offrirsi alcuna via d'uscita da questo dualismo. Infatti l'idea di concepire le leggi statistiche come solo provvisorie e sostituirle in futuro con leggi dinamiche, appariva inattuabile: la teoria aveva insegnato che per tutti i fenomeni rientranti nel « secondo principio », per tutti i processi irreversibili le impostazioni statistiche erano indispensabili. Se dunque si doveva ristabilire l'unità, ciò poteva avvenire solo per la via inversa: le leggi statistiche andavano considerate il genere comprensivo sopra ordinante e alle leggi dinamiche, il genere che le include come casi speciali. La tesi di questo sovraordinamento è quella che Exner sostiene e giustifica in modo nuovo e originale. Dobbiamo seguire le sue deduzioni nei particolari, perché esse toccano dovunque il vero e proprio problema di fondo della critica gnoseologica e hanno una importanza essenziale per la chiarificazione di esso.

Exner non nega la validità di leggi di natura « universali » in senso stretto, ma la dichiara problematica. Sappiamo che le leggi della teoria cinetica dei gas non hanno una validità assolutamente esatta ma solo statistica; sappiamo che esse ci danno solo valori medi partendo da un gran numero di osservazioni. Ma le cose stanno forse diversamente nelle altre leggi, nelle leggi della fisica classica? La formula avanzata da Galilei per la caduta dei gravi vale davvero « sempre e dovunque »? E come potremmo decidere in proposito quando la nostra esperienza si estende sempre solo alla media di un fenomeno durante un lungo tratto di tempo? Forse dunque l'accelerazione non è real-

mente costante come assumeva Galilei. In ogni caso possiamo supporre che essa oscilli molto rapidamente intorno a un valore medio, e di conseguenze in tempi brevissimi il moto di caduta del grave non sia uniformemente ma irregolarmente accelerato. In tal caso nella caduta il grave si muoverebbe a scosse, e non in linea retta ma a zig-zag. Dove sinora credevamo di conoscere leggi di natura e validità assoluta, forse abbiamo sempre a che fare solo con leggi di media, che per tempi e spazi brevi perdono la loro validità. In ogni caso qui l'affermazione dommatica non è meno infondata della negazione dommatica: se non vogliamo infliggere all'indagine dei ceppi arbitrari, dobbiamo lasciare aperta la questione. Resta bensì vero che l'indagine non può fare a meno di tali assunti ipotetici, come quelli riguardanti la causalità o le forze; anzi, noi dobbiamo i maggiori progressi e le più belle scoperte alla loro scelta felice; « ma non per questo è lecito dimenticare la loro provenienza e far di essi una parte della natura »¹¹.

Neppure noi vogliamo fare delle leggi dinamiche una « parte della natura » — infatti la questione della legalità non va riferita direttamente alle cose e ai processi della natura, come si è dovuto porre ripetutamente in risalto, ma alla conoscenza della natura. E che cosa vuol dire il problema di Exner, se lo intendiamo unicamente in quest'ultimo senso? Devesi forse contestare alla conoscenza il diritto e la possibilità di avanzare in via ipotetica leggi universali e rigorose, di trarre determinate conclusioni da tale assunzione e poi sottoporne i risultati alla prova dell'esperimento? Di fatto questa fu l'unica via per cui Galilei, e con lui tutta la fisica classica, credettero di poter giungere a leggi rigorose e di mostrarne la verità empirica. Si è già ribadito più sopra che Galilei ha ignorato una « induzione » nel senso di Mill, che egli ha respinto esplicitamente l'argomentazione da molte osservazioni a tutte

¹¹ EXNER, *Vorlesungen über die physikalischen Grundlagen der Naturwissenschaften*, Wien 1919, lezioni 86 e 87, p. 647 ss.

le osservazioni (cfr. qui sopra, p. 64 ss.). E per quanto concerne il dubbio che qui Exner fa valere, Galilei in un certo senso ha previsto anche questo. Ma egli cerca di superarlo spiegando come le proprie dimostrazioni come tali non perderebbero affatto il loro significato quando risultasse che in natura i gravi non cadono con accelerazione strettamente uniforme; tali dimostrazioni infatti implicano solo un'affermazione ipotetica, non assertoria¹². Ne viene che per le sue leggi Galilei rivendica la « esattezza » incondizionata solo in quanto si tratta di impostazioni ipoteticamente esatte; ma non nel senso che debba trattarsi della descrizione collettiva di « tutti » i casi singoli, di tutti gli enunciati individuali intorno a un « qui e ora ». Ciò si potrebbe esprimere in forma quasi paradossale dicendo che le equazioni di Galilei non pretendono di essere vere per la ragione che valgano sempre e dovunque, né perché questo « sempre » e « dovunque » fosse mai stato provato da lui sperimentalmente — ma perché a rigore esse non valgono mai. Esse riguardano « casi ideali », non casi dati immediatamente, empiricamente effettuati. E tutte le leggi che la fisica classica ha posto secondo il modello galileiano, sono della stessa specie. Questo dato di fatto storico e fenomenologico è stato riconosciuto a pieno persino da Mach, sebbene la sua propria gnoseologia in fondo non avesse nessun mezzo per giustificarlo. « Tutti

Galilei a P. de Carcavy, in *Opere*, ed. Albèri, vol. VII, p. 156 ss.: « Io argomento *ex suppositione*, figurandomi un moto verso un punto il quale partendosi dalla quiete vada accelerandosi, crescendo la sua velocità con la medesima proporzione con la quale cresce il tempo: e di questo tal moto io dimostro concludentemente molti accidenti. Soggiungo poi, che se l'esperienza mostrasse, che tali accidenti si trovassero verificarsi nel moto dei gravi naturalmente descendenti, potremmo senza errore affermare questo esser il moto medesimo, che da me fu definito e supposto: quando che no, le mie dimostrazioni fabbricate sopra la mia supposizione, niente perderanno della sua forza e concludenza; siccome niente pregiudica alle conclusioni demonstrate da Archimede circa la spirale, il non ritrovarsi in natura mobile che in quella maniera spiralmemente si muova ».

i concetti e le leggi generali della fisica — egli dice — il concetto di raggio luminoso, le leggi diottriche, la legge di Mariotte ecc., si ottengono per idealizzazione. Essi vi assumono quella forma semplice ... che rende possibile ricostruire, cioè intendere un qualsiasi fatto, anche complicato, per combinazione sintetica di questi concetti e leggi »¹³. Certo nella prospettiva di Mach questa ammissione suona, in qualche misura, problematica. Se infatti per lui la regola di deduzione, la formula, la legge « non ha in nulla piú valore materiale dei singoli fatti riuniti »¹⁴, è difficile comprendere come nel porre questa regola ci sia lecito non badare neppure a un solo caso singolo, come ci sia lecito procedere a « idealizzazioni », che alla fine dovrebbero pur sempre apparire violenze inflitte ai fatti reali. Per Galilei invece questo problema non presenta nessuna difficoltà: perché egli ricavava il « caso singolo » solo da una « sovrapposizione » di leggi universali, da quello che chiamava il « metodo risolutivo e compositivo ». Per lui allora il particolare non è dato fin dall'inizio come punto isolato ma è determinabile sempre solo come punto di intersezione di relazioni universali. Le equazioni galileiane della caduta non vogliono essere un enunciato intorno alla caduta « reale » dei gravi, poiché non vi si tiene conto della resistenza dell'aria, che nella determinazione della caduta reale è un momento indispensabile. Ma in ciò Galilei non scorge alcun difetto delle proprie enunciazioni; ci vede solo l'invito a fare un passo avanti nella determinazione ed a rappresentare il fattore « resistenza dell'aria » con nuove regole, che da capo devono essere regole esatte. Inoltre egli si rende conto che intorno al diritto di tutto questo processo, intorno alla possibilità di determinare progressivamente il particolare mediante l'universale, alla fine può decidere solo l'esperienza. Ma la prova empirica che egli cerca e riconosce come obbli-

¹³ *Erkenntnis und Irrtum* cit., p. 189.

¹⁴ Cfr. sopra, p. 105.

gatoria, non è quella che Exner presuppone nella sua esposizione e nella sua critica. Quando Exner dichiara (p. 651) che Galilei avrebbe stabilito le leggi della caduta in via puramente induttiva sol che ciò fosse stato possibile al suo tempo per via sperimentale, mentre Newton, forte dell'indagine induttiva di Galilei, avrebbe posto alla base dei fenomeni di caduta la sua teoria della gravitazione a titolo di ipotesi, la cosa non risponde a verità. Piuttosto, il rapporto fra « ipotetico » e « fattuale », fra « deduttivo » e « induttivo » in Galilei è esattamente lo stesso che in Newton. Newton ha ampliato straordinariamente la sfera di applicazione delle leggi di caduta galileiane includendovi fenomeni affatto nuovi quali il moto della luna, il fenomeno delle maree e così via. Ma la metodica dell'indagine galileiana qui non aveva bisogno di subire nessuna variazione. Essa è già stabilita nei primi esperimenti decisivi di Galilei. Questi esperimenti, le osservazioni sul piano inclinato, servivano alla verifica delle leggi galileiane, non alla loro scoperta, che aveva seguito tutt'altra strada. Essi appartengono al processo della *verificazione*, che va nettamente distinto dalla forma consueta dell'induzione o *inductio per enumerationem simplicem*.

Si potrebbe nondimeno obiettare che tutte queste considerazioni d'ordine storico non toccano il nocciolo del problema sollevato da Exner. La sua non era propriamente una questione di natura storica bensì esclusivamente sistematica. Ammesso che la fisica classica ha ottenuto per la sua via, la via della « deduzione ipotetica », i massimi successi: dobbiamo noi per questo attenerci per sempre a questa via d'indagine? O non è forse opportuno rammentarsi che in ogni caso sono possibili e praticabili altre vie — che un giorno la fisica potrebbe vedersi costretta a compiere il passo definitivo dalle leggi « dinamiche » a quelle « statistiche »? Neppure Exner, come abbiamo visto, intende negare in alcun modo la fecondità della metodica classica; quanto egli mette in dubbio e contesta è unicamente la

validità definitiva di essa. E qui in ogni caso si deve convenire che tale validità definitiva non può essere garantita da considerazioni speculative « a priori ». Se in un qualsiasi campo della fisica emergono nuovi fatti dai quali si dimostri e si renda probabile l'impossibilità di rappresentarli con sufficiente chiarezza concettuale sulla via fin qui seguita dalla « sovrapposizione » di rigorose leggi dinamiche, qui allora senza dubbio si imporrebbe un nuovo problema che alla gnoseologia non sarebbe lecito mettere da parte ma con cui essa dovrebbe fare i conti seriamente. Più oltre dovremo domandarci se questa premessa sussista veramente — se i problemi della nuova fisica atomica non costringano a un cambiamento della via d'indagine seguita fin qui e a un qualche distacco da essa. Ma nelle sue deduzioni Exner non si appella a considerazioni empiriche di tal sorta. La sua formulazione del problema, come abbiamo visto, è nata da riflessioni d'altro genere, puramente metodologiche. Essa provenne dal desiderio di ridurre di nuovo le leggi di natura ad « un » solo denominatore e di eliminare il dualismo fra leggi dinamiche e leggi statistiche. Ma è chiaro che questo « interesse della ragione », in sé legittimo, non ha alcuna forza di prova empirica definitiva. Se e in qual senso esso vada soddisfatto, si può decidere piuttosto sempre solo in base alla situazione in cui l'indagine viene a trovarsi di volta in volta. E qui all'esigenza della omogeneità si affianca con pari diritto quella della varietà: la « regola logica di scuola » per cui *entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem* è integrata e quasi tenuta in scacco dall'altra, parimenti legittima: *entium varietates non temere esse minuendas*¹⁵. Se dunque dovesse risultare che nel passaggio dai problemi della « macrofisica » a quelli della « microfisica » non si può mantenere la conformità fin qui realizzata nella formulazione delle leggi di natura, allora dovremmo senza dubbio tener conto di tale circostanza. Ma ciò ancora non signi-

¹⁵ *Critica della ragion pura*; cfr. sopra, p. 122 e n. 10.

ficherebbe affatto una rinunzia al concetto « classico » di legge come tale, bensì solo una piú aderente definizione logica, non una « abrogazione » ma una « specificazione ». Le considerazioni di Exner sono importanti e notevoli perché anticipano certi problemi che piú tardi nello sviluppo della meccanica quantistica sono divenuti particolarmente chiari e urgenti; ma la sua forma di argomentazione non basta per prendere una risoluzione sicura intorno a questi problemi. Il « fatto » della fisica classica non si può eliminare né smuovere adducendo mere possibilità. Tale fatto è tutta una prova continua della capacità che ha la conoscenza fisica di pervenire a una comprensione sempre piú completa del particolare, anzi del caso singolo, con l'enunciazione di leggi rigorose, valide sulle prime solo in via ipotetica. Che tale sviluppo non procede in modo costantemente omogeneo, che vi si danno arresti e regressi, è evidente. Ma dal punto di vista della fisica classica questi arresti per l'indagine non sono un ostacolo bensì rappresentano piuttosto uno stimolo importante e indispensabile. Là dove l'esigenza di determinare il particolare mediante l'universale sembra farsi problematica, dove la sussunzione del dato fattuale sotto la regola ipotetica non riesce subito, interviene sempre una nuova costruzione concettuale destinata ad annullare il conflitto. La lacuna apparente si chiude, e ogni chiusura siffatta significa un nuovo passo nella discesa al particolare [*Besonderung*] delle leggi di natura. Così ad esempio nella teoria dello stato dei gas si compie il progresso dalla legge di Boyle-Mariotte $pV = \text{cost}$ alla legge di Gay-Lussac $pV = RT$ e infine all'equazione di stato di Van der Waals $(p + \frac{a^2}{V^2})(V - b) = RT$. Quest'ultima con le due costanti a e b aggiunge due nuovi elementi di determinazione con cui differenziare il comportamento dei gas « reali » da quello dei gas « ideali ». E allo stesso modo, quando studiamo il comportamento del gas in presenza di forze elettriche o magnetiche, dobbiamo introdurre nuove « costanti individuali » come la costante dielettrica

epsilon e simili; e ciascuna di queste nuove costanti introdotte ci offre una nuova « approssimazione » alla realtà effettuale. Nel quadro della elaborazione concettuale e della conoscenza fisica un altro « piú diretto » rilevamento della realtà non è possibile. Con tutto ciò si vede chiaramente che la cosa dipende da un progressivo incremento dei mezzi concettuali, non da un semplice accumulare l'osservazione e gli esperimenti. Se la fisica ripete determinate serie sperimentali, proprio questa ripetizione serve allo scopo dell'incremento. L'esperimento va depurato da tutte le circostanze concomitanti « accidentali » che dapprima possono essersi immischiate con azioni di disturbo, e ripulito da possibili sbagli nella sperimentazione. Una volta assolto questo compito, si giunge al punto in cui per lo scienziato « un caso ne vale mille »; ora egli è in grado di passare senza esitazioni dall'individualità degli enunciati di misura all'universalità degli enunciati di legge.

Di fronte a questo procedimento perde il suo buon diritto la domanda di Exner se noi possiamo mai essere del tutto sicuri che l'accadere « reale » della natura corrisponda a quello che presupponiamo e fissiamo nelle nostre leggi universali. Contro la concezione di Planck per cui solo la legalità strettamente dinamica appagherebbe a pieno le nostre richieste di conoscenza, mentre ogni legge statistica in fondo sarebbe insoddisfacente perché porrebbe una risposta imprecisa al posto di una precisa, Exner obietta che « la natura non domanda affatto se l'uomo la intenda oppure no; né abbiamo da costruire una natura adeguata alla nostra intelligenza bensí unicamente da attenerci a quella data » (p. 697). Ma il problema gnoseologico è appunto entro quali limiti ci sia data in generale una natura e che cosa si debba intendere per questo darsi. Natura ha da significare un ordinamento « oggettivo » dei fenomeni e come tale l'intende e la presuppone anche Exner. Egli accentua che questa prospettiva resta pienamente valida anche quando passiamo dalla regolarità « assoluta » a quella statistica. Infatti nemmeno il concetto di probabi-

lità si potrebbe interpretare in senso puramente soggettivo. Una probabilità che fosse unicamente l'espressione di un fenomeno psicologico, della misura della nostra « aspettazione soggettiva », per la scienza della natura non sarebbe né utile né feconda. « La conferma positiva dei risultati del calcolo delle probabilità con la esperienza prova che il caso è qualcosa di affatto indipendente dall'uomo e dal suo sapere, che esso dev'essere qualcosa di dato oggettivamente nella natura. Altrimenti non sarebbe possibile che... dall'assunto del caso fossero deducibili leggi fisiche » (p. 667). Ma con ciò il problema ritorna fuori — con quale diritto infatti affermiamo che nella natura non regna un perfetto caos ma una certa conformità a regole esprimenti in leggi oggettivamente statistiche? Di tale affermazione non si potrà mai addurre una « prova », una volta che si sia posta senz'altro la natura come un essere assoluto che non domanda se venga inteso o non inteso. Se non ci si risolve a compiere la « rivoluzione copernicana » in tutto rigore, ci si avvolge per l'appunto sempre di nuovo in antinomie e pseudoproblemi. Certo, la natura non domanda — infatti la funzione del domandare spetta alla conoscenza. E la conoscenza domanda se e in quale misura sia possibile rintracciare nei fenomeni un ordinamento e una precisione oggettivi: e tutti i suoi concetti singoli sono solo espressioni parziali di questo problema unitario di fondo. Se risulta che col muovere da premesse universali ipotetiche l'indagine fisica sa allacciarle fra loro così da ottenerne una conoscenza sempre più compiuta dei fenomeni particolari, allora in ciò possediamo quanto possiamo esigere e cercare come stretta legalità dinamica in generale. Se dunque di fatto — come Exner assume e presuppone — tutte le misurazioni e tutte le prove sperimentali che possiamo intraprendere entro i limiti a noi fissati nell'ambito della macrofisica, fruttano la rigorosa esattezza delle equazioni galileiane, resta privo di fondamento l'assunto che possa essere altrimenti in quei campi in cui non penetra più nessuna osservazione. Naturalmente dal

punto di vista logico un assunto del genere resta possibile, ma in quanto non lo si può sostenere con determinate ragioni empiriche, resterebbe al tempo stesso anche vuoto. Exner non ha dedotto tali ragioni perché per lui si trattava solo di dimostrare la legittimità relativa della considerazione statistica. Ma un'occasione effettiva di adottare questo tipo di considerazione si presenta solo quando abbiamo a che fare con fenomeni che abbiano la natura di una collettività. Tale occasione sussisteva nella teoria cinetica dei gas dove, secondo le premesse atomistiche, si tratta veramente di fenomeni di massa che non è né possibile, né necessario per la determinazione delle leggi cercate, seguire nei singoli particolari. Ma con ciò non si può motivare la pretesa di estendere tale considerazione a tutta la natura e a tutti i problemi del macrocosmo. In realtà nel quadro della natura tracciato da Exner la statistica conduce per altro solo una specie di esistenza umbratile. Che di gran lunga nella massima parte dei campi le impostazioni « dinamiche » si sono confermate valide e ad esse noi dobbiamo i più rilevanti progressi compiuti nella conoscenza della natura, non è contestato; si afferma solo che da ciò non consegue la necessità di tali impostazioni, e che noi dobbiamo sempre fare i conti con la possibilità che dietro la causalità stretta vi sia solo una regolarità statistica. Con il che la statistica resta ancora, in un certo modo, nello sfondo; somiglia, per dir così, agli dei di Epicuro che non abitano nel mondo stesso ma dimorano negli *intermundia* [*metakósmia*], negli spazi vuoti fra i mondi. Exner accentua che l'apparenza della regolarità esatta forse si dissolverebbe se invece di misurare per secondi risalissimo a tempi da contare in milionesimi di milionesimi di secondo o anche meno (p. 657). Ma poiché un simile incremento dei mezzi d'osservazione ci è negato, considerata e valutata empiricamente la questione si chiude con un *non liquet*: essa ci addita determinate possibilità della problematica fisica senza volerne anticipare una risposta precisa in senso positivo o negativo.

CAPITOLO II

IL CARATTERE LOGICO DEGLI ENUNCIATI STATISTICI

Dalle considerazioni che si connettono col secondo principio della termodinamica, il quadro fisico dell'universo subisce una trasformazione importante non solo nel settore materiale ma anche in quello formale. La differenza tra processi reversibili e processi irreversibili non riguarda solo l'accadere come tale; essa indica al tempo stesso la rappresentazione concettuale di questo accadere deve ricorrere a due diverse forme fondamentali di leggi. In tutti i processi legati al secondo principio si vede la necessità di passare a una forma di enunciati uguale al sistema della meccanica classica. È decisamente innegabile che questo passaggio, questo riconoscimento della statistica come fattore parimenti legittimo e indispensabile della conoscenza della natura implica non solo un problema fisico ma anche un problema gnoseologico molto profondo. Ma per lo studio e l'approfondimento ulteriore di questo problema si dimostrò un ostacolo pregiudizievole il fatto che l'essere enunciato per lo più in una forma inadeguata rispetto al suo vero contenuto. Con la statistica si accolse nella conoscenza della natura una nuova modalità e un nuovo strumento di determinazione: uno strumento che si dimostrò utile e altamente fecondo anche là dove fallirono i metodi « classici » fin qui usati. Ma invece di intendere questo nuovo mezzo nella sua portata, invece di valutare nella sua natura logica e assegnargli il suo posto nel tutto sistematico della determinazione fisica,

si preferì la via inversa. Leggi dinamiche e leggi statistiche non si affiancarono come due modalità, due direzioni, due modi della determinazione; piuttosto si contrapposero come il « determinato » e lo « indeterminato ». Così i nuovi problemi a cui conducevano il secondo principio e lo sviluppo della teoria dei quanti, furono trattati sotto il titolo di « indeterminismo » — un titolo che contiene in sé gli equivoci più pericolosi. Parve schiudervisi un *liberum arbitrium indifferentiae*: una « libertà » che a stento si poteva ancora differenziare dall'arbitrio.

Conseguenze simili sono affrontabili solo con una analisi del *sensu nudo* e crudo che la fisica annette ai propri enunciati di probabilità. Certo qui la gnoseologia si muove su un terreno difficile e malfido. La definizione del concetto di probabilità quale venne data nella teoria « classica » di Laplace e quale è passata in quasi tutti i trattati del calcolo delle probabilità, ora certamente in genere si riconosce insufficiente. La spiegazione della probabilità cosiddetta « a priori » col quoziente del numero dei casi favorevoli per il numero dei « casi equipossibili » sfocia in un circolo; l'espressione « equipossibile » alla fine non vuol dire altro che « equiprobabile »¹. A questo punto si deve dunque tentare una nuova fondazione, che per il momento non sembra ancora giunta a una conclusione del tutto soddisfacente. Comunque da questo sviluppo emergono con sempre maggiore chiarezza e distinzione certi tratti fondamentali con cui delimitare nettamente il carattere degli enunciati probabilistici della scienza e ricondurlo a condizioni precise. In genere si può dire che in senso gnoseologico il concetto di probabilità non è mai in grado di supplire o di soppiantare quello di « verità oggettiva », perché è fondato su quest'ultimo e lo implica in sé come momento integrante. Si è posto ripetutamente in rilievo che ogni probabilità

¹ Per la critica della definizione « classica » della probabilità cfr. specialmente R. VON MISES, *Wahrrscheinlichkeit, Statistik und Wahrheit*, Wien 1928, p. 61 ss.

è una funzione logica di certe verità e sussiste solo in rapporto ad esse. « Parlare della probabilità di un evento senza nominare la condizione — dice ad esempio C. S. Peirce in un breve saggio intorno a *Chance and Logic* — in realtà non ha alcun significato »². A questa premessa si attiene per intero anche il tentativo più rigoroso e coerente di fondare una teoria puramente « soggettiva » della probabilità quale è stato intrapreso in epoca più recente da Keynes nel *Treatise on Probability*. Keynes definisce la probabilità una « credenza razionale » [*rational belief*] e concepisce il suo valore numerico come la misura di una certa « aspettazione razionale » [*rational expectation*]. Ma già l'aggettivo « razionale » qui deve escludere ogni confusione con un arbitrio puramente soggettivo.

La probabilità — ribadisce Keynes — si può chiamare soggettiva, ma nel senso che conta per la logica, non lo è. Essa non è affatto soggetta a capricci umani. Una proposizione non è probabile per il fatto che noi la riteniamo tale. Una volta dati i fatti che determinano la nostra conoscenza, quello che nella prospettiva di questi fatti è probabile o improbabile è fissato oggettivamente ed è indipendente dalla nostra opinione. La teoria della probabilità è una teoria logica, perché ha a che fare col grado di credenza che ci è lecito mantenere razionalmente in certe condizioni date, ma non con le credenze effettive di particolari individui. Se concludiamo che Darwin adduce ragioni valide per farci accettare la sua teoria della selezione naturale, con ciò non vogliamo dire semplicemente che sentiamo una propensione psicologica a trovarci d'accordo con lui... Crediamo che intercorra un rapporto reale oggettivo fra le testimonianze empiriche su cui Darwin si fonda, e le sue conclusioni: un rapporto del tutto indipendente dal puro e semplice fatto del nostro credere, e tanto reale e oggettivo (benché in un grado diverso) quanto lo sarebbe nel caso

² Citato da E. KAILA, *Die Prinzipien der Wahrscheinlichkeitslogik* «Annales Univers. Fennicae Aboensis», Turku 1926, p. 32 ss [La citazione, in inglese nel testo, è rintracciabile direttamente nell'edizione italiana: C. S. PEIRCE, *Caso, amore e logica*, a cura di N. e M. Abbagnano, Torino 1956, p. 49. — N.d.T.].

che le argomentazioni di Darwin avessero la rigida forza probante di un sillogismo³.

Pertanto non possiamo mai definire la « probabilità » altrimenti che riferendola a un determinato insieme di proposizioni, alle quali attribuiamo valore di verità. Senza l'indicazione di un siffatto sistema « oggettivo » di riferimento l'enunciato probabilistico perde il suo senso; la proposizione « *a* è probabile » in sé è altrettanto poco intelligibile, come pone in evidenza Keynes, quanto la proposizione « *a* è uguale » ovvero « *a* è maggiore » senza indicare il punto di riferimento per cui essa debba valere. Con questo accenno si respinge anche quella esplicazione e fondazione puramente negativa delle proposizioni probabilistiche, che si avvale del cosiddetto « principio di ragione insufficiente » — una concezione che conduce ad esempio alla conseguenza che se *A* e *C* sono due oggetti a noi completamente ignoti, la probabilità che *A* sia identico a *C* è esattamente eguale alla probabilità opposta, cioè numericamente = 1/2. Si dovrebbero allora qualificare « equipossibili » casi in rapporto ai quali ci troviamo nello stesso non sapere; e questa equazione a stretto rigore vale quando e solo quando assolutamente non sappiamo per nulla quale dei casi discernibili avrà luogo⁴. Contro questo principio di « ragione insufficiente » ovvero della « ignoranza assoluta », come anche è stato chiamato, riesce decisivo notare che, con le parole di Leslie Ellis, un puro non sapere non costituirà mai il fondamento di alcuna conclusione qual si sia: *ex nihilo nihil*⁵.

Ma per intendere il carattere degli enunciati probabilisti-

³ KEYNES, *A Treatise on Probability*, London 1921, p. 4 ss.

⁴ Nella letteratura più recente questa concezione è stata sostenuta da K. STUMPF, cfr. la sua dissertazione *Über den Begriff der mathematischen Wahrscheinlichkeit* in « Sitzungsber. der K. Bayer. Akad. der Wissensch. », Philos.-histor. Klasse, 1892.

⁵ ELLIS, *On the Foundations of the Theory of Probabilities*, 1842 (citato da Keynes, op. cit., p. 85). Per la critica del « principio di ragione insufficiente » cfr. in particolare VON KRIES, *Die Prinzipien der Wahrscheinlichkeitsrechnung*, Freiburg i. B. 1886, e *Logik*, Tübingen 1916, p. 595 ss.

ci della fisica, dobbiamo fare ancora un passo avanti. Interpretare tali enunciati nel senso soggettivo qui non basta — neppure se si restringe questa soggettività alla condizione aggiuntiva della razionalità. La questione non si può mai rivolgere solo alla nostra aspettazione dell'accadere: deve essere rivolta a questo stesso accadere. La probabilità fisica di un evento, come è stato detto, può « dipendere sempre solo dalle condizioni che agiscono sul suo aver luogo, non dal grado del nostro sapere »⁶. L'applicazione delle proposizioni probabilistiche all'accadere empirico si può dunque rendere intelligibile sempre solo passando a un'interpretazione oggettiva: solo quest'ultima infatti è in grado di appurare la questione del *quid juris* di tali proposizioni, la questione della loro validità per gli oggetti dell'esperienza⁷. Perciò nella scienza della natura le tecniche « soggettivistiche » della probabilità sono state respinte sempre più a fondo — e al loro posto è subentrato un tentativo di interpretare proposizioni probabilistiche oggettivamente come enunciati sulla frequenza relativa di determinati eventi all'interno di una successione

⁶ SMOLUCHOWSKI, *Über den Begriff des Zufalls und den Sprung der Wahrscheinlichkeitsgesetze in der Physik* in « *Naturwissenschaften* », IV, 1918, p. 253 ss.

⁷ Appunto per questa ragione non mi sembra possibile vedere negli enunciati statistici opinioni puramente soggettive « riflesive » intorno all'oggetto invece di giudizi che riguardano oggetti o stati di cose. Così ad esempio Fritz Medicus, nello scritto *Die Freiheit des Willens und ihre Grenzen* (1919) in cui si compie il tentativo di accertare « quale significato si attribuisce alla fisica dell'epoca più recente per la concezione filosofica dell'idea di libertà », dichiara che i pensamenti statistici sono solo « testi di una riflessione soggettiva ». « La statistica tratta tutto il suo oggetto benché come oggetto non afferri nulla. In essa non dà nessuna conoscenza di realtà effettuale: le leggi statistiche restano sempre rinchiusi nel recinto dell'astratto, di cui è posto dalla sola riflessione. I giudizi statistici non valgono "oggettivamente", non riguardano una realtà oggettiva ma una creazione prodotta da operazioni mentali » (vedi op. cit., p. 105 ss.). Se questa conclusione fosse giusta, a mio avviso resterebbe privo di fondamento ogni uso scientifico della statistica: quest'ultimo infatti deve sempre rivendicare una « validità oggettiva » per i propri enunciati.

di eventi. È innegabile che con ciò la natura del problema si aggrava e si complica, in senso gnoseologico, e noi siamo condotti a tutte le spinose questioni intorno alla possibilità di risolvere le proposizioni e i principî probabilistici⁸. Ma a questa complicazione non possiamo sottrarci: essa piuttosto ci occorre per caratterizzare e garantire l'uso degli enunciati probabilistici nella fisica. Finché ci teniamo nel puro calcolo delle probabilità, tutti questi problemi non si presentano. Infatti nella sua struttura logica tale calcolo non differisce essenzialmente dalle altre discipline matematiche. Il calcolo delle probabilità è stato fondato nel secolo XVII come un ramo della matematica pura, ovvero, per usare la espressione di G. Cantor, come un ramo della matematica « libera ». Se a poco a poco gli vennero assegnati tanti e tanto disparati campi di oggetti, per altro non poteva esservi alcun dubbio sul fatto che tale particolarità degli oggetti non annullasse il carattere metodico unitario del calcolo stesso. Leibniz è il primo pensatore a dare netto rilievo a tale carattere metodico, il quale richiede una rigorosa analisi degli enunciati di probabilità, che secondo lui avrebbe arricchito la logica di un nuovo ramo. Egli accentua che questa logica ha regole e principî suoi propri e deve avere anche un suo simbolismo e un suo schema di calcolo particolari. Questi concetti fondamentali in Leibniz risalgono ai suoi primi progetti scientifici e logici, che lo conducono al problema dell'arte combinatoria. Ciò che conferisce alla combinatoria la sua fondamentale portata filosofica, secondo Leibniz è la circostanza che essa si regge unicamente su un solo concetto di base, il concetto di ordine, e che proprio su questo concetto si fonda tutto il nostro sapere — sia il sapere dell'« ideale » sia quello del « reale », sia il sapere del « necessario » sia quello del « contingente ». Perciò lo stesso Leibniz nel primo impianto delle regole

⁸ Cfr. in proposito REICHENBACH, *Kausalität und Wahrscheinlichkeit* in « Erkenntnis », I, 1930-31, p. 158 ss.

fondamentali della combinatoria accenna subito a certi problemi di fisica al servizio dei quali queste regole un giorno potrebbero essere poste⁹. Ma nonostante le applicazioni affatto disparate di cui il calcolo delle probabilità è suscettibile — applicazioni che già nel secolo XVII si riferiscono sia al problema dei giochi d'azzardo sia a questioni della statistica sulla popolazione, delle rendite vitalizie e così via — il suo senso unitario resta immutato. Il calcolo delle probabilità è una disciplina puramente matematica in quanto da determinati punti di partenza ipotetici inferisce oltre secondo regole rigorose — regole che portano a risultati altrettanto sicuri quanto nelle altre parti della matematica. Il suo compito consiste nel calcolare, da probabilità date entro certe collettività di partenza, la probabilità all'interno di una collettività derivata da quelle — compito che nella sostanza si può ridurre a quattro operazioni fondamentali designabili come selezione, mescolanza, ripartizione e correlazione di collettività statistiche¹⁰.

Poi il progresso agli enunciati probabilistici empirici pone, è vero, di fronte a nuovi e difficili problemi gnoseologici. Ma questi problemi sono del tutto analoghi a quelli emergenti in ogni applicazione di concetti esatti alla realtà empirica. Di conseguenza essi non costringono affatto, per quel che vedo, alla scappatoia proposta da alcuni studiosi: alla costruzione di una logica speciale della probabilità, che si emancipi dai principî e dai postulati della « logica classica » e in cui, ad esempio, non sarebbe più valido il principio che ogni enunciato dev'essere vero o falso. A un ripiego tanto disperato non vi è bisogno di ricorrere finché resta aperta una qualunque altra via.

⁹ Suona quasi una predizione della teoria cinetica dei gas e della fisica statistica il passo del *De arte combinatoria* (1666) dove Leibniz, ventenne, scrive: « Istis complicationibus non solum infinitis novis theorematibus locupletari geometria potest; ...sed et (si quidem verum est grandia ex parvis, sive haec atomos, sive moleculas voces, componi) unica ista via est in arcana naturae penetrandi » (*Opera philosophica*, ed. J. E. Erdmann, p. 19).

¹⁰ Cfr. a questo proposito VON MISES, op. cit., p. 30 ss.

Fra i piú recenti teorici della probabilità R. von Mises mi sembra abbia dato la soluzione piú semplice e piú coerente. Von Mises fonda la sua teoria sul concetto di collettività [*Kollektiv*] che egli definisce con ben precisi postulati assiomatici. Simili « definizioni sintetiche » sono indispensabili, come egli rileva, ogni qual volta si voglia costruire una teoria scientifica. In tali costruzioni non possiamo restringerci in nessun caso alla sfera dell'immediatamente dato o prendere i nostri concetti semplicemente dall'uso linguistico indefinito della vita quotidiana. Dobbiamo piuttosto introdurre una delimitazione esatta, una strutturazione fissa e insieme una « razionalizzazione », che è la sola a indicare la via a ogni uso del concetto e ad ogni applicazione di questo a casi particolari. In estensione generale von Mises definisce il concetto di collettività con due postulati: il postulato che sussista un « valore limite della frequenza relativa » e il cosiddetto « postulato dell'assenza di regolarità » ovvero il « principio d'esclusione di comportamento sistematico ». Senza affrontare per il momento il contenuto di questi due postulati, ne prendiamo ora in considerazione solo il carattere metodico generale. Quando von Mises interpreta la collettività come un fenomeno di massa o come un processo a ripetizione [*Wiederholungsvorgang*], in breve come una successione ampiamente reiterata di osservazioni singole, in cui pare legittimo supporre che la frequenza relativa della comparsa di ogni singola caratteristica osservabile tenda a un determinato valore limite, egli rileva che una collettività siffatta non è un oggetto empirico ma un concetto idealizzato quasi come quello di sfera nella geometria o quello di corpo rigido nella meccanica. Ma una teoria razionale, egli dice, si può costruire sempre solo sulla base di siffatte elaborazioni concettuali idealizzanti, così come esse sono indispensabili specialmente per ogni scienza esatta della natura. Con questa netta formulazione del concetto di partenza si previene anche la confusione che insorge sempre di nuovo dal prendere l'accertamento statistico per un accertamento

« inesatto ». Come tale una collettività non comporta alcuna sorta di inesattezza; essa consta piuttosto di una serie di osservazioni di per sé esatte. In ogni caso la statistica può cominciare solo quando sono disponibili osservazioni chiare e inequivoche. La statistica concreta, è vero, non conduce mai su serie numeriche che si presentino immediatamente ed esattamente come collettività nel senso del concetto ideale che abbiamo indicato; ma la questione non sta in ciò, si tratta semplicemente di vedere quali applicazioni della teoria della probabilità costruita su questo concetto siano possibili nell'ambito dell'accadere empirico ¹¹.

Si vede subito che questa forma di giustificazione genetica di enunciati statistici non si allontana in nessun tratto essenziale dalla via che già Galilei aveva indicata a tutta la scienza esatta della natura. Deve iniziare anch'essa con quel processo che Galilei aveva denotato con l'espressione *mente concipio* e di cui egli si era valso, ad esempio per formulare la legge d'inerzia ¹². Una collettività è talmente poco rintracciabile immediatamente nell'esperienza quanto un « grave abbandonato a se stesso »; ma in entrambi i casi è legittimo cercare contenuti empirici che soddisfaccino con una certa approssimazione l'esigenza racchiusa in questi due concetti. Fatto questo, possiamo allora « sumere » tali contenuti sotto i concetti ideali fissati in ipotesi — cioè possiamo determinare i contenuti condizioni deducibili da quei concetti come loro conseguenze. In questo modo neppure il rapporto fra « induzione » e « deduzione » viene sostanzialmente mutato quando passiamo dalle leggi « dinamiche » della fisica classica alle leggi statistiche vigenti, ad esempio, nella teoria cinetica dei gas. Nella *Dissertatio de stilo philosophico* Newton (1670) Leibniz ha controbattuto la teoria del Ni-

¹¹ VON MISES, *Wahrscheinlichkeit, Statistik und Wahrscheinlichkeit*, p. 8 ss., 16 ss., 111 ss.; cfr. in particolare *Über kausale statistische Gesetzmässigkeit in der Physik* in « Erkenntnis » 1930-31, p. 189 ss.

¹² Cfr. sopra, p. 125 n. 12.

che tutti gli enunciati « universali » dovessero in fine essere riducibili a enunciati su cose o eventi singoli. Egli distingue enunciati universali che hanno carattere unicamente « collettivo », da quegli enunciati a cui dobbiamo attribuire un carattere « distributivo ». Propositioni della specie « x implica y » secondo lui sono sempre del secondo tipo; esse non affermano che ogni singolo x che abbiamo trovato sin qui o troveremo in futuro, possiede la proprietà y , ma che fra x e y sussiste una relazione funzionale universale; che dovunque sia dato x , ne consegue y . Da questa distinzione del senso « distributivo » degli enunciati di totalità [*totum distributivum*] dal loro senso puramente collettivo [*totum discretum*] per Leibniz consegue che l'induzione stessa, quando essa oltrepassi l'aspettazione puramente soggettiva che già possiamo trovare negli animali bruti, se essa va trattata come una forma dell'inferire e del concludere scientifico, ha bisogno di certi assunti razionali di base e che senza questi *adminicula rationis* essa perderebbe il suo appoggio e il suo sostegno¹³. Per paradossale che suoni a prima vista, si può dire tuttavia che l'universalità « distributiva » qui richiesta non viene meno neppure negli enunciati statistici ma anzi è essenziale per intenderli esaurientemente. Infatti la caratteristica della « collettività », che certamente è legata ad ogni enunciato statistico, riguarda l'oggetto ma non il valore logico dell'enunciato. Gli oggetti degli enunciati statistici sono fenomeni di massa o processi a ripetizione; ma non ne viene che il senso dell'enunciato come tale stia in una descrizione immediata in quanto è stato percepito in rapporto a tali fenomeni. Piuttosto anche qui

¹³ Cfr. LEIBNIZ, *Philos. Schriften*, ed. Gerhard, vol. IV, p. 160 ss. Nella logica moderna la netta differenza fra l'universalità puramente collettiva e quella distributiva è stata accentuata specialmente da Husserl. « Le forme *lo A* e *ogni A*, spiega Husserl, non sono identiche nel significato; la loro non è una diversità « puramente grammaticale ». Si tratta di forme logicamente distinte che danno espressione a differenze essenziali di significato ». Vedi *Logische Untersuchungen*, vol. II, Halle 1901, p. 148.

deve subentrare in un qualche punto qual che sia: quella μεταβασις εις άλλο γένος che ci conduce al nuovo tipo degli enunciati di legge; — anche qui il nostro pensiero deve salire da un « binario discreto » a un altro, con una specie di « salto » (vedi qui sopra, p. 84 s.). Il piano dei meri enunciati individuali va abbandonato — e al suo posto deve subentrare una qualche affermazione generale, anzi universale. Nella teoria della probabilità sostenuta da von Mises questo passo è indicato dal suo assioma del valore limite. La « legge dei grandi numeri » prende un senso nettamente determinato solo mediante tale assioma. A questa legge, enunciata prima da Jacob Bernoulli e sviluppata ulteriormente da Poisson nelle *Recherches sur la probabilité des jugements* (1837) inerisce una equivocità, come spiega von Mises, in quanto sulle prime essa sembra un teorema puramente aritmetico dimostrabile con rigore matematico, ma non contiene nessuna sorta di enunciato intorno al decorso d'una serie di fenomeni. Se da questo teorema si vuol passare all'« realtà effettuale », la « legge dei grandi numeri » deve ricevere una nuova versione: la si deve esprimere nella forma per cui, in certe serie di fenomeni, la frequenza relativa della comparsa di un evento, in osservazione illimitatamente reiterata, si avvicina a un certo valore limite. Nel costruire la teoria della probabilità si può cercare di prescindere da questa versione particolare; ma l'assioma del valore limite è sostituibile sempre solo introducendovi al suo posto un altro assunto che contenga parimenti un'esigenza « razionale », metodica, e non un fatto osservato immediatamente¹⁴. Nella stessa direzione volge in linea di principio anche l'« ipotesi della funzione di probabilità » sulla quale Reichenbach, seguendo Poincaré, vuole fondare l'applicazione delle leggi della probabilità alle c

¹⁴ Così ad esempio K. POPPER (*Logik der Forschung*, p. 12 ss.) vuole sostituire l'« assioma del valore limite » con la « convenzione metodologica di non attribuire mai a casi ripetutisi effetti di regolarità riproducibili ».

se della realtà effettuale¹⁵. Nell'interpretare e fondare tale ipotesi in senso gnoseologico Reichenbach ha mostrato delle oscillazioni. Nel suo primo lavoro egli non solo accentua che essa non è una mera proposizione empirica ma non esita neppure a qualificarla un « principio metafisico della conoscenza della natura in generale ». L'esperienza, è ben vero, deve precisare la forma specifica della funzione di probabilità; ma che un enunciato siffatto si possa produrre in generale intorno a un numero a piacere di casi, non lo può insegnare nessuna esperienza. Accanto all'ipotesi della connessione causale dell'accadere deve intervenire un altro principio concernente la distribuzione regolare nello spazio e nel tempo; ma nel riguardo logico e trascendentale i due principî hanno esattamente lo stesso carattere: sono universali « condizioni della possibilità dell'esperienza »¹⁶. Invece negli ultimi lavori di Reichenbach si cerca una fondazione sostanzialmente diversa. In essi la possibilità di risolvere le proposizioni probabilistiche viene fondata sul principio dell'induzione e si parla di una « risolvibilità induttiva ». Reichenbach non si preoccupa del circolo in cui minacciamo in questo modo di involgerci. Un circolo simile — egli spiega — apparirebbe grave solo quando ci attenissimo ai presupposti della « logica classica », i quali per l'appunto sarebbero tuttavia incapaci di soddisfare alle peculiarità del pensiero probabilistico. Reichenbach è condotto a questa rielaborazione perché ora egli è passato dal punto di vista dell'« idealismo » a quello del « positivismo ». Quest'ultimo, secondo lui, permette enunciati intorno al limite solo nella misura in cui essi siano convertibili in enun-

¹⁵ Cfr. REICHENBACH, *Philosophische Kritik der Wahrscheinlichkeitsrechnung* e *Die physikalischen Voraussetzungen der Wahrscheinlichkeitsrechnung* in « *Naturwissenschaften* », VIII, 1920, p. 46 ss., 146 ss.; vedi anche *Wahrscheinlichkeitslogik* in « *Sitzungsber. d. Berliner Akad.* », Phys.-mathem. Klasse, 1932, p. 476 ss.

¹⁶ *Der Begriff der Wahrscheinlichkeit für die mathematische Darstellung der Wirklichkeit*, Erlangen 1916, pp. 26, 45 ss., 61 ss.

ciati sulla convergenza del processo limite. E poiché in nessun punto dell'approssimazione si potrebbe parlare di un « accadere che in sé vi si adegui rigorosamente », allora una affermazione simile non si potrebbe ritenere valida nemmeno per il limite stesso. Ma con questa concessione al positivismo stretto Reichenbach è finito di nuovo nelle pericolose vicinanze di quello « psicologismo » alla confutazione del quale la sua teoria doveva servire. « Se ci si domanda perché crediamo nelle leggi di probabilità — egli dichiara — abbiamo solo una risposta (perché per queste leggi non si dà propriamente alcuna giustificazione logica): non possiamo credere ad altro che a queste leggi »¹⁷. Con questo ritorno al *common sense* quale fonte peculiare del sapere il problema per altro non è chiuso. Con ciò ritorneremmo indietro oltre Hume, a cui è ben vero che i suoi avversari, i fondatori della filosofia del *common sense*, contrapposero costantemente proprio questo argomento. Dice Reid: « Se vi sono certi principî ai quali ci porta a credere la costituzione della nostra natura e che nella vita comune siamo nella necessità di prendere per certi — questi sono quanto chiamiamo i principî del senso comune; e ciò che è manifestamente contrario ad essi, è quanto chiamiamo assurdo ». Ma a tale argomentazione Hume aveva già replicato risolutamente in anticipo precisando con rigore il senso logico vero e proprio della sua questione. « La mia pratica, dite voi, confuta i miei dubbi. Ma voi equivocate la portata del mio problema. In quanto uomo che agisce, io sono del tutto soddisfatto in proposito, ma in quanto filosofo che ha un poco, non dirò di scetticismo ma di curiosità, ho bisogno di apprendere il fondamento di questa inferenza »¹⁸.

La questione qui in campo serba il suo pieno rigore

¹⁷ Vedi REICHENBACH, *Kausalität und Wahrscheinlichkeit* in « Etkennnis », I, 1930-31, pp. 169 ss., 187.

¹⁸ Vedi HUME, *Enquiry*, sez. IV, parte II (cfr. anche il rifiuto kantiano della deduzione del principio di causalità dalla « costrizione del pensiero », v. sopra, p. 90).

anche quando passiamo dalla regolarità « dinamica » a quella « statistica » — anche quando sostituiamo il punto di vista della causalità stretta con quello della « probabilità ». Infatti anche a fondamento delle mere proposizioni probabilistiche sta sempre una qualche assunzione di costanza [*Beständigkeit*], esprimibile diversamente nelle diverse teorie e denotata ora dall'introduzione di una funzione di probabilità, ora dal postulato di un rigido *limes* per la frequenza relativa della comparsa di certe caratteristiche osservabili. Senza l'« ipotesi » di una simile costanza [*Konstanz*] — visto che è sempre lecito chiamarla una ipotesi — perderebbero il loro sostegno e la loro portata oggettiva anche le « leggi dei grandi numeri ». Pertanto non è possibile fondare le proposizioni probabilistiche sul « principio dell'induzione », — a meno che a quest'ultimo principio stesso non venga attribuita una universalità non semplicemente « collettiva » ma « distributiva ». Fra i logici contemporanei del calcolo delle probabilità Johannes von Kries ha evidenziato più nettamente questo stato di cose.

S'intende — egli spiega — che, se vogliamo fondare l'ammissibilità di un postulato sempre di nuovo su un altro postulato, dopo un regresso più o men lungo arriveremo per necessità di cose ad assunzioni ultime, per le quali tale possibilità di risalire oltre non sussiste più e per la validità delle quali si dovrà fare appello a un qualche principio d'altro genere... La probabilità a cui ci appelliamo per un qualsiasi sapere empirico di portata oggettiva, si fonderà dunque in ogni caso sul valore intellettuale di ciò che è conforme a leggi, cioè sul principio della omogeneità¹⁹.

Ma a questo punto emerge la questione autentica e più ardua — quella che ha impegnato ripetutamente la critica della conoscenza e non di rado l'ha distratta dalla via sicura dell'analisi. È possibile e ha senso parlare

¹⁹ Vedi J. VON KRIS, *Logik*, pp. 409, 426.

ancora di « leggi oggettive » una volta che siamo entrati nel campo dell'accadere accidentale? La legalità di quanto è « casuale »²⁰ non è forse un ferro di legno, una *contradictio in adiecto*? O non è forse il « caso » ciò appunto che *per definitionem* non si lascia mai determinare né governare da leggi? A questa domanda si può rispondere solo se distinguiamo nettamente i disparati significati in cui viene usata la parola « caso ». Nel linguaggio comune questa parola è un vero camaleonte che prende tutti i colori. Ma tale ambiguità non cessa neppure quando si passa alla considerazione teoretica e all'uso linguistico scientifico. « Caso » è sempre un concetto relativo e negativo, che per essere inteso ha bisogno del concetto positivo a cui implicitamente si riferisce; ed è proprio questo punto di riferimento a mutare incessantemente via via che entriamo in sfere diverse di pensiero.

Per elucidare a pieno questo punto si può muovere dall'antitesi fra il quadro mitico del mondo e quello scientifico, il quadro empirico e teoretico. Se ci mettiamo sul terreno di quest'ultimo e prendiamo le sue categorie e i suoi principî come le norme universalmente valide e le sole valide della verità, il mondo mitico appare un tessuto dei casi piú strani e piú improbabili. Si tratta di un mondo all'interno del quale nessun essere ha un suo posto definitivo, nessun accadere un suo decorso stabile e regolare. Una « cosa » non solo può mutare di luogo a piacere ma anche essere contemporaneamente in luoghi diversi; può vestirsi or di questa or di quella forma in metamorfosi continue, senza che le forme via via assunte siano legate fra loro da una qualche regola fissa qual si sia. Qui non pare esservi nessuna sorta di determinazione né delimitazione, qui può nascere ancora « tutto da tutto ». Ma se poi, invece della visione teoreti-

²⁰ [*Zufällig* (accidentale-contingente) viene reso con « casuale » — che è voce facilmente equivocabile con « causale » (molto ricorrente in quest'opera) — solo in quest'unico luogo per mantenere il legame col seguente *Zufall* (caso). — N.d.T.].

co-scientifica del mondo, prendiamo per base piuttosto la prospettiva dell'essere e dell'accadere propria del mito stesso, il quadro si sposta in modo strano. Ora le parti appaiono addirittura scambiate: quanto dall'un punto di vista appariva inintelligibile, semplicemente accidentale, se noi scambiamo il punto di riferimento, si capovolge nel suo opposto. In una quantità innumerevole di casi in cui la conoscenza empirico-scientifica rinuncia a ogni « spiegazione » precisa e che quindi essa considera « accidentali », il mito esige imperiosamente una spiegazione. Nel decorso dell'esistenza umana per il mito non c'è nessun accadere accidentale, ad esempio nessun insuccesso accidentale d'una impresa, nessuna malattia accidentale né alcuna morte accidentale. Tutto ciò dev'essere piuttosto determinato rigidamente — ma non è determinato da principî generali dell'accadere quali li enuncia la scienza nelle « leggi di natura », bensì da intenti individuali e da forze poste al servizio di questi. Si tratta di potenze magiche e demoniache le quali dominano e pervadono ogni accadere — e non c'è nulla in grado di sottrarsene. Perciò questa « causalità » magica penetra nei dettagli molto piú di quanto non riesca a fare quella teoretico-scientifica; al puro « caso » essa non abbandona nulla: esige che in ogni caso particolare di malattia o di morte sia addotta la causa precisa, da cercarsi in una volizione individuale, in un qualche incantesimo ostile di cui l'interessato è rimasto vittima. E allora in un certo senso, invece d'una assenza della spiegazione causale, qui regna piuttosto una ipertrofia, un rigoglio soffocante dello « istinto causale », ed è solo nella specie di causa che il pensiero mitico si differenzia dal pensiero teoretico, col suo risalire a intenzioni e volizioni invece che a regole e leggi ²¹.

Tale forma magico-mitica di ricorso a cause è annullata

²¹ Altri particolari su questo argomento nella mia *Philosophie der symbolischen Formen* [trad. it. cit., vol. II: « Il pensiero mitico »]. Cfr. anche il vasto materiale raccolto da LÉVY-BRUHL in *La mentalité primitive*, Paris 1922 [trad. it., Torino 1966].

dalla scienza greca e dalla filosofia greca classica. Le presunte spiegazioni mitiche vengono respinte con la qualifica di arbitrarie e « accidentali ». Esse sono arbitrarie perché non negano le cause ma le concepiscono mutanti da caso a caso; perché si fingono sempre una causa particolare per ogni accadere particolare. Al posto di questa finzione mitica nella filosofia greca si chiede una precisa forma universalmente valida di pensiero, — una legge oggettiva colta e formulata nel pensiero per poi essere ritrovata nella natura. Solo per questa via la natura cessa d'essere la scena e il campo di battaglia di arbitrarie potenze demoniache e diviene l'ordine, il « cosmo ». Tale concetto di causalità cosmica trova la sua prima fondazione e coniazione speculativa nel pensiero dei pitagorici. Ma esso si compie e matura a pieno solo nell'atomismo greco, che si colloca al vertice di ogni spiegazione scientifica del mondo tanto per il suo contenuto quanto per la sua forma. Nulla al mondo accade « a casaccio » (μάτην) ma tutto in forza di una precisa « necessità » logica (ἐκ λόγου τε καὶ ὑπ'ἀνάγκης). Il « necessario » si oppone all'« accidentale » come l'universale al particolare, il ben definito all'arbitrario fantastico. Ma con questa opposizione lo sviluppo del tema non è affatto chiuso. Anzi ora per la prima volta si tratta di dividere l'una dall'altra le diverse forme di « necessità » e ridurre ciascuna di esse alla sua misura giusta. Ciò che Aristotele rimprovera al sistema dell'atomismo è che esso non ha intrapreso questa divisione nel senso giusto e, per tale difetto, non si è inoltrato in una spiegazione completa e veramente soddisfacente della natura. Per provarlo Aristotele deve procedere da capo a una nuova definizione di « caso » e « necessità » che coglie il rapporto dell'uno all'altra in un senso completamente diverso. Per Aristotele si dice « accidentale » ciò che non consegue dall'« essenza » di una cosa; ma questa « essenza » è definita dalla « forma », la οὐσία è definita dall'εἶδος. Una proprietà è « accidentale » (συμβεβηχός) quando non costituisce il soggetto, quando essa può esser pre-

sente o mancare senza che per questo sia compromesso l'essere del soggetto. E nel campo dell'accadere dobbiamo considerare « accidentale » tutto ciò che, quantunque in sé determinato, non riceve la propria determinazione dalla forma ma dalla sola « materia ». Là dove nella natura incontriamo una qualche malformazione o dove anche soltanto, invece di risaltare in pura perfezione, la forma appare gravata di un qualsiasi difetto — dobbiamo attribuire questo al freno e alla resistenza della materia. Così la *causa materialis* resta sempre « accidentale » in quanto volta in direzione contraria rispetto a quest'ultima causalità « vera e propria » che va trovata unicamente nella *causa formalis* e nella *causa finalis*. Allora la materia appare ad un tempo necessaria e contingente: necessaria, perché il suo essere determina tutti i suoi difetti; contingente, perché proprio questo suo essere è in sé imperfetto, è soltanto un momento che per sé solo non possiede nessun significato autonomo né alcuna realtà effettiva autonoma. La materia è la fonte e della necessità naturale (*ἀνάγκη*) e dell'accidentalità o contingenza (*αὐτόματον* o *τύχη*). L'ultimo e vero fondamento sta nelle cause finali, mentre la materia va pensata sempre solo come causa concomitante, *συναίτιον* a cui non spetta che una necessità ipotetica (*ἐξ ὑποθέσεως ἀναγκαῖον*).

Con la filosofia moderna nell'uso dei concetti e nell'antitesi fra l'« accidentale-contingente » e il « necessario » subentra un nuovo spostamento. E d'altra parte tale specifico mutamento di significato corrisponde alla tendenza generale in cui la filosofia moderna si differenzia dall'antica. Ora il problema non resta più riservato alla filosofia della natura e alla metafisica; è assunto nell'ambito della critica della conoscenza e in certo modo revocato entro tale ambito. In Leibniz questo processo di pensiero è già arrivato alla conclusione: la differenza fra il necessario e il contingente per lui non serve tanto a separare le classi dell'essere quanto piuttosto a qualificare e differenziare le forme fondamentali della conoscenza nel loro va-

lore caratteristico. Ora il concetto di « accidentale » e quello di « necessario » appaiono caratteristiche specifiche di determinate specie di verità: alle *vérités nécessaires* si contrappongono le *vérités contingentes*. Le prime si possono cogliere e fondare movendo da considerazioni puramente logiche e per essere dimostrate non hanno bisogno d'altro principio che quello di identità e di non contraddizione. Esse infatti sono proposizioni puramente ipotetiche: proposizioni che implicano un « se - allora » apodittico, ma non contengono nessuna affermazione assertoria intorno a qualche realtà determinata. Esse pertanto non esprimono nessun tratto particolare del mondo attuale, dato fattualmente; piuttosto valgono per tutto quanto l'insieme dei « mondi possibili ». Ma non appena progrediamo dal « possibile » al « reale », emerge subito l'antitesi fra il « contingente » e il « necessario ». Infatti l'essere del mondo empirico non si fonda sulla sua necessità logica né può mai essere spiegato sufficientemente da questa soltanto. Esso dipende da una scelta compiuta dall'intelletto divino fra i mondi possibili — e tale scelta non è determinata da prospettive logiche ma teleologiche. A fondamento del mondo attuale dato sta dunque questo principio teleologico — *le principe du meilleur* come lo chiama Leibniz — che è insieme il principio di tutte le « verità contingenti » che a tale mondo si riferiscono. Dunque le leggi di natura, in antitesi con le leggi logiche e matematiche, sono « verità contingenti ». Ma questa contingenza non contrasta affatto con la loro determinatezza e certezza senza eccezioni, e quindi nemmeno con la possibilità di una loro fondazione razionale. Piuttosto il rapporto è esattamente l'inverso: le verità accidentali sono tanto poco senza ragione che loro vera fonte e loro caratteristico principio di conoscenza è da considerare il « principio di ragione sufficiente ». Il principio di non contraddizione è la legge del possibile, la legge delle « essenze pure » che hanno sede nell'intelletto divino; il principio di ragione sufficiente è la legge dell'esistente quale esso

risulta dalla « scelta del meglio ». Quindi per intendere tale esistente dobbiamo sempre risalire alla sua « ragione ». Quindi il *principium rationis sufficientis* per Leibniz è tanto un principio quanto un postulato — ed egli lo esprime non di rado in questa ultima forma: *principium reddendae rationis*. Si tratta di trovare una ragione anche per tutto l'« accidentale », per tutto ciò che non è deducibile analiticamente da proposizioni logiche e matematiche — e proprio questo e null'altro che questo vuol dire, secondo Leibniz, il principio che comunemente si designa « principio di causalità »²².

Ne viene che Leibniz s'è posto un nuovo e importante compito metodologico, ma si capisce anche perché la sua soluzione resta inferiore alle sue stesse esigenze. Egli voleva trattare l'antitesi fra l'« accidentale » e il « necessario » da prospettive di pura critica gnoseologica; la voleva fondare su una analisi del concetto di verità e derivare puramente da questa analisi. Ma la stessa dottrina pura dei principî lo ricondusse nei problemi fondamentali della metafisica. Le verità necessarie si distinguono dalle contingenti in questo: che le prime scaturiscono dall'intelletto divino, le seconde dalla volontà divina. Tale mescolanza di determinazioni gnoseologico-critiche e determinazioni metafisiche viene eliminata da Kant il quale avanza il principio che confondere i rispettivi confini delle scienze non sia un accrescimento ma una deformazione di esse. Ora la antitesi fra contingenza e necessità deve assumere ancora una volta una nuova forma. Essa non si riferisce al « mondo » come tale, e quindi non si può far risalire con Leibniz alla differenza fra i « mondi possibili » e il « mondo reale ». Bisogna piuttosto mostrarne l'origine nel sistema della c o -

²² « Duo sunt prima principia omnium ratiocinationum, Principium nempe contradictionis... et principium reddendae rationis... quod scilicet... omnis veritatis reddi ratio potest, vel, ut vulgo ajunt, quod nihil fit sine causa. Hoc principio non indiget Arithmetica et Geometria, sed indiget Physica et Mechanica ». Vedi *Philos. Schriften*, ed. Gerhardt, vol. VII, p. 309.

no sc enza empirica e interpretarla come un fenomeno all'interno di questo sistema. Se il mondo esista dall'eternità o sia sorto da un atto creativo « contingente », se vi sia un essere « assolutamente necessario »: tutte queste questioni vengono respinte. La conoscenza non è alla loro altezza — e con esse la ragione si avvolgerebbe subito in antinomie insolubili. La categoria della necessità o contingenza, come tutte le altre categorie, non si può estendere oltre i limiti dell'esperienza bensì va intesa e definita come essa stessa una delle condizioni della possibilità dell'esperienza. Ma qui ora ne viene una conseguenza caratteristica. Se consideriamo il principio generale di causalità, lo possiamo qualificare con pari diritto come necessario o contingente — sempre secondo il punto di vista che scegliamo nella considerazione. È necessario, perché vi si fonda ogni enunciato empirico particolare e perché come « giudizio sintetico a priori » esso precede ogni giudizio empirico. Ma d'altra parte è « contingente », perché per l'appunto la totalità della esperienza alla quale esso si riferisce e sulla quale deve reggersi per la sua giustificazione, è data solo fattualmente. Il principio di causalità si può dimostrare una *conditio sine qua non* per il fatto della scienza matematica della natura; ma allora questo stesso fatto deve esservi presupposto senza poter essere dimostrato come assoluto, come in sé senz'altro necessario. Kant formula in tutto rigore questo stato di cose paradossale. Se vogliamo ritenere necessario solo ciò che può venir assodato da una dimostrazione apodittica in quanto è intuitiva — così egli dichiara — allora il principio causale non ha nessuna necessità. La nostra ragione infatti costruisce dei principî sicuri, è vero, ma non direttamente da concetti « bensì sempre soltanto indirettamente mediante la relazione di questi concetti con qualcosa di affatto contingente, cioè con l'esperienza possibile ».

Così nessuno può conoscere fondamentalmente la proposizione « tutto ciò che accade ha la sua causa » soltanto da questi concetti dati. Quindi non è un dogma, quantunque

per un altro punto di vista, ossia nell'unico campo del suo possibile uso, cioè nella esperienza, possa essere dimostrato benissimo e apoditticamente. Ma esso dicesi principio e non teorema, benché possa essere dimostrato, perocché esso ha la proprietà particolare di rendere possibile la sua stessa prova, l'esperienza, e di dover essere in questa sempre presupposto²³.

Da questa digressione d'ordine storico ritorno ora al nostro argomento vero e proprio, alla questione del carattere logico degli enunciati probabilistici. La considerazione storica doveva solo insegnarci che fra il concetto di « caso » e quello di « legalità » non sussiste in nessun modo un rapporto di opposizione contraddittoria come spesso si assume che intercorra. Un uso siffatto dei concetti non si trova né in Aristotele né in Leibniz o in Kant. Tutti costoro piuttosto si studiano di porli in una relazione complementare, quand'anche ne accentuino al tempo stesso la netta diversità. Un simile rapporto di integrazione correlativa vale anche per l'uso fisico dei concetti di caso? Finché tale uso non è fissato univocamente, è difficile rispondere alla domanda in estensione generale. Ma se consideriamo i campi in cui il concetto di caso ha un significato ben delimitato e una applicazione chiara, anche qui si vede che esso non sta mai in contrasto col concetto di causalità come tale. Ciò appare nel modo più semplice e con la massima perspicuità nella teoria cinetica dei gas. In essa per gli urti fra le molecole si prendono a base le leggi classiche dell'urto, le leggi della conservazione dell'energia e della conservazione dell'impulso, alle quali si aggiungono ulteriori assunti, statistici, sul numero medio degli urti, il libero cammino medio, le velocità medie delle molecole, e così via. Poi movendo da queste premesse si calcolano le leggi relative alla pressione dei gas, al loro attrito interno, alle loro velocità di diffusione ecc., con esattezza ma

²³ *Critica della ragion pura*, 2ª ediz. ted., p. 764; ed. Cassirer, voi. III, p. 499; trad. it. cit., p. 581.

certo solo in via ipotetica: la conferma definitiva di queste leggi spetta in ogni caso all'esperienza. Le cose sembrano stare un poco altrimenti nei vari « meccanismi del caso ». Ma questi meccanismi concordano tutti in ciò: che da inesattezze insignificanti e forse piccolissime, in essi nel corso del processo derivano grandi differenze del risultato finale. Qui pertanto il concetto di « caso » si può addirittura definire in modo tale da subordinarlo al principio « da piccole cause, grandi effetti » — formulazione in cui diviene immediatamente evidente come non si possa parlare di eccezioni uscenti dallo schema della causalità come tale.

Si chiama caso — spiega Smoluchowski in questo senso — un tipo specifico di relazione causale. Di solito cioè si dice che un evento y dipende dal caso se di una causa variabile o condizione parziale x (eventualmente anche ignota nel suo valore o ignorata di proposito) esso è una funzione siffatta e tale che il suo aver luogo dipende da una variazione molto piccola della x . Ma poi si vede che questo concetto popolare di caso non è adatto come fondamento di un concetto di probabilità definito esattamente. Di una legge matematica di probabilità $W(y)$ intorno alla grandezza y , si può parlare solo se la relazione causale $y = f(x)$ oltre alla proprietà suddetta ne possiede anche una speciale: cioè solo se la distribuzione della y , almeno entro certi limiti, è indipendente dal tipo di funzione di distribuzione $\varphi(x)$ che definisce la frequenza relativa della x ²⁴.

Da tutto ciò consegue che « causalità » e « probabilità », « legalità » e « caso » non solo possono sussistere l'uno accanto all'altro ma vi devono stare, se noi vogliamo determinare l'accadere nel modo più completo possibile. A questo proposito nella fisica classica in sostanza la causalità si riferisce alla conoscenza del decorso dell'accadere

²⁴ Cfr. SMOLUCHOWSKI, *Über den Begriff des Zufalls und den Ursprung der Wahrscheinlichkeitsgesetze in der Physik* cit., p. 253 ss.; per le diverse specie di « meccanismi del caso » cfr. VON MISES, op. cit., p. 142 ss.

e la probabilità alla conoscenza delle condizioni iniziali. Dalla loro congiunzione risultano i teoremi della meccanica statistica che, come ha messo in evidenza per esempio Boltzmann, sono rigorose conseguenze degli assunti fatti, ma nella loro applicazione all'accadere naturale sono il prototipo di una ipotesi fisica²⁵.

Se i due tipi di leggi qui risultanti si vogliono distinguere in leggi « nomologiche » e leggi « ontologiche », come ha fatto von Kries, è chiaro che i due tipi non possono contrastarsi in nessun punto e che un conflitto materiale sussiste fra loro altrettanto poco quanto un conflitto metodologico. L'unica restrizione a cui devono allora sottostare le impostazioni probabilistiche, ma che già discende dalla definizione generale della conoscenza della natura e pertanto non ha bisogno di nessuna formulazione particolare, è che tali impostazioni siano « nomologicamente ammissibili », cioè non possano contraddire a nessuna legge-di-natura già nota²⁶. La differenza caratteristica fra le leggi probabilistiche e le leggi dinamiche qui sussiste ancor sempre; ma dall'altro lato diviene chiaro come esse si intreccino le une alle altre e come solo in questo intreccio nasca la forma universale della « legalità in generale ». Del resto la differenza di metodo che qui viene in luce non si limita affatto alla meccanica statistica ma ha un riscontro preciso nella stessa meccanica newtoniana. Anche quest'ultima accanto alla sfera della « necessità » deve riconoscere un ambito proprio della « contingenza » — e anche in essa da tale opposizione sorgono gravi difficoltà e problemi gnoseologici. Newton vedeva benissimo che le equazioni da lui stabilite non sono affatto in grado di rispondere a tutte le questioni di fronte a cui ci pone la struttura dell'universo. La legge newtoniana della gravitazione determina che cosa accadrà nel presupposto di una certa distribuzione spaziale delle masse; ma sullo stato di questa distribuzione essa non dice nulla. Da tale relativa indeterminatezza New-

²⁵ *Statistische Mechanik* cit., p. 361.

²⁶ Cfr. VON KRIES, *Logik* cit., p. 623 ss.

ton argomenta che a questo punto dobbiamo introdurre un altro genere di « ragioni » e si rifugia in considerazioni teleologiche. Il fatto che le orbite dei diversi pianeti si trovino press'a poco sullo stesso piano e che tutti i loro moti abbiano la stessa direzione, il fatto che poi la stessa cosa valga anche per i satelliti che accompagnano i singoli pianeti: tutto ciò non può avere cause « solo meccaniche ». Questo meraviglioso assetto del sistema solare può essere uscito solo dalla sovranità di un essere saggio e potente. Qui ci dobbiamo appigliare a un diretto decreto divino: *Deus corpora singula ita locavit*²⁷. Fu ambizione di Kant differire ulteriormente il limite a questo riguardo. La sua *Storia universale della natura e teoria del cielo* (1755) è destinata esplicitamente a trovare per la domanda di Newton una risposta che si tenga strettamente nell'ambito delle « cause meccaniche ». Ma nel periodo del criticismo Kant non è più ritornato all'ipotesi avanzata in tale scritto precritico sull'origine dell'universo: ora egli misurava con un metro metodico ed empirico molto più rigoroso, di fronte al quale le argomentazioni precedenti non potevano reggere. In genere si può dire che da Galilei in poi la fisica classica ha rinunciato a rispondere a qualsiasi « perché » a piacere e solo in virtù di tale rinuncia ha potuto assolvere il compito specifico che si è prefisso. Essa non domanda più senz'altro il « perché » ma il « come » e il « che »; si accontenta di enunciare leggi per questi ultimi due, per la struttura « nomologica » e « ontologica » del mondo. Anche nella teoria dei campi il campo infine appare una realtà *sui generis* che si può ancora descrivere solo nella sua costituzione ma non più « spiegare », cioè far risalire a qualcos'altro. Incontriamo dovunque siffatti confini del « perché »; ma essi non sono limiti della determinazione a cui tende la conoscenza della natura, bensì piuttosto le sue stesse condizioni.

²⁷ NEWTON, *Principia*, Lib. III, Scholium Generale (ed. Le Seur et Jacquier, Genevae 1742, voi. III, p. 672 ss.).

PARTE QUARTA

IL PROBLEMA DELLA CAUSALITÀ
NELLA TEORIA DEI QUANTI

CAPITOLO I

I FONDAMENTI DELLA TEORIA DEI QUANTI E LE RELAZIONI DI INDETERMINAZIONE

La teoria dei quanti, come si è posto spesso in rilievo, sta con la fisica classica in un'antitesi molto piú netta che non la teoria della relatività generale. Questa, nonostante trasformi radicalmente i concetti di spazio e tempo, si può allineare al modo di pensare della fisica classica senza alcuna difficoltà di principio. Planck ha detto che solo essa ha segnato in certo modo il coronamento di quest'ultima avendo unificato sotto un punto di vista superiore, con la fusione di spazio e tempo, anche i concetti di massa e di energia come pure quelli di gravitazione e d'inerzia. Dell'ipotesi quantistica invece egli opina che essa abbia agito sull'architettura della fisica classica come un minaccioso esplosivo eterogeneo che già oggi giorno ha prodotto una crepa apertasi dal basso in alto lungo l'intero edificio. « L'introduzione dell'ipotesi quantistica non significa dunque una modificazione, come quella della relatività, ma una rottura della teoria classica »¹.

Perché si prendesse coscienza completa di tale effetto dell'ipotesi occorre tuttavia molto tempo. La sua introduzione non comparve per nulla nella veste di un fatto rivoluzionario. Non fu una dichiarazione di guerra alla fisica classica ma un pacifico sviluppo ulteriore che si compiva

¹ *Physikalische Gesetzlichkeit*, 1926; *Wege zur physikalischen Erkenntnis*, cit., p. 169 ss. [trad. it. Persico e Gamba, Torino 1964].

in uno dei campi di questa. Quando Planck si volse al problema della distribuzione dell'energia nello spettro normale del calore raggianti, non aveva affatto l'intenzione di rovesciare l'edificio della fisica classica, cercava piuttosto di rafforzarlo e perfezionarlo col gettare un ponte fra due campi fondamentali che fin qui non si erano potuti congiungere in modo soddisfacente. Egli mosse dalla termodinamica, dalle leggi dell'equilibrio termico, e cercò di ottenere in base ai principi di essa una spiegazione dei fenomeni elettrodinamici, delle leggi per l'eccitazione e l'assorbimento di vibrazioni luminose e termiche. Ma tale unificazione riuscì solo introducendo l'ipotesi del quanto elementare d'azione, con l'assunto che lo scambio di energia fra gli oscillatori avvenga solo in multipli interi di una determinata grandezza ϵ . Questo postulato andava contro le premesse di fondo della teoria classica, secondo le quali l'energia ondulatoria si diffonde nello spazio in modo continuo; ma Planck si studiava manifestamente di contenere l'antitesi in quella misura minima che ancora appariva compatibile per l'esperienza. « Nell'enunciare la legge dinamica — dice nelle *Lezioni sulla teoria dell'irraggiamento termico* — procederemo in modo razionale così da ammettere il meno possibile la deviazione, riconosciuta necessaria, dalle leggi dell'elettrodinamica classica. Pertanto riguardo agli effetti del campo d'irraggiamento su un oscillatore noi aderiamo per intero a tale teoria »². In linea con questo suo primo orientamento generale, nell'elaborazione della sua « seconda teoria » Planck lasciò cadere l'assunto dell'assorbimento per quanti in generale, e solo per l'emissione postulò che essa avvenisse in modo discontinuo e soltanto quando l'energia U dell'oscillatore ammonta esattamente a un multiplo intero del quanto elementare h ³. Ancora nel 1912, nella prefazione alla seconda

² *Vorles. über die Theorie der Wärmestrahlung*, 3^a ed., Leipzig 1919, p. 148.

³ Per la « seconda teoria » di Planck cfr. A. MARCH, *Theorie der Strahlung und der Quanten*, Leipzig 1919, sez. II, cap. III.

edizione delle sue lezioni, Planck in genere metteva espressamente in guardia contro una generalizzazione affrettata della teoria quantitativa. Nulla infatti sarebbe piú nocivo al felice sviluppo d'una nuova ipotesi, dell'oltrepassarne i confini. E per tale ragione egli avrebbe sempre patrocinato l'annessione piú stretta possibile dell'ipotesi quantitativa alla dinamica classica, e una rottura dei limiti di quest'ultima solo dove i fatti dell'esperienza non lasciassero piú altra via d'uscita.

Ma lo svolgimento ulteriore della teoria oltrepassò subito questo limite iniziale entro cui il suo fondatore cercava ancora di tenerla. Nella teoria di Bohr avvengono sempre per quanti sia l'emissione che l'assorbimento. In genere si compie ora uno sviluppo che è molto importante e significativo nel senso metodologico: la legge iniziale dei quanti diviene il principio dei quanti. Le sue applicazioni non sono piú ristrette a singoli campi ancorché molto vasti della fisica; piuttosto la legge viene intesa e usata come una prospettiva universale, come un postulato della conoscenza della natura in generale. Questa trasformazione, questo passaggio dell'ipotesi quantitativa da « enunciato di legge » a « enunciato di principio » si è compiuto in breve tempo. A tale enunciato di principio ora sottostanno gruppi affatto diversi e apparentemente eterogenei di fenomeni: la teoria dell'irraggiamento termico, la teoria dell'effetto fotoelettrico e quella del calore specifico si unificano e rapportano l'una all'altra in un modo nuovo. Quando nel 1905 Einstein introdusse il concetto di « quanto di luce », lo qualificò « un punto di vista euristico intorno alla generazione e trasformazione della luce ». Sulle prime tale punto di vista viene adottato in base a considerazioni puramente teoriche: poté esser provato sperimentalmente e confermato con la massima esattezza da R. A. Millikan solo dieci anni piú tardi (1916)⁴. L'esuberante entusiasmo

⁴ Ulteriori particolari in SOMMERFELD, *Atombau und Spektrallinien*, 4^a ed., 1924, p. 42 ss.

con cui Sommerfeld traccia il quadro dell'universo della teoria quantistica nella prefazione alla prima edizione dell'opera *Struttura dell'atomo e righe spettrali* (1919), mostra quanto rapidamente progredisca questo sviluppo di pensiero e come esso invada irresistibilmente tutti i campi della fisica. « Quanto percepiamo ai giorni nostri attraverso gli spettri è un'effettiva "armonia di sfere" dell'atomo, una consonanza di rapporti in numeri interi, un ordine armonico crescente in ogni varietà ».

E tuttavia in questo sistema apparentemente tanto armonico emersero ben presto gravi dissonanze. Il progresso pacifico e rettilineo che si nota nello sviluppo della fisica classica al passare da Keplero e Galilei a Newton, da Newton a Lagrange, alla teoria dei quanti restò negato. Essa non poté raggiungere una simile semplicità e linearità già perché rimase sotto la minaccia costante di un dualismo di principio. Il postulato dei quanti spezzava sí il sistema della meccanica e dell'elettrodinamica classiche; ma doveva nondimeno continuare ad usare questo sistema. Per la critica della conoscenza tale atteggiamento duplice costituisce un paradosso sin dall'inizio. Per eliminare il paradosso o attenuarlo si dovette cercare almeno di congiungere in qualche modo definito i due linguaggi che ora la fisica era costretta ad usare costantemente l'uno accanto all'altro. Si dovette dare una direttiva generale che stabilisse le regole dell'uso dei due linguaggi e facesse sapere in qual modo i concetti della teoria quantistica e quelli della meccanica e dell'elettrodinamica classiche fossero compatibili e, diciamo, conciliabili fra loro. La teoria classica come tale si dovette modificare in tratti essenziali, perché essa non riusciva in nessun modo a dar conto del fatto empirico di base della fisica atomica — il fatto della stabilità degli atomi e dell'esigenza di nette righe spettrali — e anzi appariva del tutto incompatibile con questi. Ma altrettanto poco si potevano semplicemente sacrificare le sue leggi, provate e confermate sempre di nuovo nell'ambito della macrofisica da una grande quantità di osservazioni.

Il « principio di corrispondenza » di Bohr cercò di indicare la via d'uscita del dilemma; divenne quasi il filo d'Arianna nel labirinto della teoria quantistica. L'interpretazione dei processi di irraggiamento secondo la teoria elettromagnetica della luce e secondo la teoria dei quanti qui si rapportano mostrando che gli enunciati sull'intensità e quelli sulla polarizzazione delle righe spettrali, per numeri piccoli di quanti trapassano gli uni negli altri e per un numero di quanti sufficientemente grande si avvicinano asintoticamente. Il principio di corrispondenza, come Bohr rileva, si studia di valorizzare in reinterpretazione significativa, nonostante la antitesi di fondo tra i postulati della teoria quantistica e le teorie classiche, ogni tratto di queste teorie nella sistemazione della teoria quantistica⁵.

L'antitesi fra il modo di considerare quantistico e quello classico non si doveva affatto dissolvere né l'abisso fra le due si poteva colmare in senso vero e proprio. Ma col principio di corrispondenza si stabiliva una *massima* metodologica ed euristica per guidare il corso dell'indagine e insegnarle a usare i due diversi tipi di leggi così che essi portassero a una descrizione unitaria dell'accadere naturale⁶. Allo stesso intento rispondeva l'enunciazione dell'« ipotesi delle adiabatiche » di Ehrenfest (ipotesi dei processi atomici come processi adiabatici). Anche in questa si poneva al vertice l'esigenza di valutare gli stati stazionari di un sistema atomico — a parte i fenomeni di irradiazione — il più possibile secondo le leggi della meccanica classica. Queste leggi secondo il « principio dell'invarianza adiabatica » non dovevano valere solo per sistemi isolati ma restare valide anche quando sul sistema agissero influssi

⁵ BOHR, *Atomtheorie und Mechanik* (1925) in *Atomtheorie und Naturbeschreibung*, Berlin 1931, p. 24.

⁶ Per la storia e la formulazione del principio di corrispondenza di Bohr rimando alla concisa esposizione riassuntiva di H. A. KRAMER, *Das Korrespondenzprinzip und der Schalenbau der Atome* in « *Naturwissenschaften* », XI, 1923, p. 550 ss.; cfr. anche KRAMER e HOLST, *The Atom and the Bohr Theory of its Structure*, London 1923, p. 139 ss.

esterni — nel solo presupposto che tale azione fosse « infinitamente lenta ». Apparivano grandezze « adiabaticamente invarianti » quelle immediatamente « quantizzabili »; si trattava dunque di scoprire tali grandezze nelle leggi classiche del moto per stabilire la congiunzione tra le diverse forme fondamentali di leggi⁷. Con questo sulle prime sembrò di aver soddisfatto le richieste immediate dell'indagine fisica. Ma è chiaro che a questa concezione non ci si poteva arrestare definitivamente: considerata e valutata dal punto di vista gnoseologico essa presenta assai più il carattere d'un compromesso che non di una soluzione conclusiva. Senza dubbio resta sempre qualcosa di insoddisfacente quando determinati concetti vengono prima accettati per poi essere corretti in un secondo tempo da una restrizione a certe condizioni, e giustificati realmente e garantiti nel loro uso solo da tale correzione. Le regole per la « quantizzazione » che si erano applicate nella teoria quantistica precedente, parevano in certo senso un *deus ex machina*. Si trattava di regole « eteronome », non suscettibili di fondazione movendo dai principî della teoria classica. Dal punto di vista di questa la condizione di frequenza posta da Bohr, quantunque imprescindibile e straordinariamente feconda, restava un concetto di fronte al quale ci si trovava privi di una vera e propria intelligenza teoretica. Essa manteneva — per usare un'espressione coniata da Hilbert in un altro contesto — un che di « dittatura di divieto ». Si postulava che determinate grandezze della teoria precedente dovessero essere « quantizzabili », che esse potessero assumere solo valori in numeri interi. Si può forse comprendere tale divieto non solo nel suo « che » ma anche nel suo « perché »? Non solo nell'ὄντα ma anche nel δῶντα? Su questo punto si concentrano gli sforzi della nuova meccanica quantistica. Invece di lasciar apparire le regole di quantizzazione come semplici in-

⁷ Altri particolari nell'esposizione di P. EHRENFEST, *Adiabatische Transformationen in der Quantentheorie und ihre Behandlung durch Niels Bohr* in « Naturwissenschaften », XI, 1923, p. 543 ss.

tromissioni dell'esterno, Schrödinger nell'impianto della meccanica ondulatoria tese esplicitamente ad avvicinarle alla comprensione materiale. Egli sentì il bisogno di un metodo di quantizzazione che fosse del tutto esente dalla necessità di postulare ad arbitrio questa o quella grandezza come numero intero. Si voleva un assetto unitario della fisica, il quale abbracciasse sia i fenomeni meccanici comuni, in cui le condizioni quantiche non hanno una parte rilevante, sia i tipici fenomeni quantici. E lo scopo si raggiunse con la sorprendente riduzione del problema fisico in gioco a problema matematico. L'equazione differenziale lineare stabilita da Schrödinger, come si può dimostrare in estensione generale movendo dalla teoria delle equazioni differenziali, ammette una soluzione univoca, finita e stabile solo quando i parametri che vi figurano hanno certi valori discreti. Tali « autovalori » offrono allora i distinti valori discreti di un sistema senza bisogno di aggiungere assunti particolari. Con ciò gli stati stazionari di Bohr si spiegavano come frequenze d'autooscillazione delle onde schrödingheriane⁸. E così nella prospettiva della nuova meccanica ondulatoria la questione della « quantizzazione » veniva in una luce nuova; la teoria precedente e la sua versione e interpretazione delle condizioni quantiche ora apparivano solo una « prima approssimazione »⁹. Il postulato dell'univocità e finitezza della funzione d'onda offre ora il $\delta\iota\acute{o}\tau\iota$ cercato delle regole di quantizzazione. Queste, come il $\nu\acute{o}\upsilon\varsigma$ di Aristotele, non hanno più bisogno d'entrare a forza nel mondo della fisica « dal di fuori » ($\delta\acute{\upsilon}\rho\alpha\delta\epsilon\nu$): risultano intelligibili e giustificate « dal di dentro ». A tale riguardo, quando si segue lo sviluppo della teoria dalla legge dell'irraggiamento di Planck al modello atomico di Bohr e da questo alla nuova meccanica quantistica, si nota un progresso evidente e continuo.

⁸ Cfr. SCHRÖDINGER, *Vier Vorlesungen über Wellenmechanik*, Berlin 1928, lez. L.

⁹ In proposito cfr. ad esempio DE BROGLIE, *Einführung in die Wellenmechanik*, Leipzig 1929, cap. 17.

Oggigiorno tutti accettano che la teoria non ha ancora raggiunto a pieno il suo scopo né ha ancora detto la sua ultima parola; ma è altrettanto sicuro che le difficoltà restanti si potranno superare solo col progresso dell'esperienza. Qui si tratta semplicemente di acquisire e fondare « particolari leggi di natura » che, kantianamente, sono « accidentali per il nostro intelletto » e intorno alla validità delle quali può dunque decidere solo l'osservazione empirica.

Tutt'altra questione è se e in qual modo, in tale passaggio dalla teoria classica a quella quantistica, sia mutato il significato del principio causale, se questo principio sia divenuto non valido e « vuoto » per la conoscenza scientifica della natura. A tale questione non è possibile rispondere prima di aver definito il senso della legge causale stessa, prima di aver detto che cosa per essa si debba intendere e non intendere. Tutta la nostra ricerca precedente era rivolta a questo problema. Abbiamo cercato di mostrare che la versione tradizionale del principio causale come la esprime la « formula di Laplace » non soddisfa a pieno in alcun modo il contenuto del principio e l'uso « classico » fattone sin qui. Corrispondentemente le obiezioni che si sono sollevate — secondo noi, con pieno diritto — contro questa formula, per noi non valgono più da obiezioni contro il principio di causalità. Noi trovammo il significato essenziale del principio causale, una volta inteso questo nel senso « critico » e non in quello metafisico, in ciò: che esso non contiene immediatamente un enunciato su « cose », ma un enunciato sull'esperienza in cui e in forza della quale soltanto ci possono essere date delle « cose » come oggetti della conoscenza. Il principio vuol dire qualcosa intorno all'assetto della conoscenza empirica; stabilisce le singole fasi della via per cui la conoscenza empirica tende al proprio fine, il fine del « sapere l'oggetto ». La nostra questione pertanto può sonare solo così: se l'impostazione del problema propria della teoria quantistica e i suoi risultati abbiano segnato un mutamento essenziale in questa via e in questa definizio-

ne del fine — se d'ora in poi la conoscenza della natura debba cambiare la sua direzione e trasformare radicalmente la sua metodica.

Nel rispondere a tale questione, sulle prime prescindereò ancora dalle relazioni di indeterminazione, della cui portata ci si deve occupare solo piú oltre. È indiscusso che esse hanno svelato un tratto caratteristico e decisivo del modo di conoscere e di considerare proprio della teoria quantistica; ma a mio avviso questo tratto non riguarda tanto la struttura e la disposizione del sistema stesso della fisica quanto piuttosto la base su cui esso si costruisce. Nelle relazioni di indeterminazione non è in gioco quella « gerarchia di tipi » che la nostra precedente analisi cercò di esporre nei dettagli, ma solo il primo stadio, quello degli enunciati di misura, all'interno del quale ora si presenta una problematica peculiare prima non considerata. Le relazioni di indeterminazione, come ha detto Planck, riguardano le incertezze insorgenti sia nella traduzione di un evento dal mondo sensibile nel « quadro fisico dell'universo » sia nella ritraduzione inversa da quest'ultimo nel primo — incertezza che, come esse affermano, non potrà mai venir eliminata completamente da nessun raffinamento, per quanto progressivo, dei metodi di misurazione. Ma l'indeterminatezza che ne consegue non autorizza né favorisce le conseguenze « metafisiche » o « cosmologiche » ad ampio raggio che spesso se ne sono tirate. Nella teoria quantistica Schrödinger ha distinto un punto di vista « conservatore » e uno « rivoluzionario ». Il primo assume che alla base di ogni legge di natura, quand'anche da noi formulabile solo statisticamente, debba esservi una legge strettamente dinamica; il secondo punto di vista invece consiste nell'assumere che la connessione presunta necessaria da noi accertabile nell'accadere naturale sia solo il risultato di innumerevoli eventi elementari svolgentisi senza alcuna regola. Fra le due concezioni sussisterebbe la possibilità di scegliere, perché una decisione definitiva fra loro non si potrebbe né ricavare dall'esperienza né raggiungere con argomenta-

zioni razionali¹⁰. Ma quand'anche ci si attenga alle enunciazioni dei « rivoluzionari » dichiarati della nuova fisica, si vede che esse non incoraggiano per nulla le conseguenze metafisiche che spesso se ne sono tirate. Infatti nell'effettivo lavoro dell'indagine fisica nessuno di loro ha voluto rinunciare alla legalità dell'accadere in generale; piuttosto hanno cercato tutti come esprimere e tale legalità incontestabilmente e come fondarla, nelle condizioni in cui versa la nostra osservazione della natura. Bohr non ha affatto negato la validità del concetto causale come tale; piuttosto ha accentuato ripetutamente che tale concetto è indispensabile per ogni interpretazione dei dati di misura. L'idea che i concetti di fondo sui quali si reggono le teorie fisiche classiche possano mai divenire superflui per la descrizione dell'esperienza fisica, è da lui qualificata illusoria. Bohr contesta solo che sia più oltre possibile legare direttamente nel senso delle teorie classiche la descrizione causale dei fenomeni alla descrizione spazio-temporale e fonderla in certo modo con questa. Le due descrizioni si integrano a vicenda ma non si possono adottare insieme contemporaneamente né, per dir così, abbracciare in un solo sguardo. Secondo l'essenza della teoria quantistica dobbiamo accontentarci di concepire la rappresentazione nello spazio-tempo e il postulato della causalità come tratti *complementari* ma reciprocamente escludentisi della descrizione contenutistica dell'esperienza, tratti che simbolizzano l'idealizzazione delle possibilità d'osservare e, rispettivamente, di definire¹¹. Con molto maggior risolutezza si esprime Heisenberg quando, nel suo primo introdurre le relazioni di indeterminazione, dichiara addirittura che esse dimostrano la non

¹⁰ Cfr. SCHRÖDINGER, *The Law of Chance in Science and the Human Temperament* cit., p. 40 ss.

¹¹ Cfr. BOHR, *Das Quantenpostulat und die neuere Entwicklung der Atomistik* (1927) in *Atomtheorie und Naturbeschreibung* cit., p. 34 ss.; vedi anche il preambolo introduttivo a tale raccolta (1929), p. 10 ss.

validità della legge causale¹². Ma l'ulteriore sistemazione e interpretazione data da Heisenberg ai principî fisici della teoria quantistica insegna che anche questo brusco rifiuto si rivolge solo contro una ben determinata versione ristretta del principio di causalità e non contro il suo senso universale. Qui infatti si tiene ben ferma la concezione fondamentale di Bohr della « complementarietà ». Secondo Heisenberg la teoria quantistica ha da scegliere fra due possibilità: può tener valida la descrizione nello spazio-tempo, ma allora deve prendersi in aggiunta anche la peculiare indeterminazione del concetto di « osservazione » caratterizzata dalle relazioni di indeterminazione, oppure essa si deve accontentare di uno schema matematico non interpretabile come una semplice connessione di cose nello spazio e nel tempo, e allora è in grado di restituire la « causalità » nei suoi diritti¹³. Per quanto riguarda infine l'interpretazione statistica sostenuta da Born e Jordan della meccanica quantistica, essa mette parimenti in risalto l'impossibilità di mantenere piú oltre una teoria deterministica secondo cui il decorso dell'accadere in un sistema chiuso sia definito completamente dallo stato del sistema nel tempo iniziale $t = 0$; a una teoria siffatta, benché sia pensabile senza contraddizione, mancherebbe ogni possibilità d'essere applicata, perché lo stato iniziale non è mai determinabile esattamente. In questo senso la legge causale diviene « vuota » — la fisica è per principio indeterministica e dunque una faccenda di statistica. Ma anche in tale conclusione Born precisa subito che gli enunciati statistici sono enunciati assolutamente rigorosi: le stesse probabilità, come egli rileva, non sono per nulla indefinite; piuttosto sono rigidamente determinate dal formalismo della teoria quantistica¹⁴.

¹² « Zeitschrift für Physik », XLIII, 1927, p. 197; cfr. sotto, p. 181 s.

¹³ HEISENBERG, *Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie*, Leipzig 1930, p. 47 ss. [trad. it. M. Ageno, Torino 1948].

¹⁴ BORN, *Quantenmechanik und Statistik* in « Naturwissenschaften », XV, 1927, p. 240 ss.; cfr. *Elementare Quantenmechanik*, cap. VI.

Questo stato di cose si può chiarire da un altro lato, quando si consideri la parte svolta dal principio dell'energia nella costruzione della meccanica quantistica. Nel corso della fisica classica era stato proprio questo principio a mostrarsi sempre più l'autentico prototipo del pensiero e dell'inferire strettamente causali. I sostenitori di un rigido energetismo sono propensi a risolvere addirittura il concetto di energia e quello di causalità l'uno nell'altro; dichiarano che il concetto di causalità ha la sua unica vera realizzazione e la sua rappresentazione fisica adeguata nel concetto di energia e solo in esso. « Poiché tutti gli eventi consistono in mutamenti spaziali o temporali dell'energia — spiega ad esempio W. Ostwald — questa forma della legge causale in un certo senso è anche esauriente... In versione più definita... la legge causale vuol dunque dire che nulla accade senza equivalente trasformazione di una o più forme di energia in altre »¹⁵. Questa coincidenza del primo principio fondamentale col principio generale di causalità si può contestare con ragioni d'ordine gnoseologico; ma è incontestabile che nel pensiero « energetistico » il pensiero causale costituisce un momento essenziale. Se dunque si tien fermo l'uno, con ciò stesso si è posto insieme e riconosciuto implicitamente anche l'altro. E questo tener fermo è caratteristico anche per la meccanica dei quanti. Nello sviluppo della teoria quantistica a volte si sono avanzati anche certi dubbi sul rigore e la validità universale del principio dell'energia; e alcuni scienziati erano disposti a sacrificare questo principio. Ma tale sacrificio non si è dimostrato né necessario né realizzabile. Piuttosto la meccanica dei quanti ha adottato nel proprio *corpus* i principi di conservazione dell'energia e dell'impulso senza modificazioni. Tali principî sembrano appartenere all'impalcatura fondamentale di ogni descrizione esatta della natura — sembrano rientrare in quelle « inva-

¹⁵ W. OSTWALD, *Vorles. über Naturphilosophie*, Leipzig 1902, p. 296.

rianti » che non dipendono da nessuna forma particolare assunta via via dal sistema della spiegazione fisica. E proprio su di essi si fondano le spiegazioni piú importanti per la teoria e piú feconde, di determinati fenomeni di base della teoria quantistica. Nella teoria dell'effetto fotoelettrico, come in quella dell'effetto Compton, si postulano validi per gli urti fra quanti di luce ed elettroni liberi e per il conseguente scambio d'energia i principi di conservazione dell'energia e dell'impulso. Nelle discussioni di questo problema tenutesi recentemente e, a quanto vedo, non ancora giunte ad alcuna conclusione sicura, si è certo avanzata anche l'ipotesi che al principio di conservazione dell'energia spetti forse solo un significato statistico, cosí che ne sarebbero possibili delle deviazioni nel caso singolo¹⁶. Se tuttavia si osserva la forma attuale della meccanica quantistica, il mutamento nell'applicazione del concetto di energia sembra restringersi a questo: che, secondo le prospettive della teoria quantistica, la questione della determinazione dello stato energetico di un sistema in un momento dato si dimostra molto piú complessa di quanto era parsa sinora e vi si assume anche l'esistenza di stati a cui in generale non corrisponde alcuna energia definita. Ma da ciò la validità del principio dell'energia come tale non è rovesciata e resta alla base anche delle predizioni statistiche della meccanica quantistica.

Va poi richiamata l'attenzione anche su un'altra circostanza che fin dall'inizio dovrebbe mettere in guardia contro l'uso acritico, tanto frequente nella discussione popolare, del termine « indeterminismo ». In una delle sue ultime esposizioni sulla situazione odierna della meccanica quanti-

¹⁶ La congettura, avanzata fra gli altri da Bohr, che nel singolo processo atomico si possano presentare eccezioni sia al principio dell'energia sia a quello dell'impulso, cosí che tali principi andrebbero considerati come principi statistici, cioè validi per un gran numero di singoli processi atomici, non si è potuta confermare con controlli sperimentali. Sullo stato attuale della questione cfr. BOHR e DIRAC in « Nature », CXXXVII, 1936, p. 298 e 344.

stica¹⁷ Schrödinger ha posto in rilievo che, benché nella meccanica dei quanti si tratti in genere di enunciati probabilistici, questi enunciati tuttavia sono caratterizzati da una *e s a t t e z z a* particolare. Se ad esempio si misura l'energia di un oscillatore di Planck, la probabilità di trovare un valore fra E ed E' può essere diversa da zero solo se fra E ed E' vi è un valore appartenente alla serie $3\pi h\nu$, $5\pi h\nu$, $7\pi h\nu$, $9\pi h\nu$... Tutti gli altri valori di misurazione non esprimibili con multipli dispari della « costante modello » $\pi h\nu$ sono esclusi. Tale enunciato — aggiunge Schrödinger — non soffre davvero di un eccessivo difetto di precisione, tutt'al contrario esso è piú preciso di quanto possa mai esserlo una misurazione reale. E come vale per i suoi enunciati di misura, lo stesso aumento di precisione vale anche per tutti gli enunciati di legge e di principi della teoria quantistica. Cosí ad esempio il principio di Hamilton nella sua forma classica esige solo che un certo integrale debba essere un minimo, senza definire il valore numerico di questo minimo, mentre la teoria dei quanti vi aggiunge la condizione che tale valore dev'essere un multiplo intero del quanto d'azione di Planck. Si può dunque parlare di un difetto di precisione per principio negli enunciati della teoria quantistica solo finché non ci si è ancora liberati dal pregiudizio che gli enunciati statistici siano necessariamente enunciati « imprecisi ». In realtà essi sono enunciati *rigorosi* che per altro non riguardano una cosa o un evento singolo ma determinate collettività (vedi qui sopra p. 140 ss.). Quando nella teoria del decadimento radioattivo si parte dalla premessa che per ogni sostanza esista una certa probabilità che un qualsiasi atomo decada in una qualsiasi unità di tempo; quando si dimostra il sussistere di una determinata legge esponenziale che definisce il decadimento, e quando poi si stabiliscono gli « alberi genealogici » delle diverse « famiglie radioattive » — tutti questi sono accertamenti esatti in sommo grado,

¹⁷ Vedi « Naturwissenschaften », XXIII, 1935, p. 807 ss.

sebbene non dicano nulla né della sorte del singolo atomo né del momento del suo decadere. Ciò non comporta nessuna infrazione della « causalità » perché la causalità in generale non è una « questione di sorti » ma una pura e semplice questione di leggi. Dunque anche nella teoria dei quanti il problema andrebbe inteso in questo senso esclusivamente « critico ». A volte la tesi dell'indeterminismo è stata formulata in termini per cui la via che prenderà il singolo elettrone non sarebbe prescritta da leggi di natura, ma l'elettrone potrebbe « scegliere » entro certi limiti, e quale scelta infine abbia luogo sarebbe deciso quasi da un « gioco a dadi della natura »¹⁸. Ma a un autentico indeterminismo, che meriti davvero questo nome, si verrebbe solo quando a questo punto si decidesse di fare ancora un passo avanti; quando, invece di dirigersi contro la determinatezza dell'accadere individuale, l'attacco si dirigesse piuttosto contro la determinatezza delle leggi dalle quali pensiamo governato questo accadere. Il « gioco a dadi della natura » assumerebbe allora un'altra forma — ora non si tratterebbe più di prendere, con quel gioco, una decisione alla via del singolo elettrone, ma di domandarsi se la natura in un certo momento possa mettere in pratica questa o quella legge, se essa possa mutare le proprie leggi « caso per caso » in modo incontrollabile dalla nostra conoscenza. Ma è chiaro che già la formulazione della domanda in questo senso implica un antropomorfismo inammissibile. Pensare la « natura » come un soggetto per sé stante, come una « cosa » che agisca o patisca, è una ipostatizzazione erronea. Noi incorriamo in questo errore sia che concepiamo la natura come un agente autonomo in grado di « fare una scelta » in certi momenti¹⁹, sia che la pensiamo soggetta a leggi rigide e inesorabili alle quali essa non

¹⁸ Cfr. in proposito H. BERGMANN, *Der Kampf um das Kausalgesetz in der jüngsten Physik*, Braunschweig 1929, p. 55.

¹⁹ « Nel 1927, a Bruxelles, Dirac diceva che " in certi momenti la natura fa una scelta " » (LANGEVIN, *La notion de corpuscules et d'atomes*, Paris 1934, p. 33).

possa sottrarsi. Nell'uso linguistico rigoroso della fisica la « natura » non è altro che un insieme di relazioni, di leggi — e ad un siffatto insieme, a una simile « forma » pura non è applicabile la categoria dell'agire-patire. Pertanto anche quando si decida a favore del postulato deterministico, si deve far leva da qualche altra parte. Neppure questo postulato è lecito riferirlo immediatamente e in prima linea allo stesso accadere materiale, ma esso va rivolto alla « forma » della conoscenza della natura, alla struttura dei suoi concetti fondamentali e dei suoi principi. La determinatezza, la determinazione logica di tali concetti e principi, quando dovesse risultare che nella fisica atomica l'accadere non è piú rappresentabile mediante leggi dinamiche del tipo « classico » ma solo da leggi statistiche, non ne sarebbe annullata.

Nel difendere la tesi dell'« indeterminismo », Eddington una volta ha coniato una similitudine spiritosa. Egli paragona il cambiamento compiutosi nel pensiero della fisica moderna alla svolta economica conseguente al fatto che in epoca piú recente molti stati sarebbero passati a porre su una nuova base l'essenza del loro denaro e della loro valuta. Come in quest'ultimo caso si sarebbe visto che un mutamento della politica monetaria non doveva avere necessariamente come conseguenza una scossa dell'economia e del credito economico, cosí nel primo caso non occorrerebbe che il valore di verità degli enunciati della fisica soffrisse alcunché dalla loro trasformazione. La validità delle leggi strettamente dinamiche non si potrebbe piú mantenere — ma si sarebbe mostrato che esse non sono necessarie per la funzione che la fisica avrebbe da svolgere nel tutto della conoscenza. Finora le leggi dinamiche valevano come l'autentico e necessario fondamento dell'elaborazione concettuale della fisica in generale.

Esse erano l'oro che si accumulava e custodiva nelle cantine della fisica; le leggi statistiche erano solo la cartamoneta che si usava per i pagamenti effettivi. Nessuno ci badava; si trovava

naturale ed evidente che la cartamoneta fosse coperta dall'oro. Ma venne la crisi — e la fisica abbandonò la base aurea. Tale evoluzione si è compiuta solo recentemente — e le opinioni sul suo risultato finale sono ancora molto divise. Alcuni scienziati, come Einstein, temono un'inflazione disastrosa e insistono su un ritorno alla copertura aurea. Ma la più parte dei fisici comincia a domandarsi perché poi si debba attribuire una forza siffatta all'oro, che ora avrebbe da svolgere solo una parte oziosa, e perché non si voglia rinunziarvi del tutto per l'avvenire ²⁰.

Del paragone qui tracciato ci si può effettivamente valere per illustrare quella situazione problematica della gnoseologia, a cui ha condotto lo sviluppo della moderna fisica atomica. Ma per radicale che egli sia, nessun « indeterminista », mi pare, sarà disposto a introdurre una pura « monetazione cartacea » nel sistema della conoscenza fisica. Gli enunciati della fisica avranno un carattere puramente simbolico; ma per la totalità di tali simboli alla fine si dovrà pur sempre esigere un qualche allacciamento alla « realtà effettuale », un qualche *fundamentum in re*. Senza soddisfare tale esigenza non vi sarebbe più rimedio quanto al valore di verità della fisica: il suo « credito » logico sarebbe perduto una volta per sempre. Se dunque si vuole salvare il carattere scientifico della fisica teorica, non si tratterà affatto di rinunziare alla « copertura » dei suoi concetti e giudizi; il problema può essere solo in quale punto la dobbiamo cercare. Anche la moderna fisica atomica ha da stabilire certe definizioni di fondo, ultime, oggettivamente valide, su cui fondare il vero e proprio patrimonio della conoscenza. Ma a tale patrimonio non dà più la stessa formulazione che esso riceveva nel sistema della fisica classica. La speranza di poter mai riuscire a ridurre tutti gli enunciati della fisica al solo tipo delle leggi dinamiche classiche sembra svanire sempre più. Invece di cercare una riduzione siffatta, dobbiamo disporci e rassegnarci a riconoscere le leggi stati-

²⁰ EDDINGTON, *New Pathways in Science* cit., p. 83 ss.

stiche come un tipo proprio e fondamentale di enunciati fisici. Esse vanno considerate elementi conoscitivi non ulteriormente derivabili, parimenti originari e forniti degli stessi diritti. Con questo, è vero, la « copertura » dei nostri giudizi fisici si è spostata; ma non è abbandonata in nessun modo. Ora essa sta in ciò che si dimostra invariante nei confronti di questo spostamento. Se la costruzione della nuova fisica ha da riuscire, si deve dare un qualche « punto di Archimede », una qualche base sicura, non minacciata da alcuna « indeterminatezza ». Anche Bohr e Heisenberg hanno insistito ripetutamente sulla necessità di una base siffatta. Nel suo breve quadro riassuntivo intorno allo sviluppo della quanto-meccanica²¹ Heisenberg spiega che anche nella nuova fisica sia il comportamento dell'osservatore sia il suo apparecchio di misura si devono discutere secondo le leggi della fisica classica, perché altrimenti non sussisterebbe nessun problema fisico in generale. Negli apparecchi di misura, egli dice, ogni accadere si considera determinato nel senso della teoria classica, il che costituisce altresì la premessa necessaria per poter inferire univocamente da un dato di misurazione che cosa sia accaduto. In genere, continua Heisenberg, il procedimento della meccanica quantistica consiste nel coordinare a ogni grandezza della meccanica classica, ad esempio all'impulso o all'energia degli elettroni, una matrice corrispondente. Perché movendo da qui venga fuori una pura descrizione dello stato di cose empirico, le matrici coordinate alle diverse grandezze si devono poi allacciare regolarmente fra loro, così come nella meccanica classica le grandezze corrispondenti sono allacciate dalle equazioni del moto. Allora in base a tale procedimento anche nella meccanica quantistica si riesce a dimostrare le leggi che erano fondamentali per la meccanica classica, e specialmente a mantenere valida la costanza temporale dell'energia, dell'impulso e della rotazione. Un'ulteriore de-

²¹ Vedi il volume miscelaneo *Die moderne Atomtheorie*, Leipzig 1934, in cui sono raccolte le conferenze tenute a Stoccolma in occasione dell'accettazione del premio Nobel 1933.

terminatezza e costanza essenziale è data dal fatto che ci si attiene all'immutabilità di certe grandezze fondamentali e che questa immutabilità è presupposta in tutte le descrizioni teoriche dell'accadere naturale. Si fissa un determinato sistema di costanti universali della natura; ad esempio la velocità della luce, la carica o la massa elettronica, la massa del protone, e così via, si considerano grandezze determinate in senso assoluto che hanno sempre lo stesso valore fisso. In tali determinazioni — per dirla nel linguaggio della metafora di Eddington — stanno gli autentici « valori aurei » della nuova fisica. E che la teoria dei quanti non abbia desistito né potesse desistere da questa base aurea, risulta già dal fatto che nella sua formazione e nel suo sviluppo ulteriore essa è interamente legata proprio a questo ideale di metodo. Anzi il vero e proprio risultato su cui essa si fonda, consisté appunto nello scoprire che vi è una costante universale della natura, la quale imprime il proprio marchio su ogni accadere naturale comunque esso sia fatto in particolare. In tutti gli studi e gli esperimenti quantistici si presuppone la validità universale di questa costante, il cui valore numerico risulta sempre da capo il medesimo per vari che siano i metodi della sua verificaione. Tutte le singole determinazioni quali si danno ad esempio nella legge dell'irraggiamento di Planck, nella serie Balmer dello spettro dell'idrogeno, nella formula sul calore atomico e via dicendo, riconducono di nuovo a questa determinazione universale. Il quanto elementare d'azione delimita, per così dire, il quadro fisso in cui si inquadrano tutti gli enunciati della teoria quantistica; e la sicurezza e la saldezza di tale quadro sarebbero già dovute bastare da sole a proteggere l'« indeterminismo » della teoria da quelle libere interpretazioni speculative a cui fu esposto nel passare dalla fisica a conclusioni « generali intorno all'universo ».

Che neppure le relazioni di indeterminazione possano né vogliano uscire da questo quadro del « determinismo quantistico », è evidente. Il loro senso e contenuto auten-

tico infatti si può intendere solo dove si presupponga come data e universalmente valida la salda impalcatura della teoria quantistica. Le relazioni di indeterminazione rinunziano tanto poco ad assumere rigorose leggi di natura che anzi vogliono dare una direttiva sul come giungere a tali leggi e come formularle per soddisfare alle condizioni della nostra conoscenza empirica. Nella prima presentazione delle relazioni di indeterminazione, Heisenberg parte dal notare che tutti gli enunciati fisici in tanto hanno un carattere relativo in quanto non possono mai esprimere lo stato dell'oggetto osservato come tale nel suo puro « in sé » ma solo in relazione al mezzo d'osservazione volta a volta impiegato. La condizionatezza che ne consegue, si può trascurare finché restiamo nel campo della macrofisica; ma acquista un'importanza decisiva non appena ci volgiamo ai fenomeni della microfisica. Qui ci moviamo in un ordine di grandezze in cui la circostanza suddetta non è più oltre trascurabile. È questa dipendenza dal mezzo d'osservazione a impedirci per principio e una volta per sempre di produrre enunciati che oltrepassino un certo limite di determinazione. La conseguenza più importante, significativa anche nell'aspetto gnoseologico, che Heisenberg tira da questo stato di cose, si è che esso non contrassegna solo un limite della nostra tecnica sperimentale, ma un limite della nostra elaborazione di concetti fisici. Ogni qual volta formiamo un concetto fisico, perché esso non sia vuoto o ambiguo, dobbiamo ricordarci di questo limite. Se ad esempio parliamo della « posizione di un elettrone », dobbiamo indicare determinati esperimenti con l'aiuto dei quali si pensa di misurare tale posizione. Dunque si illuminerà l'elettrone per osservarlo, poniamo, a un microscopio. In tal caso risulta che la determinazione di posizione diviene tanto più esatta, quanto minore è la lunghezza d'onda della luce impiegata. Ma quanto più si riduce la lunghezza d'onda, tanto più si fa sentire dall'altra parte la circostanza concomitante dell'effetto Compton: la luce che colpisce l'elettrone e viene riflessa o deviata da questo,

modifica l'impulso $h\nu/c$ dell'elettrone. L'elettrone subisce un rinculo, che è tanto maggiore quanto maggiore è la frequenza, ossia quanto minore scegliamo la lunghezza d'onda della luce. Ne consegue che e perché per principio non è possibile misurare contemporaneamente posizione e velocità dell'elettrone con una qualche esattezza qual si sia. Quanto più precisa si fa la determinazione di posizione, tanto più imprecisa deve divenire la misurazione della velocità, e viceversa. Se designamo con Δx l'errore commesso nel misurare la posizione e con Δmv quello commesso nel misurare l'impulso, si ha che il prodotto delle due grandezze non si può mai portare al di sotto di una certa entità che è dell'ordine di grandezza del quanto elementare d'azione.

Per chiarire il significato gnoseologico della relazione di indeterminazione dobbiamo distinguere lo stato di cose qui presentato dalle conseguenze connesse da Heisenberg. Heisenberg interpreta questa relazione così da farle implicare immediatamente una negazione della legge causale.

Nella formulazione precisa della legge causale « se conosciamo il presente con esattezza, possiamo determinare il futuro » — egli dice — non è erronea la conclusione ma la premessa. Per principio noi non possiamo venir a conoscere il presente in tutti i tratti determinanti... Poiché tutti gli esperimenti sono soggetti alle leggi della meccanica quantistica (e quindi all'equazione $\Delta x \cdot \Delta mv \geq h$), la meccanica quantistica constata definitivamente la non validità della legge causale²².

Quanto contestiamo a questa argomentazione è la sola circostanza che qui si presenti davvero una « formulazione precisa della legge causale ». L'argomentazione di Heisenberg si rivolge esclusivamente contro una determinata versione del principio causale, della quale abbiamo ve-

²² HEISENBERG, *Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik* in « Zeitschrift für Physik », XLIII, 1927, p. 197.

duto che, anche a prescindere affatto dalle relazioni di indeterminazione, è gravata da seri difetti d'ordine teorico. Se al posto di questa formula inesatta mettiamo la versione criticamente corretta quale nella fisica classica è stata data ad esempio da Helmholtz²³, se esprimiamo il postulato della causalità unicamente mediante il postulato generale della legalità, allora le relazioni di indeterminazione heisenberghiane non costituiscono un'istanza ad esso contraria. Proprio nel luogo in cui egli dichiara non valido il principio causale nella versione da lui presupposta, Heisenberg aggiunge che in tutti i casi in cui nella teoria classica sussistono, fra grandezze, relazioni tutte realmente misurabili con esattezza, le corrispondenti relazioni esatte restano valide anche nella teoria dei quanti (principio di conservazione dell'impulso e dell'energia). In realtà già la deduzione e la prova delle relazioni di indeterminazione quali vengono date da Heisenberg, offrono una conferma ulteriore alla tesi che qui non vanno affatto contestati il pensiero e l'inferenza causale come tali. Proprio di questo pensiero infatti fa un uso ben determinato la teoria dell'effetto Compton su cui si basa questa deduzione. In tale teoria, è vero, del meccanismo d'interazione fra elettroni e fotoni non si parla nel senso che si introducano determinate forze d'interazione fra particelle di materia e quanti di luce e si descriva il decorso temporale dei processi in esame nel modo della meccanica solita. Le stesse direzioni in cui la particella e il fotone proseguono dopo l'urto, non si possono determinare rigorosamente. Ma comunque negli urti fra quanti di luce ed elettroni le leggi meccaniche dell'urto per punti materiali si applicano in modo che i risultati finali da un lato si determinano secondo i principî di conservazione dell'energia e dell'impulso, e dall'altro lato secondo la relazione di Planck fra energia e frequenza²⁴. Qui dunque il postulato fondamentale della

²³ Cfr. sopra, p. 94 s.

²⁴ Altri particolari in proposito ad es. in FRENKEL, *Einführung in die Wellenmechanik*, Berlin 1929, cap. I, § 4.

teoria quantistica si lega in modo definitivo e caratteristico coi principî di conservazione dell'energia e della quantità di moto (o « momento » mv), i quali ultimi, come già si è rilevato, vanno considerati puri e tipici « principî causali ». Da questo nesso risulta senza dubbio che le relazioni di indeterminazione non hanno affatto spezzato il ponte fra teoria dei quanti e fisica classica e quindi neppure il ponte fra la prima e il « principio di causalità ». Esse possono sí rettificare la formula di tale principio, ma non possono rinnegare o rovesciare senz'altro il suo contenuto. In che cosa consiste questa rettifica? Quale è il suo vero risultato, significativo per la critica gnoseologica?

Otteniamo una chiara risposta a questa domanda se teniamo presente da un lato il senso delle relazioni di indeterminazione e dall'altro la forma logica del principio causale. Quest'ultima si può esprimere con una pura proposizione condizionale enunciabile nella formula: *se x, allora y*. Che cosa si può dire di questa formula e della sua validità quando nel primo membro della relazione, nel membro x , sia entrata una indeterminazione o « falsità »? In merito già la logica tradizionale risponde che tale falsità non porta necessariamente con sé quella di y e tanto meno lede la validità generale della relazione. Secondo note regole logiche, dalla proposizione *Posita conditione ponitur conditionatum* si può sí derivare per « contrapposizione » la proposizione *Sublato conditionato tollitur conditio*, ma non la proposizione *Sublata conditione tollitur conditionatum*. Aristotele esprime ciò nella forma per cui da premesse vere non si può dedurre nulla di falso ma la falsità di una premessa non dà ancora come conseguenza la falsità della conclusione, nella misura in cui si tratti del solo « che » e non del « perché » di quest'ultima (πλήν οὐ διότι ἄλλ'᾽ἔτι)²⁵. Se dunque le relazioni di indeterminazione ci informano che certi giudizi causali della fisica contengono una premessa falsa, con ciò non è ancora

²⁵ ARISTOTELE, *Analyt. priora* II, 2.

detto nulla intorno alla pura forma dell'argomentazione ipotetica che in essi viene usata. Lo schema conclusivo *se x, allora y* non è abolito: si afferma solo che per rendere tale schema utilizzabile, per renderlo applicabile in fisica, si deve prima verificare in ogni singolo caso se i membri che vi abbiamo introdotto sono grandezze misurabili esattamente. In altre parole, il problema non riguarda la relazione di causalità come tale ma i posti vuoti di questa relazione. Perché la relazione causale acquisti un determinato senso univoco, i valori per l'argomento *x* devono essere valori « ammissibili ». Ma dal punto di vista della fisica sono ammissibili solo i valori determinabili mediante un certo procedimento di misura che si deve indicare con precisione. Il « principio causale » acquista un significato comprensibile per la fisica solo in questa condizione restrittiva e a tale condizione resta limitato l'uso legittimo del principio.

Il principio generale così stabilito non è nuovo, dove si tenga presente il suo contenuto puramente gnoseologico — e ha una lunga e significativa preistoria nella storia stessa della fisica. Newton ha accolto questo principio fra le regole metodologiche fondamentali che egli chiama « *Regulae philosophandi* ». Qui esso si esprime nella forma per cui la fisica dovrebbe ammettere alla spiegazione di fenomeni naturali solo cause « vere » e sufficienti a tale spiegazione: *causas rerum naturalium non plures admitti debere, quam quae et verae sint et earum phaenomenis explicandis sufficient*²⁶. Il postulato della *vera causa* qui a prima vista sembra una sovradeterminazione logica. Ma implica un senso pregnante molto chiaro; esso dichiara fittizia ogni presunta causa che non si possa verificare sperimentalmente per una qualche via, vuoi mediata vuoi immediata. Da allora in poi questo postulato newtoniano della « verifica » è divenuto la massima metodica di tutta quanta l'indagine fisica. Ma l'esempio stesso di New-

²⁶ *Philosophiae natural. princ. math.*, Lib. IIL

ton insegna che con l'enunciazione di questo principio non era ancora garantito affatto che lo si osservasse coerentemente. Infatti il decidere quali grandezze debbano allora valere come « osservabili » in senso stretto, esige un'attenta ricerca in ogni caso singolo. Per Newton il principio di inerzia è senza dubbio un'autentica legge di natura universalmente valida, l'assioma stesso su cui si fonda tutta la sua meccanica. Ma quando si esamina la versione che egli ha dato a questo principio, si trova che essa acquista un senso fisico intelligibile solo se si introduce lo « spazio assoluto » come sistema di riferimento rispetto a cui un « corpo abbandonato a se stesso » deve muoversi di moto rettilineo uniforme. Qui dunque lo spazio assoluto fa da *vera causa*; è vero che esso non è dato immediatamente nell'esperienza, come Newton rileva, ma si possono addurre certi esperimenti, come ad esempio il noto esperimento del filo, mediante i quali possiamo decidere se in determinati casi sia presente un moto assoluto o solo relativo²⁷. Leibniz ha contestato questa affermazione; egli dichiara lo spazio assoluto una grandezza puramente fittizia, che quindi non è lecito accogliere nel formulare le leggi di natura. E in rapporto con questa critica egli riuscì a enunciare per la prima volta esplicitamente in forma generale il principio della « osservabilità » (*principe de l'observabilité*)²⁸ e a trattarlo come un principio metodico fondamentale della fisica²⁹. Ma nel successivo sviluppo di questa, dominato dall'autorità di Newton, sulle prime tale principio resta affatto nell'ombra. Solo negli ultimi decenni del secolo XIX osano emergere i primi dubbi critici contro

²⁷ [Cfr. in proposito E. CASSIRER, *Das Erkenntnisproblem* ecc., trad. it. cit., voi. II, p. 508. — N.d.T.]

²⁸ Vedi Leibniz contro Clarke, lettera V, § 52, in *Hauptschriften*, ed. Cassirer-Buchenau, op. cit., vol. I, p. 188; altri particolari nel mio scritto *Zur Einsteinschen Relativitätstheorie*, Berlin 1921, p. 37.

²⁹ « Herculinum illud argumentum, quod ea omnia quae sintne an non sint a nemine percipi potest, nihil sunt » (*Nouvelles lettres et opuscules inédits*, ed. Foucher de Careil, Paris 1857).

la versione newtoniana del principio di inerzia. Carl Neumann, Mach, Streintz, Ludwig Lange propongono formulazioni diverse tutte intese allo scopo di far concordare il principio di inerzia col principio dell'osservabilità. Si cerca di stabilire un « sistema inerziale » spaziale e una « scala-del-tempo inerziale », ai quali spetti un significato fisico concreto e che si possano esprimere in grandezze osservabili e misurabili³⁰. Ma una soluzione di effettiva validità universale e soddisfacente dal punto di vista gnoseologico venne data al problema solo dalla teoria della relatività generale, e questa soluzione da capo si regge sull'esplicita constatazione che la legge di causalità ha il senso di un enunciato sul mondo empirico solo quando in ultima analisi compaiono come cause ed effetti solo fatti osservabili³¹.

Questo stesso motivo metodico dominante ha condotto Heisenberg a enunciare le relazioni di indeterminazione. Ma qui in realtà c'era da assolvere un compito nuovo perché nel frattempo, col passaggio alla fisica atomica, il problema aveva assunto una nuova forma. Planck una volta ha giustamente fatto notare che la decisione se una grandezza fisica sia osservabile in linea di principio o se una certa questione abbia un senso per la fisica, non si può mai prendere a priori ma sempre solo dal punto di vista di una determinata teoria: la differenza tra le diverse teorie starebbe appunto in questo: che secondo l'una teoria una certa grandezza è osservabile per principio, una certa questione ha un senso fisico, e secondo l'altra teoria non lo è o non l'ha³². Le relazioni di indeterminazione di Heisenberg hanno posto il problema e dato per la prima volta una risposta netta e precisa dal punto di vista della teoria quantistica. Esse mostrano che i principî generali

³⁰ Per il significato gnoseologico di questi tentativi di definizione cfr. il mio scritto *Substanzbegriff und Funktionsbegriff*, Berlin 1910, p. 230 ss.

³¹ EINSTEIN, *Die Grundlagen der allgemeinen Relativitätstheorie*, 1916, § 2.

³² *Das Weltbild der neuen Physik*, 1929 [trad. it. E. Casari, Milano 1960]; *Wege zur phys. Erkenntnis*, p. 199 ss.

della teoria quantistica escludono una volta per sempre la possibilità di misurare contemporaneamente con precisione qualsiasi determinate coppie di grandezze, come la posizione e l'impulso dell'elettrone, l'intensità elettrica e quella magnetica del campo in una piccola porzione di spazio, e così via. Con ciò l'applicazione del principio causale nella teoria dei quanti è sottoposta a una condizione da cui la fisica classica non era toccata direttamente e nel proprio ambito, nel campo dei « macrofenomeni », poteva prescindere. Ma l'introduzione di tale condizione restrittiva non significa affatto l'abolizione del principio causale; essa fa solo notare che per restare utilizzabile e fecondo nella fisica, in ogni passaggio a un nuovo campo di problemi della conoscenza della natura tale principio ha bisogno di una nuova analisi rigorosa. Solo un'analisi siffatta può impedire che nella formulazione del principio causale si insinuino elementi per principio inosservabili, che quindi ne renderebbero illusoria l'applicazione. Di tutte le diverse esplicazioni del concetto di causalità date dalla *Critica della ragion pura* la più precisa e soddisfacente è forse quella in cui si dice che tale concetto comporta solo una direttiva per la formazione di determinati concetti empirici. « Che tutto ciò che avviene abbia una causa, non può ricavarsi a nessun patto dal concetto di ciò che avviene in generale; piuttosto il principio dimostra come di ciò che accade si possa primieramente formare un determinato concetto empirico »³³. A questa constatazione le relazioni di indeterminazione hanno raggiunto qualcosa di nuovo e di molto importante nel riguardo gnoseologico. Hanno mostrato che nel passare a nuove sfere di problemi della conoscenza scientifica della natura non è lecito adottare semplicemente e portarsi dietro i vecchi concetti bensì che per riuscire applicabili incontraddittoriamente essi hanno bisogno in ogni caso di una nuova definizione e inter-

³³ *Critica della ragion pura*, 2^a ed. tedesca, p. 357; ed. Cassirer, voi. III, p. 249; trad. it. cit., I, p. 296.

pretazione. Pertanto anche se teniamo fermo il principio generale di causalità, nel progresso ai fenomeni e ai problemi della fisica atomica ci dobbiamo anzi tutto render conto di come, nelle condizioni mutate, possiamo valerci di questo principio così che esso soddisfi al suo compito generale — così che esso ci insegni a formare un « determinato concetto empirico » di ciò che accade. Non possiamo raggiungere questo scopo con un dogmatico verdetto d'imperio; nell'enunciare determinati concetti empirici dobbiamo per forza lasciarci guidare dall'esperienza stessa. Se l'esperienza mostra che alla nostra osservazione sono posti dei limiti ben definiti, formulabili esattamente, non dobbiamo trascurare ad arbitrio questi limiti nella nostra elaborazione concettuale empirica. Piuttosto dobbiamo dare ai nostri giudizi causali una versione tale che essi restino compatibili con quei limiti: tale che essi rispettino le nuove condizioni che ora si presentano per l'applicazione del pensiero e dell'inferenza causali. Questa appunto, a mio avviso, è stata la via seguita dalla meccanica quantistica. Essa non ha affatto rinunciato al postulato della *d e t e r m i n a z i o n e* come tale, ma ha dovuto elaborare nuovi mezzi concettuali per soddisfarlo e per potersi inoltrare felicemente, per mezzo di esso, nel campo di fatti testé dischiuso. L'equazione ondulatoria di Schrödinger, lo schema quadratico di Heisenberg, la meccanica delle matrici di Born e Jordan, i numeri di Dirac sono i mezzi concettuali con cui rendere possibile un rigoroso coordinamento delle grandezze osservabili. In questo senso lo stesso Heisenberg ha posto una « legge causale della meccanica quantistica » per cui, se in un tempo qualsiasi si misurano certe grandezze fisiche con la massima precisione possibile in linea di principio, anche in ogni altro tempo vi sono grandezze il cui valore può essere calcolato esattamente, per le quali cioè si può predire con precisione il risultato di una misurazione³⁴. Così la determinazione è ristabilita; ma essa vale

³⁴ *Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie*, p. 45 [trad. it. M. Ageno, Torino 1948].

solo per ciò che nella meccanica quantistica si designa come « puro caso », per quelle misurazioni che secondo i principi quantistici non sono più suscettibili di una precisione maggiore.

Se guardando più da vicino si vede che quanto le relazioni di indeterminazione porgono al concetto di causalità è medicina e non veleno; se tali relazioni, intese rettamente, portano a un raffinamento del concetto piuttosto che alla sua eliminazione, integrandolo col postulato aggiuntivo della « osservabilità », con ciò tuttavia non siamo ancora alla fine del problema ma sempre solo all'inizio. La difficoltà infatti riemerge da un altro lato — invece che alla formulazione del concetto causale essa si riferisce alla definizione del concetto di realtà proprio della fisica. E qui pare che ricadiamo da Scilla in Cariddi. A che giova il nostro porre in relazione i « puri casi » della meccanica quantistica in un modo del tutto corrispondente agli ideali « classici », a che giova poter passare dagli enunciati di misura a rigorosi enunciati di legge, se cionondimeno i primi restano affetti da una indeterminatezza di principio e se quindi la traduzione dei dati del mondo sensibile nel mondo fisico e la ritraduzione inversa da questo a quello non si possono più compiere nel modo fin qui possibile e garantito? E tale conseguenza sembra doversi tirare per davvero. Heisenberg le dà espressione in modo che nel descrivere processi atomici si deve fare un taglio netto fra gli apparecchi di misura dell'osservatore e l'oggetto d'osservazione. Su entrambi i lati di questo taglio, tanto su quello che porta all'osservatore quanto sull'altro che comprende l'oggetto dell'osservazione, tutti i nessi sono strettamente determinati: sul primo lato dalle leggi della fisica classica secondo cui vanno descritti gli apparecchi di misura, sul secondo dalle equazioni differenziali della meccanica quantistica. Ma nel punto del taglio subentra un'incertezza, perché l'azione del mezzo di osservazione sull'oggetto da osservare va intesa come un disturbo non pienamente controllabile. In tal modo incontrollabile.

labile per principio è mutata ad esempio la velocità dell'elettrone dal semplice fatto dell'osservarlo e dalle onde di luce impiegatevi, per via dell'effetto Compton. Secondo Heisenberg ciò significa che dobbiamo rinunciare definitivamente, non solo in via provvisoria, all'idea di eventi oggettivi nello spazio e nel tempo, indipendenti da ogni osservazione. « La speranza di rintracciare l'accadere oggettivo nello spazio e nel tempo con nuovi esperimenti non sarebbe più giustificata della speranza di trovare l'estremità ultima del mondo nelle zone inesplorate dell'Antartide ». In tali ragionamenti Heisenberg vede una sintesi di fisica e filosofia, un avvicinamento e una conciliazione delle loro rispettive impostazioni del problema; ma la filosofia avrebbe mostrato da tempo memorabile le difficoltà di fondo connesse con la separazione del mondo in soggetto e oggetto³⁵.

Ma in che modo la meccanica quantistica interviene nello sviluppo del problema soggetto-oggetto, e quale è il contributo che essa ha da recare a tale sviluppo? Rispondere a questa domanda non è affatto semplice; è possibile solo sulla base d'una analisi approfondita, di ordine sistematico e insieme storico. Già un simile addentellarsi immediato di problemi fisici e gnoseologici a prima vista potrebbe sorprendere. In un passato non ancora molto remoto, sia sul piano filosofico sia su quello della fisica si sosteneva la tesi che la fisica dovesse svolgere il suo concreto lavoro scientifico del tutto indipendentemente da qualsiasi considerazione gnoseologica. Si dichiarava che in nessun caso la scienza della natura avrebbe potuto prendere per base un qualunque concetto del mondo che non fosse quello del « buon senso », e che questo la obbligava inevitabilmente a un certo « realismo ingenuo ». Essa dunque non avrebbe bisogno di impegnarsi in « sottigliezze » gnoseolo-

³⁵ HEISENBERG, *Physikal. Prinzipien* cit., p. 49; cfr. *Wandlungen* cit., p. 13 ss.; vedi anche il suo breve saggio *Prinzipielle Fragen der modernen Physik* in « Neuere Fortschritte in den exakten Wissenschaften », Leipzig-Wien 1936, p. 91 ss.

giche di sorta e farebbe bene a evitare la loro discussione, che per lei sarebbe piú dannosa che utile. Ma già nel quadro della fisica classica tale concezione non si poté mantenere. Già in pensatori come Mach, Helmholtz o Heinrich Hertz subentrò in proposito un rovesciamento decisivo. In Mach la problematica fisica e quella gnoseologica sono intrecciate a tal punto che fra le due non si può tirare una linea netta di separazione in nessun luogo, e ben difficilmente si potrebbe indicare dove finisca l'una e cominci l'altra. Né Helmholtz ha mai considerato il proprio lavoro in campo gnoseologico come una semplice via laterale o secondaria della propria indagine scientifica; piuttosto ha dichiarato che fondare le premesse della conoscenza della natura costituisce un'aspirazione comune alla fisica e alla filosofia, una richiesta a cui nessuna epoca potrebbe sottrarsi impunemente. Ma d'altra parte proprio la teoria di Helmholtz presenta un tratto caratteristico che accenna a una differenza nella concezione della fisica classica e della fisica atomica. Helmholtz è l'ultimo grande rappresentante della concezione meccanicistica della natura, che veramente egli non presuppone affatto in modo dogmatico, ma che sta sullo sfondo di tutte le sue trattazioni gnoseologiche e dà ad esse la loro colorazione specifica. Dal punto di vista di tale concezione della natura dobbiamo considerare la materia il reale ultimo da descrivere nei nostri concetti scientifici. Tale descrizione non si può mai concepire come un semplice riproduzione; piuttosto essa ha un carattere puramente simbolico. Che cosa «è» in realtà e in sostanza la materia non si può esprimere altrimenti che nel linguaggio segnico dei nostri sensi. Pertanto il concetto di segno [*Zeichen*] diviene per Helmholtz quello fondamentale della gnoseologia scientifica della natura. « Il principio basilare della prospettiva empirica — così Helmholtz riassume alla fine dell'*Ottica fisiologica* il risultato complessivo delle sue ricerche — è questo: che per la nostra coscienza le percezioni sensibili sono segni di cui è lasciato in facoltà al nostro intelletto imparare a intendere

il significato »³⁶. Così fra conoscenza e realtà effettuale si stabilisce un saldo nesso e una corrispondenza totale che tuttavia implica insieme un rigido dualismo. Per quanto infatti possiamo ampliare e raffinare il sistema segnico dei nostri concetti, in esso abbiamo sempre solo un'espressione mediata della realtà. L'oggettivamente reale è da presupporre come un qualcosa che sussista, una sostanza; ma in questa sua esistenza sostanziale non può mai entrare nel linguaggio segnico dei nostri concetti della natura. Tale linguaggio può riprodurre sempre solo le relazioni tra singoli fenomeni, non il *substrato* universale che vi sta alla base. Il presupposto della necessità di un *substrato* siffatto, di un saldo nocciolo della realtà a cui le relazioni aderiscono, è eredità della concezione meccanicistica del mondo. I fenomeni fisici si riconoscono a pieno col ridurli a puri fenomeni di moto; ma questi ultimi non si possono intendere senza l'assunto di un « portatore » materiale. Tale portatore costituisce in certo modo un nocciolo fisso a sé stante contro cui viene a urtare la nostra conoscenza e di fronte al quale essa è costretta a fermarsi. Essa lo deve ammettere senza mai poterlo comprendere per intero. La luce della conoscenza si può diffondere sempre più oltre, a illuminare la realtà con rigore e precisione sempre maggiori, ma può sempre tastarla, per così dire, solo da fuori e non penetrarla veramente. Infatti per quanto si addentri il cono di luce, dietro vi resta sempre un ultimo residuo oscuro che si nasconde al nostro sguardo. Dunque il sostanzialismo, essenziale alla concezione meccanicistica della natura, comporta sempre un tratto di agnosticismo: l'*Unknowable*, l'inconoscibile diviene un presupposto della conoscenza stessa.

Ho cercato altrove di esporre come questa concezione « sostanzialistica » si muti gradatamente — come il concetto di sostanza sia respinto e sostituito sempre più dal puro concetto di funzione. In tali considerazioni

³⁶ *Handb. der physiolog. Optik*, 2^a ed., 1896, p. 947 ss.

mi sono limitato allo sviluppo e alla problematica della fisica classica³⁷; ma esse si sarebbero potute cogliere in modo molto piú breve e preciso, se all'epoca in cui furono avanzate fossero già comparse la teoria della relatività generale e la moderna fisica atomica. Oggigiorno tale processo di pensiero è ormai condotto a conclusione sicura e, a quanto sembra, definitiva. Nello scritto *Che cosa è la materia?* Hermann Weyl dice essere sua convinzione che oggi la sostanza abbia finito di svolgere la sua parte nella fisica. « La pretesa di quest'idea concepita da Aristotele come idea metafisica, di esprimere l'essenza della materia reale — la pretesa della materia di essere sostanza incarnata, è illegittima ». Ciò risalta chiaramente già nel passaggio alla teoria del campo. Il campo infatti è un insieme di pure azioni, di pure relazioni fra « linee di forza » che non sono piú legate necessariamente a un substrato materiale, bensí definiscono l'accadere fisico quasi in libera congiunzione reciproca. Nella teoria del campo, come ha detto Weyl, in un certo senso il continuo spazio-temporale si è addossato la parte della sostanza: « il questo darsi solo con un'indicazione individuale, non caratterizzato qualitativamente, per essa non è piú un portatore nascosto a cui ineriscano le qualità, ma il "qui-ora" dei singoli luoghi spazio-temporali ». Certo anche qui il passaggio si è compiuto solo per gradi: la precedente teoria del campo come ad esempio figura alla base dell'elettronica di Lorentz e Abraham, rappresenta ancora l'elettrone come una sfera rigida ai cui elementi spaziali la carica elettrica è rigidamente legata. Ma a poco a poco prevale anche qui la visione dinamico-funzionale; la massa, specialmente dopo le risultanze della teoria della relatività generale, non appare piú un essere indipendente, ma si risolve nella carica elettrica³⁸.

Con ciò è mutata radicalmente anche la situazione gno-

³⁷ Cfr. *Substanzbegriff und Funktionsbegriff* cit., specialmente il cap. IV.

³⁸ Cfr. H. WEYL, op. cit., p. 17 ss., 41 ss.

seologica generale della fisica; e di questo mutamento non vi è da tener conto altrimenti che mediante una definizione diversa e nuova del concetto fisico di oggetto. Ora nessuna via riconduce piú a quel « realismo ingenuo » che per l'addietro si era potuto raccomandare alla fisica come il punto di vista naturale e ad essa adeguato; la fisica si vede indirizzata necessariamente sulla via della verifica, dell'analisi critica rigorosa dei propri procedimenti sia concettuali che di misurazione. Le relazioni di indeterminazione sono solo un singolo passo, certo particolarmente significativo, in questo processo di verifica. Uno dei risultati essenziali di tale processo sta nel fatto che d'ora in poi in un certo senso il rapporto fra i concetti di oggetto e di legge si rovescia. Ora il concetto di legge viene *preordinato* al concetto di oggetto, mentre prima gli era subordinato e aggiunto successivamente. Nella concezione sostanzialistica si dava un essere rigidamente definito che possedeva certe proprietà costanti ed entrava con un altro essere in determinate relazioni le quali erano espresse dalle leggi di natura. Nella prospettiva funzionale invece questo essere non costituisce piú il punto di partenza per sé evidente ma il punto d'arrivo a cui mira la considerazione: da *terminus a quo* esso è divenuto il *terminus ad quem*. Noi non possediamo piú un essere a sé stante, determinato in assoluto, da cui poter cogliere direttamente le leggi ed a cui « farle aderire » a titolo di suoi attributi. Quanto in realtà costituisce il contenuto del nostro sapere empirico è piuttosto l'insieme delle osservazioni che raccogliamo in determinati ordini e possiamo rappresentare, nell'ordine loro, mediante concetti teorici di leggi. Quanto si estende il dominio di tali concetti, altrettanto si estende il nostro sapere oggettivo. C'è « oggettività » o « realtà » oggettiva perché e nella misura in cui c'è legalità — senza viceversa. Donde viene che non possiamo parlare di un « essere » fisico se non nelle *condizioni* della conoscenza fisica, vuoi le sue condizioni generali vuoi quelle particolari vigenti per le sue osservazioni e misurazioni. Così da una parte

questo essere ha perduto la sua fissità definitiva; è venuto in certo modo a includersi nel processo conoscitivo della fisica ed è ancora pensabile solo come il limite a cui tale processo tende senza raggiungerlo mai pienamente. Da determinato in assoluto ora esso è divenuto un indefinitamente determinabile. Ma dall'altra parte proprio tale apparente limitazione si dimostra un'importante e feconda qualificazione del tutto *positiva*. Infatti quel presunto « nocciolo oscuro » dell'essere a cui la scepsi poteva sempre rinviare e nel quale poteva in certo modo annidarsi, ora è svanito. L'« essere » della fisica, il suo oggetto empirico, certo non è mai dato in modo definitivo, perché non si finisce mai di definirlo; ma dall'altro lato neppure ci minaccia più oltre come un misterioso assoluto di cui non poter penetrare le ragioni ultime. Ora infatti la proprietà di lasciarsi determinare empiricamente e teoricamente è assunta nella sua stessa definizione; invece di esprimerne solo un singolo tratto accidentale, essa *costituisce* l'essere fisico. Noi non cogliamo semplicemente le leggi « degli oggetti » ma comprimiamo i dati empirici accessibili a osservazioni e misurazioni, in leggi e dunque in enunciati oggettivi, né al di fuori di questi esiste per noi alcuna realtà oggettiva di cui s'abbia da andare in cerca per indagarla.

Nella moderna teoria dei quanti questo stato di cose ha trovato una nuova e memorabile conferma. A prima vista essa sembra aver bisogno di un concetto rigido e « fisso » di sostanza più di qualsiasi altra teoria fisica, e non potersene staccare. Il suo vero problema è quello dell'accadere atomico — e il concetto di atomo è valso già da tempo immemorabile come l'autentico modello esemplare, il prototipo del pensiero sostanzialistico. È per l'appunto la *stabilità* dell'atomo a costituire il problema di fondo della fisica atomica: e come si può tener conto di tale stabilità nella teoria quando si rinuncia all'assunto della sostanzialità e non si concepiscono più gli atomi come sfere rigide? Qui si presentava senza dubbio un compito difficile — ma è caratteristico della moderna teoria dei

quantí proprio il progressivo superamento di questo compito sia sul piano logico che su quello fisico. Fin dall'inizio essa non poté piú attenersi alla precedente interpretazione dell'atomo, alla sua individuabilità. Dovette lasciar cadere la « semplicità » dell'atomo, costruirlo concettualmente come una struttura molto complicata. Da semplice concetto cosale quello di atomo diviene un concetto relazionale e sistematico. Abbiamo visto che la concezione di fondo della nuova fisica preordina il concetto di legge a quello di cosa; che cos'è una « cosa » si può dunque descrivere solo adducendo le leggi per essa vigenti. Ma le prime leggi che si poterono avanzare per la costituzione dell'atomo, nella struttura e complessione loro si dimostrano simili alle leggi del moto dei pianeti: la teoria di Bohr della serie Balmer si poté sviluppare in stretta analogia con le leggi di Keplero sulle orbite dei pianeti³⁹. Ne viene subito che il problema della « stabilità » dell'atomo acquista una forma molto piú complessa e non si può piú risolvere con gli stessi semplici mezzi di prima. Nella teoria classica gli atomi di fatto si potevano considerare gli elementi primi delle cose, le ultime pietre da costruzione della natura. Allora il compito consisteva nell'enunciare per l'attività di questi elementi, per l'urto degli atomi, certe semplici leggi fondamentali che bastassero a spiegare l'accadere fisico. La teoria dei quanti non poté adottare la soluzione classica del problema. Per essa in ogni caso l'atomo non è tanto un semplice esistere quanto piuttosto un sistema di forze sommamente intricato. Per intendere tale sistema come un tutto stabile, le occorrono degli assunti di fondo dai quali appaia garantito il relativo equilibrio del sistema stesso. E tali assunti non si fondano su ipotesi intorno alla « rigidità » o alla « durezza » assoluta dell'atomo, ma si deducono dalla premessa del postulato dei quanti. Ecco dunque come ciò che rende possibile la soluzione del proble-

³⁹ Questa analogia è svolta con rigore ad es. nell'esposizione di SOMMERFELD, *Atombau und Spektrallinien* cit., cap. II, § 4.

ma non sia il porre una proprietà cosale non deducibile piú oltre, ma l'appello a un principio. « Dall'atomo — dichiara Bohr corrispondentemente — dobbiamo esigere una stabilità che rappresenta un tratto del tutto eterogeneo rispetto alla teoria meccanica. Le leggi meccaniche permettono una variazione continuativa dei moti possibili, la quale è assolutamente incompatibile con la determinazione delle proprietà degli elementi ». E per questa via egli è condotto a enunciare il suo postulato fondamentale della teoria della struttura atomica: è condotto ad assumere che un sistema atomico ha una certa varietà di « stati stazionari » ai quali in genere corrisponde una serie discreta di valori energetici e la cui peculiare stabilità si esprime in ciò: che ogni mutamento di energia dell'atomo deve consistere in una transizione dell'atomo stesso da uno stato stazionario all'altro⁴⁰. Al posto di una qualsivoglia rappresentazione senso-cosale della natura dell'atomo, nella teoria di Bohr subentra dunque la caratteristica condizione di frequenza per cui il mutamento di energia di un sistema atomico e la frequenza di un'onda luminosa sono allacciate da una determinata equazione: $h\nu = E_1 - E_2$ ⁴¹. La prova empirica della fecondità di questa teoria si ebbe quando si riuscì a calcolare nell'atomo d'idrogeno i livelli energetici discreti in modo tale che proprio questa condizione di frequenza conduceva esattamente allo spettro dell'idrogeno secondo la formula di Balmer.

Con ciò s'era fatto il primo passo, e un passo di importanza fondamentale. Il modello atomico di Bohr permetteva ora di metter piè fermo, per così dire, nel campo della fisica atomica. Era il « punto di Archimede » che le occorreva necessariamente. Si raggiungeva una straordinaria concentrazione del sapere fin qui acquisito; si dava la deduzione dell'equazione di Balmer, della costante R di Rydberg, del principio di combinazione di Ritz. L'assetto

⁴⁰ *Atomtheorie und Mechanik* (1925) cit., p. 19 ss.

⁴¹ [Così riporta il testo originale. L'equazione corrente è $\Delta E = h\nu = E_2 - E_1$. — N.d.T.].

del sistema periodico degli elementi ora riusciva nel modo piú semplice e perspicuo con l'eguagliare il numero degli elettroni dell'atomo al numero atomico, cioè al numero d'ordine dell'elemento nel sistema naturale. E tuttavia in questa *p r i m a* versione della teoria di Bohr restava una parte non pienamente chiarita sul piano teorico e destinata a dare adito a dubbi specialmente nella critica gnoseologica. In tale versione infatti si pongono certi « casi » senza indicare come sia possibile addivenire a un loro accertamento empirico. Nelle orbite stazionarie, dello « stato fondamentale » dell'atomo, l'elettrone si muove costantemente senza dar luogo a nessun irraggiamento: « l'elettrone è per così dire immunizzato quantisticamente contro l'irraggiamento » (Sommerfeld). Ma come si concilia questa « immunizzazione » col postulato fondamentale della « osservabilità », quando viceversa l'irraggiamento è l'unica via a noi accessibile per aver notizia dell'elettrone? Ecco aprirsi una lacuna che col tempo divenne sempre piú sensibile. Lo stesso Bohr ha riconosciuto esplicitamente tale lacuna in lavori successivi dichiarando che, secondo i postulati di fondo assunti in origine, i connotati delle immagini meccaniche, come il numero delle rivoluzioni e la forma delle orbite elettroniche, non sono accessibili all'osservazione diretta. Nulla varrebbe a sottolineare meglio il carattere puramente simbolico di tali immagini — egli aggiunge — della circostanza che dallo stato normale non ha luogo alcun irraggiamento, benché si attribuisca un moto all'elettrone anche in questo stato⁴². Ciò che qui è particolarmente significativo dal punto di vista puramente gnoseologico, è il vederci condotti allo stesso dilemma che incontriamo sempre di nuovo nella storia della fisica. Nelle orbite stazionarie dell'elettrone si pone ancora una volta un *e s s e r e* cui non corrisponde nessun *a g i r e*. Sembra di bel nuovo che ci dobbiamo accontentare di un oscuro campo dell'essere, sottratto per principio alla nostra osservazione;

⁴² *Ibidem*, p. 23.

il « nocciolo » sostanziale riafferma la sua priorità su tutto quanto ci è accessibile in base ai nostri mezzi di misura e di conoscenza fisica.

E anche qui dalla difficoltà non si dava altra via d'uscita che quella di verificare e rettificare radicalmente l'impostazione del problema. Invece di lamentarci di non afferrare l'« interno della natura », dobbiamo chiarire che per noi non esiste altro « interno » se non quello che ci si dischiude per osservazione e analisi dei fenomeni. È questo processo del sapere empirico a definire volta per volta l'orizzonte dell'essere oggettivo — un orizzonte che si sposta a ogni nuovo progresso del sapere. Il vantaggio della meccanica quantistica è l'aver tenuto conto di questo postulato metodico con molto più rigore e di averlo seguito con molto maggior coerenza di quanto non fosse avvenuto prima. Nella sua impostazione del problema essa rinuncia a rappresentare l'accadere dell'interno dell'atomo e a raffigurarlo con un qualsiasi modello intuitivo. Essa si limita a quelle grandezze che sono accessibili all'osservazione, come le frequenze e le intensità delle righe spettrali. Ora la teoria non si costruisce su assunti intorno all'« interno » sostanziale degli atomi ma su relazioni funzionali intercorrenti fra queste grandezze osservabili. Lo schema quadratico di Heisenberg è sorto da questa visione di principio. In esso si trova una forma chiara e netta, matematicamente precisa, per tutto ciò che si può cercare in merito all'interno dell'atomo. Si indica un metodo con cui addurre esattamente e compiutamente le sole relazioni funzionali che ci sono accessibili. Non compaiono più enunciati sulla posizione dell'elettrone, sul suo periodo di rivoluzione, sulla forma dell'orbita; la « realtà » dell'elettrone non si deve fondare su altro, anzi non deve consistere in altro che le leggi da noi enunciabili sull'irraggiamento. La stessa meccanica ondulatoria di Schrödinger non si differenzia dal calcolo delle matrici in questa concezione di principio. Anche Schrödinger tien fermo che non vi è né può esservi altra definizione dell'essere fisico se non

mediante le leggi della fisica. Che esistano « realmente » degli elettroni e che essi percorrano certe orbite non vuol dire altro, come afferma esplicitamente lo stesso Schrödinger, se non che valgono le leggi che deduciamo dagli esperimenti con raggi catodici e da altre osservazioni⁴³. Per noi non c'è altra « realtà » fisica che quella di cui ci sono mediatrici le determinazioni fisiche di misura e quelle di legge, che in tanto risultano « oggettive » in quanto sono fondate sulle prime.

Che dunque non possiamo uscire dalla sfera dei concetti teorici di base e dei dati di misura sperimentali, che nell'uno come nell'altro caso non possiamo « saltare oltre la nostra ombra », è ben evidente. Ma per qualificare questo un difetto della nostra conoscenza fisica, dovremmo prima saper indicare che cosa qui propriamente ci manchi e in che cosa consisterebbe quel sapere « assoluto » che ci è vietato. Ma già il solo tentativo di dare un'indicazione siffatta ci involgerebbe in contraddizioni. La questione pertanto non sta altrimenti che nelle determinazioni assolute di spazio e tempo, in rapporto alle quali Maxwell diceva che nessuno si lamenterebbe di non sapere, se avesse mai tentato di rappresentarsi lo stato d'una mente che sia consapevole di conoscere la posizione assoluta di un punto (cfr. sopra, p. 68). Va ammesso che in questa versione del concetto di sapere oggettivo in un certo senso ci muoviamo

⁴³ *Conceptual Models in Physics*, loc. cit., p. 123. — Qui si deve far notare che tale definizione non si limita agli oggetti « fisici » ma vale allo stesso modo per le « cose » della « esperienza quotidiana ». Neppure queste sono mai « date immediatamente » come assumono alcune correnti del positivismo, ma sono risultati di un allacciamento secondo leggi, di una « costruzione logica ». Russell fra i logici contemporanei ha formulato nel modo più netto questo stato di cose. Le cose della percezione secondo lui non sono dati « duri » (« hard data »); piuttosto esse richiedono di essere analizzate e sono analizzabili. I concetti di cosa secondo Russell sono « concetti di classi » (classi di « aspetti ») e questi portano di nuovo a « concetti di legge ». « Le cose sono quella serie di aspetti che ubbidiscono alle leggi della fisica »; vedi *Our Knowledge of the External World*, terza conferenza.

in un circolo; ma questo non è affatto un *circulus vitiosus*. Anzitutto esso consiste in ciò: che non possiamo separare nettamente le osservazioni sperimentali e gli enunciati di legge e di principî, che non possiamo esibire le prime nel loro puro « darsi » fattuale, indipendentemente da ogni assunto teorico. Così, ad esempio, la restrizione dei nostri enunciati di misura posta nelle relazioni di indeterminazione vale sempre solo in rapporto al principio dei quanti e al formalismo generale della meccanica quantistica. Se un giorno si desse una ragione empirica per abbandonare tale principio e sostituirlo con un altro assunto di fondo, anche la questione della « osservabilità » entrerebbe subito in una luce nuova. Qui sussiste appunto quel « reciproco intreccio » dei singoli momenti del sapere, che, come abbiamo visto precedentemente, non è una condizione tale da paralizzare la nostra conoscenza della natura. Anche la teoria dei quanti ha confermato sotto un aspetto nuovo la verità del detto goethiano che « ogni fatto è già una teoria ». Prima della fisica la gnoseologia generale ha urtato nel circolo apparente che per provare la verità della conoscenza ci dobbiamo già servire dei mezzi la cui validità va dimostrata e garantita da questa stessa prova critica. Da tale dilemma pare non esservi scampo e a prima vista esso sembra rendere illusorio ogni tentativo di « critica della ragione ».

Quale sia il contenuto della verità — così espone il problema Lotze nella sua *Logica* — si può trovare sempre solo con un'autoriflessione del pensiero che commisura e mette alla prova incessantemente le proprie prestazioni singole sul metro delle leggi universali del proprio operare. Preoccuparsi del circolo presente in questa situazione non solo non serve a nulla, dal momento che la sua inevitabilità è ormai di un'evidenza palmare, ma è anche superfluo perché... non potremo mai giungere a osservare il danno che tale oscura diffidenza teme venire da quel lato... Visto che questo cerchio è inevitabile, vi si deve entrare senza timore, e in primo luogo cercar di stabilire che cosa possa significare la conoscenza secondo

il suo concetto piú generale, e quale rapporto sia pensabile — in conformità a rappresentazioni sia pure ancor piú generali — fra un soggetto conoscente e l'oggetto del suo conoscere, secondo cui pensare l'azione di ciascun elemento sull'altro⁴⁴.

Queste parole valgono per la conoscenza fisica come per quella logica. E il profitto gnoseologico piú importante delle relazioni di indeterminazione sta forse in ciò: che esse, avendo richiamato energicamente l'attenzione sul circolo, ci hanno insieme insegnato a « entrarvi senza timore ».

Il pericolo da cui sembra qui minacciato il concetto fisico di oggetto, scompare quando si è appreso a tenerlo chiaramente presente; la relatività non resta una semplice macchia ma diviene una forza positiva da cui dipende ogni fecondità del sapere fisico⁴⁵.

I dubbi e gli scrupoli vengono meno — così ho cercato di esprimere un tempo lo stato di cose, e mi sia permesso di ripetere qui tale formulazione che i problemi della moderna fisica atomica sembrano confermare e illustrare sotto un altro aspetto — non appena si rifletta che proprio quanto qui appare il residuo non inteso della conoscenza, in realtà rientra in ogni conoscenza da fattore indispensabile e da condizione necessaria. Conoscere un contenuto significa improntarlo a oggetto togliendolo dal semplice stadio di dato per conferirgli una definita costanza e necessità logica. Dunque non conosciamo « gli oggetti » — quasi fossero definiti e dati come oggetti già prima e indipendentemente — ma conosciamo oggettivamente in quanto nel decorso uniforme del contenuto empirico introduciamo certe delimitazioni e fissiamo certi elementi e nessi di allacciamento costanti. Se il concetto di oggetto si prende in questo senso, non

⁴⁴ LOTZE, *Logik*, 2^a ed., Leipzig 1880, pp. 492 ss., 525.

⁴⁵ Intorno al « circolo dell'indagine fisica » cfr. le eccellenti osservazioni di E. WIND, *Das Experiment und die Metaphysik*, Tübingen 1934; certo io non posso aderire alle conseguenze sistematiche che il Wind tira da tale circolo per la relazione in cui porre la fisica e la metafisica.

vi è piú alcun limite del sapere... Esso contrassegna il patrimonio logico del sapere stesso — non un oscuro al di là che gli si sottragga ora e per sempre. Cosí la « cosa » non è piú il fatto ignoto che ci sta di fronte come pura materia, ma un'espressione per la forma e la modalità del comprendere. Tutto quanto la metafisica attribuisce alle cose in sé e per sé come loro proprietà, ora si dimostra un momento necessario nel processo dell'oggettivazione. Solo movendo da questo nesso si spiega la peculiare instabilità emergente nel contenuto dei concetti fisici di oggetto. A seconda che la funzione, unitaria nel fine e nella essenza, dell'oggettività si compie con materiale empirico diverso, sorgono concetti diversi della realtà fisica, i quali nondimeno sono solo stadi diversi nell'adempimento di una medesima esigenza fondamentale. Veramente immutabile resta solo questa esigenza stessa, non il mezzo con cui essa viene soddisfatta di volta in volta. In questo senso la dottrina critica dell'esperienza vuol essere, per cosí dire, la teoria generale delle invarianti dell'esperienza... Come in una determinata figura il geometra mette in evidenza e osserva le relazioni che restano immutate in certe trasformazioni, cosí qui si cerca di scoprire quegli elementi formali universali che si conservano in ogni avvicinarsi dei contenuti empirici particolari... Il fine dell'analisi critica sarebbe raggiunto quando si riuscisse a evidenziare in questo modo l'ultima struttura comune di tutte le forme possibili dell'esperienza scientifica, cioè a fissare in concetti quei momenti che nel procedere da teoria a teoria permangono perché sono le condizioni di ogni teoria ⁴⁶.

⁴⁶ *Substanzbegriff und Funktionsbegriff* cit., pp. 403 s., 356 s. Con questa concezione, che si fondava su considerazioni gnoseologico-critiche affatto generali e attingeva il proprio materiale di prova esclusivamente dalla « fisica classica », si confronti ora il programma della fisica teorica moderna cosí come ad es. lo ha fissato Dirac nei *Principles of Quantum Mechanics*. « Per formulare le leggi fondamentali della natura — vi si dice — ci occorre la teoria della trasformazione. Le cose essenziali compaiono nel mondo come invarianti di queste trasformazioni... Il nocciolo del nuovo modo di procedere della fisica teorica è l'impiego in estensione generale della teoria della trasformazione, divenuta tanto importante prima per la teoria della relatività e in seguito per la teoria dei quanti » (p. v della prefazione dell'edizione tedesca, Leipzig 1930).

CAPITOLO II

PER LA STORIA E LA TEORIA GNOSEOLOGICA DEL CONCETTO DI ATOMO

Dal tempo della sua scoperta nel sistema di Democrito il concetto di atomo figura tra i piú sicuri fondamenti della conoscenza della natura. Resiste a tutte le obiezioni che gli vengono sollevate contro e che hanno trovato la loro prima ricapitolazione sistematica nella *Fisica* di Aristotele; e si dimostra capace di accogliere in sé un contenuto empirico sempre nuovo. Ma con tale fecondità empirica del concetto, che risalta sempre piú chiaramente e inequivocabilmente quanto piú avanza la conoscenza, sta in singolare contrasto, difficilmente intelligibile, il giudizio che questo concetto riceve nella storia della critica della conoscenza. In questa non vi è traccia di alcuna concezione né valutazione unitaria. I metri a cui esso viene commisurato e i risultati a cui si giunge in base a tali metri, mutano secondo i diversi indirizzi gnoseologici. La stima del significato « oggettivo » del concetto di atomo percorre quasi l'intera scala delle valutazioni possibili. Su questo concetto si sono accumulati ogni lode e ogni biasimo. Esso appare ora una condizione necessaria, ora un grave pericolo per la conoscenza empirica; ora se ne chiede la fondazione filosofica, ora la eliminazione. Gli uni vi vedono quasi l'*ens realissimum* della fisica, l'espressione compiuta e adeguata della realtà fisica — gli altri lo considerano una semplice finzione o tutt'al piú un accorgimento economico del pensiero. Per qualche tempo i dubbi insorgenti in proposito sembrano respinti dalla grande quantità di sempre

nuove conferme empiriche che il concetto ha trovato; ma essi non sono mai scomparsi del tutto e anche oggi sembrano trarre nuovo alimento dalla problematica della teoria quantistica.

Comunque non possiamo sperar di dominare questi dubbi se prima non abbiamo deciso che cosa significhi la « questione » della « realtà » dell'atomo e in che senso la si possa porre e risolvere. E già a questo punto cominciano le prime oscurità che hanno diviso fisici e gnoseologi in due posizioni diverse. Il verdetto muta a seconda che il concetto stesso di oggetto si prenda nel senso « realistico » o « idealistico », « critico » o « positivistico ». Alla critica *m a c h i a n a* dell'atomistica Boltzmann potè giustamente obiettare che in ultima analisi essa si fondava su una *petitio principii*. Qualora si accetti la spiegazione che Mach dava della realtà e per quest'ultima non si intenda altro che la somma di quanto è dato, degli « elementi » semplici della percezione sensibile, allora certo ci si deve risolvere a sfavore del concetto di atomo. Ma Boltzmann fa notare che tale punto di vista non solo non basta a circoscrivere il concetto-di-oggetto della fisica bensì fallisce già nella spiegazione dei concetti comuni di cosa. Anche questi contengono un momento « costruttivo » non riducibile senz'altro ai dati sensibili. Di fronte all'obiezione di Mach che gli atomi e le molecole siano creazioni del tutto « artificiali », « simbolizzazioni economiche delle esperienze fisico-chimiche », dalle quali tuttavia al fisico « non è lecito lasciarsi impressionare »¹, Boltzmann osserva che lo stesso si potrebbe dire delle stelle fisse — infatti anche l'assunto che esistano questi corpi enormi distanti milioni di miglia non ci è imposto dalle percezioni visive come tali, e anche ad esso pertanto si potrebbe rimproverare di costruire tutto un mondo di cose immaginate accanto al mondo delle nostre percezioni sensibili².

¹ Cfr. MACH, *Analyse der Empfindungen*, 2ª ed., p. 207.

² *Vorlesungen über Gastheorie*, vol. I, p. 9. Lo stesso argo-

Nella sua lotta contro l'atomistica l'energetica è andata anche più oltre. Nelle *Lezioni di filosofia della natura* di Ostwald, Robert Mayer è qualificato il « semi-dio » che con pugno potente ha frantumato il mondo della vecchia fisica, il mondo della materia e degli atomi. Come vero fine della scienza della natura ora si pone il compito di costruire una concezione del mondo con materiale puramente energetico, senza ricorrere al concetto di materia³. Una volta raggiunto tale fine, il concetto di atomo sembrava aver esaurito definitivamente la sua parte: da allora in poi era lecito rimandarlo dalla fisica nella scolastica. « Qui la scolastica — e là l'energetica — questa è la scelta »: così Helm riepiloga la sua esposizione dell'antitesi fra energetica e atomistica⁴. Il vantaggio essenziale del concetto di energia e della legge dell'energia appariva il fatto che essi permettevano d'aggirare i processi elementari e con questi gli atomi e le forze agenti fra essi. Non ci occorrono altri elementi del mondo oltre l'energia: tutto quanto sappiamo del mondo, lo sappiamo intorno all'energia⁵. Nella sua celebre relazione al congresso scientifico di Lubeca (1895) Ostwald presentò addirittura come un'assurdità l'assunto che in una certa combinazione chimica, ad esempio di ferro e ossigeno, gli elementi continuino a sussistere e abbiano solo preso altre proprietà — qualificando questa un'idea non molto lontana da un « puro non senso »⁶.

mento ricorre nell'epistemologia più recente. « L'elettrone — dichiara Eddington — non è né più né meno ipotetico di una stella. Quando mettiamo in discussione la realtà del mondo fisico e le entità che lo costituiscono, non abbiamo alcuna ragione di distinguere fra le entità macroscopiche e quelle microscopiche. Essa va presa come intero. Se il mondo fisico è un'inferenza, stelle ed elettroni sono inferenziali — se il mondo fisico esiste, stelle ed elettroni sono reali » (EDDINGTON, *New Pathways in Science* cit., p. 21).

³ *Vorlesungen über Naturphilosophie*, ed. 1902, p. 163 ss.

⁴ HELM, *Die Energetik nach ihrer geschichtlichen Entwicklung*, Leipzig 1898, p. 366.

⁵ HELM, *Die Lehre von der Energie*, Leipzig 1887, p. 56.

⁶ OSTWALD, *Die Überwindung des wissenschaftlichen Materialismus*, Leipzig 1895, p. 12 s.

In seguito però, spinto dal nuovo materiale empirico affluente da ogni lato, egli ha modificato sostanzialmente la propria concezione e ha riconosciuto la prova empirica dell'« esistenza » degli atomi. Egli dichiara che l'isolamento e il computo degli ioni dei gas, realizzato da J. J. Thomson, la concordanza del moto browniano coi postulati della ipotesi cinetica e così via, hanno provato sperimentalmente la natura atomica delle sostanze che occupano spazio; da semplice ipotesi ora l'atomistica sarebbe salita al rango d'una teoria ben fondata su basi scientifiche⁷. Era così raggiunto il fine per cui Boltzmann si era battuto tenacemente nella sua critica metodologica rigorosa dell'energetica⁸. Ma il vero equivoco in cui Ostwald incorse nella sua sfida all'atomistica, stava in un altro punto. Egli negò l'atomistica perché vi vide la più pericolosa alleanza col « materialismo scientifico ». La sorte di tale materialismo gli appariva indissolubilmente legata a quella dell'atomistica — questa sembrava reggersi e cadere con quello. Ma proprio tale assunto a lungo andare si dimostrò insostenibile. Si vide che non solo il concetto di atomo si poteva sciogliere da quello di materia ma che quello stesso concetto in cui fin lì s'era veduto il sostegno essenziale del « materialismo » e del « meccanicismo », era chiamato piuttosto a condurre al vero superamento, non speculativo ma scientifico, della concezione meccanicistica della natura. Gli avversari dell'atomistica non avevano previsto uno sviluppo simile. Già Helmholtz, è vero, nella conferenza su Faraday del 1881 dichiarò che le scoperte di Faraday, specialmente la legge per cui nell'elettrolisi quantità chimicamente equivalenti trasportano sempre le stesse quantità di elettricità, costringevano a concludere che non solo la materia ma anche l'elettricità avesse una struttura atomica e fosse divisa

⁷ OSTWALD, *Grundriss der allgemeinen Chemie*, 4^a ed., Leipzig 1909.

⁸ Cfr. specialmente BOLTZMANN, *Ein Wort der Mathematik an die Energetik* in « Wiedemanns Annalen », LVII, 1896, e in *Popul. Schriften*, p. 104 ss.

in quanti elementari⁹. Helmholtz fece subito notare il significato fondamentale di questa teoria: la chiamò l'esito forse piú sorprendente delle ricerche di Faraday. Ma il risultato ultimo, e il piú notevole anche nell'aspetto puramente gnoseologico, si raggiunse con la legge dell'irraggiamento di Planck. Qui le parti si scambiarono: l'avversario che l'energetica aveva combattuto con tanta furia e tanto accanimento, ora si insinuava in certo modo nelle sue stesse file. Con la prova che l'energia raggiante di ogni frequenza può essere emessa e assorbita solo in multipli interi di un certo quanto elementare, si affermava il carattere atomistico dell'energia stessa e si dava la chiave che aprì il mondo della « fisica atomica ».

Con ciò entrava del pari in un nuovo stadio anche la questione gnoseologico-critica della « realtà » degli atomi, e diveniva piú importante e urgente di quanto non fosse mai stata prima. Ma neppure la teoria dei quanti fruttò una soluzione immediata della questione. Piuttosto, tutti i vecchi contrasti col tempo si riaprirono nel suo stesso interno. Laddove all'inizio la teoria si serviva di certe immagini da cui cercava di cogliere i processi svolgentisi all'interno dell'atomo, la nuova meccanica quantistica rinunziò all'uso di tali modelli. Essa dichiarò esplicitamente che di fronte al microcosmo fallisce ogni tentativo di « illustrazione »¹⁰. Ed esso deve fallire perché le relazioni di indeterminazione hanno aggravato sostanzialmente il problema della descrizione spazio-temporale: non sussiste piú nessuna descrizione siffatta, per un oggetto isolato, ma tutti gli enunciati sono vincolati all'interazione fra l'oggetto e l'osservatore o i suoi apparec-

⁹ *On the Modern Development of Faraday's Conception of Electricity*, Faraday Lecture, 1881, in *Wiss. Abhandl.*, vol. III, p. 69.

¹⁰ Cfr. ad esempio SCHRÖDINGER, *Conceptual Models in Physics*: « Nonostante l'incommensurabile progresso di cui siamo debitori alla teoria di Bohr, ritengo sia molto increscioso che il lungo e fortunato impiego dei modelli di essa abbia ottuso la nostra sensibilità teoretica in rapporto a tali questioni. Non dobbiamo esitare a raffinarla di nuovo ».

chi. La fisica atomica moderna — dichiara allora Heisenberg — non si occupa dell'essenza e della struttura degli atomi ma dei processi che percepiamo nell'osservare l'atomo. Il processo dell'osservazione non si può più oggettivare semplicemente, né del suo risultato si possono fare immediatamente oggetti reali¹¹.

Così siamo di nuovo di fronte al vecchio dilemma: la scelta fra « soggettivismo » e « oggettivismo », tra « fenomenismo » e « realismo ». Ma prima di cercar di decidere in proposito, si tratta di porre da capo la questione generale del senso in cui parlare di una realtà oggettiva degli atomi in generale. Che la soluzione puramente nominalistica quale cercava di dare Mach non sia più oltre sostenibile né utilizzabile, è fuori dubbio. Essa infatti non sa spiegare proprio il tratto essenziale dell'ipotesi atomistica, non sa spiegare la sua altissima fecondità e il suo straordinario potere euristico. Se il concetto di atomo davvero non è altro che un appiglio economico, un simbolo molto naturale che si dà inconsapevolmente per un complesso di eventi sensibili e da cui tuttavia al fisico « non è lecito lasciarsi impressionare » — tale fecondità resta un enigma. Possiamo ben intendere come con un simile appiglio si possano semplificare, classificare, ordinare i fatti già dati ma non come se ne possano scoprire di completamente nuovi. E la funzione che il concetto di atomo ha adempiuto e confermato di continuo nel corso della sua storia è proprio questa. Esso non è da paragonare solo a una carta geografica che rappresenta compiutamente e perspicuamente il territorio studiato; somiglia molto di più a una bussola che è data in mano all'indagine e la guida sempre di nuovo in remoti lidi sconosciuti. Una spinta simile verso una terra prima inesplorata si ebbe quando ad esempio negli esperimenti sulla diffrazione dei raggi Röntgen in reticoli cristallini Max von Laue riuscì a ottenere quei

¹¹ *Kausalgesetz und Quantenmechanik* (1930) in « Erkenntnis », II, 1931, p. 182.

suoi diagrammi che diedero un chiarimento completamente nuovo sulla struttura dei cristalli e resero visibile direttamente sulla lastra fotografica la loro costituzione regolare in atomi e molecole. Dalla grande quantità di prove, disparate e fra loro indipendenti, della « struttura granulare » della materia, prove addotte specialmente negli ultimi decenni, di fatto si deve « lasciar impressionare » non solo la fisica ma anche la gnoseologia. Anche gli enunciati della teoria cinetica dei gas assunsero una forma sempre più rigorosa e diedero adito a una verifica sperimentale sempre più precisa. Qui si ottennero chiarimenti ben definiti sulle condizioni delle singole particelle, sul loro numero, la loro grandezza, la loro massa — così come col numero di Loschmidt, ad esempio, si calcolò la quantità di molecole di un gas in un centimetro cubo. Così l'ipotesi atomistica porta alla conoscenza di nuove costanti universali — una conoscenza a cui tocca la massima dose di « oggettività » ottenibile nella scienza della natura in generale.

Ma con ciò appunto si vede anche in qual senso vada intesa tale oggettività. Non si tratta tanto dell'esistenza di cose quanto piuttosto della validità oggettiva di relazioni — a questa validità si può sempre far risalire e in essa si risolve tutto il nostro sapere intorno agli atomi. Anche qui giungiamo a una chiarificazione del problema solo se teniamo ben fermo che in ogni conoscenza scientifica della natura il concetto di legge è preordinato al concetto di oggetto. Nessun oggetto ci è « dato » altrimenti che attraverso la mediazione della legalità: la nostra conoscenza dell'oggetto si estende precisamente tanto quanto riusciamo a denotarlo con relazioni definite, con equazioni funzionali esatte. Nella misura in cui si amplia il sistema di queste equazioni funzionali, il sapere si consolida intorno all'oggetto e assume una forma sempre più rigorosa. I mutamenti del concetto di atomo offrono un esempio caratteristico di questo progetto continuo. Ogni nuovo campo in cui la atomistica viene a risultare valida, fornisce un nuovo insieme di equazioni condizionanti a cui da

ora in, poi l'atomo deve sottostare. Al crescere del numero di queste equazioni condizionanti, l'atomo assume in un certo senso una forma sempre piú « concreta » perché unifica in sé un numero sempre maggiore di conoscenze particolari. Ma questo crescere insieme, questo « concrescere » di note determinanti sta in rapporto inverso con ciò che siamo soliti intendere per concrezione intuitiva. Quanto piú oltre procede la determinazione concettuale, tanto meno si dimostra possibile trattenerne il risultato in semplici e singole immagini intuitive. Dobbiamo accontentarci per forza della determinazione mediante leggi e rinunciare alla illustrazione per mezzo di schemi e modelli. Ma da ciò la vera « oggettività » fisica non è diminuita bensí accresciuta; fin dall'inizio infatti essa non si può cercare nella direzione del concetto « ingenuo » di cosa ma va cercata nella direzione del concetto critico di legge.

La storia del concetto di atomo e delle sue applicazioni è un esempio ininterrotto di questo fatto d'ordine metodologico. Qui ogni nuova applicazione porta a stabilire una condizione nuova. In tale consolidamento del concetto di atomo, che per altro è precisamente il contrario della sua ipostatizzazione, della sua cosificazione immediata, hanno parte tutti i campi della conoscenza della natura. Il processo inizia nella logica e nella filosofia della natura e di qui passa alla meccanica, alla chimica, all'elettrodinamica, alla spettroscopia. E ogni qual volta il concetto di atomo dischiude e rende accessibile un nuovo ambito d'esperienza, l'atomo stesso acquista in certo modo un volto nuovo e diverso. Il suo significato autentico sta appunto in ciò: che esso non conduce solo a nuovi risultati particolari bensí a nuovi aspetti universali dell'accadere naturale; ma all'altezza di questi aspetti esso può salire solo se resta aperto a una metamorfosi incessante. Se per chiarire questo punto cominciamo dalla atomistica antica, le condizioni a cui l'atomo deve soddisfare e dalle quali viene definito nel suo « essere », qui sono ridotte al minimo. Spesso si è affermato che

L'introduzione del concetto di atomo nel sistema di Democrito non abbia avuto alcuna sorta di relazione con la conoscenza empirica; che sia sorta unicamente per una esigenza « speculativa ». Ma un'esatta ricerca storica e sistematica non conferma questa interpretazione. È ben vero che a condurre alla formulazione del concetto antico di atomo non sono state certe osservazioni particolari e che esso non ha preso le mosse da accertamenti sperimentali; ma da questo non si può concludere¹² che nel porre la propria tesi di fondo l'atomistica antica non si lasciasse guidare da una analisi degli oggettivi processi naturali. Tale analisi è presente e si fa sentire subito con acume ammirevole. Solo non si volge a singoli processi di moto bensì al moto stesso come fenomeno fondamentale. A tale fenomeno la critica eleatica del divenire sembrava negare ogni consistenza. Chi cerca di salvare la realtà del moto, si avvolge in contraddizioni insolubili, come avevano cercato di mostrare gli argomenti di Zenone. Non resta altro che preporre la logica all'apparenza sensibile e quindi rinunciare a ogni realtà del moto. Il pensiero atomistico interviene a questo punto. Esso accetta la condizione della « logica » eleatica, ammette che tutto ciò che ha da meritare veramente il nome di « essere » si deve pensare come qualcosa di costante, permanente, immutabile. Ma d'altra parte non intende rinunciare alle condizioni di base poste dalla visione empirica. Il postulato degli Eleati sembra in accordo con la ragione; ma a cospetto dei fatti equivale « quasi a una follia ». Per sfuggire a entrambe le assurdità — quella logica e quella empirica — c'è una sola via: dobbiamo trovare principî razionali (λόγοι) che concordino con la percezione, — che dunque invece

¹² Come fa ad esempio il BAEUMKER in *Das Problem der Materie in der griechischen Philosophie*, Münster 1890, p. 87; cfr. anche ZELLER, *Philosophie der Griechen*, 5^a ed., Leipzig 1892, I 2, p. 854 [= ZELLER-MONDOLFO, I 5, Firenze 1969, p. 166]. Per il seguito cfr. la mia esposizione dell'atomistica greca nel *Lehrbuch der Philosophie*, ed. M. Dessoir, vol. I, p. 55 ss.

di annientare il fenomeno del moto, lo spieghino e lo rendano concepibile¹³. Tali principi sono gli atomi e lo spazio vuoto, dei quali con ciò è garantita la realtà oggettiva anche se essi si sottraggono a ogni possibilità di percezione sensibile. Il criterio della realtà infatti non è la percezione ma l'« intelletto »; ciò che esso riconosce oggettivamente necessario è quindi dimostrato al tempo stesso nella sua verità e realtà.

Si poneva con ciò un postulato affatto universale — si davano, diciamo, i « prolegomeni ad ogni fisica futura che possa presentarsi come scienza ». Ma in quel primo acchito mancò ogni mezzo per soddisfare a questo postulato metodico. Sul terreno dell'atomistica antica non si poté fondare una fisica « concreta ». Essa si vide rinviata alla concezione qualitativa dell'accadere naturale, che trova la sua esposizione coerente e la sua giustificazione sistematico-unitaria nella fisica aristotelica. Finché il concetto di atomo restò nell'indeterminatezza di una concezione puramente logica, esso non ebbe nulla di decisivo da contrapporre a questo sistema della fisica peripatetica. La teoria atomistica non scomparve neppure nel medio evo, ma esso non fu in grado di portarla a una fondazione soddisfacente nell'aspetto filosofico e scientifico¹⁴. Qui un mutamento decisivo subentrò solo quando Galilei si pose il problema d'una fondazione esatta della dinamica in termini matematici. Da allora in poi la sorte dell'atomistica è indissolubilmente allacciata a questo problema. Con lo stesso Galilei e più oltre con Gassendi l'atomistica ha una parte essenziale nella fondazione della nuova concezione della natura, la « visione meccanicistica del mondo ». Ma questa ora non resta più un semplice progetto; infatti invece che sul semplice concetto di moto e di spazio vuoto ora essa si può reggere sulle leggi empiriche del moto e sulla loro

¹³ Cfr. l'esposizione di Aristotele sull'origine dell'atomistica nel *De generat. et corrupt.*, 8, 324 b 35.

¹⁴ Altri particolari specialmente in K. LASSWITZ, *Geschichte der Atomistik vom Mittelalter bis Newton*, Hamburg-Leipzig 1890.

fondazione matematica. D'ora innanzi queste leggi formano la salda impalcatura per la costruzione dell'atomistica moderna. Le rappresentazioni senso-intuitive della « solidità », della compattezza e della « durezza » assoluta degli atomi ora per la verità non vengono abbandonate, ma respinte sempre più indietro. Si mantengono come tratti ausiliari per l'intuizione ma non definiscono più il vero carattere della teoria atomistica. Questa non ha più a che fare con una descrizione dell'essere degli atomi ma unicamente con la loro interazione — e nelle regole universali, per questa interazione vede le condizioni per tutto l'accadere naturale, In tal modo la sintesi fra il concetto di sostanza e quello di causalità è già compiuta in Huyghens, la cui teoria si può considerare il vertice dell'atomistica cinetica. Huyghens spiega ogni accadere della natura col semplice cambiamento di posizione degli atomi; ma nell'esporre e fondare l'atomistica egli non ha più bisogno di insistere sulla « durezza » o la « rigidità » degli atomi. Ora la « stabilità » della natura non è più garantita da simili rappresentazioni senso-cosali ma da certi principi universalmente validi. Come principi di fondo della meccanica e quindi come regole valide per l'urto degli atomi si introducono il principio di conservazione della somma algebrica delle grandezze di moto e quello di conservazione della energia. Huyghens presenta questi principi della meccanica come le premesse di base dell'atomistica e come condizioni della sua applicabilità.

Ciò che vi è di essenziale e decisivo nell'opera di Huyghens — così giudica il Lasswitz nella sua eccellente esposizione dell'atomistica huyghensiana — è che egli non mosse da alcuna sorta di rappresentazioni tolte dall'illustrazione sensibile o colorite antropomorficamente, ma da dati di fatto meccanici che per lui valevano da leggi fondamentali proprio perché necessari e sufficienti a definire univocamente i moti dei corpi, a calcolare velocità e direzioni quando sono date le velocità e le direzioni prima dell'urto. Non è perché i corpi sono elastici che dopo l'urto si conserva la loro forza

viva, ma l'urto avviene così come lo si osserva nei corpi che chiamiamo elastici, perché il moto deve conservarsi¹⁵.

Donde si vede come qui si sono mutati l'« essere » dell'atomo e la sua natura, poiché all'atomo è imposta una condizione nuova; poiché esso non è più definito solo dalle considerazioni teorico-speculative che erano determinanti per l'atomistica antica, ma da certe leggi empiriche e matematiche.

Un nuovo sviluppo del concetto di atomo si ha con gli inizi della chimica scientifica. L'esigenza di un assetto strettamente corpuscolare della chimica è già posta da Robert Boyle nel sec. XVII. Il *Chemista Scepticus* di Boyle svolge la tesi che si possa metter fine alla sovranità delle « qualità oscure » nel regno della chimica solo introducendo il concetto di atomo. In quest'opera si attua il passaggio dall'alchimia alla chimica; vi si sostiene che non possiamo intendere i fatti chimici assumendo arcane « simpatie » fra i corpi bensì solo movendo dalle leggi della struttura e del moto delle loro parti minime. Ma in mancanza delle premesse quantitative necessarie per realizzarla, questa concezione resta ancora sterile. In un primo momento la chimica permane ancora nella considerazione qualitativa della natura, che risalta ancora una volta con particolare chiarezza nella teoria del flogisto di Stahl. Ma quando gli esperimenti di Lavoisier capovolgono la situazione, quando anche tutti i fatti chimici si collocano sotto il punto di vista di misura, numero e peso — ecco giunto allora anche in questo campo il momento dell'atomistica. Lavoisier dichiara che tutta l'arte della sperimentazione chimica si regge sul principio fondamentale che fra i corpi dati all'inizio e quelli da essi ricavabili mediante l'analisi sussiste una vera eguaglianza o equazione¹⁶. Così anche tutti gli enunciati su gli atomi, ai quali tale arte

¹⁵ LASSWITZ, op. cit., vol. II, p. 369 ss.

¹⁶ LAVOISIER, *Traité élémentaire de Chimie*, parte I, cap. 13.

conduce, infine devono servire a dare un'espressione definita a questa « eguaglianza » e a renderla intelligibile in via teorica. Nella legge di Dalton delle proporzioni multiple e costanti l'atomistica celebra il suo primo trionfo; essa riesce a spiegare immediatamente il fatto empirico dei numeri interi costanti della combinazione. I numeri fissi di equivalenza trovano la loro interpretazione piú semplice e in piena aderenza all'assunto che gli atomi dei diversi elementi hanno un peso definito, caratteristico per le singole sostanze fondamentali. Vi si aggiunge la legge di Avogadro per cui il numero delle molecole nell'unità di volume è uguale per tutti i gas. E sul semplice schema di base cosí acquisito si costruisce tutto quanto lo sviluppo successivo della chimica¹⁷. Come in Huyghens cosí anche qui l'atomo resta in una versione strettamente sostanzialistica, ma tutti gli enunciati sul suo « che cosa » infine si traducono in enunciati intorno a un « quanto »: in enunciati su certi rapporti numerici. In questa direzione volgono tutti i concetti di fondo e tutte le teorie della chimica scientifica — il concetto di valenza e quello di modelli molecolari, il concetto di radicale e la teoria dei radicali composti. Ora il linguaggio-per-concetti dell'atomistica, unito all'universale linguaggio-per-segni della matematica, permette quella semplice e grandiosa costruzione del linguaggio chimico per formule, che si compie nel progresso dalle formule brute alle formule di struttura. La stereochemica fondata da van't Hoff permette di dare espressione, sulla base di una forma piú complessa di formule, a un nuovo gruppo di fatti, specialmente ai fenomeni dell'isomeria, e offre nuovi chiarimenti sulla disposizione degli atomi nello spazio. Cosí muta e si raffina l'immagine intuitiva dell'atomo; ma tutti questi mutamenti servono solo allo scopo di abbracciare e rappresentare una cerchia sempre piú vasta di relazioni funzionali.

¹⁷ Ho cercato di esporre questo sviluppo dal punto di vista gnoseologico nello scritto *Substanzbegriff und Funktionsbegriff* cit., cap. IV, p. 270 ss.

E da capo si ha un nuovo inizio e un orientamento per principio affatto nuovo, quando al posto della teoria sostanzialistica della materia sottentra la teoria elettrodinamica, che segna un ulteriore passo avanti nella concezione puramente funzionale dei fenomeni naturali. Sin dai primi studi sui fatti elettrolitici, sin dalle ricerche sulla natura dei raggi catodici e sui fenomeni della radioattività si gettano le basi per una teoria della materia che le ascrive una costituzione puramente elettrica. Ora il concetto di carica elettrica si introduce come il vero e proprio elemento fondamentale della conoscenza della natura, e lo sviluppo successivo porta sempre piú a considerare la massa dell'elettrone solo come « massa apparente » fino a risolverla del tutto nella carica elettrica. Cosí l'elettricit  toglie alla materia la sua posizione centrale; il detto di Huyghens — avanzato dal punto di vista dell'atomistica cinetica — che ci si debba attenere alla concezione meccanicistica o lasciare ogni speranza di spiegazione razionale della natura, viene confutato. E quelli in cui si conia tale capovolgimento della concezione di fondo sono ancora una volta i modelli atomici. Essi son quasi gli specchi che in s  raccolgono e riflettono ad un tempo tutto il nuovo materiale d'osservazione e il progresso delle idee teoriche. In ci  sta l'eccezionale valore che essi hanno dal lato empirico, ma in ci  sta anche il loro limite gnoseologico-critico. La loro forza dipende dalla loro funzione di espressione e rappresentazione, non dal fatto che essi denotino un essere indipendente, completamente staccato da tale funzione. È un merito della meccanica quantistica piú recente l'aver riconosciuto questo stato di cose piú decisamente che per l'addietro, l'aver veduto il senso dei modelli atomici soprattutto nel loro rendimento euristico e quindi l'aver messo in chiaro il loro limite gnoseologico-critico. A tali modelli ora si impone l'esplicita condizione di non accogliere in s  contenuti che per principio si sottraggano a ogni accertamento sperimentale. Nel 1904, seguendo Lord Kelvin, J. J. Thomson present  un modello che si basava an-

cora sui presupposti della teoria classica dell'elettrodinamica. L'atomo secondo questo modello consta di una sfera uniformemente piena di carica positiva, in cui gli elettroni o ruotano su orbite circolari oppure oscillano intorno a certe posizioni di equilibrio¹⁸. Il difetto di tale modello era che esso non poteva soddisfare alle nuove esperienze compiute sulle radiazioni corpuscolari: col modello atomico di Thomson non si poteva spiegare la diversione (diffusione a grandi angoli) che i raggi α subiscono nel passare attraverso sottili lastre metalliche. Intervenne a questo punto la teoria di Rutherford (1911), secondo la quale il portatore della maggior parte della massa dell'atomo è un nucleo a carica positiva intorno a cui gira un certo numero di elettroni, piú leggeri, a carica negativa; qui la deviazione suddetta delle particelle α era attribuita a una repulsione coulombiana da parte del nucleo. Si dava con ciò una descrizione « astronomica » dei processi interatomici; si considerava l'atomo un sistema planetario, i singoli elettroni come pianeti rotanti intorno al corpo centrale, il nucleo. Ma la stabilità di questo modello aveva ancora bisogno di una garanzia specifica che si ebbe solo con l'introduzione del postulato dei quanti da parte di Bohr. Ora l'orbita dell'elettrone fu definita da due equazioni diverse, una classica e una quantistica¹⁹. Solo quest'ultima poteva spiegare il fatto fondamentale della spettroscopia, l'esigenza di forti righe spettrali. Si vede dunque come anche qui quella che sola conferisce all'atomo la sua « forma » determinata sia da capo la comparsa di nuove condizioni richieste vuoi sul piano empirico vuoi sul piano teorico. La struttura dell'atomo non è altro che l'espressione riassuntiva di tali condizioni. Alla loro formulazione sempre piú chiara e precisa partecipano tutti i grandi settori principali della fisica. In questo processo intervengono del pari

¹⁸ Cfr. J. J. THOMSON, *The Corpuscular Theory of Matter*, London 1907, capp. 6 e 7, p. 103 ss.

¹⁹ Altri particolari in BOHR, *Drei Aufsätze über Spektren und Atombau*, 2^a ed., Braunschweig 1924.

la meccanica, la chimica, la termodinamica, l'elettrodinamica — e volgendosi in questo modo a un fine comune, esse vengono appunto a raccogliersi in un tutto metodico unitario.

Ma proprio quando si coglie questo processo nel suo insieme, forse sembra difficile trattenersi da una delusione e da un profondo scetticismo. Che cosa significa infatti questa serie di immagini che qui ci sfilano dinanzi in continua vicenda e in caleidoscopica varietà di colori? È forse tutto ciò qualcos'altro e qualcosa di piú di una strana fantasmagoria? Che giova a noi l'abbondanza delle immagini e il loro raffinamento continuo se nessuna di esse ha diritto a una verità effettiva, definitiva? se, appena sorta, un'immagine è soppiantata da un'altra a cui tocca subito la stessa sorte? A tutte queste domande sembra di nuovo non esservi altra risposta che lo *ignorabimus* di Du Bois-Reymond. Non sapremo mai meglio di quanto sappiamo oggi — aveva detto Du Bois-Reymond — che cosa « si aggiri nello spazio » qui dove c'è materia (cfr. sopra p. 17). Lo sappiamo forse meglio oggi, oppure lo sappiamo forse oggi meno che mai? E proprio la meccanica dei quanti, lungi dal confutare la profezia di Du Bois-Reymond, non ci ha forse insegnato a vedere meglio le ragioni della nostra ignoranza precisandola con piú rigore nelle relazioni di indeterminazione? Quando si resti fermi alla concezione sostanzialistica, questa conclusione è realmente inevitabile: il sostanzialismo porta necessariamente all'agnosticismo anche in questo punto. Ma quando si accetta seriamente la concezione funzionale, il problema si configura in tutt'altri termini. Allora la molteplicità delle risposte che riceviamo alla domanda sull'« essere » dell'atomo, sulla sua natura e struttura, non è piú un'obiezione. Una funzione infatti « è » solo nel suo dispiegarsi in una serie progressiva di valori. Non si lascia compri- mere in una singola immagine ma comprende tutte le proprie forme particolari sotto una regola universale, le include come casi diversi di applicazione. Nessuno di questi casi

è una meta definitiva a cui la conoscenza possa fermarsi soddisfatta: è sempre solo una pietra miliare donde la conoscenza può cogliere il punto in cui si trova e la strada da percorrere. Che nondimeno la via continui a estendersi davanti a noi, che non se ne veda alcuna fine, alcun *non plus ultra*, non occorre che ci preoccupi, perché la verità che cerchiamo, in quanto verità empirica, può essere sempre solo quella di un processo, non quella di un risultato senz'altro definitivo. Se in questo procedere manteniamo una direzione unitaria e ne siamo certi, in essa — e solo in essa — abbiamo il criterio della verità. E allora, quando siamo sicuri solo del fatto che le diverse forme di determinazione dell'atomo o dell'elettrone offerteci dalla progressiva indagine sperimentale e teorica si connettono strettamente l'una con l'altra e si integrano a vicenda, noi non abbiamo bisogno di trovare nessuna risposta alla questione del che cosa sia propriamente e definitivamente l'atomo o l'elettrone. Se tale nesso empirico è assodato, se ci possiamo convincere che nel succedersi dei « modelli atomici » non regna il capriccio o l'arbitrio ma una certa regola, con ciò l'atomo ha tutta la « realtà » di cui è capace. Esso dunque non è un semplice accorgimento economico, soggettivo; ma altrettanto poco possiede un essere sostanziale, di cosa — un essere direttamente descrivibile in un modo o nell'altro per analogia con gli oggetti della intuizione comune. Rispetto allo sviluppo del concetto di atomo che abbiamo cercato di seguire nelle sue singole fasi, in realtà una descrizione siffatta dovrebbe apparire un equivoco singolare, un'ingenuità gnoseologica. Essa infatti ci costringerebbe ad annullare tutto quanto il progresso conoscitivo faticosamente acquisito; ci rigetterebbe indietro all'inizio del cammino. Agli elementi che costituiscono la materia, nell'atomistica antica si poteva ancora assegnare una determinata forma afferrabile per intuizione, come del resto quello che Democrito ha scelto per i suoi atomi sembra esser stato proprio il nome di « forma » (*ιδέα*). E qui neppure occorre evitare certe descrizioni

sensibili; per spiegare come i corpuscoli diversamente foggiate si attacchino e avvilluppino gli uni agli altri, li si poteva munire di rampini e grappe quali si fossero²⁰. Ma già nella fondazione della meccanica per siffatte descrizioni ingenuie non vi è più posto; poiché qui l'essere degli atomi è definito dalle leggi e dai principî del moto, né si può ascrivere loro altra proprietà che quella conseguente da tali principî. Tuttavia il bisogno di disprezzare i mezzi ausiliari dell'intuizione non si sente neppure qui, sempre che si abbia coscienza dei limiti del loro significato. Così in un certo senso si può continuare a pensare gli atomi come delle piccole palline rigide che occupano una certa porzione di spazio. Ma non appena arriviamo alla fisica del campo, dilegua anche questa rappresentazione: la costituzione elettrica della materia non si lascia più « raffigurare in forme sensibili » nel modo semplice che era stato possibile per quella meccanica. E infine per la teoria dei quanti fu ben chiaro fin dall'inizio che ad ogni immediata descrizione spazio-temporale dei processi atomici sono imposti determinati limiti. In proposito Niels Bohr non ha sopravvalutato né la portata né l'ambito del proprio modello atomico; egli piuttosto si è detto convinto che nel problema generale della teoria quantistica non è in gioco una modificazione delle teorie meccaniche ed elettrodinamiche descrivibile sulla base dei concetti fisici tradizionali, ma si tratta di un fallimento radicale delle immagini spazio-temporali con cui fin qui si era cercato di descrivere i fenomeni naturali²¹. Falliscono le immagini — ma le relazioni poste negli enunciati di misura e di legge restano in vigore, anzi sono loro a costituire il vero fondamento della conoscenza fisica.

Se ora ritorniamo al punto di partenza delle nostre considerazioni, possiamo constatare un notevole sviluppo nell'uso e nella valutazione gnoseologica del concetto di

²⁰ Cfr. SIMPLICIUS in *Aristot. De caelo*, 133 a 18 (ZELLER, op. e voi. cit., p. 889; [ZELLER-MONDOLFO, op. e voi. cit., p. 209]).

²¹ *Atomtheorie und Mechanik*, loc. cit., p. 22.

atomo. Quando nella relazione di Lubeca del 1895 Ostwald lanciò la sua sfida all'atomistica e dichiarò che dovevamo abbandonare definitivamente la speranza di poter pensare il mondo fisico in modo intuitivo riconducendo i fenomeni a una meccanica degli atomi, egli si domandò anche quale altro mezzo restasse per farci un'immagine della realtà.

A questa domanda — disse — vorrei gridarvi: non « devi » farti nessuna immagine o similitudine! Il nostro compito non è vedere il mondo in uno specchio più o meno appannato o distorto, ma vederlo tanto immediatamente quanto voglia mai permettere la natura della nostra mente. Porre in certe relazioni delle realtà, delle grandezze ostensibili e misurabili, così che, date le une, si possano dedurre le altre: questo è il compito della scienza, né esso si può assolvere coll'intromettervi una qualsiasi immagine ipotetica bensì col provare relazioni di interdipendenza fra grandezze misurabili²²

In tale postulato di metodo Ostwald non andò errato; a questo riguardo è ben vero che i rappresentanti della nuova meccanica quantistica aderiranno pienamente al suo programma di conoscenza della natura. Ma l'errore di Ostwald fu che egli rimproverò al concetto di atomo come tale un difetto riguardante solo una delle sue « applicazioni », quella compiuta nella costruzione della « concezione meccanicistica della natura ». Una volta sciolto il concetto da questo intreccio, la sua fecondità e importanza viene alla luce tutta intera. Cadono le componenti fatte semplicemente di « immagini » — ma da ciò l'uso del concetto non è impedito bensì ampliato. Considerata nell'aspetto gnoseologico la nuova meccanica dei quanti è un passo d'importanza decisiva in questa direzione. Essa evita i pericoli della raffigurazione per immagini col fare in modo che quelle da essa impiegate si circoscrivano in un certo senso da sole e si equilibrino a vicenda. Essa

²² *Die Überwindung des wissenschaftl. Materialismus* cit., p. 22.

infatti non lascia mai la parola a un'immagine sola né la lascia valere da unica illustrazione del processo in esame. Erge a principio il dualismo fra la rappresentazione corpuscolare e quella ondulatoria, e grazie a questo dualismo esercita una critica rigorosa e sull'una e sulla altra immagine²³. Così i pericoli presenti in ogni descrizione figurata si affrontano in modo che le diverse esposizioni, mediante l'immagine di particelle e mediante quella di onde, si neutralizzano.

Di fronte alla domanda che chiede quale immagine riproduca la realtà fedelmente — l'immagine dei corpuscoli discontinui o quella delle onde continue — la teoria dei quanti resta muta. Tutto ciò che essa può e vuole insegnarci è solo la regola secondo cui produrre una « corrispondenza simbolica » fra le due immagini: cosicché, unite, esse offrano un'espressione concettuale esatta delle leggi vigenti per i fenomeni della fisica atomica²⁴. Così, è vero, ci dobbiamo imporre una certa azione di freno e di controllo nei confronti delle rappresentazioni concrete con cui cerchiamo di esprimere l'accadere della natura; a nessuna di esse ci è lecito attribuire un valore assoluto bensì sempre solo un valore relativo. E tuttavia nella misura in cui ci si attiene strettamente al nuovo metro della conoscenza fisica così stabilito, nella misura in cui si ritiene unico fine di tale conoscenza lo scorgere relazioni rigorose ed esatte fra grandezze osservabili, questa delimitazione e « neutralizzazione » d'immagini non lascia dietro di sé nessuna ambiguità né alcuna semplice indeterminatezza.

²³ Lo sviluppo di questo programma è stato dato da HEISENBERG nei *Physikalische Prinzipien der Quantentheorie* del 1930 [trad. it. M. Ageno, Torino 1948].

²⁴ Cfr. in proposito ad esempio FRENKEL, *Einführung in die Wellenmechanik*, cap. I, § 9.

PARTE QUINTA

CAUSALITÀ E CONTINUITÀ

CAPITOLO I

IL PRINCIPIO DI CONTINUITÀ NELLA FISICA CLASSICA

Si può cercar di combattere la « concezione meccanicistica della natura » per cui tutto l'accadere naturale sarebbe riducibile al moto di minime particelle di massa, e mostrarne i difetti movendo da punti di vista gnoseologici, ma appellarsi al presunto fatto che la fisica meccanicistica provenga da un modo di pensare « materialistico », è un motivo polemico del tutto inammissibile e insufficiente. Tale argomento polemico si è usato ripetutamente non solo nella discussione popolare ma anche in « confutazioni » che si piccavano di apparire strettamente filosofiche. Si rimprovera al meccanicismo di essere un modo di considerare esteriore, « profano » — di non avere alcun senso per la « totalità » dell'accadere naturale ma di accontentarsi d'afferrarne le parti. Per efficace che riesca, questa argomentazione è erronea e superficiale. A confutarla basta già uno sguardo alla storia della concezione meccanicistica del mondo. Tale concezione è intimamente ed essenzialmente allacciata allo sviluppo della filosofia idealistica, non a quello del materialismo. In Hobbes, è vero, meccanicismo e materialismo si associano e risolvono l'uno nell'altro. Ma nel pensiero stesso di Hobbes il secondo è solo una conseguenza del primo: non ne è in alcun modo il fondamento vero e proprio. Anche per Hobbes il fondamento del meccanicismo sta altrove: va cercato nei principî della dinamica galileiana e in quelli della propria logica nominalistica e razionalistica. E per quanto riguarda la

vera fondazione metodologica della concezione meccanicistica della natura, essa risale ai nomi di Descartes, Leibniz e Kant. I *Principia philosophiae* di Descartes danno la prima fondazione universale e coerente del meccanicismo; Leibniz, senza rinunciare al proprio « spiritualismo », accentua che tutto l'accadere naturale va spiegato « matematicamente e meccanicamente », e giunge fino a far valere le ragioni « meccaniche » come le uniche ragioni « intelligibili » entro il mondo materiale, le sole che si possano intendere¹. Per quanto concerne Kant, con la sua riduzione della materia a forze di attrazione e repulsione egli trasforma il meccanicismo in un puro « dinamicismo »; ma questa stessa costruzione dinamica appoggia pienamente sul presupposto che ogni considerazione matematica della natura sia necessariamente legata al concetto dei punti materiali e alle leggi che definiscono la loro interazione. Dove si vogliono penetrare le vere ragioni di questo presupposto si deve porre la base più a fondo, si devono elucidare le condizioni storiche e sistematiche donde la « concezione meccanicistica del mondo » è sorta e ha tratto la sua forza autentica.

Le *Regulae ad directionem ingenii* di Descartes cercano di fondare una concezione del mondo nettamente universalistica, che non va affatto dalle parti al tutto ma dal tutto alle parti. Le *Regulae* cominciano col confutare la prospettiva tradizionale che spezzetta il sapere e crede sia possibile raggiungere un sapere « vero » giustapponendone le parti pezzo per pezzo. La conoscenza è un'unità indivisibile, così come un'unità siffatta è l'intelletto donde essa scaturisce. Le scienze nel loro complesso non sono altro che quell'unica sapienza umana (*humana sapientia*) che resta pur sempre la medesima per molti e disparati che siano gli oggetti a cui essa può applicarsi. Pertanto alla base di tutti i rami e indirizzi particolari del sapere dev'esserci una pura

¹ Cfr., ad esempio, *Philos. Schriften*, ed. Gerhardt, vol. VII, p. 265.

scienza universale, una *Mathesis universalis*. Da essa, non dai singoli oggetti del sapere, dobbiamo partire se vogliamo ottenere una base sicura e incrollabile della conoscenza. Forte di questa premessa, Descartes cerca di mettere una nuova divisione puramente metodologica del sapere al posto della divisione ontologica fin lì vigente. Perché ci sia possibile abbracciarli con lo sguardo tutti gli oggetti vanno suddivisi in certe classi; ma tali classi non si possono fissare dal punto di vista dell'essere, si devono stabilire dal punto di vista della conoscenza. La prima concezione ha dominato sin qui la « dottrina delle categorie » dei filosofi; la seconda è quella che caratterizza la nuova metodica e ne determina il carattere scientifico. L'ordinamento, l'articolazione e l'assetto del sapere devono aver luogo così da offrirci una visione d'insieme dell'interdipendenza reciproca delle conoscenze, del modo in cui esse si addentellano e si fondano le une sulle altre. Solo sulla base di tale visione metodologica noi possiamo azzardare un giudizio ontologico, enunciare con sicurezza alcunché sulla natura e le relazioni delle cose². Tema fondamentale della filosofia cartesiana non è l'intrecciarsi delle cose ma la *complicatio* [*Komplikation*] delle conoscenze. Ciò a cui essa aspira è metterci in mano un filo d'Arianna tale da non perderci nel labirinto delle conoscenze particolari che sulle prime si aggrovigliano in un modo del tutto inestricabile. Da questo labirinto non c'è alcuna via d'uscita finché non ci atteniamo strettamente alla norma di procedere dalle leggi semplici alle leggi complesse, dalle più facili alle più difficili. La « composizione » qui teorizzata, lungi dall'essere una composizione « meccanica », è strettamente logica. Ciò da cui si parte è una regola del pensiero: sottoporre tutte le nozioni a un ordinamento tale per cui

² Regula VI: « Haec propositio praecipuum ... continet artis secretum; monet enim res omnes per quasdam series posse disponi, non quidem in quantum ad aliquod genus entis referuntur sicut illas Philosophi in categorias suas diviserunt, sed in quantum unae ex aliis cognosci possunt ».

si comincia dalle questioni piú semplici e piú facilmente intelligibili e si procede lentamente e costantemente alle piú intricate, in una certa gradazione.

Da questo metodo di partizione e ripartizione consegue il « meccanicismo » che domina e pervade la filosofia cartesiana. Esso esige che tutti i problemi che lo spirito umano si pone, tutte le difficoltà che esso incontra, si scompongano in « parti minime » — e in tale procedimento vede la sola via per venirne a capo³. Non possiamo metter piè fermo in nessun campo di oggetti, non lo possiamo esprimere in idee chiare e distinte, se prima non abbiamo individuato le « nature semplici » che lo costituiscono. Queste *naturae simplices* sono i primitivi concetti di base per ogni sfera di oggetti, sono gli originali e gli archetipi sul modello dei quali foggiamo tutte le altre conoscenze. Questi concetti non sono molti: sono quelli di essere, numero, durata, estensione, moto e, per il campo psichico, il concetto di coscienza o pensiero⁴. Grazie a questo sistema di concetti fondamentali [*notions primitives*] i campi di oggetti si spogliano della loro apparente varietà ed eterogeneità e si riconducono gli uni agli altri. Mediante il concetto di estensione la fisica si riduce alle geometria e in quest'ultima si può ottenere un'ulteriore semplificazione e riduzione risalendo dal concetto di estensione a quello di numero col metodo della geometria analitica che Descartes ha trovato e fondato proprio in questa concezione di base. Questo è il saldo fondamento su cui poggia il sistema meccanicistico cartesiano della natura.

Forse mi si domanderà — dice Descartes nei *Principia* — per quale via io sia giunto alla conoscenza delle parti minime della materia, non percepibili sensibilmente. A ciò rispondo

³ *Discours de la méthode*: « Il secondo è quello di dividere ciascuna delle difficoltà che esaminerò, in tante parti quante sarà possibile, e quante sarà richiesto per meglio risolverle » (ed. Adam-Tannery, parte II, vol. VI, p. 18).

⁴ Cfr. lettera alla principessa palatina Elisabetta, del 21 maggio 1643 (*Correspondance*, ed. Adam-Tannery, vol. III, p. 665).

che anzi tutto ho considerato in generale tutti i concetti chiari e distinti che possono esservi nel nostro intelletto in rapporto alle cose materiali, e non ne ho trovato altri che quelli della grandezza, della forma, dei movimenti, e delle regole secondo le quali essi agiscono gli uni sugli altri. Poiché tali regole sono i principi della geometria e della meccanica, ho argomentato che ogni conoscenza che l'uomo può avere della natura, si debba dedurre solo da essi, perché tutti gli altri concetti che possiamo farci delle cose sensibili essendo confusi ed oscuri non servono tanto a promuovere la vera conoscenza di queste cose quanto a impedirli. Dopo di che ho esaminato tutte le differenze principali che si possono dare tra le figure, le grandezze e i movimenti dei diversi corpi che per la loro piccolezza non si possono percepire direttamente, e mi sono domandato quali effetti percepibili si possano produrre dalla loro varia interazione. E quando poi ho incontrato di fatto tali effetti percepibili nella natura, ho pensato che essi potessero essersi prodotti in tal modo. Ma poi, quando ho visto che nell'intero ambito della natura non era possibile scoprire nessun'altra causa capace di produrli, ho concluso che essi dovevano assolutamente essersi prodotti così⁵.

Le condizioni logiche e filosofiche di base del sistema meccanicistico della spiegazione della natura risaltano altrettanto chiaramente in Leibniz. Ma qui nel passare dalla geometria analitica al calcolo infinitesimale s'è compiuta

⁵ « At insensilibus corporum particulis, determinatas figuras et magnitudines et motus affingo, tamquam si eas vidissem, et tamen fateor esse insensiles; atque adeo quaerent fortasse nonnulli unde ergo quales sint agnoscam. Quibus respondeo; me primo quidem ex simplicissimis et maxime notis principiis, quorum cognitio mentibus nostris a natura indita est, generaliter considerasse, quanam praecipuae differentiae inter magnitudines et figuras et situs corporum, ob solam exiguitatem suam insensilium, esse possent, et quoniam sensiles effectus ex variis eorum concursibus sequerentur. Ac deinde cum similes aliquos effectus in rebus sensibilibus animadverti, eas ex simili talium corporum concursu ortas existimasse; praesertim cum nullus alius ipsa explicandi modus excogitari posse videbatur »: *Renati Descartes Principia Philosophiae*, Amstelodami, ex Typographia Blaviana, 1692, p. 219. [*Les Principes de la philosophie*, ed. francese, art. 203, ed. Adam-Tannery, vol. IX, p. 321].

una nuova importante trasformazione della dottrina generale del principî, che esige un rafforzamento e una piú precisa determinazione del sistema. L'analisi leibniziana dell'infinito poggia sul concetto di continuità. È questo concetto ad allacciare d'ora in poi matematica e conoscenza della natura e a fonderle in un tutto unico. Ora viene eretta a postulato supremo la descrizione dell'accadere naturale in funzioni continue e differenziabili: il principio di ordinamento generale [*principe de l'ordre général*]. Come tale, nel campo della logica e della geometria esso vale in modo assoluto, ma la stessa validità senza eccezioni gli va accordata anche nel campo della conoscenza della natura. Infatti secondo le premesse di fondo della filosofia leibniziana non può mai esservi una frattura neppure in questo campo. Ideale e reale, verità e realtà sono allacciate e riferite l'una all'altra da un'armonia prestabilita. Quindi tutte le verità « fattuali » [*vérités de fait*] sono fondate in verità « eterne » [*vérités éternelles*], e spiegabili solo mediante queste. E il principio di continuità garantisce proprio questo nesso. Tale principio non è una semplice legge di natura — è piuttosto una regola universale che ci insegna come trovare le leggi di natura e come intenderle. In questo senso esso è usato da Leibniz come universale « pietra di paragone della conoscenza ». Le leggi dell'urto introdotte da Descartes devono essere false perché non reggono a questa prova, perché implicano una contraddizione col principio di continuità⁶. Nulla vale forse a illustrare la netta antitesi fra il sistema « classico » dei concetti fisici di base e il sistema moderno meglio della circostanza che Leibniz introduce il principio di continuità esattamente

⁶ Cfr. specialmente *Mathematische Schriften*, ed. Gerhardt, vol. VI, p. 129 ss.; *Hauptschriften*, ed. Cassirer, vol. I, p. 84 ss.; *Animadvers. in partem generalem Principiorum Cartesianorum*, ed. Gerhardt, vol. IV, p. 375: « Antequam ad speciales motuum regulas ab autore nostro traditas veniam, criterion generale dabo et velut lapidem Lydium, ad quem examinari possint, quod appellare soleo Legem Continuitatis ».

te nello stesso luogo dove nella fisica atomica figura il principio dei quanti, ed egli lo impiega esattamente nello stesso senso metodologico. Per lui è un principio euristico e un postulato generale della conoscenza della natura⁷. Solo in base a questo postulato il nuovo strumento del conoscere, l'analisi dell'infinito, è utilizzabile e si può rendere veramente fecondo nell'indagine della natura.

In proposito Leibniz si rende perfettamente conto che una natura in cui si dessero improvvisi mutamenti per salti, non sarebbe affatto impossibile; ma secondo lui sarebbe insoddisfacente dal punto di vista logico, non adeguata alla « sapienza del Creatore ». Questo argomento teleologico e metafisico non è affatto il solo che egli adduce per la validità universale del principio di continuità. È di molto più caratteristica e significativa un'altra ragione probante che si regge su un postulato puramente gnoseologico. Se non vigesse il principio di continuità, dovremmo fare i conti con la possibilità che al nostro pensiero sia posto un limite ben definito dalla natura stessa delle cose. In tal caso un raffinamento dei nostri mezzi conoscitivi, un incremento dell'analisi non porterebbe necessariamente a una maggiore approssimazione rispetto alla realtà bensì in certi casi potrebbe persino allontanarcene. Ma di una simile possibilità il sistema di Leibniz, tutto fondato sulla continua corrispondenza e la concordanza completa fra « pensiero » ed « essere », fra « concetto » e « realtà », non può tener conto. La natura non può prescrivere all'analisi nessun limite fisso — anzi l'analisi stessa è l'unico mezzo per giungere a idee chiare e distinte che ci assicurano della verità della natura. Qui non può darsi né è lecito che si dia alcuno iato; un simile iato infatti metterebbe subito in forse la « razionalità » della natura.

Da questo punto di vista si può subito intendere anche

⁷ « La Legge della Continuità che da lungo tempo mi serve da " principio d'invenzione in fisica ", ed anche da esame molto utile per vedere se vanno bene alcune regole che si sono date » (*Mathemat. Schriften*, ed. Gerhardt, cit., vol. IV, p. 105).

la posizione di Leibniz nei confronti dell'atomistica. Egli è contrario all'ipotesi atomistica non come empirico, ma come logico della conoscenza fisico-matematica. Sia nella storia del pensiero filosofico sia in quella della fisica si è spesso cercato di costruire un compromesso fra atomistica e continuità formulando il principio di continuità in modo tale che esso contenesse solo un postulato per l'accadere e non per l'essere. Nell'accadere si esigevano passaggi continui, mentre per l'essere, per il configurarsi delle cose nello spazio si assumevano nette delimitazioni discrete. Ma Leibniz era un cultore dell'analisi troppo acuto per poter trascurare i difetti di un compromesso simile. L'assunto di atomi, come egli mostra dettagliatamente, implica in ogni caso una violazione del principio di continuità. Se infatti per la interazione degli atomi si prendono a base le leggi dell'urto, secondo queste leggi risulta che nell'urto il mutamento di luogo avviene, è vero, in modo continuo, ma allo stesso momento dell'urto subentra un mutamento discontinuo nella velocità degli atomi in quanto ad un tratto questa varia di segno. Ma una simile variazione, un cambiamento nella direzione della velocità non è possibile se questa non ha prima raggiunto la grandezza zero approssimandovisi in modo continuo⁸. In seguito Leibniz integra questa ragione speciale con un'altra più generale: è arbitrario prescrivere alla nostra analisi un limite fisso oltre il quale le sia impossibile penetrare. Un assunto simile non può far valere per sé nessun vero motivo razionale, corrisponde piuttosto alla debolezza della nostra immaginazione e a tale debolezza cerca di adattare la natura. Ma la natura si beffa di tutti i tentativi di questo genere, perché essa viene dall'infinito e va all'infinito⁹. Se si vuole conciliare con la natura la matematica

⁸ Cfr. in proposito il carteggio di Leibniz con Huyghens sull'atomistica in *Hauptschriften*, ed. Cassirer, vol. II, p. 35 ss.

⁹ « Gli atomi sono l'effetto della debolezza della nostra immaginazione che ama adagiarsi e affrettarsi a giungere a una conclusione nelle suddivisioni o analisi; non così accade nella natura che viene

non resta altro che dare piena applicabilità anche per la realtà al concetto fondamentale di essa: al concetto di infinitamente piccolo e infinitamente grande. Le obiezioni sollevate da Aristotele contro l'infinito attuale non hanno distolto Leibniz da questo tentativo.

«A tal punto io sono per l'infinito attuale — scrive egli al Foucher¹⁰ — che, invece di ammettere che la natura l'abborra, come si dice volgarmente, ritengo che essa lo mostri dovunque per meglio sottolineare le perfezioni del suo autore. Così credo non vi sia nessuna parte della materia che non sia, non dico divisibile, ma attualmente divisa, e che di conseguenza la minima particella si debba considerare un mondo pieno di un'infinità di creature diverse».

Con ciò è posto un programma generale che tuttavia attende ancora a lungo la sua attuazione scientifica. L'unione della nuova matematica alla fisica, per quanto immediatamente esse si siano fecondate a vicenda, nell'aspetto puramente metodico si è compiuta solo a poco a poco: il concetto di sistema di coordinate, ad esempio, è stato introdotto nella meccanica solo relativamente tardi, da Maclaurin. Leibniz, è vero, ha analizzato i concetti fondamentali della dinamica e ha dato loro una versione e fondazione nuova, ma non ha svolto un compiuto sistema della dinamica. E lo stesso Newton nell'applicazione fisica del proprio metodo «dei fluenti e delle flussioni» procede, con estrema prudenza: benché lo presupponga dovunque tacitamente, nella presentazione esplicita preferisce usare i precedenti metodi «sintetici» quali si erano sviluppati nella matematica antica. A una compenetrazione effettiva qui si giunge solo coi grandi matematici francesi del sec. XVIII, con d'Alembert e Lagrange. Come scienziati empirici costoro sono dei newtoniani, ma come logici e metodologi della fisica son rimasti del tutto cartesiani.

dall'infinito e va all'infinito. Così gli atomi non soddisfano che l'immaginazione, ma urtano le ragioni superiori» (a Hartsoeker, 30 ottobre 1710, in *Philos. Schr.*, ed. Gerhardt, vol. III, p. 507).

¹⁰ *Philos. Schriften*, ed. Gerhardt, voi. I, p. 416.

A questo nesso accenna già il titolo dell'opera fondamentale di Lagrange (*Mécanique analytique*). Ora lo spirito dell'analisi deve fare il suo ingresso definitivo nella fisica; l'ideale cartesiano della semplicità, del risalire alle *naturae simplices* deve raggiungerci una validità senza restrizioni. Un unico sistema di equazioni deve abbracciare tutti i fenomeni statici e dinamici — e la forma di tali equazioni è determinata dalla nuova analisi dell'infinito. Per questa via d'Alembert e Lagrange son giunti a enunciare il « principio virtuale » che esprime nel modo piú semplice pensabile la condizione generale vigente per tutti i fenomeni dell'equilibrio e del moto. Nella prefazione alla sua dinamica d'Alembert dichiara che da molto tempo s'è cercato con successo di applicare l'algebra alla geometria, la geometria alla meccanica e ciascuna di queste tre scienze alla fisica. Ma non si è badato sufficientemente né a ridurre al minor numero possibile i principî di queste scienze né a conferire loro tutta la chiarezza desiderabile. A tale lacuna d'ordine logico intendono porre rimedio la dinamica di d'Alembert e la *Mécanique analytique* di Lagrange — e specialmente l'opera di Lagrange ha realizzato questo ideale con effettivo rigore. Solo essa ha raggiunto la fusione dell'analisi infinitesimale alla fisica enunciando le equazioni differenziali del moto immediatamente deducibili dal principio d'alembertiano, e insieme ha offerto un modello di chiarezza e precisione logica che rimane esemplare per tutto il prosieguo.

Cosí si è fatta sempre piú stretta e naturale anche la congiunzione del principio di causalità col principio di continuità. D'ora in poi nella fisica classica i due principî sono intrecciati a tal punto che in tutto rigore riesce difficile anche solo tener ferma la loro distinzione puramente concettuale. Neppure Kant ha sciolto questo intreccio, piuttosto lo ha confermato e ha cercato di giustificarlo da un lato nuovo. Per quanto concerne il puro concetto, la categoria della causalità, per Kant è certo fuori dubbio che esso non implica nessuna relazione immediata né alcun legame diretto col concetto di continuità. Ma per

l'uso empirico del concetto causale si aggiunge subito un'ulteriore condizione restrittiva. Se non ha da restare vuoto, il concetto deve potersi riferire all'intuizione pura e in essa potersi rappresentare: si deve « schematizzare ». E ciò comporta il riguardo alla forma pura del tempo: gli « schemi » infatti per Kant non sono altro che « determinazioni a priori del tempo secondo regole » e, secondo l'ordine delle categorie, si rapportano alla serie (quantità), al contenuto (qualità), all'ordine (relazione) e infine all'insieme (modalità) dei fenomeni nel tempo. Per Kant si hanno due versioni differenti del concetto causale a seconda che nella sua definizione si accolga o non si accolga esplicitamente questa richiesta di schematizzazione. Nella prima edizione della *Critica della ragion pura* si trova ancora una formulazione affatto generale del principio di causalità: « tutto ciò che accade (incomincia ad essere), presuppone qualche cosa, a cui segue secondo una regola »¹¹. Qui dunque si postula solo la possibilità di allacciare l'accadere secondo regole, senza avanzare nessuna premessa definita intorno alla specie di queste regole. Il postulato della causalità sembra equivalere al postulato della legalità dell'accadere naturale e restringersi a quest'ultimo. Ma la dimostrazione aggiuntavi del principio causale fa un passo piú oltre coll'introdurre il riguardo al tempo, col designare come lo « schema » di causa ed effetto la « successione del molteplice » in quanto essa è sottoposta a una regola. Ma con la successione è posto di nuovo immediatamente il tempo come sua condizione: e questa prima condizione implica quella della continuità. Nessuna causa può produrre di colpo il rispettivo cambiamento ma solo in un certo tempo, in modo che, come il tempo cresce dal momento iniziale a al compimento dell'effetto in b , così anche la somma di realtà ($b-a$) si produce attraverso tutti i gradi minori compresi fra il primo e l'ultimo.

¹¹ *Critica della ragion pura*, 1ª ed. tedesca, p. 189; ed. Cassirer, vol. III, p. 630; trad. it. cit., vol. I, p. 206 in nota.

Ecco dunque la legge di continuità di ogni cambiamento, il cui principio è che né il tempo e né anche il fenomeno nel tempo constano di parti, che siano le più piccole possibili; eppure lo stato della cosa nel suo cangiare passa al suo nuovo stato attraverso tutte queste parti, come elementi. Non c'è nel reale fenomenico, come non c'è nella quantità del tempo, una differenza che sia la minima possibile, e così il nuovo stato della realtà cresce dal primo, nel quale non esisteva, attraverso tutti i suoi gradi infiniti, le differenze dei quali sono tutte più piccole della differenza fra zero ed a ¹².

Se teniamo presente ancora una volta in uno sguardo retrospettivo questo sviluppo del pensiero filosofico e fisico in cui il concetto di causalità e quello di continuità concregono a poco a poco sempre più profondamente e saldamente insieme, l'uno nell'altro, comprendiamo quanto dovesse riuscire difficile sciogliere da capo il legame che li teneva uniti. Per tale scioglimento non occorre nulla di meno del potente « esplosivo » della teoria quantistica. E intanto la rappresentazione di questi due concetti come indissolubilmente congiunti e interdipendenti s'era talmente radicata che l'annullamento di tale congiunzione fu inteso dai sostenitori della concezione nuova come un annullamento della causalità stessa. Il taglio che staccò la continuità dalla causalità, riuscì un taglio mortale. Ma un'argomentazione siffatta dal punto di vista gnoseologico non si può condurre coerentemente. La caratteristica costitutiva ed essenziale della causalità sta nel postulare in generale una legalità, non nell'indicare come in particolare tale legalità si debba ottenere e realizzare. Se dunque ragioni empiriche e teoriche mostrano che non è possibile soddisfare più oltre al postulato della continuità, con questo solo non s'è ancora dimostrato affatto che sia divenuto insostenibile il postulato causale. Quindi dobbiamo piuttosto liberare quest'ultimo dalle condizioni restrittive

¹² [*Critica della ragion pura*, trad. it. cit., vol. I, p. 221. — N.d.T.].

che fin qui vi si sono immischiate — dobbiamo intenderlo in modo che esso non suoni piú immediatamente come un allacciamento continuo fra le « cose » del nostro spazio intuitivo e gli « eventi » nel tempo intuitivo. Che dal punto di vista di una teoria « critica » della causalità una simile liberazione sia possibile, è indubbio: infatti il principio critico della causalità non contiene nessun enunciato sulla congiunzione di « cose » e « avvenimenti », ma piuttosto un enunciato sul nesso sistematico di conoscenze (vedi qui sopra, p. 32 ss.). Ora, dunque, dobbiamo tener conto della circostanza che queste conoscenze sono entrate in un nuovo coordinamento e in una nuova gerarchia — che « causalità » e « continuità » non stanno piú fra loro nello stesso semplice rapporto che la fisica classica presupponeva. Se anche i rappresentanti della moderna fisica atomica concludono che il postulato dei quanti deve avere come necessaria conseguenza il crollo del principio causale, alla base di ciò vi è un atteggiamento in se stesso discorde: qui essi stessi giudicano ancora dal punto di vista di una situazione gnoseologica che proprio la teoria dei quanti ha superato e sorpassato.

La « crisi della causalità » a cui ha condotto la meccanica dei quanti sussiste certamente ed è abbastanza seria. Ma non è una crisi del puro concetto di causalità bensì una « crisi dell'intuizione »: essa mostra che non ci è piú lecito riferire nel modo consueto tale concetto all'intuizione del « tempo puro » e « schematizzarlo » in questa. A una simile schematizzazione traccia limiti ben definiti lo sviluppo della teoria quantistica. Noi non possiamo piú allacciare la causalità alla descrizione spazio-temporale nello stesso modo che nella fisica classica, e tanto meno possiamo lasciare che la prima si risolva nella seconda. Considerata dal punto di vista puramente gnoseologico questa scoperta non sorprende perché è stata preparata dallo sviluppo della matematica del sec. XIX già prima che si formasse la fisica moderna. La « crisi dell'intuizione »

venne apertamente alla luce già in questa sede¹³. Nella sua fondazione dell'analisi infinitesimale Leibniz muove dal problema generale delle tangenti. Egli considera anzi tutto due punti P e P', posti su una curva, che poi fa spostare sempre più vicini l'uno all'altro e infine coincidere. In questo modo egli giunge alla costruzione del suo cosiddetto « triangolo caratteristico », i cui elementi sono le grandezze dx e dy . Ma in tale passaggio si deve necessariamente assumere che il valore limite cercato esista realmente — che nel punto in questione la curva abbia una determinata « direzione ». Un dubbio in proposito ai tempi di Leibniz non sembrava possibile; ma il dubbio si dovette imporre per forza di cose da quando l'analisi matematica moderna dimostrò che continuità e differenziabilità non coincidono necessariamente, e Weierstrass diede persino l'esempio di una curva continua che non possiede una tangente determinata in nessuno dei suoi punti. Con ciò fu chiaro che l'assunto per cui si può passare sempre e senz'altro da un « rapporto incrementale » a un « rapporto differenziale », dai valori di $\frac{\Delta y}{\Delta x}$ al valore di $\frac{dy}{dx}$, non regge ma vale solo entro certi limiti e riserve. Alla stessa conclusione portano osservazioni e riflessioni d'ordine puramente fisico¹⁴. Ma così è scossa una delle basi essenziali su cui poggia l'edificio e dell'analisi e della fisica classica.

¹³ Cfr. a questo proposito l'esposizione di H. HAHN, *Krise und Neuaufbau in den exakten Wissenschaften*, cinque conferenze, Leipzig-Wien 1933, p. 41 ss.

¹⁴ « Resteremo ancora nella realtà sperimentale se, con l'occhio al microscopio, osserviamo il moto browniano che agita ciascuna particella in sospensione in un fluido. Per fissare una tangente alla sua traiettoria, dovremmo trovare un limite almeno approssimativo per la direzione della retta che congiunge le posizioni di tale particella in due istanti molto ravvicinati. Ora, nella misura in cui questa esperienza si può fare, quando si fa decrescere la durata che separa questi due istanti tale direzione varia follemente. Cosicché quanto questo studio suggerisce all'osservatore spregiudicato è ancora la funzione senza derivata e per nulla affatto la curva con tangente » (PERRIN, *Les atomes*, Paris 1913², p. IX).

Ora risulta chiaro che i « rapporti nel grande » non permettono nessuna inferenza immediata sui « rapporti nel piccolo ». Leibniz ha formulato a volte il suo principio di continuità in modo da fargli esigere immediatamente proprio questa omogeneità. Egli lo prende nella forma di « principio d'analogia » secondo cui si deve assumere un'uniformità totale dell'essere e dell'accadere in tutti i campi della realtà. Quale che sia il campo a cui ci volgiamo, alla fine troviamo che in esso non c'è nulla di radicalmente nuovo, scopriamo che le regole da noi osservabili sono dovunque le stesse; *C'est tout comme ici* — come dice il buffone in un'arlecchinata francese (*Harlequin Empereur de la Lune*)¹⁵. Leibniz ha espresso la stessa massima con più rigore nel detto per cui le regole del finito devono valere anche nell'infinitamente piccolo, e viceversa quelle dell'infinitamente piccolo devono valere nel finito: *les règles du fini réussissent dans l'infini et, vice versa, les règles de l'infini réussissent dans le fini*¹⁶. Ma lo sviluppo della teoria quantistica ha scosso le basi empiriche e teoriche di questa massima. Il pensiero fisico non può fidarsi né gli è lecito fidarsi più oltre di una simile conclusione analogica. Esso deve tener conto che il passaggio a nuovi campi di oggetti può esigere mutamenti profondi non solo nelle singole leggi bensì nelle stesse premesse e forme generali di pensiero della fisica. Come tale il postulato della legalità qui deve sempre rimanere valido; ma al postulato della « uniformità » e « omogeneità » dell'accadere naturale come è stato spesso avanzato nella logica della fisica classica, si deve rinunciare¹⁷. La fisica moderna si vede

¹⁵ Leibniz a Clarke, lettera V, §§ 3 e 4, in *Philos. Schriften*, ed. Gerhardt, vol. VII, p. 394; in *Hauptschriften*, ed. Cassirer, vol. I, p. 173.

¹⁶ Leibniz a Varignon, in *Math. Schriften*, ed. Gerhardt, vol. IV, p. 937.

¹⁷ Leibniz avanzò esplicitamente questo postulato e ritenne un pregio essenziale del proprio sistema il fatto che esso vi fosse pienamente soddisfatto. « Apud me — scrive a Christian Wolff — magna uniformitate naturae omnia ubique in magnis et parvis,

posta nella necessità di impiegare l'uno accanto all'altro sistemi differenti di concetti, non riducibili l'uno all'altro. Ma l'unità della conoscenza della natura neppure esige una identità siffatta. Le basta che i sistemi diversi siano posti l'uno rispetto all'altro in una relazione definita, che ci sia possibile passare dall'uno all'altro secondo una determinata regola. È una regola siffatta quella fissata nel principio di corrispondenza di Niels Bohr per la relazione in cui porre concetti « classici » e concetti quantistici. Qui ci è data in mano una specie di chiave traduttrice che ci mostra in qual modo connettere e usare l'uno accanto all'altro i linguaggi diversi. Certo resta anche qui il fatto che la traduzione non può essere una semplice versione interlineare; che non possiamo tradurre l'uno nell'altro il linguaggio classico e quello quantistico parola per parola ma ci dobbiamo arrestare a una libera trascrizione a senso.

Così è un difficile problema della teoria quantistica la questione stessa se sia possibile tener fermi e adottare semplicemente i nostri concetti geometrici nel procedere alla descrizione dei fenomeni del microcosmo. « Lo spazio matematico — dice Schrödinger — ha una struttura estremamente semplice nel piccolo. Per piccole che si facciano le dimensioni a cui si perviene, si è sempre di fronte alla stessa cosa — a parte una trasformazione di somiglianza. Il che appare anche troppo facile per impie-

visibilibus et invisibilibus, eodem modo fiunt soloque gradu magnitudinis et perfectionis variant » (*Briefwechsel zwischen Leibniz und Christian Wolff*, ed. Gerhardt, Halle 1860, p. 44). Si confrontino con questo le parole di un fisico moderno: « In realtà non si tratta affatto di una crisi del determinismo ma di una crisi del meccanicismo, di cui cerchiamo di valerci per rappresentare un nuovo campo. Nel microscopico infatti constatiamo l'insufficienza delle nozioni e delle idee che avevano avuto successo nel macroscopico, che per questo e a contatto prolungato con questo si erano create per tante generazioni. Io trovo ciò infinitamente più interessante » (P. LANGEVIN, *La notion de corpuscules et d'atomes*, Paris 1934, p. 35).

garvici la carta geografica dell'accadere reale »¹⁸ Inteso nella sua generalità effettiva, il « principio causale » chiede solo che sussista una simile « carta geografica », senza enunciare alcunché intorno alla forma particolare di essa. Nello studio dell'accadere naturale dobbiamo sempre usare un qualche reticolo generale di orientamento ma non occorre che ne fissiamo le maglie fin dall'inizio. Ogni nuovo orizzonte che ci si apre può chiederci una variazione dell'orientamento. Ma ciò non tocca il postulato della legalità, della determinazione funzionale in generale; questo piuttosto si dimostra sempre di nuovo la vera e propria invariante. Tale invariante è certo troppo generale per poter definire da sola compiutamente la forma concreta della conoscenza della natura. Kant impone allora giustamente che il concetto generale, la « categoria » della causalità, per essere utile e applicabile empiricamente si specifichi nel senso definito. Ma noi non possiamo piú cercare tale specificazione nella stessa direzione di Kant: non ci possiamo accontentare della semplice relazione dei concetti con gli schemi sensibili puri, con le « forme intuitive di spazio e tempo ». Infatti sono proprio questi schemi ad aver perduto la loro portata universale, da un lato con la scoperta delle geometrie non euclidee e dall'altro coi risultati della teoria della relatività speciale e generale. Quindi la logica trascendentale non si lascia piú allacciare né, per così dire, vincolare all'estetica trascendentale nel modo tenuto da Kant. Ora la particolareggiata richiesta, indispensabile per l'uso empirico del concetto causale, si deve cercare piuttosto nell'ambito dei concetti stessi. Il concetto causale si può congiungere in vario modo e fondere piú o meno stabilmente ora con questo ora con quel mezzo concettuale. A seconda della specie di fusione assume una forma diversa. A definirne la forma ora è la congiunzione con la categoria di sostanza, ora è quella con la categoria della continuità: ora esso

¹⁸ *Über die Anwendbarkeit der Geometrie im Kleinen* in « *Naturwissenschaften* », XXII, 1934, p. 519.

si permea dell'intuizione della grandezza continua, ora si rapporta alla pura forma del numero discreto.

E ogni volta che esso si scioglie da una congiunzione per passare in un'altra, pare posta in pericolo la causalità stessa. Ma uno sguardo alla storia della fisica ci insegna che tale apparenza si è poi anche sempre dissipata felicemente. Da tutte le dure prove a cui fu esposto in questa storia, il concetto di causa è uscito vincitore: alla fine ne è emerso sempre di nuovo come una fenice dalle sue ceneri. Una prova siffatta si ebbe quando il pensiero fisico giunse a lasciar cadere la condizione della vicinanza spaziale fra causa ed effetto. Oggi noi forse non ci rendiamo conto sufficientemente di qual sacrificio implicasse per l'intelletto la rinuncia a questa condizione. Qui si operava come un taglio netto: si scioglieva il legame che sino ad allora aveva annodato il concetto di causa dell'intuizione dello spazio continuo. La trasmissione degli effetti nello spazio avviene in modo discontinuo: salta da un luogo all'altro senza toccare il tratto intermedio che separa i due luoghi. Quando Newton per primo introdusse questo concetto di « azione a distanza », incontrò la più acerba diffidenza da parte di filosofi e fisici. Contro di esso protestarono, per ragioni analoghe, Leibniz e Huyghens. Essi non ci videro affatto una semplice modificazione della considerazione della natura invalsa fin lì ma ne temerono una rovina completa della spiegazione della natura in generale. Abbandonando la base sicura delle teorie cinetiche la scienza della natura sembrava ritornare da capo alle « qualità occulte », sembrava doversi gettare nelle braccia della mistica. Nell'assunzione di una forza che agisca immediatamente a distanza, Leibniz non vede altro che un ritorno alla « barbarie », una ricaduta nel « regno delle tenebre »¹⁹; e anche Huyghens si schiera esplicitamente contro l'« absurdità » di un assunto

¹⁹ « Le royaume des ténèbres »: cfr. carteggio con Clarke, lettera V, § 43, in *Hauptschriften*, ed. Cassirer, vol. I, p. 208. Cfr. specialmente il saggio *Antibarbarus Physicus* in *Philos. Schriften*, ed. Gerhardt, vol. VII, p. 337 ss.

simile. Egli si meraviglia che Newton si sia presa la briga di fare dei calcoli tanto difficili e complicati sulla base di un principio siffatto²⁰. Eppure poco dopo è proprio questo « assurdo » principio a valere non solo come ammissibile ma come necessario. L'azione a distanza che prima appariva una strana anomalia, ora diviene il modello e il prototipo delle vere leggi di natura. Piano piano essa assoggetta a sé tutti i campi dell'accadere naturale: dalla meccanica penetra nella chimica e nella teoria generale dell'elettricità. Ma qui avviene ora il rovescio decisivo. Il lavoro tranquillo e costante di Faraday, compiutosi lungi da ogni controversia delle scuole ed esente da ogni dogma della fisica del tempo, supera il concetto di azione a distanza. Tale superamento nondimeno non comporta affatto il ritorno alle teorie cinetiche precedenti. Le leggi del campo elettrico enunciate da Faraday e Maxwell non si lasciano ricondurre alle leggi meccaniche dell'urto vigenti in tali teorie. Se infatti nelle « forze propagate ad effetto circostante » di Faraday e Maxwell si stabilisce la relazione allo spazio continuo, tuttavia nel passaggio della fisica meccanicistica alla fisica del campo si è mutata radicalmente la teoria della sostanza²¹. Qui dunque dovendosi connettere e rapportare a un concetto modificato della sostanza, il concetto causale ci si presenta ancora una volta in una forma nuova, più matura. Se si tiene ben presente tale sviluppo, vi si scorge ad ogni modo almeno questo: che neppure il concetto di causalità della fisica classica è mai stato quella creazione semplice e pienamente armonica che spesso ci viene descritta, ma celava in sé anch'esso un gran numero di problemi e una certa quantità di tensioni dialettiche.

Per chiarire la ragione vera e propria di queste tensioni occorre tuttavia risalire ancor più indietro. Goethe ha

²⁰ A Leibniz, 18 novembre 1690, in *Math. Schriften*, ed. Gerhardt, voi. II, p. 57.

²¹ Cfr. sopra, p. 192 ss.

detto che tutti i tentativi di risolvere i problemi della natura sorgono dai conflitti insorgenti sempre di nuovo tra la facoltà di pensare e l'intuizione²². Riguardo a questo detto si può far notare che anche l'odierna problematica della teoria quantistica si radica in un conflitto fra intuizione e pensiero, che è rintracciabile fin nei primordi consapevoli della elaborazione di concetti filosofici e di concetti matematici. La prima alleanza in cui entrano queste due specie di elaborazione concettuale, si presenta nella teoria pitagorica dei numeri. Qui l'analisi della matematica e l'analisi della filosofia sono fuse immediatamente l'una nell'altra; il concetto di verità proprio della filosofia è riferito al concetto di numero proprio della matematica, e ristretto alle condizioni di questo. Se non vi fosse il numero con la sua caratteristica funzione fondamentale, la funzione del « delimitare », neppure potrebbe esservi alcun oggetto della conoscenza. Nulla delle cose sarebbe chiaro ad alcuno — si dice in un frammento di Filolao — né nei loro rapporti con sé né con altri, se non esistesse il numero e la sua essenza. È il numero a prodigare conoscenza, a guidare e insegnare a ciascuno in ogni cosa che gli sia dubbia o sconosciuta²³. Ma in questo fondamento ultimo di ogni conoscenza, che ne deve garantire la precisione e la sicurezza, si manifesta subito una problematica nuova e profonda. È stata questa problematica a imprimere il suo marchio su tutto lo sviluppo successivo del pensiero greco, in matematica e in filosofia. Essa nasce nel momento in cui si presenta l'impossibilità di penetrare e dominare pienamente con la natura e l'« essenza » del numero intero proprio quel campo a cui anzi tutto il pensiero matematico si riferisce: il campo delle grandezze continue. Il fatto dell'« irrazionale », il fatto che si diano lunghezze per le quali non si possono trovare valori nume-

²² *Der Kammerberg bei Eger* in *Naturwiss. Schriften*, ed. di Weimar, vol. IX, p. 91.

²³ FILOLAO, fr. 11, Diels 32 B 11.

rici corrispondenti, pone la concezione pitagorica del cosmo di fronte a un'aporia sulle prime insolubile. L'« armonia » del cosmo ora non sembra potersi mantenere piú oltre; infatti la forza del numero, che dovrebbe produrre tale armonia, è paralizzata nel problema della grandezza continua. Di fronte al pensiero si è riaperto un impenetrabile, un *ἄλογον* e *ἄρρητον*. Qui dunque non si trattava piú di un problema matematico particolare ma di una questione accampantesi nel cuore stesso della paideia scientifica e filosofica. Platone ne è talmente preso che nel settimo libro delle *Leggi* dichiara lo studio del fatto dell'« incommensurabilità » addirittura obbligatorio per tutti e considera l'incertezza su questo punto come una « ridicola e vergognosa ignoranza in cui nascono gli uomini » di cui ci si dovrebbe vergognare non solo per se stessi ma anche per tutti gli Elleni²⁴. In questo passo parla tutta la passione, il pathos genuino e profondo della filosofia e della scienza greca. Filosofia e scienza s'accorgono di essere qui sulla soglia di un nuovo problema di fondo che può riuscire decisivo per la forma complessiva del sapere²⁵.

Il modo in cui il pensiero matematico ha cercato di superare questo problema, è noto. Non occorre nulla di meno che l'elaborazione di un armamentario affatto nuovo dell'analisi matematica. Perché il solo numero fosse capace di dare un'esposizione esatta e adeguata del mondo delle grandezze continue, esso dovette prima modificare la propria natura. Il concetto di numero « discreto » si doveva trasformare non solo in modo tale da venire applicato al continuo intuito come ci si configura nelle forme fondamentali dello spazio e del tempo, ma anche così da poter esaurire in

²⁴ PLATONE, *Leggi*, VII 819 D.

²⁵ Sulla posizione del pensiero greco nel problema del « numero irrazionale » qui non si può aggiungere altro. A questo proposito rimando alle due opere, entrambe eccellenti, di O. TOEPLITZ, *Mathematik und Antike* in « Die Antike », I, 1925, p. 175, e di SCHOLZ, *Warum haben die Griechen die Irrationalzahlen nicht aufgebaut?* in « Kant-Studien », XXXIII, 1928, p. 35 ss.

certo modo tale continuo. E questa meta parve raggiunta solo quando la matematica moderna, in incessante elaborazione e raffinamento dei propri mezzi concettuali, riuscì a perfezionare il sistema dei « numeri naturali » nel sistema dei « numeri reali ». Solo qui la lacuna parve colmata — il conflitto fra intuizione e pensiero sembrò superato. Ora l'insieme di tutti i punti di una retta si può far corrispondere univocamente e senza lacune all'« insieme di tutti i numeri reali ». La fondazione della teoria degli insiemi da parte di Cantor e la definizione dei numeri irrazionali data da Dedekind si potevano considerare la soluzione conclusiva del problema; qui infatti coi soli mezzi del puro pensiero si costruiva un continuo che era veramente all'altezza di quello delle grandezze intuitive e in grado di esprimerlo in ciascuno dei suoi tratti caratteristici. Dedekind ritiene l'aritmetica e l'analisi una parte della logica pura, esige che il concetto di numero sia svolto come un portato diretto delle pure leggi del pensiero e del tutto indipendentemente da rappresentazioni o intuizioni dello spazio e del tempo. Che un siffatto svolgimento sia possibile, che possiamo costruire per via logica un regno continuo dei numeri, solo allora elevabile a metro delle nostre rappresentazioni di spazio e tempo: questo è considerato da Dedekind il vero trionfo del pensiero analitico²⁶. La « crisi dei fondamenti » a cui fu condotta la matematica nell'ulteriore sistemazione della teoria degli insiemi, ha certamente mostrato che in questa prima fondazione era rimasto un pericoloso argomento di conflitto. Anche dopo l'elaborazione del « continuo numerico » restava innegabile non essersi raggiunta una vera coincidenza fra questo e il continuo intuito. Il numero non era in grado di spogliarsi del carattere logico fondamentale dell'« essere discreto » neppure in tale ampliamento e raffinamento. Nello scritto sul continuo del 1918 Hermann Weyl poté dichiarare

²⁶ Cfr. specialmente DEDEKIND, *Was sind und was sollen die Zahlen?*, Braunschweig 1887.

che il grande compito posto dalla scoperta pitagorica dell'irrazionale, il compito di « cogliere matematicamente come totalità di "stadi" discreti il continuo dato dall'intuizione, secondo il suo contenuto formulabile in nozioni esatte, sarebbe rimasto irrisolto oggi come sempre, nonostante Dedekind, Cantor e Weierstrass ». La correlazione ora raggiunta non sarebbe affatto una concordanza effettiva: « Non si dimentichi che nel "continuo" dei numeri reali i singoli elementi di fatto se ne stanno isolati l'uno rispetto all'altro "esattamente" come i numeri interi »²⁷. Pertanto dal punto di vista della pura teoria dei numeri si guardò sempre con una certa diffidenza a quegli « ampliamenti » a cui il concetto di numero doveva adattarsi per soddisfare le richieste impostegli da parte della grandezza continua. Tali ampliamenti furono considerati una specie di violenza recata al carattere originario del puro numero « discreto », una trasformazione accettabile come espediente prammatico artificiale ma che restava pur sempre viziato da una certa dose di artificiosità e di arbitrio. Caratterizza bene quest'ultima concezione il noto detto di Kronecker: che i numeri interi sono creati da Dio e tutto il resto è opera umana.

Al conflitto fra le esigenze logiche del numero discreto e le richieste provenienti dall'intuizione delle grandezze continue la moderna conoscenza della natura ha cercato di dare una soluzione diversa. Essa partì dal fenomeno fondamentale del moto e dall'analisi di questo fenomeno acquisì certi concetti di base che, perseguiti più oltre, condussero a un assetto completamente nuovo della matematica. Nel riguardo storico e sistematico, la nuova « analisi dell'infinito » risale ai problemi della dinamica. Nel suo sforzo di definire i concetti di velocità e accelerazione, Galilei scoprì quei nuovi mezzi concettuali che contengono in germe la metodica posteriore dell'analisi

²⁷ H. WEYL, *Das Kontinuum. Kritische Untersuchungen über die Grundlagen der Analysis*, Leipzig 1918, pp. 16, 69.

infinitesimale. E questo legame si strinse sempre più saldamente nel prosieguo. La *Geometria indivisibilium* di Cavalieri, la *Stereometria doliorum* di Keplero, il metodo newtoniano dei « rapporti primi ed ultimi » sono gli ulteriori stadi caratteristici di questo processo di pensiero. L'opera di Keplero, divenuta la fonte di tutte le ricerche posteriori sul volume dei solidi, per determinare tale volume offre un metodo che consiste nel pensarli risultanti dalla rotazione di una determinata forma; dall'analisi del concetto di moto uniforme e non uniforme Newton svolge le idee fondamentali di una matematica universale delle grandezze variabili. Tale sviluppo trova la sua conclusione e il suo coronamento logico quando Leibniz introduce il concetto generale di funzione e formula esattamente il concetto di continuità d'una funzione. Ora si delinea un campo in cui il pensiero matematico entra in certo modo in contatto immediato con la realtà effettuale. È ben vero che, come afferma lo stesso Leibniz, nelle creazioni della natura non ve n'è alcuna tale da corrispondere in tutto rigore alle determinazioni di cui sono capaci le nostre definizioni matematiche; ma nondimeno gli effettivi fenomeni della natura sono e devono essere regolati in modo tale che nessun evento reale infranga mai la legge di continuità e tutte le altre regole esatte della matematica. Altrimenti non si darebbe nessuna spiegazione comprensibile della natura, nessuna penetrazione delle sue cause « intelligibili »²⁸.

Spezzando questo presupposto la teoria dei quanti in un certo senso riporta il problema alla sua origine. È una teoria « pitagorica » della natura: non afferma solo la possibilità ma la necessità di penetrare la natura col concetto di numero discreto e intenderla per mezzo di questo. Ma per mettere in atto tale concezione di fondo occorre certo fare un passo caratteristico e altamente rivo-

²⁸ Cfr. LEIBNIZ, *Réponse aux réflexions de Bayle*, in *Philos. Schriften*, ed. Gerhardt, vol. IV, p. 568 ss.; *Hauptschriften*, ed. Cassirer, vol. II, p. 402 ss.

luzionario. I presupposti della spiegazione-della-natura coltivata sin qui si invertono. Se questa, per l'esigenza della continuità che sembra data e garantita immediatamente dall'intuizione, richiedeva una trasformazione di tutti i concetti matematici nel senso di tale esigenza — ora l'accadere stesso viene preso *sub specie* del numero « discreto » e ne riceve un'impronta nuova e differente. Il numero discreto esige l'atomismo dell'accadere. Nell'enunciazione della legge dell'irraggiamento di Planck non costringono a questa conclusione considerazioni speculative o matematiche ma puramente empiriche. Ma una volta tirata tale conclusione emersero anche d'altronde sempre più chiaramente nel quadro della natura quei tratti di cui non si poté più dare alcun conto coi concetti di base della fisica classica, col concetto di funzione continua e col metodo delle equazioni differenziali. Proprio mentre si toccavano i problemi veramente fondamentali della natura, mentre si cercava di intendere teoricamente la stabilità degli atomi, la costanza e la determinatezza delle loro proprietà, ci si venne a trovare di fronte a un limite della metodica classica. Dal punto di vista di quest'ultima nel caso dell'irraggiamento si sarebbe dovuto avere la cessione *c o n t i n u a* di energia e l'emissione simultanea di *t u t t e* le righe spettrali, il che è incompatibile col postulato della stabilità e col dato di fatto empirico fondamentale di righe spettrali nettamente distinte. Ora dunque si mostrava nei fenomeni stessi una forma di delimitazione e di « particolarizzazione » a cui erano in grado di soddisfare pienamente solo la metodica del numero « discreto », solo le « regole di quantizzazione ». Ma per portare alla vittoria questa concezione i concetti fondamentali della conoscenza della natura dovettero prima entrare in un nuovo tipo di congiunzione reciproca, a prima vista estremamente singolare. Nella « formula magica » che sta al vertice della teoria quantistica, nella formula $\epsilon = h\nu$ si afferma una equivalenza di energia e frequenza, cioè si connettono l'una all'altra grandezze di dimensioni del tutto diverse. E tuttavia le conseguenze empiriche otte-

nute da questa relazione « paradossale » ora mostrano da un lato affatto nuovo che la vera forza conoscitiva insita nel numero discreto non sta affatto nella sola forza di separazione ma altrettanto in quella di unificazione. Il numero torna ad adempiere l'ideale che gli avevano posto i Pitagorici. Frutta « l'unione di cose variamente confuse e la concordia di cose discordi » (πολυμιγέων ἔνωσις καὶ δῖχα φρονεόντων συμφρόνησις). Planck ha detto che uno dei massimi pregi, non sempre adeguatamente apprezzato, della teoria atomica di Bohr, sta nella circostanza che a questa teoria non occorrono altre costanti nuove neppure nelle sue applicazioni piú specifiche, che piuttosto le bastano perfettamente i quanti elementi di massa, elettricità e azione, e che essa attua l'assetto complessivo della fisica e della chimica con queste sole grandezze e la serie naturale dei numeri interi²⁹.

A considerazioni analoghe si giunge quando si confrontano i procedimenti della nuova meccanica quantistica con quelli della meccanica classica. Quest'ultima poggia su un principio metodico a cui Leibniz ha dato una formulazione sommamente espressiva e caratteristica: in una lettera al matematico de Volder in cui cerca di persuadere quest'ultimo della verità e necessità del suo principio di continuità, Leibniz dichiara che nell'indagine della natura si dovrebbe prendere le mosse dall'assioma generale che le cose riescono tanto piú intelligibili quanto piú rigorosamente sono analizzate e « discusse »: *quanto res discutuntur magis, tanto magis intellectui satisfi*³⁰. La fisica classica intende questa specie di « discussione » nel senso strettamente letterale. Esige che la conoscenza non si arresti a nessuna totalità indivisa; che essa debba « spezzettare » sempre di nuovo ogni intero in parti finché non sia perve-

²⁹ PLANCK, *Die Bohr'sche Atomtheorie* nel fascicolo dedicato a Niels Bohr di « *Naturwissenschaften* », XI, 1923, p. 536 ss.

³⁰ Leibniz a de Volder, 24 marzo 1699, in *Philos. Schriften*, ed. Gerhardt, vol. II, p. 168; *Hauptschriften*, ed. Cassirer, vol. II, p. 288.

nuta agli elementi ultimi, indivisibili, dell'accadere naturale. Riferito al moto, ciò significa che è inevitabile descrivere ogni moto di un sistema materiale in modo tale da risolverlo in singoli eventi elementari strettamente « localizzati », cioè riferiti a singoli elementi spaziali e temporali. A questo vincolo la nuova meccanica deve rinunciare; essa è condotta all'idea singolare che ogni singolo punto materiale di un sistema si trovi in ogni tempo in certo modo « anche » in tutti i luoghi dello spazio. Così la concezione quantistica fonda un nuovo concetto di « totalità » dell'accadere naturale. La nuova meccanica non connette più la formulazione delle leggi del moto a eventi singoli rigidamente localizzati; piuttosto cerca di cogliere certe pure « forme fondamentali » dell'accadere naturale che intende tener ferme e rappresentare come forme, cioè senza spezzettarle in parti. Da tutto ciò consegue che la relazione fra « continuo » e « discreto » nella nuova fisica si dovette intendere in un modo completamente diverso da quanto era avvenuto nei precedenti sistemi scientifici della natura.

Dall'altro lato è innegabile che l'antitesi fondamentale fra i due concetti di base non è risolta pienamente neppure in questa nuova versione. Nel contenuto tale antitesi continua a sussistere in quanto la nuova fisica si divide in due campi nettamente separati, nella teoria dell'irraggiamento e in quella della materia. Entro il primo campo tutti i fenomeni si lasciano ordinare in una successione continua: quando passiamo dalle onde hertziane ai raggi infrarossi, alla luce visibile, ai raggi ultravioletti e infine ai raggi Röntgen di « durezza » massima, in questo passaggio non c'è nessun « salto » improvviso: qui abbiamo a che fare con una variazione continuativa della frequenza. Ma le diverse forme della materia non si lasciano ordinare a questo modo in una serie continua; gli elementi chimici, nonostante tutte le relazioni sistematiche intercorrenti fra loro, restano pur sempre separati l'uno dagli altri come « isole nel mare ». E alla stessa differenza caratteristica siamo condotti quando prendiamo in considerazione

le diverse forme in cui si è presentata la nuova meccanica dei quanti. In Schrödinger prevale chiaramente il punto di vista della « continuità », mentre in Heisenberg il ruolo primario e decisivo è svolto dalla categoria del numero discreto. Là è l'idea di funzione continua a definire l'assetto della nuova meccanica nella forma dell'equazione ondulatoria; qui si introduce un'algebra che rinuncia a ogni accostamento al regno delle grandezze continue, e con ciò anche a ogni possibilità di illustrazione intuitiva diretta, per limitarsi a operazioni con puri simboli. Nella teoria di Heisenberg le variabili continue classiche sono sostituite da « matrici », cioè da sistemi di grandezze numeriche discrete, mentre la meccanica ondulatoria procede nella direzione esattamente opposta col passare dalla meccanica classica di punto a una pura teoria del continuo³¹. Se abbracciamo in uno sguardo d'insieme il tutto di questo sviluppo e ne teniamo presenti le premesse gnoseologiche, dovremo convenire che quei « conflitti fra pensiero e intuizione » che secondo Goethe sono alla base di ogni vero problema della natura, nella nuova fisica non sono affatto appianati; piuttosto sono riconosciuti come tali con maggior rigore di prima. Ora infatti invece di alternare semplicemente le sue determinazioni di base della continuità e della discontinuità, invece di assegnarle a campi differenti dell'essere col riferire l'una all'irraggiamento e l'altra alla materia, sorge il compito molto più arduo e paradossale di farle compenetrare l'una nell'altra in modo da cogliere uno stesso accadere, per sé medesimo, in entrambi i punti di vista e descriverlo secondo entrambi³². Continuo e discontinuo, immagine ondulatoria e immagine corpuscolare in linea di principio devono essere applicabili a ogni essere

³¹ Altri particolari in SCHRÖDINGER, *Abhandlungen über die Wellenmechanik*, Leipzig 1928, Abhandl. I.

³² Cfr. in proposito specialmente le esposizioni di LANGEVIN, *L'orientation actuelle de la physique* e di PERRIN, *La chimie physique* nel volume miscelaneo *L'orientation actuelle des sciences*, Paris 1930.

fisico; la diffusione continua della luce si deve poter rappresentare e interpretare col concetto di corpuscolo, e la materia discreta col concetto di onda. E così il conflitto si aggrava, ma questo tuttavia non porta necessariamente a nessuna rinunzia scettica, a nessun *ignorabimus*: anzi, fin qui si è sempre visto che simili conflitti non hanno un significato solo negativo ma anche sommamente positivo; che invece di drizzare barriere insormontabili alla conoscenza, essi piuttosto si dimostrano sue importantissime forze motrici.

CAPITOLO II

PER IL PROBLEMA DEL « PUNTO MATERIALE »

Nelle discussioni gnoseologiche tenute con l'energetismo, Boltzmann muove dalla premessa che vi siano due forme di considerazione della natura. La prima, che egli chiama « fenomenologica », in ogni campo di problemi che affronta, si accontenta di porre certe equazioni differenziali ritenendo di possedere in queste una descrizione completa del campo che la esonera dalla necessità di introdurre altri assunti ipotetici. Essa allora guarda dall'alto con un certo disprezzo l'altra concezione della natura, che trova la sua espressione più chiara e caratteristica nell'atomismo; essa rimprovera all'atomistica di pensare per semplici immagini invece che per concetti rigorosi. Ma Boltzmann si studia di mostrare che tale rimprovero si fonda su un'illusione. Egli fa notare che in fondo anche le equazioni differenziali della fenomenologia hanno pur sempre bisogno di « immagini ideali » quali che siano, su cui poggiare, e che senza queste non si potrebbero raggiungere neppure le equazioni. Anzi tutto si deve sempre pensare un numero finito di elementi, per poi aumentarli continuamente. Ma a che giova nascondere questa esigenza di pensare un gran numero di elementi individuali, se essi già si devono accogliere nel formare le equazioni differenziali? Chi pertanto ritiene che le equazioni differenziali si siano sbarazzate dell'atomistica, si smarrisce perdendo di vista il complesso. Nel fissare l'equazione differenziale devesi avanzare solo l'ulteriore premessa che, per molto che si raffinino i mezzi d'osservazione, non saranno mai osservabili differenze tra i fatti e i valori limite

dedotti. Ma proprio questa premessa immette nel quadro qualcosa di nuovo e di indimostrato. Secondo Boltzmann non è mai da escludere in nessun caso la possibilità che il quadro rappresenti i fenomeni nel migliore dei modi per un certo numero, molto grande, di variazioni [*Mannigfaltigkeitspunkte*] e che invece se ne allontani di nuovo in un aumento ulteriore di tale numero — il che, se assumiamo che gli atomi esistano in numero grande ma finito, deve accadere sempre.

Tali considerazioni, rintracciabili in uno studio di Boltzmann *Sull'indispensabilità dell'atomistica nella scienza della natura*¹ come anche all'inizio delle sue *Lezioni sui principî della meccanica* (1897), a quanto vedo non hanno trovato particolare attenzione né nella letteratura gnoseologica né in quella sulla fisica². E tuttavia contengono un problema importante e fecondo: predicono infatti una difficoltà che solo nel prosieguo della conoscenza fisica si è imposta con effettiva chiarezza. Dove l'ipotesi atomistica si prenda sul serio, l'ammissibilità di certi passaggi al limite solitamente compiuti dalla fisica classica senza esitare, di fatto deve apparire problematica. L'assunto che le nostre misurazioni siano approssimabili oltre ogni limite di precisione, in fondo poggia sempre sul presupposto della divisibilità all'infinito; dunque implica un postulato di continuità che è contraddetto dall'atomistica stessa. Così fra la *metodica* classica delle equazioni differenziali e l'atomistica, fondantesi sul principio del numero discreto finito, sussiste fin dall'inizio un certo dissidio. Leibniz lo ha visto chiaramente e proprio per questo, con perfetta coerenza, ha espulso gli atomi dalla sua fisica, quella che egli intendeva costruire come una fisica rigorosamente infinitesimale.

¹ In «*Annalen der Physik und Chemie*», nuova serie, vol. LX; ristampato in *Populäre Schriften*, cit., p. 141 ss.

² Fa eccezione lo studio di R. HOENIGSWALD, *Zum Begriff des Atoms* in «*Festschrift für Paul Natorp*», Berlin 1924, p. 178 ss., che accenna esplicitamente all'importanza gnoseologica di questo saggio di Boltzmann.

Il suo principio di continuità e omogeneità esige che l'estrapolazione sia possibile senza restrizioni — sia dal lato dell'infinitamente grande sia dal lato dell'infinitamente piccolo. Ma di tale esigenza egli non seppe addurre una ragione logicamente stringente; per essa egli si dovette fondare su certi assunti teleologici (vedi qui sopra, p. 233 ss.). L'espressione adeguata per la descrizione dell'accadere atomico in fondo non sono i rapporti differenziali ma i rapporti incrementali. La teoria dei quanti ha posto in chiaro per prima anche questa antitesi rimasta a lungo nascosta. Il « momento » della grandezza continua e quello della grandezza discreta qui si contrappongono nettamente. Così nella teoria di Bohr della serie Balmer dell'idrogeno l'orbita dell'elettrone è definita da una condizione classica e da una condizione quantistica. In congiunzione le sue condizioni esigono che l'elettrone possa muoversi solo su certe sfere quantizzate. E secondo il principio di corrispondenza di Bohr si distinguono due frequenze, una quantica e una classica, la cui differenza risulta come quella intercorrente fra rapporto incrementale e rapporto differenziale³. Se ci atteniamo alla nostra concezione generale per cui la legalità è preordinata all'oggettività e quest'ultima è definibile solo mediante la prima, sulla base di questo dualismo dovremo aspettarci di incontrare nell'« oggetto » della nuova fisica atomica una struttura diversa e più completa di quella presupposta dalle teorie classiche. Un'analisi più approfondita conferma a pieno questa aspettativa.

Il concetto della meccanica classica si regge su due presupposti fondamentali: sul concetto di « sostanza » e su quello di spazio. La materia è *substantia extensa* e in ultima analisi è solo questo. A questa determinazione si devono ricondurre tutte le sue proprietà percepibili. Tale concetto di oggetto si trova svolto con pregnante rigore

³ Altri particolari in SOMMERFELD, *Atombau und Spektrallinien* cit., 4^a ed., pp. 105 ss., 328 ss.

in Descartes. Che cosa vogliamo dire — egli domanda — quando assegnamo a un oggetto un essere fisico, una esistenza « oggettiva »? Forse che tale affermazione d'esistenza non implica altro se non che nell'oggetto pensiamo unite qualità diverse, ciascuna delle quali si lascia descrivere sensibilmente? Evidentemente no, perché la semplice somma di queste qualità non equivale all'essere dell'oggetto. Se consideriamo una qualunque cosa singola, ad esempio un pezzo di cera, la possiamo caratterizzare mediante certe proprietà percepibili, mediante la sua grandezza, la forma, il colore, la durezza, l'odore, eccetera. Ma nondimeno la cera « è » qualcos'altro dall'aggregato di tutte queste singole proprietà. Se infatti supponiamo che essa si avvicini al fuoco e si liquefaccia, le troviamo tutte completamente mutate: il suo colore, la sua durezza sono scomparsi, il suo profumo è svanito. E tuttavia non è forse la « stessa » cera? Nessuno lo nega; ciascuno è convinto che l'« essere » della cera sopravvive a tutti questi mutamenti. Ne viene che tale essere si può cogliere « solo nel pensiero » ma non percepire sensibilmente: « superest ut concedam, me ne quidem imaginari quid sit haec cera, sed sola mente percipere ». Quanto dunque costituisce la cera come oggetto fisico è il « momento » della persistenza, definibile solo logicamente⁴. Con ciò è fissata la condizione generale su cui si fonda ogni oggettività nell'ambito della concezione meccanicistica della natura. Si dice « oggettivo » un essere che in ogni mutamento delle sue qualificazioni particolari si può tuttavia riconoscere sempre « lo stesso », e tale riconoscimento è possibile solo se vi poniamo a base un substrato spaziale. Tutta l'assiomatica della meccanica classica si fonda su questo presupposto. In uno scritto su *Gli assiomi della fisica e il loro rapporto col principio causale* (1866) Wilhelm Wundt ha designato come primo assioma il principio che nella natura tutte le cause siano cause di moto. Ma egli non si accontenta della semplice enuncia-

⁴ DESCARTES, *Meditationes de prima philosophia*, II.

zione di tale principio bensì ne chiede una derivazione logica, una « deduzione ». E la trova in ciò: che vi sarebbe un unico caso in cui una cosa muta nella rappresentazione e tuttavia resta la stessa cosa, e questo caso è il moto. Nel moto il cambiamento consiste nel fatto che l'oggetto cambia solo la sua relazione spaziale con altri oggetti: pertanto il cambiamento di luogo (traslazione) è l'unico cambiamento immaginabile delle cose, in cui esse restino identiche a sé⁵. Tale argomentazione ha svolto una parte dovunque ci si è attenuti alla produzione d'una spiegazione strettamente meccanicistica di tutti i fenomeni fisici. Nei *Principi della meccanica* Heinrich Hertz se ne è valso addirittura a definizione del concetto di massa: « Una particella di massa — egli dichiara — è un connotato mediante il quale facciamo corrispondere univocamente un certo punto dello spazio in un tempo dato a un certo punto dello spazio in ogni altro tempo ». Hertz mette in rilievo che in questa determinazione concettuale non vi è più bisogno di dedurre la immutabilità e l'indistruttibilità delle particelle di massa; esse sono già assunte nella definizione di queste⁶. Ma già nel passare alla teoria del campo questa definizione ci viene meno. Il campo non è una « cosa », è un sistema di azioni; né da questo sistema si può estrarre un elemento singolo da fissare come permanente, come « identico se stesso » nel corso del tempo. L'elettrone singolo non ha più nessuna « sostanzialità » nel senso che esso *per se est et per se concipitur*; « esiste » solo in rapporto al campo, come « luogo distinto » in esso. Da Faraday in poi la rappresentazione delle « linee di forza » ha sostituito e soppiantato quella della cosa permanente su cui si fondava la meccanica classica.

Neppure la teoria dei quanti potè più ritornare su questo passo: per essa piuttosto il problema si pone in un senso nuovo e più generale. Anche nella teoria dei

⁵ WUNDT, op. cit., p. 126.

⁶ *Prinzipien der Mechanik* cit., p. 54.

quanti emerge sempre piú chiaramente, come abbiamo visto, il primato delle pure « leggi dell'effetto » dinamiche [*Wirkungsgesetze*] sulle « leggi dell'essere ». Nel porsi questioni di struttura essa sa pur sempre che queste si possono risolvere solo nella misura in cui sono riconducibili a pure questioni di legge, a questioni sulle intensità e le frequenze delle righe spettrali. Per rispondere a tali questioni la meccanica dei quanti si crea nel calcolo della matrici un nuovo strumento matematico, un'algebra astratta affiancantesi pari pari alle equazioni differenziali della fisica classica. Così si suggella quel passaggio che la scoperta del quanto d'azione aveva indicato sin dall'inizio. Invece di cercare il proprio « compimento » solo nella nozione di sostanza e in quella di grandezza continua, la causalità si lega strettamente al concetto di numero discreto. Essa può e deve rinunciare a seguire i moti della singola particella nell'atomo nel modo intuitivo della rappresentazione classica dell'orbita. Ma così ci vediamo spinti al tempo stesso a un'ulteriore conseguenza d'ordine gnoseologico. Che cosa « sono » infatti questi elettroni di cui non possiamo piú seguire l'orbita? Ha senso attribuire loro ancora un'« esigenza fattuale » definitiva, rigidamente fissata, che tuttavia ci è « accessibile » sempre solo imperfettamente? O non dobbiamo battere piuttosto la via opposta — ossia prendere sul serio il postulato d'usare le condizioni della possibilità dell'esperienza, cioè le condizioni della « accessibilità », come condizioni degli oggetti dell'esperienza? In tal caso per noi non vi sono piú oggetti empirici che si possano dire senz'altro inaccessibili per principio; ma possono ben esservi classi di presunti oggetti che dobbiamo escludere dalla sfera dell'esigenza empirica perché risulta chiaro che non sono raggiungibili coi mezzi conoscitivi empirici e teorici a nostra disposizione, perché risulta che con questi mezzi e in virtù di questi mezzi non sono determinabili.

La fisica atomica moderna sembrò dapprima risolversi a tirare questa conclusione solo con riluttanza. Per qualche tempo sembrò che essa volesse ancora tener ferma e « salva-

re » in un qualche senso la rappresentazione d'una esistenza puntiforme degli elettroni e quella del loro moto su orbite stazionarie anche quando si vide che tutte queste rappresentazioni le si scioglievano per così dire fra le mani — anche quando non si offrì più alcun mezzo per il loro accertamento empirico. Ma qui non ci è lecito sottrarci all'ultima conseguenza gnoseologica. Non possiamo dire che in un determinato tempo l'elettrone « è » in un determinato luogo, né che esso « possiede » una velocità rigorosamente definita, se tale possesso sussiste solo per sé e non per la conoscenza fisica. Non possiamo affermare un'« entità » che oltrepassa quanto si può porre coi mezzi di questa conoscenza; infatti la funzione del « porre » è la sola ragione logica possibile, è il *quid juris* di ogni entità. Dal punto di vista di una concezione critica dell'oggettività e della conoscenza un possesso che non è « realizzabile » in qualche modo, è una *contradictio in adjecto*, un ferro di legno.

Pertanto gli oggetti della esperienza — così ha precisato Kant tale concezione — non sono mai in sé, ma soltanto dati nell'esperienza, e non esistono punto fuori di essa. Che nella luna ci possano essere abitanti, benché nessun uomo mai li abbia percepiti, deve certamente ammettersi; ma questo non significa altro se non che nel progresso possibile dell'esperienza noi potremmo incontrarci in essi; giacché reale è tutto quello che sta in un contesto con una percezione secondo le leggi del processo empirico⁷.

Se dunque le relazioni di indeterminazione ci informano che non possiamo sperare più oltre di « incontrare » un elettrone in un punto determinato del nostro spazio intuitivo con un impulso rigorosamente determinato, con ciò resta priva di fondamento l'affermazione della realtà empirica di questo stato di cose: esso è escluso dal « contesto dell'esperienza ». E quindi cadono da soli tutti gli strani

⁷ *Critica della ragion pura*, 2^a ed. tedesca, p. 521; ed. Cassirer, vol. III, p. 350; trad. it. cit., voi. II, p. 414.

problemi che hanno inquietato fin qui la fisica atomica. Quando l'elettrone vien sollevato con un « salto » da un'orbita interna su una esterna o da un'orbita esterna cade in una interna, non occorre piú che noi domandiamo dove mai si trovi l'elettrone nell'intervallo — se nel momento in cui esso abbandona la prima orbita, sia già fissata l'orbita in cui arriva; che cosa accada nell'irraggiamento, quando il processo viene interrotto prima che sia terminata l'emissione di un quanto, e cosí via. Tali domande non trovano nessuna risposta tranne questa: che esse non si possono porre in questa forma, perché presuppongono uno stato di cose per noi indefinibile empiricamente.

Anche da un altro lato ci è possibile chiarire che — come ha affermato recentemente Laue⁸ — le relazioni di indeterminazione pongono un limite ben definito a ogni meccanica corpuscolare, ma non ad ogni conoscenza fisica. La meccanica dei quanti ha posto ripetutamente in rilievo che anche nel suo ambito sussiste uno schema rigidamente matematico, ma che tale schema non si può pensare come semplice connessione di cose nello spazio e nel tempo. Ora, se ciò è vero, già da qui dobbiamo tirare conseguenze ben precise in merito all'« individualità » degli elementi con cui essa costruisce l'accadere naturale. Schopenhauer dichiara che spazio e tempo si devono ritenere il vero *principium individuationis*; e questa determinazione la incontriamo sempre di nuovo nella storia filosofica del problema dell'individuazione. « È facile scoprire — dice Locke — che cosa sia quel *principium individuationis* intorno al quale tanto si è indagato; è chiaro che esso è l'esistenza stessa, la quale determina un essere di qualunque specie, in un particolare tempo e un particolare luogo, incomunicabili a due esseri della medesima specie... Ad esempio, supponiamo un atomo che esista in un determinato tempo e luogo. È evidente che, considerato in qualunque istante della sua

⁸ VON LAUE, *Über Heisenbergs Unbestimmtheitsbeziehungen und ihre erkenntnistheoretische Bedeutung* in « *Naturwissenschaften* », XXII, 1934, p. 441.

esistenza, in quell'istante esso è identico con se stesso »⁹. Ma per converso ne viene pure che se un oggetto non è più determinabile mediante un « qui » e « ora », se non si può esibire come un $\tau\acute{o}\delta\epsilon\ \tau\iota$, neppure se ne può affermare più oltre l'individualità nel senso consueto, vigente per « cose » nello spazio e nel tempo. Determinazioni temporali e determinazioni spaziali a questo riguardo sono per principio tutt'uno: infatti « energia » e « tempo » rientrano in quelle grandezze « coniugate secondo i canoni », di cui le relazioni di indeterminazione vietano un accertamento simultaneo pienamente esatto. Per stati stazionari in cui l'energia ha un valore nettamente determinato, la coordinata temporale dell'elettrone risulta indeterminata, e viceversa ogni determinazione precisa del tempo ha come conseguenza un'indeterminazione dell'energia. Se dunque continuiamo a parlare di individualità della singola particella, ciò è ancora possibile solo mediatamente; non in quanto le particelle siano date in sé come oggetti individuali ma in quanto sono rappresentabili come « punti d'intersezione » di certe relazioni. Se consideriamo lo sviluppo della moderna meccanica quantistica, questa premessa vi si trova del tutto confermata. Nella teoria ondulatoria della materia avanzata da de Broglie e nella meccanica ondulatoria di Schrödinger si mantiene il concetto di protoni e di elettroni; ma questi non sono più definiti « punti materiali » nel senso della meccanica precedente, bensì centri di energia. Ci è dunque lecito continuare a parlare dello elettrone come di un « oggetto » determinato; ma tale oggetto non ha più quell'individuazione che era denotabile mediante un semplice « qui » e « ora ». Le onde non sono legate a nessun singolo punto spazio-temporale ma godono di una specie di « onnipresenza ». Ognuna di esse s'estende per « tutto lo spazio », che per altro non va più definito come spazio intuitivo ma come « spazio di configurazione ».

⁹ LOCKE, *Saggio sull'intelletto umano*, libro II, cap. XXVII, sez. 4^a [cfr. la trad. it. di C. Pellizzi, Bari 1951, voi. I, pp. 449-450].

Con ciò da punto di partenza della considerazione la particolarità, nella misura in cui la possiamo mantenere e definire rigorosamente, è divenuta il risultato della considerazione: essa nasce dalla concentrazione dell'energia in una certa piccola porzione di spazio. La carica dell'elettrone non è più vincolata a un determinato posto ma si distribuisce in una « nube di carica »; si rinuncia al carattere corpuscolare dell'elettrone. Negli autovalori dell'equazione differenziale di Schrödinger si danno ben determinati valori discreti dell'energia, e sono essi a subentrare al posto delle precedenti orbite elettroniche discrete. Ora si vede che le leggi che erano state enunciate per gli stati stazionari dell'atomo, sono riconducibili alle leggi dell'ottica fisica ondulatoria. Una teoria siffatta, che spiega l'elettrone come una « sovrapposizione di auto-oscillazioni », adempie una funzione importante anche nel riguardo gnoseologico: è espressione caratteristica e tipica della tendenza generale del pensiero fisico a rappresentare la « natura » della materia solo mediante certe relazioni dinamiche e a ridurla completamente a queste. Non occorre abbandonare i concetti « statici », ma essi sono ritenuti casi speciali deducibili da considerazioni dinamiche generali. Così nella meccanica ondulatoria di Schrödinger gli stati energetici stazionari di Bohr sono interpretati come frequenze d'auto-oscillazione delle onde, mentre la meccanica heisenberghiana delle matrici avanza uno schema quadratico generale in cui le espressioni degli stati stazionari sono contenute come casi speciali: gli « elementi diagonali » della matrice corrispondono a frequenze che scompaiono, e quindi servono da mezzi per rappresentare le grandezze negli stati stazionari.

Nell'odierna discussione del problema, a quanto vedo, questo punto di vista gnoseologico si fa valere sempre di più. È vero che tra i fondatori e i sostenitori della nuova meccanica quantistica un pieno accordo non sembra ancora raggiunto in nessun modo; ma che si debba far leva su questo punto, che il concetto di « punto materiale » abbia bisogno di una modificazione radicale, è ammesso

da quasi tutti. M. von Laue, Schrödinger, Langevin si sono espressi recentemente in questo senso: non vedono altra via d'uscita dal dilemma se non che la fisica si liberi per intero dei concetti della meccanica classica di punto e lasci cadere definitivamente la rappresentazione dell'elettrone come « corpuscolo », cioè come un corpo molto piccolo¹⁰. Contro questa prospettiva si possono sollevare obiezioni fondate in parte su ragioni empiriche, in parte su considerazioni teoriche. Riguardo alle prime, ci si può appellare al fatto che nel noto rilevamento di Wilson delle traiettorie di raggi α e β nei gas abbiamo quasi direttamente davanti agli occhi i singoli elettroni e il loro percorso. Nella « camera a nebbia » di Wilson, a quanto pare, le singole particelle e le loro tracce si rendono visibili immediatamente. In base a questo fatto e a una serie di « esperimenti elementari », per qualche tempo si credette di aver assodato fuor d'ogni dubbio la natura puramente corpuscolare dei raggi catodici. Per quanto concerne l'analogia fra questi raggi e quelli luminosi, essa apparve una somiglianza superficiale che non occorre seguire piú oltre; l'antitesi coi raggi luminosi, che si dovevano pensare in ogni caso come un fenomeno ondulatorio puramente continuo, sembrò insormontabile. Ma quanto piú la teoria procedette, tanto piú essa fu condotta a penetrare nella natura « dualistica » di ogni irradiazione. Non fu piú possibile porre l'una accanto all'altra due diverse specie di irradiazione — corpuscolare e ondulatoria — ma per ogni processo d'irraggiamento si dovette compiere una descrizione doppia, si dovette integrare l'« immagine di particelle » con l'« immagine di onde » e questa con quella. Con ciò comunque si rinunciava al significato assoluto della prima. Dal punto di vista teorico, argomento decisivo per la concezione dell'elettrone come struttura puntiforme fu spesso ritenuto specialmente

¹⁰ Cfr. le esposizioni di VON LAUE e SCHRÖDINGER in « Naturwissenschaften », XXII, 1934, p. 439 ss.; M. VON LAUE, *Materie und Raumerfüllung* in « Scientia » dicembre 1933, p. 402 ss.; LANGEVIN, *La notion de corpuscules et d'atomes* cit., p. 35 ss.

il fatto dell'indivisibilità della carica elettronica. Su questo fondamento Sommerfeld, ad esempio, è contrario a « prendere alla lettera la nube di carica a cui porta la teoria di Schrödinger »¹¹. Ma anche qui si può osservare come il fatto che la carica degli elettroni e dei protoni resti sempre immutata, non obblighi ancora in nessun modo a una interpretazione in termini di sostanza. Infatti la costanza di una determinata relazione non basta affatto per argomentare la costanza di un « portatore ». « Quello che noi anche nella materia possiamo conoscere — dice Kant — sono mere relazioni... ma fra esse ve n'ha di indipendenti e permanenti, per cui ci è dato un oggetto determinato »¹². L'indivisibilità della carica è una siffatta relazione indipendente e permanente, che ci dà il diritto di parlare dell'elettrone come di un « oggetto determinato »; ma non è sufficiente per sostanzializzare ed ipostatizzare l'elettrone.

Le prime determinazioni circa la massa, la velocità e la carica elettrica degli elettroni sono state acquisite, come è noto, con gli esperimenti su raggi catodici ottenuti con scariche in gas molto rarefatti. Dalla deviazione che questi raggi subiscono in campi elettro-magnetici, si acquistano i primi punti d'appoggio per determinare la massa elettronica e la carica specifica dell'elettrone, cioè il rapporto fra il quanto elementare d'elettricità (o carica elementare di Millikan) e la massa elettronica. Altre determinazioni del valore $\frac{e}{m}$ ottenute per vie affatto diverse, diedero sempre un risultato concorde. Così si riconobbe nell'elettrone « l'universale pietra da costruzione di tutta la materia » « Fluisca lentamente nella corrente elettrica o percorra lo spazio ad altissima velocità come raggio catodico — così era ora lecito concludere — venga emessa nella disintegrazione ra-

¹¹ *Atombau und Spektrallinien, Wellenmechanischer Ergänzungsband*, Braunschweig 1929, cap. I, § 8, p. 98.

¹² *Critica della ragion pura*, 2^a ed. tedesca, pp. 321, 341; ed. Cassirer, vol. III, pp. 227, 239; trad. it. cit., pp. 272 ss., 284.

dioattiva o in un processo fotoelettrico... si tratta sempre d'una medesima unità fisica che dimostra la propria identità mediante una stessa carica e una stessa massa, e specialmente con lo stesso rapporto di carica e massa »¹³. Sapendo che il rapporto fra carica e massa è lo stesso in tutti gli elettroni e che esso è una costante fondamentale, si dava la possibilità di ritenere l'elettrone l'ultima « pietra da costruzione » di tutta la materia. Ma il principio per cui « quello che conosciamo nella materia sono mere relazioni », per cui essa è *substantia phaenomenon* e corrispondentemente « un insieme di pure relazioni », da ciò non era rovesciato bensì piuttosto confermato. È stata proprio la teoria dei quanti ad acuire sempre di nuovo il nostro sguardo a questo proposito. Tutti i suoi enunciati infatti si possono intendere solo come enunciati su un sistema, non come enunciati sull'essere e il comportamento di atomi e di elettroni individuali. La meccanica dei quanti tratta di insiemi il cui spezzettamento in « parti » non è più possibile nello stesso modo che nella fisica classica. Quanto più la teoria procedette, tanto più dovette perdere l'abitudine di domandare « dove » si trovi il singolo elettrone in un dato istante, come da uno stato esso pervenga ad un altro e « perché » compia un passaggio siffatto. Tutte queste domande si dimostrarono inadeguate: ostacoli all'intendimento teorico. Se consideriamo ad esempio lo sviluppo della meccanica ondulatoria, secondo la versione iniziale di de Broglie, ogni singola particella si doveva connettere con un sistema di « onde di fase » (onde in concordanza di fase). Queste dovevano per così dire « portare » la particella, cosicché ogni particella doveva possedere un suo impulso d'onda. Ma questa concezione iniziale dell'« onda portante » più tardi venne rettificata e trasformata sostanzialmente dallo stesso de Broglie. Egli dichiara che la teoria dell'onda portante, che cercava di mantenere valida la rappresentazione classica col voler loca-

¹³ SOMMERFELD, op. cit. (*Hauptband*), p. 7.

lizzare la particella in un punto dell'onda ed assegnarle in ogni momento un moto ben definito, trova gravi ostacoli. Un'illustrazione intuitiva dell'onda portante nello spazio comune si dimostrò impossibile. L'elaborazione ulteriore della teoria fu costretta ad assumere un'impostazione molto più complicata. A un sistema armonico di onde di de Broglie propagantisi in una certa direzione si dovette far corrispondere una corrente omogenea di consimili particelle materiali con una certa densità. Persino una proprietà come quella della « velocità » non si poté più pensare legata a una particella materiale isolata, alla maniera della meccanica classica: si dovette pensare ogni particella come congiunta con un'onda, la cui velocità di gruppo esprime la velocità meccanica della particella¹⁴.

A enunciati su singole particelle distinguibili si rinuncia espressamente anche nella costruzione heisenberghiana della meccanica quantistica. L'irraggiamento viene analizzato nel complesso: dall'esame delle frequenze e delle intensità delle righe spettrali si ottengono certe grandezze di calcolo caratteristiche che subentrano al posto delle coordinate e delle velocità degli elettroni. Nella teoria figurano ancora le sole frequenze della luce, mentre le frequenze di rivoluzione degli elettroni nelle loro orbite ne sono escluse come componenti non osservabili. La teoria si limita ad enunciati su energie, frequenze, ampiezze, senza alcuna indicazione di coordinate, velocità, impulsi di particelle all'interno degli atomi¹⁵. Se infine si considera l'interpretazione statistica che Born ha dato agli enunciati della meccanica ondulatoria, neppure essa mostra alcun quadro diverso in linea di principio. Questa interpretazione mirava sí esplicitamente a serbare il carattere corpuscolare dell'elettrone; essa prese la grandezza che in Schrödinger fa da misura della densità

¹⁴ Altri particolari in DE BROGLIE, *Einj. in die Wellenmechanik*, cap. V, § 4; cap. IX, § 5.

¹⁵ Ulteriori particolari nell'esposizione della cinematica heisenberghiana in BORN-JORDAN, *Elementare Quantenmechanik*, cap. I, § 3.

della carica elettrica, come misura della probabilità di trovare una particella in una posizione. Born ne concluse che possiamo rappresentare la materia come sempre secondo l'immagine di particelle puntiformi mobili (elettroni o protoni): ma aggiunge subito che in molti casi, quando ad esempio essi si associano in un gruppo atomico, questi corpuscoli non sono « assolutamente da identificare come individui »¹⁶. Ma che cosa « sia » ancora un corpuscolo, se non si deve più « identificare come individuo », è difficile a dirsi — mentre la fisica classica, come abbiamo visto nel caso di Heinrich Hertz, aveva addirittura d e f i n i t o il punto materiale con questa possibilità di identificazione. Ed è proprio la concezione statistica a far notare con particolare vigore che, quando si tratta di descrivere

¹⁶ BORN in « Zeitschrift für Physik », XXXVIII, 1926; cfr. « Naturwissenschaften », XV, 1927, p. 240. L'impossibilità di distinguere elettroni diversi e di attribuire loro una « individualità » indipendente, nello sviluppo della teoria quantistica successiva è stata posta in chiara luce sopra tutto dalle considerazioni connesse col « principio di esclusione di Pauli ». Se si considera il divieto di equivalenza di Pauli unicamente secondo il significato metodologico che esso ha nell'aspetto della teoria quantistica, viene in risalto una peculiare analogia fra questo e il principio generale introdotto da Leibniz nella filosofia col nome di *principium identitatis indiscernibilium*. Tale principio afferma che non vi possono essere due oggetti, i quali coincidano a pieno l'un con l'altro in tutti i loro tratti determinanti e che quindi non si distinguano per altro che il « solo numero ». Non esistono cose che si differenzino *solo numero*; ogni differenza autentica deve piuttosto essere definibile come una differenza qualitativa, come una distinzione nei connotati e nelle condizioni che costituiscono l'oggetto (cfr. LEIBNIZ, *Briefwechsel mit Clarke* cit., IV, § 4, V, §§ 5, 6 e *passim*). Il principio di Pauli in certo modo è il *principium identitatis indiscernibilium* della teoria quantistica. Esso caratterizza ogni elettrone all'interno dell'atomo mediante un definito insieme di condizioni: mediante i quattro « numeri quantici » che fa corrispondere ad esso e che determinano completamente la sua orbita. Inoltre tale principio esprime la conseguenza che elettroni i quali non presentino differenze in questa caratterizzazione, sono da ritenere un unico essere fisico. In un atomo non vi sono due elettroni che abbiano in comune tutti i quattro numeri quantici; due sistemi di numeri quantici, che risultano dallo scambio di due elettroni, rappresentano un solo stato.

eventi del microcosmo, non possiamo piú mantenere né soddisfare il postulato dell'individualizzazione e dell'identificazione nello stesso senso in cui ciò sembra possibile nei confronti degli oggetti « macroscopici ». Infatti gli enunciati statistici in sé sono certamente degli enunciati rigorosi, che tuttavia riguardano « collettività » invece che casi singoli, e fruttano una determinazione solo per queste collettività, non per un membro particolare che si estragga da esse. Se la meccanica dei quanti ci insegna che la possibilità di determinazione non si estende oltre queste collettività, ci manca ogni appiglio per stabilire ancora, oltre queste, l'« essere » di una particella isolata. Quindi neppure è lecito intendere il carattere statistico delle proposizioni quantistiche in senso esclusivamente negativo. Esso non vuol dire che noi siamo nell'incertezza circa la posizione e l'impulso del singolo elettrone, circa la sua orbita e la sua stessa « sorte » complessiva, e che pertanto, volere o no, ci si debba accontentare e aggiustare con confusi enunciati statistici intorno a delle totalità; esso piuttosto vuol dire che siamo certi che una individualizzazione siffatta non ha piú un senso definito nel campo della fisica atomica. Quando la meccanica dei quanti dichiara che nel suo campo devono essere possibili e ammissibili solo predizioni statistiche, con ciò essa afferma appunto di ritenere sua vera mèta non piú la determinazione di eventi singoli, ma quella di interi sistemi di eventi. « La domanda fondamentale — così H. Weyl formula questo stato di cose — non suona come nella fisica classica: “ Che valore ha questa grandezza fisica in questo caso particolare? ” ma: “ Quali sono i possibili valori della grandezza fisica A e con quale probabilità essa assume questi valori in un dato caso singolo? ” »¹⁷.

Lasciar cadere l'« individualità » dell'oggetto fisico, rinunciare all'idea che fotoni o elettroni esistano come singoli oggetti materiali, alla concezione fisica non sembra certo

¹⁷ WEYL, *Gruppentheorie und Quantenmechanik*, 2ª ed., p. 66.

facile. Ma nell'aspetto gnoseologico tale rinunzia è agevolata dal vedere che anche là dove la fisica classica parlava di « singoli » punti materiali, l'impressione era pur sempre da prendere *cum grano salis* e con ben definite riserve in linea di principio. Tale « singolarità » non è in nessun caso da riferire semplicemente al dato, all'intuizione sensibile immediata; prima che noi la possiamo accogliere nel sistema conoscitivo della fisica, essa va « definita » in un qualche modo, cioè rappresentata nei mezzi concettuali esatti della fisica stessa. Se nel passare alla meccanica dei quanti abbiamo determinato diversamente da prima il rapporto del « tutto » con le sue « parti » — tuttavia non è lecito dimenticare che già nella fisica classica tale rapporto non si poteva adottare ingenuamente dal mondo sensibile ma lo stabilirlo comportava sempre una ben definita elaborazione logica. Nei loro tentativi di fondare filosoficamente i concetti di base della fisica classica i sistemi del razionalismo hanno sempre rimandato a questo fatto. È stato specialmente Leibniz a vedere nettamente e a formulare con esplicita chiarezza il problema qui in campo. Egli muove dell'osservare che la coppia di concetti « tutto-parte » implica in sé solo in apparenza un contenuto di pensiero affatto unitario. In un'analisi più approfondita si vede che la relazione del « tutto » con le sue « parti » è suscettibile di applicazioni e di enunciazioni affatto disparate, ciascuna delle quali va distinta e studiata nelle sue condizioni logiche. Questo studio doveva costituire il tema e il compito di un capitolo speciale della logica, capitolo che Leibniz aveva intenzione di inserire nella propria dottrina generale della scienza col titolo *De continente et contento*. Come tutta la *Scientia generalis*, così anche questo capitolo è rimasto un frammento; ma pure in questa forma frammentaria esso contiene gli accenni più importanti e fecondi a problemi che sono emersi nella storia della matematica e della conoscenza della natura solo molto più tardi. Se analizziamo le diverse condizioni possibili della « inclusione » — dice Leibniz — risulta che per inclusione [*inclu-*

zio] possiamo intendere o una relazione di coincidenza, di concordanza, di implicazione causale, di deducibilità logica, oppure la relazione del « maggiore » e « minore » quantitativi. In senso puramente logico l'inclusione sarebbe stata trattata ad esempio da Aristotele, la cui costruzione della sillogistica non mirava che a mostrare il modo in cui la conclusione sia contenuta nelle singole premesse. Da ciò andrebbe distinta la teoria del « tutto » e delle « parti »: il tutto infatti è sempre maggiore delle parti, mentre l'implicante e l'implicato potrebbero essere uguali, come si ha ad esempio nel caso delle proposizioni cosiddette « reciproche »¹⁸. Ogni parte è contenuta nel tutto, mentre non ogni contenuto è una parte — ad esempio il punto si deve pensare come contenuto nella linea ma non come una parte della linea.

Di questo sviluppo logico dei concetti di « tutto » e « parte » la teoria dei quanti offre un esempio fisico significativo. Fin dall'inizio essa dovette rinunciare a definire il tutto come la « somma » delle sue parti; essa dichiara che il tutto è piú di una siffatta unità per addizione. Un sistema che consta di due elettroni, nella prospettiva della meccanica quantistica determina lo stato di entrambi questi elettroni; ma non ne segue l'inverso. La conoscenza degli stati delle due parti non fissa lo stato del sistema complessivo; e di una deduzione di quest'ultimo dai primi

¹⁸ « Così si può dire, veramente, che tutta la dottrina sillogistica potrebbe essere dimostrata per quella *de continente et contento*, del comprendente e del compreso, che è differente da quella del tutto e della parte; perché il tutto eccede sempre la parte, ma il comprendente ed il compreso sono talvolta uguali, come succede nelle proposizioni reciproche ». (LEIBNIZ, *Nuovi saggi sull'intelletto umano*, libro IV, cap. XVII, § 8 [trad. it. di E. Cecchi, Bari 1911, vol. II, pp. 258-59]). Ulteriori particolari sulla teoria *de continente et contento* vedi in COUTURAT, *La logique de Leibniz*, Paris. 1901, p. 303 ss. Nella filosofia contemporanea i suggerimenti qui offerti da Leibniz sono stati raccolti e svolti ulteriormente anzi tutto da HUSSERL: cfr. le sue « Idee per una teoria delle forme pure di tutto e parti » in *Log. Untersuchungen* cit., voi. II, p. 254 ss.

non si parla neppure¹⁹. Corrispondentemente la questione del come imprendere la partizione all'interno di un tutto dato, la questione del come differenziare e « individualizzare » un certo insieme, per la teoria dei quanti costituisce sempre un problema difficile. Qui non si può piú concordare coi metodi consueti di numerazione partenti dal presupposto che sia già stabilito a priori che cosa debba valere come una cosa sola e che cosa debba valere come due o piú cose. Le cose singole qui non si delimitano le une rispetto alle altre in un modo così semplice come nell'intuizione sensibile dello spazio; piuttosto, per stabilire che cosa sia propriamente da considerare un oggetto individuale, che cosa si debba contare come « uno », occorrono sempre complicate considerazioni teoriche. A seconda dell'impostazione che si sceglie, nascono forme del tutto diverse di statistica dei quanti. Queste ultime non poterono piú adottare semplicemente i metodi della statistica « classica »: dovettero passare a nuovi modi di « computo » statistico. Certi elementi che secondo la concezione precedente si erano ritenuti distinti, si dovettero fondere e contare come uno solo, perché risultò che essi sono affatto indiscernibili coi nostri mezzi teorici e sperimentali. Così la meccanica quantistica moderna abbraccia una pluralità di forme statistiche la cui applicabilità al caso singolo va sempre decisa a partire dalla determinata posizione del problema. Dobbiamo usare l'una o l'altra di queste forme a seconda che abbiamo a che fare con elettroni o con quanti di luce, con autofunzioni « simmetriche » o « asimmetriche »²⁰. Donde pure risulta chiaramente che la determinazione dell'individuale, di ciò che debba veramente vale-

¹⁹ Cfr. a questo proposito le esposizioni di H. WEYL, *Gruppentheorie und Quantenmechanik* cit., 2^a ed., p. 88, e *The Open World*, p. 55 ss.

²⁰ Intorno alla differenza della statistica classica (boltzmanniana) dalla statistica di Bose-Einstein e da quella di Fermi-Dirac, vedi JORDAN, *Statistische Mechanik auf quantentheoretischer Grundlage*, Braunschweig 1933, cap. III.

re come « un solo » essere, per la teoria dei quanti non è il *terminus a quo* ma sempre solo il *terminus ad quem* — cioè un risultato della teoria che non si può presupporre dogmaticamente in anticipo quasi movendo da una « intuizione immediata ».

Se si raccolgono insieme tutte queste considerazioni, si vede da un nuovo lato che le vere difficoltà della meccanica quantistica non risalgono al presunto fatto che essa conduca a un « indeterminismo » radicale, che essa ci chieda di rinunciare al concetto di causalità. Nella sua « essenza » tale concetto resta intatto — nella misura in cui questa essenza si colga in effettiva estensione generale, cioè non si pensi definita da altro che dal postulato della stretta dipendenza funzionale. Se le singole note determinanti di cui dispone la meccanica quantistica, si stabiliscono nel solo modo in cui è possibile stabilirle secondo i principî generali della teoria e nei limiti posti dalle relazioni di indeterminazione, fra loro risulta sempre intercorrere una relazione funzionale definibile esattamente. E allora vale il « principio di causalità della meccanica quantistica », cioè il principio per cui, se in un tempo qualsiasi si misurano certe grandezze fisiche con tutta la precisione possibile in linea di principio, anche in ogni altro tempo esistono grandezze per le quali si può predire esattamente il risultato di una misurazione (cfr. qui sopra, p. 188 ss.). A questo accertamento della dipendenza funzionale per altro non si può più collegare una descrizione intuitiva dei singoli eventi nello spazio e nel tempo. Non si può addurre nessun meccanismo che descriva il nesso fra onde e particelle e definisca il moto di queste ultime secondo leggi classiche. « La meccanica quantistica — dichiara ad esempio Dirac — non vuole enunciare altro che le leggi che sono alla base dei fenomeni, in forma tale che da esse si possa determinare univocamente che cosa accadrà in date condizioni sperimentali. Voler penetrare nelle relazioni fra onde e particelle più a fondo di quanto sia necessario a questo scopo, sarebbe un tentativo vano e privo

di senso »²¹. Ma il principio causale neppure richiede e neanche soltanto favorisce un tentativo siffatto: per soddisfare questo principio basta enunciare leggi rigorose. Se possiamo cogliere in linguaggio matematico e con questo descrivere a rigore l'accadere osservabile, con ciò adempiamo già al postulato della « comprensibilità della natura » che il principio causale comporta.

I problemi essenziali che la meccanica dei quanti pone alla gnoseologia, stanno dunque in un altro punto. Non riguardano in prima linea la categoria di « causa » ed « effetto » ma la categoria di « cosa » e « proprietà », di « sostanza » e « accidente ». Qui, a quanto pare, dobbiamo compiere una modificazione piú profonda e « imparare un nuovo punto di vista » molto piú radicalmente che in merito al principio causale. Fin qui sembrava essere un assioma non solo della fisica classica ma addirittura della logica classica, che lo stato di una cosa in un dato momento sia completamente determinato in ogni aspetto risalendo a tutti i predicati semplicemente possibili. Questa determinazione assoluta vigeva tanto sicuramente che spesso venne usata addirittura per definire che cosa dobbiamo intendere per « realtà effettuale di una cosa ». La stessa *Critica della ragion pura* ha riferito e indissolubilmente allacciato i due concetti l'uno all'altro in questo modo. « Realtà effettuale » [*Wirklichkeit*] e « determinazione completa » vi appaiono come concetti reciproci. « Ogni cosa... — dice Kant — sottostà al principio della determinazione completa, in forza del quale di tutti i possibili predicati delle cose, in quanto essi sono paragonabili coi loro opposti, gliene deve convenire uno ». Ma un oggetto dei sensi si può determinare completamente solo quando venga confrontato con tutti i predicati del fenomeno e rappresentato da questi in via affermativa o negativa. Se dunque scelgo un qualunque predicato x a

²¹ DIRAC, *Die Prinzipien der Quantenmechanik*, trad. tedesca di W. Bloch, Leipzig 1930, p. 2.

piacere, riguardo ad esso dev'essere sempre determinato univocamente se una cosa empirica da me considerata posseda o non posseda questo predicato e, nel primo caso, in quale grado le spetti²².

A questa concezione hanno aderito teorici razionalisti e teorici empirici della conoscenza, che su di essa hanno cercato di fondare la definizione del concetto di realtà. Specialmente la determinazione spazio-temporale fu ritenuta da tempo immemorabile il vero e proprio criterio dell'«esistenza» di un oggetto empirico. « " Esistenza " — dichiara ad esempio Natorp — per il criticismo non significa altro che determinatezza dell'essere completa, compiuta sotto tutti gli aspetti, in relazione al tempo e allo spazio. Tempo e spazio sono le condizioni del giudizio di esistenza, ossia della determinazione completa dell'oggetto nell'esperienza ». « Ad ogni punto-dello-spazio..., che ha da essere dato esistentivamente, deve corrispondere un punto o un elemento assoluto dell'esistente, vale a dire sempre un qualche punto identico dell'esistere, dunque del tempo »²³. Nella gnoseologia contemporanea la stessa concezione di base è sostenuta da Schlick, che però la restringe alla temporalità tenendo conto del fatto che non tutti gli oggetti sono rappresentabili nello spazio. « Una salda determinazione spaziale è certamente caratteristica per la più parte delle realtà, ma poiché ciò non avviene per tutte... contrassegno distintivo necessario della realtà effettuale è da ritenere la sola determinazione univoca del tempo »²⁴. Sulla base di queste esplicazioni della « realtà » oggettiva si riconosce subito quali radicali modifiche della nostra immagine empirica del mondo ci chiedi la meccanica dei quanti in forza delle relazioni di indeterminazione. Ora infatti non possiamo

²² Cfr. *Critica della ragion pura*, 2ª ed. tedesca, p. 600 ss.; ed. Cassirer, vol. III, p. 397 ss.; trad. it. cit., vol. II, p. 467.

²³ NATORP, *Die logischen Grundlagen der exakten Wissenschaften*, Leipzig 1910, p. 341 ss.

²⁴ SCHLICK, *Allgemeine Erkenntnislehre*, 2ª ed., Berlin 1925, p. 172 ss.

piú definire l'esistenza come qualcosa di completamente e totalmente determinato. Lo « stato » di un sistema fisico, per esprimerci nel linguaggio della teoria quantistica, non presenta piú la stessa forma di legame spazio-temporale che esso possedeva nella meccanica classica. In questa i singoli elementi dell'essere si lasciavano isolare gli uni dagli altri; ogni essere particolare si riferiva in un dato istante o punto del tempo ad un punto affatto determinato dello spazio e « aderiva » esclusivamente ad esso. La meccanica dei quanti invece ci chiede di abbandonare questa concezione. Nel senso della meccanica ondulatoria dobbiamo pensare una particella come distribuita in ogni momento su tutto quanto lo spazio — dobbiamo assegnare alla sua massa e alla sua carica una specie di « onnipresenza ». Al posto di orbite di rivoluzione dell'elettrone nettamente definite subentra una « nuvola di carica » d'estensione infinita. Cosí cade la possibilità d'assegnare all'elettrone un posto singolo, esattamente circoscritto entro lo spazio dell'intuizione. In questo mutamento di significato del concetto di stato credo stia una delle « paradossalità » essenziali della meccanica quantistica e uno dei problemi piú difficili di fronte a cui essa pone l'analisi gnoseologica. A questo proposito, non quanto alla validità del concetto causale, essa ci chiede di rinunciare a presupposti che sinora apparivano indispensabili per ogni descrizione della natura. In realtà il nuovo « concetto di stato » della meccanica quantistica sulle prime deve costituire, per chiunque provenga dalla fisica classica, l'autentica pietra dello scandalo. A misurarlo col metro solito, esso sembra quasi condurre a una *contradictio in adjecto* — sembra davvero pretendere da noi qualcosa come pensare un « ferro di legno ». Lo stato infatti assume valori completamente diversi a seconda che lo descriviamo nell'uno o nell'altro linguaggio, né alcuno di tali linguaggi può accampare la pretesa di determinarlo univocamente ed esaurientemente. Esso ci si presenta diverso secondo i diversi punti di vista donde lo consideriamo, né è mai possibile unire le prospettive disparate in

un solo sguardo. Immagine corpuscolare e immagine ondulatoria vanno usate l'una accanto all'altra senza che esse possano mai « concordare » fra loro, senza che si lascino portare ad effettiva congruenza. Si sovrappongono senza potersi conciliare né compenetrare realmente a vicenda.

Questo principio della « sovrapposizione » è stato posto da D i r a c al vertice della sua esposizione della meccanica quantistica. « Dobbiamo figurarci gli stati di una struttura fisica come allacciati fra loro in modo tale che, quando essa si trova in un certo stato, possiamo considerarla presente in parte anche in ciascuno di due o più stati. Lo stato originario si deve ritenere il risultato di una s o v r a p p o s i z i o n e di uno o più stati nuovi in un modo che resta inintelligibile movendo da rappresentazioni classiche. Ogni stato si può ritenere il risultato di una sovrapposizione di due o più stati e ciò invero in modi infinitamente differenti. Per converso due o anche più stati qualsiasi possono sovrapporsi a uno stato nuovo e ciò invero in modi infinitamente differenti ». La meccanica quantistica ci costringe ad esempio a concludere che nel mondo dell'atomo possano darsi stati per i quali il concetto di energia non ha più nessun senso precisabile, stati che dobbiamo considerare « energeticamente non definiti ». E questo non vale affatto solo per la energia ma anche per tutte le altre grandezze di stato — per tutte quelle grandezze che, come la coordinata x e la coordinata dell'impulso p_x dell'elettrone e come l'intensità elettrica e magnetica del campo, stanno fra loro in un rapporto regolato dalle relazioni di indeterminazione. In ciascuna di esse dobbiamo tener conto che in un dato stato non le possiamo assegnare nessun valore misurato rigorosamente. Il che appare ancor più singolare quando si rifletta che la determinatezza qui raggiungibile, da accertare volta per volta, non dipende mai dal solo oggetto ma dalla specie di osservazione che scegliamo. L'oggetto in certo modo ci mostra un « volto » diverso a seconda delle condizioni in cui ha luogo l'osservazione. Dall'acca-

duto riceviamo « immagini » diverse secondo la scelta degli strumenti di misura e l'uso particolare che ne facciamo. Nessuna osservazione singola ci può aprire e offrire in una volta sola la totalità degli aspetti possibili. Ogni particolare disposizione di misura ci scherma, per così dire, certi tratti dell'accadere — come ad esempio la « natura ondulatoria » o la « natura corpuscolare » della luce — mentre altri ne emergono al loro posto. La risposta che la natura ci dà, non viene dunque esclusivamente da lei: è determinata al tempo stesso dalla specie di domanda che le rivolgiamo e dai mezzi di osservazione scelti. Non esiste nessun esperimento con cui provate simultaneamente la natura ondulatoria della luce e la sua natura corpuscolare. Che cosa sia la « cosa » nel senso assoluto, al di fuori delle circostanze d'osservazione realizzabili nelle diverse serie di esperimenti — è una domanda che non riceve più nessuna risposta. Se cerchiamo di carpire a forza una risposta simile, se tentiamo di fare della cosa un *ens omnimodo determinatum*, un ente determinato da ogni lato, subito interviene uno strano capovolgimento dialettico. Invece di un oggetto determinato assolutamente ci resta in mano solo un'ombra. Se viceversa accettiamo le condizioni empiriche a cui secondo le premesse della teoria quantistica sottostà ogni osservazione, ecco che la situazione assume il segno opposto. La rinuncia alla determinazione assoluta reinstaura il maximum di determinazione relativa di cui sia capace la conoscenza fisica. Quando infatti all'accertamento di un sistema fisico noi ammettiamo solo quelle note determinanti che soddisfano le condizioni espresse nelle relazioni di indeterminazione, quando ci accontentiamo delle « osservazioni massimali » cioè del massimo numero di osservazioni indipendenti compatibili, allora possiamo porre queste in un rapporto reciproco rigorosamente determinato. Allora possiamo avanzare il principio che se si sottopone una struttura fisica a un'osservazione massimale, il suo stato successivo è pienamente determinato da tale osservazione — e si può usare questo principio come assio-

ma per esprimere che cosa dobbiamo ritenere « stato di un sistema » nel senso della fisica atomica ²⁵.

Tutte queste trasformazioni concettuali che la meccanica dei quanti porta con sé, divengono perfettamente chiare solo dove si tenga sempre presente che il suo linguaggio per concetti è uno strumento inadatto alla descrizione di « cose » e « stati » ma riguarda l'esposizione del comportamento di sistemi fisici. In esso possiamo continuare a parlare di « cose » nel senso della meccanica classica e in quello dell'esperienza « macroscopica »; ma dobbiamo sempre stare bene attenti che queste cose non si « irrigidiscano ». Così ad esempio nella meccanica ondulatoria i corpi materiali sono « dissolti »; ciò che prima appariva una struttura rigida, si trasforma in una « differenza di fasi », che si trasmette da un punto dello spazio a un altro in un determinato tempo. Dove nel senso della concezione precedente avevamo una cosa, che si trova di volta in volta in uno « stato » perfettamente determinato e cambia quest'ultimo in un modo definibile con precisione, ora dobbiamo cogliere totalità di eventi, insieme a cui far sempre corrispondere una determinata funzione d'onda. Ne ricaviamo enunciati precisi che per altro hanno carattere statistico. Ora la questione è quale probabilità sussista che, in un'occasione posta sotto determinate condizioni e in un certo momento, si ottenga questo o quel risultato.

Se si sottopone a osservazione una qualunque struttura atomica — così formula Dirac lo stato di cose — in genere il risultato sarà indeterminato, cioè ripetendo l'esperimento molte volte nelle stesse condizioni, si otterranno risultati diversi. Ripetendo l'esperimento molto spesso, si troverà che ogni singolo risultato compare in una certa frazione di tutti i casi, cosicché si può dire esservi una certa probabilità di ottenere proprio questo risultato quando si esegue l'esperimento, e la

²⁵ Cfr. DIRAC, op. cit., §§ 3 e 4. Sul nuovo concetto di stato della meccanica quantistica e sul principio di sovrapposizione vedi specialmente A. MARCH, *Einführung in die moderne Atomphysik*, Leipzig 1933, cap. III, § 15.

teoria ci permette di calcolare questa probabilità. In casi particolari questa probabilità può essere eguale a uno: allora il risultato dell'esperimento è prestabilito pienamente²⁶.

Pertanto la meccanica quantistica non porta a stabilire la posizione di un singolo punto materiale in un dato momento, come faceva la meccanica classica; indica solo, per la totalità degli elettroni, la probabilità che in un determinato tempo gli elementi di essa si trovino in una certa posizione.

Quando si tengano presenti queste premesse e questi principi della impostazione quantistica del problema, cadono le conseguenze scettiche che tanto spesso si sono tirate dalle relazioni di indeterminazione. Talvolta il contenuto di queste relazioni è stato formulato così da dire che le stesse leggi di natura sian fatte in modo tale da impedire l'accertamento esatto dello stato del momento. Se questo enunciato si interpreta nel senso che lo stato in questione *sussista* in tutto rigore e in tutta determinatezza ma che la natura, con leggi particolari, abbia preso dei provvedimenti per sottrarlo per sempre ai nostri sguardi, ciò sembra alludere a un curioso enigma filosofico e metafisico²⁷. Ma questo dilemma metafisico è piuttosto un dilemma che interessa la logica e la critica della conoscenza. Con quale diritto infatti possiamo presupporre che lo stato « sussista » in tale forma, se dal lato della conoscenza non abbiamo nessuna possibilità di accedervi? Nep-

²⁶ DIRAC, op. cit., § 3.

²⁷ Che simili interpretazioni dello « indeterminismo » della teoria quantistica non vengano sempre evitate neppure nell'ambito della fisica esatta, lo mostra una singolare asserzione di W. Nernst. Nernst pensa che la fisica moderna si avvicini a certe concezioni teologiche e che tra fisica e teologia si possa ormai stabilire « un parallelismo sinora impreveduto »: la seconda avrebbe sempre affermato che il corso del mondo è determinato completamente dalla volontà e dal decreto di Dio, ma che allo spirito umano è negata la capacità di penetrare questa determinazione fin negli ultimi particolari. Cfr. W. NERNST in « Naturwissenschaften », X, 1922, p. 495.

pure il qualificare le relazioni di indeterminazione come leggi di natura è molto pertinente nell'aspetto metodologico. Nell'esposizione dei *Principi fisici della teoria dei quanti* Heisenberg ha cominciato dal «postulare come legge di natura» i limiti inferiori di esattezza per la nostra conoscenza simultanea di variabili diverse e dal fare di tale postulato il punto di partenza della critica dei concetti quantistici. Ma le relazioni di indeterminazione non si possono qualificare leggi di natura nel senso usuale della espressione perché le leggi di natura riguardano cose ed eventi fisici, mentre le relazioni di indeterminazione riguardano misurazioni, cioè certe forme della conoscenza della natura. Esse non sono enunciati categorici sull'oggettivamente reale, ma enunciati modali sull'empiricamente possibile, su quanto è constatabile fisicamente. Quindi non presuppongono un oggetto determinato per poi stabilire che esso non è mai pienamente accessibile alla nostra conoscenza, ma contengono una calibrazione nuova dei concetti di oggetto che noi possiamo foggare a buon diritto nella misura in cui ci atteniamo strettamente nei limiti dell'osservabile. Per non involgerci in antinomie dobbiamo tener presente anche qui la differenza tipologica degli enunciati fisici²⁸. Si potrebbe obiettare che uno dei risultati più importanti della moderna fisica atomica è l'averci insegnato l'impossibilità di fare un taglio netto fra la natura e il «sapere la natura»: le due cose sarebbero indissolubilmente intrecciate. Ma proprio quando si tira questa conclusione, ne viene con tanto maggior forza il rifiuto della conseguenza scettica: allora infatti scompare quella differenza che Aristotele ha designato come distinzione fra il πρότερον τῆ φύσει e il πρότερον πρὸς ἡμᾶς. E dunque ciò che non sia «per noi», che non sia in un senso qualsiasi per la conoscenza fisica, non «è» più «in sé» nella natura. La specie della determinazione prescrive all'«essere» che possiamo attribuire

²⁸ Cfr. sopra, p. 49 ss.

alle cose naturali, i suoi²⁹ limiti — ma non è l'essere in sé determinato a porre alla conoscenza una volta per sempre dei limiti fissi, per restarle impenetrabile in una propria essenza assoluta.

Che questo stato di cose e quindi il senso e l'apporto del tutto positivi delle relazioni di indeterminazione non siano emersi subito in tutto rigore, forse dipese dal corso storico che la teoria dei quanti ha preso. Tali relazioni derivarono dal quadro della teoria quantistica precedente, quadro che esse per altro circoscrissero e restrinsero. La rappresentazione degli elettroni puntiformi non fu abbandonata senza ambagi; ma il sapere intorno a questi elettroni e le loro orbite stazionarie fu bloccato dalla scoperta di un limite di principio della osservazione e della misurazione. Ma con ciò in sostanza si introdussero due diversi sistemi di riferimento gnoseologico-critici che a lungo non potevano sussistere ed essere usati l'uno accanto all'altro. Quando si tolga questo dualismo e si fissi un metro strettamente unitario dell'esame e della valutazione gnoseologici, le relazioni di indeterminazione perdono molto della paradossalità di cui all'inizio erano innegabilmente affette. Ciò che in effetti esse hanno fatto notare, è solo una certa sovradeterminazione rimasta come residuo nelle precedenti versioni della teoria quantistica. Nella misura in cui questa teoria conteneva enunciati su grandezze, che a un'analisi più approfondita si dimostrarono inosservabili, essa oltrepassava il fine che la conoscenza fisica si può prefiggere — e allora si trattava di revocare tale sconfinamento. Fin qui le relazioni di indeterminazione non hanno un senso scettico ma puramente critico. La necessaria correzione apportata al concetto fisico di oggetto della teoria precedente poteva apparire una rinunzia scettica solo quando proprio quel concetto non fosse stato ancora superato in linea di principio, quando ci si fosse ricollocati nella posizione che si desiderava abbandonare

²⁹ [« Seine »: suoi, cioè dell'essere stesso. — *N.d.T.*].

e che già si era abbandonata enunciando le relazioni di indeterminazione. Dobbiamo tener chiaramente davanti agli occhi la nuova problematica così creatasi. A quanto pare non sussiste nessuna possibilità di ritornare nel paradiso perduto dei concetti classici; la fisica deve cominciare ad aprirsi una nuova via metodica. Non intendo affatto affermare che la mèta di questa via ci stia già chiaramente dinanzi. Ma la direzione in cui cercare la soluzione, mi sembra facilmente riconoscibile. La fisica e la gnoseologia non possono continuare a porre un essere, con la chiara intuizione che esso contraddice alle condizioni della conoscenza fisica. Se si scopre che certi concetti, come quelli di posizione, velocità, massa di un singolo elettrone, da parte nostra non sono più oltre colmabili con un determinato contenuto empirico, essi vanno eliminati dal sistema teorico della fisica, per importante e fecondo che sia stato il loro rendimento.

Soddisfare a questa esigenza non può riuscire grave quando si abbia coscienza della struttura generale dei nostri concetti fisici — quando si ricordi che tutti questi concetti non sono altro che « predicati di giudizi possibili ». Intorno al valore di verità e al contenuto oggettivo fra i concetti matematici e quelli fisici sussistono un nesso caratteristico e un'antitesi caratteristica. Uno dei progressi più importanti nella logica moderna della matematica è che i concetti fondamentali non vi vengono più definiti esplicitamente ma implicitamente. Il punto, la linea, la retta qui non hanno più un essere rigidamente determinato e un significato definito che ad essi si possa attribuire prescindendo dalle relazioni in cui stanno fra loro. Tutte queste costruzioni non « sono » per poi entrare in certe relazioni solo in un secondo tempo; piuttosto sono proprio queste stesse relazioni a definire ed esaurire completamente l'« essere » che si esprime nei concetti matematici. In questo aspetto puramente logico concetti come quelli di atomo e di elettrone stanno sullo stesso piano dei concetti geometrici: non ammettono nessuna definizione

esplicita ma in sostanza sono definibili sempre solo implicitamente. A questo proposito il « punto materiale » non si differenzia dal punto « ideale », matematico. Neppure ad esso si può attribuire un « essere per sé »: è costituito anch'esso da un certo insieme di relazioni e si risolve in tale insieme. Quindi la meccanica quantistica piú recente è passata via via a non iniziare dal porre certe realtà per poi metterle in certe relazioni fra loro, ma a battere invece la via opposta. Essa muove dall'istituire certi simboli che esprimono lo stato e le variabili dinamiche di una struttura fisica. Poi da questi, in base a determinate premesse assiomatiche, si deducono altre equazioni donde si tirano conseguenze d'ordine fisico. In un primo momento qui non occorre nemmeno affrontare il significato preciso dei simboli nel caso singolo. Solo in uno stadio posteriore della ricerca si considerano le « esposizioni » dei simboli astratti, cioè si ricercano « cose » e « proprietà » che corrispondono alle regole vigenti per la connessione dei simboli³⁰. A questo proposito la differenza tra i concetti matematici e quelli fisici sta solo nella specie della costituzione. I concetti matematici si possono produrre per costruzione [*konstruktiv*]; noi « creiamo » questi concetti con le condizioni che imponiamo loro, coi sistemi di assiomi a cui essi devono soddisfare. Al posto di questa assiomatica logica, nella fisica subentra la forma della posizione ipotetica dei concetti di base, e della deduzione ipotetica³¹. Qui disponiamo i concetti cosí che i fenomeni ne siano descritti nel modo piú completo e unitario possibile, in modo che i concetti « salvino » i fenomeni. Questo postulato del $\sigma\acute{\omega}\zeta\epsilon\upsilon\upsilon \tau\acute{\alpha} \phi\alpha\iota\nu\acute{o}\mu\epsilon\nu\alpha$ risale già ai primordi della fisica scientifica³². Cosí nei concetti fisici affluisce materiale sempre nuovo

³⁰ Questo procedimento risalta sopra tutto nell'esposizione di Dirac della meccanica quantistica.

³¹ Cfr. sopra, p. 123 s.

³² Cfr. il ricco materiale storico che P. DUHEM ha raccolto nello studio $\Sigma\phi\acute{\omega}\zeta\epsilon\upsilon\upsilon \tau\acute{\alpha} \phi\alpha\iota\nu\acute{o}\mu\epsilon\nu\alpha$. *Essai sur la notion de théorie physique de Platon à Galilée*, Paris 1908.

che non esige da essi un abbandono totale del loro contenuto ma una costante capacità e disposizione a trasformarsi. Il concetto la cui definizione implicita consiste in un insieme di relazioni empiriche, dev'essere nello stesso tempo fisso e mobile: fisso perché la conoscenza vi trovi un certo punto direttivo; mobile, perché possa orientarsi nell'esperienza e mettersi alla prova sempre di nuovo. Il concetto di punto materiale sembra trovarsi di fronte a una simile necessità di orientamento. È difficile sopravvalutare l'importanza che questo concetto ha avuto nel costruire la conoscenza della natura: un'importanza rilevante non solo in campo fisico, come abbiamo cercato di mostrare nella storia del concetto, ma quasi altrettanto in campo logico, puramente metodologico. E tuttavia, per la natura stessa della cosa, un concetto come quello di punto materiale non si può mai intendere quale copia d'un oggetto fisico: è una « forma » il cui senso e contenuto sta nel suo rendimento teorico, nella capacità di condurre a leggi semplici e rigorose dei fenomeni. Ogni forma siffatta possiede sempre anche un certo limite; dobbiamo tener conto del fatto che si danno ambiti dell'esperienza che essa non riesce più ad abbracciare né a esprimere. Se i sacrifici a cui si deve giungere a questo proposito, oggi giorno sembrano forse maggiori e più gravi che mai, nondimeno la moderna fisica atomica a mio avviso non ha distrutto i fondamenti metodologici su cui si regge la conoscenza fisica: piuttosto ce li ha fatti riconoscere con più rigore di prima nella loro caratteristica peculiarità e condizionatezza.

CONCLUSIONE

CONSIDERAZIONI FINALI E CONSEGUENZE ETICHE

Le considerazioni fin qui svolte si sono mosse semplicemente nell'ambito della fisica e in quello della gnoseologia. Abbiamo cercato di mirare al nostro fine, che consisteva solo nel chiarire la problematica della nuova fisica nell'aspetto logico, senza guardare né a destra né a sinistra, senza nessuna digressione speculativa di sorta né alcuna visuale d'ordine etico. Solo alla fine affrontiamo la questione del significato che tale problematica ha per la conoscenza filosofica nel suo insieme. Ma se raccogliamo in uno sguardo retrospettivo il risultato della nostra analisi dei concetti fisici fondamentali, su questo punto non ci sarà lecito dare adito a troppe speranze. L'essenziale di questo risultato sta appunto nel suo esortarci alla riservatezza e modestia metodologiche. Kant ci ha inculcato sempre di nuovo il principio che lasciar confondere gli uni negli altri i confini delle scienze non è un accrescimento ma uno scempio di esse. Una confusione simile è in gioco quando le discussioni sull'« indeterminismo » della teoria quantistica vengono allacciate a speculazioni metafisiche sul problema del « libero volere ». Si crede di poter raggiungere con ciò un'unità superiore tra fisica ed etica e di poter colmare l'abisso che le separa. Ma per un pensiero educato in senso critico questo abisso comporta poi davvero un pericolo? È forse possibile e lecito che noi ci abbandoniamo qui in balia della tendenza all'unificazione e alla semplificazione dei problemi — o tutto non sta forse nel vedere ogni ambito di problemi nella sua retta partizione, e nel trattenerlo entro la sua natura caratteristica?

L'essenza del problema etico si fonda appunto su tale natura. Tra fisica ed etica non esiste nessuna « concorrenza » nel senso che esse presuppongano un patrimonio ontologico comune di cui contendersi la spiegazione e l'interpretazione. Quando l'etica non sapesse conservare altrimenti la sua autorità né adempiere il suo compito peculiare altrimenti che con lo spiare lacune apertesi nella spiegazione scientifica della natura per annidarsi, diciamo, in tali lacune, questo sarebbe per l'etica e per la sua dignità un brutto affare sin dall'inizio. In tali lacune essa potrebbe condurre sempre solo un'esistenza umbratile; la « libertà » morale sarebbe tollerata in qualche modo nel mondo, ma sul mondo non potrebbe esercitare nessuna azione, nessuna forza effettiva; non potrebbe « agire apertamente ». Viceversa nel problema della eticità tutto dipende da questo agire. Libertà etica non deve significare una semplice possibilità, una « potenza » vuota; il suo senso e il suo significato sono nel suo attuarsi, nella sua realizzazione costantemente progressiva di sé. Per questo atto di autorealizzazione il concetto puramente negativo d'indeterminazione o assenza di determinazione non basta: vi si richiedono altre forze positive, propri principi e proprie ragioni di determinazione. E queste ragioni non vanno rintracciate sul piano in cui si muove la spiegazione fisica della natura — sia quella classica sia quella quantistica — ; su tale piano, anzi, queste ragioni non si possono nemmeno scorgere. Esse richiedono in ogni caso una *μετάβασις εἰς ἄλλο γένος*. Nessun « indeterminismo » fisico, per esteso che sia, ci può risparmiare il salto che si attende e si esige da noi a questo punto. Non si tratta di spezzare o di allentare in qualche modo la stretta delle « rigide leggi di natura » entro l'accadere empirico. Si tratta di trovare e attuare un nuovo punto di vista, di fissare un nuovo metro che non è riducibile a quello della causalità empirica ma d'altra parte neppure gli si oppone in alcun modo. Le azioni umane — ecco ciò che l'etica esige — devono [sollen] essere suscettibili e accessibili a una duplice v a -

lutazione; devono essere determinate causalmente come eventi nella serie temporale, ma il loro contenuto e senso non si deve risolvere in questo determinismo. Penetrare con la conoscenza nel decorso di queste azioni, per quanto strettamente esse risultino determinate, non ci deve rendere ciechi di fronte all'altro metro con cui abbiamo da misurarle — cioè la questione del loro *quid juris*, della loro validità e dignità etica. Quest'esigenza di validità non si può affatto cogliere né giustificare solo in via negativa: è necessario garantirla positivamente. In essa non si tratta di stabilire delle eccezioni a certe regole generali: è in gioco il problema molto più serio e arduo di trovare una nuova regola, una nuova forma di legalità a cui sottoporre l'agire che qualificiamo « etico ».

Seguendo la storia dell'etica dai suoi primordi si scorge che è stato sempre questo problema di fondo a impegnare e stimolare tutti i filosofi dell'etica. L'etica filosofica [*philosophische Sittenlehre*] non si accontenta, come quella religiosa, di insegnare una morale: vuole fondare la morale. Ma in questo tentativo di fondazione, di λόγον διδόναι, il pensiero filosofico si vede condotto subito a una duplice forma di « cause ». Caratterizza tale dualità con classica concisione e chiarezza un passo del *Fedone* platonico che appunto perciò si può ritenere l'autentico luogo di nascita dell'etica filosofica.

Per quale ragione — domanda Socrate nel *Fedone* — io siedo qui nel carcere aspettando l'esecuzione della condanna a morte invece di fuggire come mi avrebbero lasciato libero di fare? Si vuol forse dire che mi trovo qui perché il mio corpo è composto d'ossa e di nervi e la presente posizione di tali ossa e nervi rende possibile solo lo star seduto e non il correre? Questo significherebbe ignorare le cause vere e proprie: e cioè che, siccome agli Ateniesi parve bene condannarmi, per questo e solo per questo a me, Socrate, è parso bene restarmene a sedere qui; che ho ritenuto mio dovere soffrire la pena che essi mi inflissero. Perché altrimenti,

càspita, quando invece d'andare in esilio e darmela a gambe, a me non fosse parso piú giusto e piú bello subire pazientemente la pena che la città mi ha decretato, queste mie ossa e questi miei nervi sarebbero già da un pezzo a Megara o in Beozia... Che se uno dicesse che senza le mie membra, senz'ossa e nervi e tutto il resto ch'io mi abbia, io non sarei capace di fare quel che voglio, questo potrebbe ancora andare; ma dire che faccio quel che faccio proprio per queste ragioni e che agisco sí con la mente, ma non perché io scelga liberamente quello che è il meglio per me, chi parla cosí e insensato e grossolano. Questo infatti equivale a non saper discernere che altro è la causa vera e propria, altro quel mezzo senza cui la causa non potrà mai essere causa (*ἄλλο μὲν τί ἐστὶ τὸ αἴτιον τῷ ὄντι, ἄλλο δὲ ἐκεῖνο, ἄνευ οὗ τὸ αἴτιον οὐκ ἂν ποτ'εἴη αἴτιον*). Proprio su questo punto gli uomini brancolano come nel buio confondendo del tutto a sproposito con la causa vera quanto è solo fenomeno¹.

Quanto si suole indicare come « causa » nella considerazione puramente fisica, dal punto di vista della filosofia presocratica della natura, per Socrate decade a semplice occasione o condizione. E Platone inasprisce tale differenza. La vera « ragione » dell'agire etico, libero, non si può trovare né nella situazione fisica del momento né in ciò che la precede immediatamente nel tempo. Essa presuppone una prospettiva diversa, un modo diverso di guardare. Agisce liberamente chi agisce « avendo riguardo » al mondo delle idee; soggetto libero è quello che partecipa a tale visione delle idee e in virtù di essa sa guardare oltre tutta la sfera dei fenomeni, delle apparenze spazio-temporali, e riconoscerla nella sua condizionatezza. Dunque ciò che viene limitato o invalidato da questa specie di « libertà », non è un singolo rapporto, non è una forma particolare di determinazione entro il mondo fisico: — è piuttosto la totalità

¹ *Fedone*, 98 C ss. [Ho riportato la traduzione italiana di Manara Valgimigli: cfr. *Fedone*, Bari 1951, p. 125. — *N.d.T.*].

del mondo che dev'essere oltrepassata, « trascesa » eticamente. Secondo Platone l'atteggiamento specificamente etico si raggiunge solo in tale trascendenza: infatti l'« Idea del Bene » sta « al di fuori dell'essere » (ἐπέκεινα τῆς οὐσίας).

Ma la doppia prospettiva continua a sussistere anche quando si respinga questa trascendenza platonica e si chieda una soluzione del problema etico contenuta puramente entro i limiti della conoscenza della natura. Il dualismo fra « libertà » e « necessità naturale » non si può evitare neppure in un'etica strettamente « naturalistica ». Il primo a esigere e attuare una siffatta fondazione naturalistica nella filosofia moderna è Spinoza. Il principio metodico direttivo seguito nella costruzione della sua *Etica* è che non ci è lecito trattare piú oltre le azioni umane come uno « stato nello stato ». C'è solo un ordinamento e una legge dell'accadere, quant'è vero che c'è solo un essere, un'unica sostanza onnicomprensiva. Quindi il concetto di fine va escluso dalla considerazione etica cosí come da quella della natura. Nell'uno come nell'altro caso esso si dimostra un semplice *asylum ignorantiae*. Le azioni umane non si possono valutare diversamente da come giudichiamo figure matematiche, triangoli o cerchi. Per esse non vale ricorrere a un ipotetico metro antropomorfo: c'è solo da descriverle e intenderle in forza di tale descrizione. Ma questa metodica puramente descrittiva non annulla il concetto di libertà neppure entro il sistema spinoziano. Lo stesso Spinoza non può evitare di ammettere che quella a cui ci conduce la considerazione dell'agire umano, è « un'altra forma di cause ». Noi non possiamo né vogliamo sottrarci alla sovranità delle leggi universali della natura: ma dove non si riferiscono ai soli moti di corpi bensí al nostro agire autocosciente, al nostro rappresentare, desiderare e volere, queste leggi assumono un'altra impronta. Le leggi etiche sono leggi di natura, ma leggi per la nostra « natura razionale ». Questa espressione « natura razionale » è per Spinoza la conciliazione e il connubio fra natura e libertà; — la sola conciliazione che vi sia e che si possa

esigere a buon diritto e sensatamente dal punto di vista dell'etica. Agire liberamente non significa agire a casaccio o senza determinazione; significa piuttosto agire secondo una determinazione che si accordi con l'essenza della nostra ragione. Tale essenza, e con essa la priorità specifica della ragione, si esprime nella conoscenza dell'universale. La ragione non ha a che fare con cose ed eventi particolari: a lei interessa intendere il Tutto secondo la sua forma ed essenza pura. Il campo della ragione non è quello della semplice esistenza ma quello della pura essenza. Da questo sapere essenziale scaturisce la forma autentica e piú profonda del volere e del comportamento etici. Quanto li allaccia intimamente l'uno all'altro è *l'amor Dei intellectualis*. Chi è compenetrato dall'amore verso il Tutto e dall'*intuitus* nel Tutto, non soggiace alle illusioni dell'immaginazione o alle attrattive di impulsi transitori del momento. In tanto egli è libero in quanto non vive nel momento né per se stesso diviene un altro a seconda del mutare del momento; egli coglie la norma dell'universo e si autodefinisce a partire da tale norma, dunque mediante una regola immutabile ed eterna. Agire « liberamente » per Spinoza significa solo agire secondo questa regola. Non significa sottrarsi a ogni determinazione ma far valere nel proprio agire una forma ben definita di determinazione, qualitativamente eccellente: quella che risulta dalla legge della ragione come tale. *Libere agere* e *ex ductu rationis agere* sono la medesima cosa: cercare un altro concetto di libertà e un altro concetto di eticità è vano e superfluo. Contro questa forma suprema e omnicomprensiva della volontà e della conoscenza umane si spezza, anche nel sistema di Spinoza, la forza e la stretta di tutte le cause particolari puramente esteriori: *nihil in natura datur quod buic amori intellectuali sit contrarium, sive quod ipsum possit tollere*.

Una formulazione sistematica completamente diversa del rapporto fra libertà e necessità incontriamo nella fondazione kantiana dell'etica. Kant riconduce a Platone. La sua dottrina della moralità si regge tutta sulla differenza

che egli stesso chiama « classica »: la « distinzione di tutti gli oggetti in generale in fenomeni e noumeni ». Ma per Kant è fuori dubbio sin dall'inizio che tale distinzione non si deve compiere in senso metafisico-dogmatico bensì « trascendentale »; che « mondo sensibile » e « mondo intelligibile » non si devono porre come due forme assolute dell'essere contrapposte l'una all'altra, ma la necessità di questa antitesi va dimostrata movendo da principî della conoscenza. È la forma determinata della conoscenza pratica e del giudizio pratico a condurre a questa contrapposizione quale suo correlato necessario. Ogni azione umana rientra in una duplice connessione dell'essere in quanto si può e si deve sottoporre a norme diverse di valutazione. Secondo la sua comparsa nel campo e il suo decorso temporale l'azione è un membro nella catena di cause ed effetti — un membro di quel *nexus* che designamo col nome di « natura ». Ma la determinazione dell'azione in questo tutto della natura non esaurisce mai il suo contenuto e senso vero e proprio. Le nostre azioni appartengono al « regno dei fini » come a quello della natura e si devono riferire all'unità sistematica di questo regno e valutare secondo questa. Tale valutazione sottostà a concetti e regole completamente diversi da quelli su cui si regge la visione del fenomeno « natura ». Se per quest'ultima possiamo accontentarci di « sillabare fenomeni per poterli leggere come esperienze », qui invece dobbiamo entrare nell'« intelligibile ». Un'azione può essere condizionata nello spazio e nel tempo in ciascuno dei propri tratti e quindi determinata come fenomeno della natura: e tuttavia in essa non si esprime mai il solo nesso col mondo reale empirico delle cose. L'azione rimanda al tempo stesso al soggetto etico che vi si presenta e di cui in essa si rivelano il carattere e l'essenza pura. Questa rivelazione della persona è ciò che Kant designa con l'espressione « carattere intelligibile »: — un'espressione che per lui racchiude la sostanza del problema della libertà e del problema etico. Grazie a questa dottrina Kant può restare un rigido

determinista empirico e nondimeno affermare che proprio questa determinazione empirica lascia la via libera a una forma di determinazione per principio diversa, che egli chiama la determinazione mediante la legge morale o la pura autonomia del volere. Nel sistema kantiano queste due forme non si escludono ma si esigono e condizionano a vicenda — relazione che certo si può intendere e giustificare solo se ci si attiene strettamente al fatto che qui non è in gioco un'antitesi metafisica ma critico-trascendentale. Essa non concerne l'essere assoluto come tale, indipendente da tutte le condizioni della nostra conoscenza empirica e della nostra conoscenza morale: fissa solo la prospettiva e l'orizzonte della nostra realtà effettuale dal punto di vista dei nostri concetti teoretici fondamentali e dei nostri postulati etici. Ogni essere razionale, spiega Kant, ha due punti di vista da cui considerare se stesso e riconoscere leggi delle proprie azioni: « l' u n o , in quanto egli appartiene al mondo sensibile, sotto leggi di natura (eteronomia), il s e c o n d o in quanto appartenente al mondo intelligibile, sotto leggi indipendenti dalla natura, non empiriche ma fondate soltanto nella ragione ». « Il concetto d'un mondo intelligibile non è dunque altro che un punto di vista che la ragione si vede costretta ad assumere al di fuori dei fenomeni al fine di concepire se stessa come pratica; ciò che non sarebbe possibile, se le influenze della sensibilità fossero determinanti per l'uomo, il che pertanto è necessario, se non gli si deve negare la coscienza di se stesso come intelligenza, e quindi come causa razionale, ed agente mercé la ragione, vale a dire libera nel suo atto »².

Nei limiti di questa ricerca non è possibile e neppure occorre entrare piú addentro nella storia del concetto di libertà e nel suo significato sistematico. Gli esempi addotti

² *Fondazione della metafisica dei costumi*, sez. III; ed. Cassirer, voi. IV, p. 318; [ed. it. di Delbos-Carrara, Firenze 1942², pp. 187-88; trad. it. di A. Banfi, Milano 1933, p. 197].

dovevano mostrare soltanto questo: che tutti i grandi pensatori che hanno sentito piú profondamente la problematica di tale concetto e vi si sono cimentati, non hanno mai ceduto alla tentazione di averla vinta su questa problematica negando il principio generale di causalità e facendo equivalere la libertà all'« essenza di cause ». Un tentativo simile non si trova né in Platone, né in Spinoza, né in Kant. Per tutti loro libertà non significa tanto indeterminazione quanto piuttosto un certo modo di *d e t e r m i n a b i l i t à*. Determinabilità da parte della pura visione delle idee, determinabilità da parte di una legge universale della ragione che è insieme la legge suprema dell'essere, determinabilità da parte del puro concetto di dovere in cui si esprime l'autonomia, l'autolegislazione della volontà: ecco i momenti fondamentali a cui si riconduce il problema della libertà. L'altra forma di determinazione, presente nelle leggi generali della natura, qui non è negata o respinta ma presupposta. Il nuovo modus di determinazione che devesi fondare, non si regge sulle rovine della legalità della natura: piuttosto si affianca a quest'ultima come correlato e integrazione. Già per questo motivo risulta estremamente problematico se e in qual modo un allentamento o dissolvimento del determinismo scientifico possa servire alla soluzione del problema etico fondamentale. Una « libertà » che derivasse da una fonte siffatta e dovesse fondarsi su consimili ragioni, per l'etica sarebbe un dono dei Danai. Contraddirebbe infatti al senso peculiare e positivo dell'etica; non lascerebbe posto per quella *r e s p o n s a b i l i t à* morale di cui l'etica vuole dimostrare la possibilità e la necessità. Ogni « imputazione » nel senso morale presuppone sempre una qualche specie di « calcolo preventivo » ed è legata a questo. Un'azione che debordasse senz'altro dal nesso causale, un'azione che avvenisse a caso senza ragioni, resterebbe completamente nel vuoto, non si potrebbe riferire né imputare a un soggetto etico costante. Si può ritenere azione responsabile solo un'azione « fondata » su qualche ragione: e il valore che noi le attribuiamo,

dipende dalla specie, dalla qualità delle ragioni che la fondano, non dalla loro assenza. Pertanto non è possibile né lecito fare tutt'uno della questione del « libero volere » e di quella dell'« indeterminismo » fisico. Il libero volere che all'etica importa di fondare, contraddice a un fatalismo dogmatico, ma non contraddice affatto a un determinismo concepito e attuato criticamente. Ci è risultato sempre di nuovo che neppure la meccanica quantistica ha abbandonato in alcun modo il concetto della legalità della natura, ma piuttosto gli ha dato una nuova versione. Se dunque tale concetto costituisse una minaccia per l'idea di libertà morale, a quest'ultima non potrebbe venire alcun soccorso neppure da parte della meccanica quantistica. Nel senso di questo problema, che noi pensiamo l'accadere naturale dominato da rigide leggi dinamiche o vi presupponiamo una semplice regolarità statistica, è tutto lo stesso. Anche nella seconda prospettiva l'accadere resterebbe determinato in misura così ampia che la presunta « libertà », un *liberum arbitrium indifferentiae*, non vi potrebbe trovare nessun rifugio. L'azione che dal punto di vista della fisica fosse da qualificare non proprio assolutamente impossibile ma improbabile in sommo grado, è un'azione di cui non potremmo « tener conto » in nessun modo nel campo stesso delle nostre decisioni pratiche. Se per queste dovessimo contare su improbabilità del genere e dovessimo farle dipendere da esse, sarebbe un brutto affare per le nostre decisioni morali. Nella pratica l'estremamente improbabile fa tutt'uno con l'impossibile; dove, secondo il suo concetto e il suo senso autentico, la libertà etica fosse in contrasto con la calcolabilità preventiva, la misura di calcolabilità preventiva che la meccanica dei quanti lascia sussistere, sarebbe più che sufficiente a distruggere la libertà etica.

Ma uno dei compiti essenziali dell'etica filosofica sta appunto nel mostrare in che modo e perché un tale contrasto non sussiste — in che modo la libertà non ha bisogno di essere affermata c o n t r o la causalità fisica ma si erge e s'afferma per conto proprio. « Costanza » non è solo

una categoria della fisica, è insieme — benché in un senso completamente diverso — una categoria etica. Tutte le azioni schiettamente morali infatti devono per forza [müssen] scaturire dall'unità e dalla costanza d'un certo « carattere » morale. E già da questo risulta chiaro che se l'etica volesse connettersi a un « indeterminismo » illimitato e gettarglisi, per così dire, nelle braccia, la cosa le sarebbe fatale. Movendo da questo punto di vista dovremmo stimare tanto più elevata un'azione quanto più essa portasse il marchio dell'arbitrio, dell'imprevisto, dell'incalcolabile. Ma l'autentico giudizio morale si muove nella direzione esattamente opposta: non sta a valutare il comportamento a capriccio, variante da momento a momento, « incontrollabile »; esso valuta piuttosto l'agire che nasce da uno strato fondamentale e originario della « personalità » e che vi è saldamente ancorato. Il carattere morale è contraddistinto proprio dal suo non essere determinato unicamente da fuori, dal non essere gettato or qua or là nelle proprie decisioni secondo le mutanti condizioni del momento, ma restare eguale a sé medesimo e persistere in sé medesimo. In virtù di questa persistenza noi su un carattere simile possiamo « contare »: — confidiamo che esso resti fedele a sé, che non prenda la sua decisione secondo l'umore e il capriccio ma secondo una legge autonoma, secondo quanto esso stesso ritenga e riconosca giusto. Nel fondare la sua dottrina della libertà morale Schiller parte da ciò: che vi sarebbero due concetti di base teorici ed etici, ultimi, in cui l'analisi dovrebbe fermarsi a confessare i propri limiti. L'uno è il concetto di persona, l'altro il concetto di stato [Zustand]. Nell'uomo in quanto essere finito le due determinazioni sono e restano necessariamente diverse e non si possono ridurre l'una all'altra.

La persona dev'essere il proprio fondamento, perché ciò che permane non può scaturire dal cambiamento; e quindi avremmo per prima l'idea dell'essere assoluto, fondato in se stesso,

cioè libertà. Lo stato deve avere un fondamento; non essendo esso mediante la persona, dunque non assolutamente, deve seguire; e quindi avremmo per seconda la condizione di ogni essere o divenire dipendente, il tempo.

Corrispondentemente causalità e libertà sono altrettanto poco in contrasto quanto lo sono essere e tempo: la struttura del nostro mondo teoretico e di quello morale si regge sulla compenetrazione e la giusta integrazione reciproca di questi due momenti.

Certo tale integrazione non è da intendere nel senso che i due momenti siano posti semplicemente l'uno accanto all'altro, che si possano considerare parti addizionabili e risultanti in un tutto omogeneo in virtù di questa addizione. La sintesi che qui si cerca ed esige, è assolutamente una sintesi del diverso, se non proprio dell'incompatibile per lo meno del qualitativamente disparato. Questa disparità non si può superare né far sparire in alcun modo. E così diviene chiaro anche da questo lato che un eventuale cambiamento nel « concetto di causalità » della fisica non può toccare l'etica direttamente. Infatti per quanto la fisica in se stessa cambi sempre la propria forma, per esempio col rinunciare al concetto di semplice punto materiale o alla possibilità di predizioni rigide, con questo nondimeno l'antitesi di principio fra il mondo fisico e il mondo etico, fra il « regno della natura » e il « regno dei costumi », non si può colmare. I due mondi stanno l'uno di fronte all'altro sempre allo stesso modo, ciascuno come il tutto, quali che siano gli interni mutamenti di forma a cui li pensiamo soggetti. Il problema « natura e libertà » resta lo stesso — sia che noi interpretiamo come leggi dinamiche le leggi generali costituenti il concetto di natura, sia che le intendiamo come leggi statistiche. Qui non è in gioco una differenza materiale di contenuto ma una differenza formale o, più precisamente, categoriale. Al concetto superiore di determinazione non possiamo rinunciare in nessuno dei due casi, né nella co-

struzione del mondo fisico né in quella del mondo etico. Ma nel regno dell'essere la determinazione ha luogo secondo altre categorie che non in quello del dovere. Tali categorie non entrano in contrasto perché appartengono a « dimensioni » della considerazione affatto diverse. Quindi non possono intersecarsi; né concordano fra loro né si disturbano o distruggono a vicenda. Altrettanto poco esse si spartiscono in settori distinti dell'essere, bensì occupano il tutto dell'essere, sempre secondo un determinato « aspetto ». Il problema metodologico qui in campo non si restringe affatto al rapporto fra « natura » ed « eticità », ha un carattere molto più generale. Esso ricorre dovunque vengano a trovarsi l'una di fronte all'altra determinazioni e interpretazioni-di-senso eterogenee. Per quanto concerne ad esempio il mondo religioso, alla sua interpretazione filosofica si pone sempre di nuovo la questione fondamentale del se e come la concezione religiosa dell'accadere sia conciliabile con l'altra, umana-« naturale ». Su questo punto il conflitto tra « fede » e « sapere » si aprì sempre da capo; e ai seguaci della prima il miracolo apparve « il figlio prediletto della fede ». Un evento sembrò inteso e fondato in modo tanto più sicuramente religioso quanto più esso si documentava come miracoloso — quanto più comportava in sé un'infrazione delle leggi generali della natura. Ma nella filosofia moderna della religione, da Leibniz e Schleiermacher, questa concezione si è radicalmente mutata. Non contesta più oltre la validità di una legalità rigorosa ed universale della natura — piuttosto dà proprio a quest'ultima un'impronta religiosa: ci vede una prova della « natura divina » dell'essere. « "Miracolo" — dichiara Schleiermacher — non è altro che il nome religioso per "evento" »; esso non contrasta col concetto di regolarità ma innalza piuttosto questa regolarità come tale nella sfera religiosa e la esprime nel linguaggio della religiosità. In modo analogo si costituisce anche il « senso » estetico. L'arte non è né « imitazione della natura », né trasformandola secondo ideali estetici le attribuisce alcunché di completa-

mente diverso. Piuttosto l'arte scopre il bello nella natura misurandola con un metro nuovo e indipendente. La statua venerata nel santuario si può descrivere da punti di vista puramente scientifici e presentare secondo i concetti e le categorie della conoscenza della natura. Con ciò diviene un « pezzo di natura », soggetto a leggi chimico-fisiche come ogni altro. Ma con tutte queste determinazioni sappiamo benissimo di non arrivare al senso pieno della statua. Questo senso non è esaurito dall'indicazione delle sole costanti naturali: chiede altri metri, eterogenei per principio. Possiamo analizzare e studiare il marmo da tutti i lati come oggetto della natura — il risultato dell'analisi non ci svela nulla né intorno alla « forma » del marmo e alla bellezza di questa forma, né intorno al suo significato nel culto, al suo senso quale oggetto della venerazione religiosa. E altrettanto poco perveniamo al contenuto caratteristico del problema della libertà quando ci atteniamo strettamente nel campo-di-enunciati della conoscenza scientifica della natura. È anch'esso un problema *sui generis*: una questione non risolvibile con un semplice ricorso alle leggi di natura, ma da fondare su un proprio tipo indipendente di legalità, sulla legalità « autonoma » del volere. Quando si tenga presente questo, si intende che e perché l'etica non ha nulla da temere né alcunché di essenziale da sperare dai mutamenti dei concetti di fondo della conoscenza della natura. Essa dovrà cercare e trovare la propria strada come sempre: una strada su cui la fisica non la può né sviare né aiutare molto. Questa situazione non si è mutata in linea di principio neppure là dove l'etica si è data, come in Spinoza, a un « naturalismo » tassativo. La caratteristica metodologica della sua problematica si è sempre riaperta un varco in qualche punto. Quindi la controversia fra « determinismo » e « indeterminismo » alla fine verrà decisa come sempre nel campo della fisica: la cosa certa è che non vi si può premettere la decisione dell'etica. Su questo punto essa troverà sempre di nuovo il suo *Hic Rhodus, hic salta*. Nei confronti del problema della libertà l'etica

deve pronunciare un suo verdetto di propria iniziativa; non può rinviare il problema ad altra istanza né ammettere in questa sua questione delicatissima alcun pregiudizio. Lo studioso di etica che chiede la possibilità della libertà, nella misura in cui pone la questione nel solo senso rilevante e significativo per l'etica, non può attendersi nessun aiuto essenziale da parte della fisica. Ancor quando la soluzione dell'enigma gli venisse offerta nella forma di un qualche indeterminismo fisico, egli dovrebbe ricusarla con le parole con cui la regina Cristina di Svezia proclamò, a quel che si dice, la propria rinuncia al trono e al regno: « non mi bisogna e non mi basta »³.

Questo stato di cose risalta tanto più chiaramente, quanto più nettamente teniamo presenti i singoli problemi a cui ha condotto l'indeterminismo della teoria quantistica. Quale è stata infine la nuova intuizione e la nuova concezione di fondo che la fisica atomica moderna ha sostituito ai concetti della fisica classica? Essa in sostanza consistette nel non porre più la domanda del « perché » nello stesso modo di prima e nel non fare leva sullo stesso punto. Nella teoria di Bohr l'orbita dell'elettrone è stabilita da due condizioni diverse, una « classica » e una « quantistica ». Dal reciproco addentellarsi di queste condizioni risulta che l'elettrone si può muovere sempre solo su certe orbite ben distinte i raggi delle quali stanno nel rapporto dei quadrati e i periodi di rivoluzione in quello dei cubi dei numeri quantici; si vede inoltre che nel caso di un apporto d'energia l'elettrone può salire da un'orbita interna ad una esterna e nel caso di una cessione d'energia cadere da un'orbita esterna in una interna. Ma la teoria non dà risposta alla questione del « perché » di questi due processi. Definisce solo il loro « che » e il loro « come »; restringe il processo, considerato e preso come dato di

³ « Delle spiegazioni dei misteri che si spacciano qua e là, si può dire ciò che la regina di Svezia disse in una medaglia intorno alla corona che aveva depresso: " non mi bisogna e non mi basta " » (LEIBNIZ, *Théodicée* in *Phil. Schriften*, ed. Gerhardt, voi. VI, p. 81).

fatto empirico, a certe regole concepibili in termini esatti. Quando si dice che l'elettrone non possiede nessun altro vincolo oltre quello impostogli da queste regole; che gli resta un certo spazio di gioco entro il quale è « libero », ciò evidentemente non è altro e nulla di piú che una metafora. Da questo significato della libertà come possibilità circoscritta da leggi di natura nessuna via conduce a quella « realtà » del volere e della decisione pratica con cui ha a che fare la problematica etica. Confondere la « selezione » che secondo la teoria di Bohr l'elettrone può fare tra differenti orbite quantizzate, con una « scelta » nel senso etico di questo concetto, significherebbe cadere vittime di un equivoco d'ordine puramente linguistico. Una « scelta » infatti c'è solo dove non soltanto sussistono in sé possibilità diverse ma fra di esse si compie una distinzione consapevole e si viene a una decisione consapevole. Proiettare atti del genere nell'elettrone sarebbe una madornale ricaduta in una forma di quell'antropomorfismo di cui proprio la fisica moderna, che insiste con piú rigore che mai sull'« emancipare la descrizione della natura degli elementi antropomorfi », non può rendersi colpevole e non si è resa colpevole. Per essa « lo » elettrone è tanto poco paragonabile a un'unità « personale », che anzi esige da noi il passo esattamente opposto: cessa di considerare e di trattare l'elettrone anche solo come un oggetto individuale nel senso consueto dell'espressione, come una « cosa singola ». Ben lungi dal favorire una qualunque forma di personificazione, la nuova fisica mette il suo punto interrogativo già al tentativo della semplice identificazione, al tentativo di tener ferma l'identità puramente numerica dei « singoli » elettroni. Abbiamo veduto come la fondazione teorica della statistica quantistica e delle sue diverse forme sia stata condotta sempre di nuovo a dubitare di una « individualità » ben determinata degli elettroni. Non possiamo piú separare due elementi entro un gruppo di elettroni e porli l'uno di fronte all'altro come entità individuali indipendenti allo stesso modo in cui nel sistema della fisi-

ca classica ciò si era ritenuto possibile per due punti materiali. Se abbiamo due elettroni che in un primo momento si trovino in due posizioni A e B molto distanti fra loro, e fra i quali poi avviene un incontro nello spazio, una collisione a cui subentra di nuovo la costellazione precedente, cioè i punti A e B tornano a essere occupati ciascuno da un elettrone, allora secondo le considerazioni e i principi generali della teoria quantistica non ha senso domandare se nella posizione A e, rispettivamente, nella posizione B si ritrovi « lo stesso » elettrone oppure fra i due elettroni abbia avuto luogo uno scambio dei posti rispettivi. Una simile forma di identificazione non solo non si può raggiungere ma, come si è scoperto e accentuato sempre più nettamente, secondo i principi della teoria quantistica non si può nemmeno cercare: un « riconoscimento » dell'elettrone non è più possibile allo stesso modo e con mezzi analoghi a quelli con cui ciò accadeva nel quadro della fisica classica⁴. Qui dove già l'individualità fisica diviene problematica, siamo dunque più lontani che mai dall'individualità etica, dalla « persona » quale soggetto della decisione pratica « autonoma »: la distanza fra le due non è diminuita ma piuttosto espressa tanto più nettamente.

Allo stesso risultato ci vediamo sospinti quando affrontiamo la questione dal versante opposto, prendendo in considerazione la sola problematica etica come tale. È vero che quanto ci chiede questa problematica sta in antitesi — apparente o reale — con una determinata forma di « causalità naturale » o non si estende forse il problema, una volta posto con effettivo rigore e coerenza logica, a tutto di questa causalità naturale? Qui in fondo è possibile solo una decisione: o affermiamo la conciliabilità di « natura » e « libertà » come tale oppure la neghiamo come tale. Alla negazione, e quindi a un'antinomia irriduci-

⁴ In proposito cfr. ad esempio JORDAN, *Statistische Mechanik auf quantentheoretischer Grundlage* cit., cap. III, p. 86 ss. (vedi anche sopra, p. 38 s.).

bile si è condotti ogni qual volta il « determinismo » si estende nel senso metafisico invece che in quello critico. Allora infatti la causalità cessa immediatamente di essere un principio della conoscenza fisica: si ipostatizza in un essere indipendente, diviene un fatto metafisico contro cui la volontà umana collide e al quale da ultimo essa deve soggiacere. A questa trasformazione acritica della causalità in una necessità materiale, in una specie di *kismet*⁵, si può ovviare solo con una svolta radicale, con un'inversione e un distacco filosofici. Per evitarne o attenuarne le conseguenze non basta andare solo in cerca di un « allentamento » che non è in grado di mutare nulla quanto alla specie del legame qui presupposto. Una volta convertita la regola della conoscenza in una coercizione materiale, una volta ridotta la norma del comprendere causale a una necessità che impone inesorabilmente la propria forma all'accadere e quasi ve lo incatena, ogni rettifica successiva di questo errore fondamentale di metodo arriva troppo tardi. Allora pensare la causalità dominante nella natura, sotto la specie di leggi strettamente « dinamiche » o sotto quella di leggi puramente « statistiche », non cambia nulla. Il difetto vero e proprio sta altrove e va eliminato con mezzi fundamentalmente diversi. Una volta inserita la « necessità » metafisica nella formulazione delle leggi di natura, se poi consideriamo tratto fondamentale dell'accadere naturale certe regolarità statistiche, tale necessità non si annuncia meno rigidamente e imperiosamente di quando pensiamo questo accadere connesso in relazioni strettamente deterministiche nel senso della fisica classica. Né sull'una né sull'altra via resta aperto un adito alla sfera della « libertà » che l'etica rivendica per sé. Per venire in chiaro su questo punto basta dare uno sguardo allo sviluppo storico del problema. Al primo contatto fra i problemi della filosofia morale e quelli della statistica si è giunti nella cosiddetta « statistica morale ». Già nella forma che le diede il Quéte-

⁵ [*Kismet*: « fato », « destino » in arabo nel testo. — N.d.T.].

let, suo primo fondatore, questa disciplina si pose deliberamente il compito di abolire i confini tra i fenomeni semplicemente fisici e quelli puramente morali mostrando che entrambi i gruppi di fenomeni soggiacciono esattamente alla stessa regolarità e vanno descritti mediante questa senza lacune né eccezioni. Secondo Quételet c'è una fisica della società umana esattamente nello stesso senso in cui c'è una fisica degli atomi e dei corpi materiali composti di atomi. L'apparente antitesi nel « che cosa », nel semplice substrato dell'accadere, viene più che colmata: viene estinta completamente dall'intuizione che l'accadere come tale si adegua in entrambi i casi esattamente agli stessi ordinamenti. Questo adeguarsi è della stessa specie e dello stesso rigore, si tratti di fenomeni corporei o spirituali, fisici o morali. Con ciò in linea di principio la morale era inclusa nell'ambito della calcolabilità che sinora sembrava riservato alla fisica. E l'unica stringente conseguenza metodologica risultante da questa impostazione poteva essere solo che la causa della « libertà » era perduta per l'etica come per la fisica. Giust'appunto le leggi dei numeri proprie della statistica sembrarono dare come risultato immediatamente lampante e ineluttabile non esservi posto per alcunché di « arbitrario » neppure nel campo dei puri fenomeni del volere. La legge dei grandi numeri cancella sia le differenze che siamo soliti porre tra fenomeni naturali e fenomeni del volere, sia le differenze entro questi ultimi fra azioni « libere » e azioni « non libere ». Dal punto di vista della conoscenza, dal punto di vista dello storico e del sociologo queste differenze devono sparire. Ora egli scorge solo l'immutante catena di cause ed effetti con cui ogni avvenimento ed essere singolo si congiunge a ogni altro tanto da perdere il suo senso particolare, il suo significato in quanto singolo. Visti da questa prospettiva decadono a determinazioni puramente accidentali anche i predicati-di-valore etici con cui diamo risalto a certi gruppi di azioni e cerchiamo di garantire loro una posizione privilegiata. La regola della statistica

abbraccia il « bene » come il « male » e fra i due non ammette né una differenza essenziale dell'essere né una differenza metodologica della spiegazione. « I delitti si riproducono ogni anno nello stesso numero, con le stesse pene, nelle stesse proporzioni » — dice Quételet — e cerca di mostrare che questo principio non riguarda solo il genere dei delinquenti ma anche tutte le circostanze concomitanti apparentemente « accidentali » della loro condotta. Non solo in determinati paesi si commette ogni anno un determinato numero di omicidî ma anche la specie di esecuzione, anche le armi che vi sono impiegate, presentano una relazione altrettanto regolare quanto quella che possiamo notare nell'ambito dei fenomeni fisici, ad esempio nel moto di flusso e riflusso delle maree. Da questa concezione di fondo si è sviluppata quella forma di filosofia « materialistica » della storia la quale scorge il termine medio di congiunzione e conciliazione fra la considerazione della natura e quella della storia, nella stessa determinazione strettamente « meccanica » che entrambe devono ammettere e prendere per base. Qui la statistica fece dovunque da autentica mediatrice intellettuale. Chi guarda serenamente la regolarità degli eventi — scrive ad esempio il Buckle nell'introduzione alla sua *History of Civilisation in England* (1857) svolgendo dei concetti fondamentali di Quételet —, chi si è fermamente convinto della grande verità che le azioni degli uomini « essendo guidate dai loro antecedenti non sono mai in realtà inconseguenti », non sarà piú sorpreso dal fatto che questa regolarità si estende anche al minimo particolare apparentemente piú insignificante.

Per vero il progresso dell'indagine va divenendo così rapido e serio, ch'io non dubito che, anzi che sia trascorso un altro secolo, la catena dell'evidenza sarà compiuta e sarà così raro trovare uno storico che neghi la regolarità immutabile del mondo morale, come è raro ora trovare un filosofo che neghi la regolarità del mondo materiale. Si osserverà che le prove... dell'essere le nostre azioni regolate da leggi, furono derivate dalla statistica: ramo dello scibile che, quantunque ancora nella

sua infanzia, ha già sparso piú lume sullo studio dell'umana natura che tutte le scienze poste insieme⁶.

Da tutto ciò si vede che e perché il carattere statistico delle leggi della meccanica quantistica per sé solo, senza l'aggiunta di considerazioni di tutt'altro genere, non può decidere la questione della « libertà » etica. Tant'è vero che dalle medesime premesse, offerte dalla fisica, qui, sempre secondo le regole riconosciute valide della metodologia filosofica e gnoseologico-critica, si fanno derivare conseguenze del tutto disparate. Movendo da « dati di fatto » statistici si può procedere tanto nel senso d'una concezione « indeterministica » quanto nel senso di un rigido determinismo e « meccanicismo ». Nemmeno il pensiero statistico, come la sua storia mostra chiaramente, è affatto al riparo dal pericolo che in un qualche punto i suoi risultati « si irrigidiscano » dogmaticamente — dal pericolo che la regola di conoscenza in esso stabilita subisca un'interpretazione tale da apparire alla mente pensante come una pura essenza trascendente, esistente e necessaria di per sé. Non appena subentri questa svolta, ci vediamo di nuovo impigliati nelle antinomie del problema della libertà — e a queste, esattamente come nel caso delle leggi « dinamiche », si può ovviare solo con una trasformazione radicale della questione in linea di principio, con una specie di « rivoluzione copernicana ».

Quando passa per legge sociologica — dice Simmel nella sua analisi gnoseologica del concetto di leggi storiche — che in 10.000 decessi annui vi sia un determinato numero di suicidi, ciò suona affatto equivoco. Ciascuno dei suicidi in questione infatti è solo il risultato di forze sociali e psicologiche ovvero sia delle leggi che regolano queste forze; e che poi in totale i suicidi ammontino a questo o quel numero, è un risultato dell'agire di tali leggi su una data materia e dunque non

⁶ BUCKLE, *History of Civilisation in England*, 2^a ed., London 1858, cap. I [si cita dalla trad. it. *L'incivilimento per Enrico Tommaso Buckle*, Milano 1864, pp. 43-44. — N.d.T.].

può essere per se stesso una legge... L'addizione dei casi è una sintesi avanzata dall'osservatore; che essa dia questo determinato risultato, si giustifica oggettivamente, è vero, ma solo a condizione che si giustifichi oggettivamente ciascuno dei suoi fattori, mentre voler dedurre all'inverso dalla necessaria determinatezza del risultato quella stessa dei fattori è un circolo vizioso e comporta una specie di teleologia mistica... La vicenda del singolo suicidio offre certamente il materiale per la questione... ma non la risolve, perché per sua natura la questione non sta affatto sul piano delle realtà immediate bensì su quelli che le categorie di maggior astrazione fanno sorgere da queste — come, poniamo, la descrizione geometrica di certe forme di cristalli e il loro ordinamento sistematico secondo tali punti di vista non affrontano la questione delle energie che fanno cristallizzare il singolo cristallo⁷.

Quando ci si attenga a questa concezione di base, si riconosce che il $\pi\rho\omega\tau\omicron\nu$ $\psi\epsilon\upsilon\delta\omicron\varsigma$ dell'intera questione della causalità sta nel pensare le leggi stesse come una specie di realtà [*Realitäten*] e nel descriverle con predicati che possono spettare solo a queste ultime. Una volta incorsi in tale confusione, non si riesce più a trovare la via d'uscita dal labirinto. Voler salvare la libertà con sostituire regolarità statistiche a leggi dinamiche, è inutile: infatti l'ostacolo che impedisce di riconoscere ed evidenziare la problematica etica, non dipende affatto dalla specie di leggi adottate: dipende da una formulazione equivoca e gnoseologicamente insufficiente del concetto di legge come tale.

Ma la posizione del problema della meccanica quantistica può servire in un altro senso mediato per tirarne una conseguenza generale di portata filosofica. Ciò che la nuova fisica ci ha insegnato è il fatto che il cambiamento di « punto di vista » da compiere quando passiamo da una dimensione-di-senso a un'altra, quando al posto del « mondo » della scienza naturale prendiamo il mondo del-

⁷ G. SIMMEL, *Die Probleme der Geschichtsphilosophie*, 2^a ed., 1905, p. 104 ss.

l'etica, dell'arte e così via, non si limita solo a questo passaggio. La molteplicità delle « prospettive » che qui ci si apre dinanzi, ha già un suo riscontro metodologico nel campo stesso della scienza naturale. La fisica moderna ha dovuto abbandonare la speranza d'espone esaurientemente il tutto dello accadere naturale con un solo sistema ben determinato di simboli. Essa si vede posta di fronte alla necessità di applicare specie differenti di simboli, di « spiegazioni » schematiche, al medesimo accadere; deve descrivere un essere per sé medesimo come « particella » e come « onda » e non le è lecito lasciarsi intimidire dalla circostanza che l'unificazione intuitiva delle due immagini si dimostra impossibile. Se il compito fondamentale della conoscenza fisica, la connessione dei fenomeni in saldi ordinamenti legali, esige la dualità della descrizione, le abitudini e le istanze del rappresentare intuitivo e dell'« intendere » intuitivo devono passare in seconda linea rispetto a questa esigenza fondamentale. E se una simile sovrapposizione di « aspetti » eterogenei è già necessaria nella considerazione della natura, tanto più facilmente concepibile diviene che noi la ritroviamo e la troviamo confermata non appena oltrepassiamo la sua sfera di problemi — non appena cerchiamo di approdare a quel pieno concetto di « realtà » [*Wirklichkeit*] che si regge sulla collaborazione di tutte le funzioni dello spazio ed è raggiungibile solo nella totalità di queste.

INDICE DEI NOMI

- Abbagnano, M., 135 n.
 Abbagnano, N., 135 n.
 Ageno, M., 171 n., 188 n., 224 n.
 Alembert, J.-B. d', 72, 93 n.
 Alfieri, V. E., 19 n.
 Anassagora, 60 e n.
 Apelt, E. F., 86 n.
 Archimede, 72, 125 n., 178, 197.
 Aristotele, 149, 154, 167, 183 e n., 193, 205, 214 n., 222 n., 235, 274, 284.
 Arnaud, E., 19 n., 28 n.
 Auerbach, B., 61 n.
 Avogadro, A., 217.

 Bacone, R., 74, 82, 98 e n.
 Baumker, C., 213 n.
 Banfi, A., vi, ix, 298.
 Bayer, K., 136 n.
 Bayle, P., 250 n.
 Bergmann, H., 175 n.,
 Bernoulli, J., 143.
 Bloch, W., 277 n.
 Bohr, N., 165 e n., 166 e n., 167, 170 e n., 171 e n., 173 n., 178, 196-198, 209 n., 219 e n., 222, 242, 252, 259, 266, 305.
 Boltzmann, L., 116, 117 e n., 118, 119 e n., 120, 156, 206, 208 e n., 257, 258 e n.
 Born, M., 171, 188, 270 n., 271 e n.
 Bose, J. C., 275 n.
 Buchenau, A., 24 n.
 Buckle, E. T., 310 e n.

 Cantor, G., 138, 248, 249.
 Carnap, R., 50, 51 n., 64 n., 107 n.
 Carnot, S., 115.
 Casari, E., 186 n.

 Cassirer, E., 185 n.
 Cavalieri, B., 250.
 Clarke, A., 86 e n., 241 n., 244 n., 271 n.
 Clausius, R. J. E., 115, 116.
 Cohen, H., vi, 6, 7.
 Colli, G., 36 n.
 Compton, A. H., 173, 180, 182, 190.
 Coulomb, C. A., 54, 55.
 Cousin, V., xiv.
 Couturat, L., 274 n.
 Cristina di Svezia, 305 e n.

 Dalton, J., 217.
 Darwin, Ch., 135, 136.
 De Broglie, L. V., 78 n., 167 n., 265, 269, 270 e n.
 Dedekind, J. W. R., 240 e n., 249.
 Democrito, 205, 213, 221.
 Descartes, R., 25, 29, 228-230, 231 n., 232, 260 e n.
 Dirac, P. A. M., 93, 173 n., 175 n., 188, 203 n., 275 n., 276, 277 n., 282 e n., 283 n., 287 n.
 Dirichlet, P. G. L., 76.
 Du Bois-Reymond, E., 12, 17, 19, 21, 94, 97, 220.
 Du Bois-Reymond, P., 19 e n., 20.
 Duhem, P., 287 n.

 Eddington, A. S., 4, 53 n., 93 n., 176, 177 n., 179.
 Ehrenfest, P., 165, 166 n.
 Einstein, A., 78 n., 102, 114 n., 163, 177, 186 n., 275 n.
 Ellis, L., 136 e n.
 Epicuro, 132.

- Erone di Alessandria, 74, 79.
 Euler, L., 75, 79, 93 n.
 Exner, F., 120, 122, 123, 124 e n.,
 127-130, 132.
 Faraday, M., 208, 209 e n., 245,
 261.
 Fermat, P., 71, 78, 79.
 Fermi, E., 275 n.
 Filolao, 246 e n.
 Foucher, S., 235.
 Fourier, J.-B., 61 e n., 62, 101.
 Frank, P., 99 n.
 Frenkel, 182 n., 224 n.
 Galilei, G., 7, 25, 26 e n., 29,
 48, 60, 61, 64 e n., 72, 74,
 86, 102, 123-124, 125 e n., 126,
 127, 141, 157, 164, 214, 249,
 287 n.
 Gamba, A., 100 n., 161 n.
 Gassendi, P., 214.
 Gauss, K. F., 76, 79, 80, 86 n., 87.
 Gay-Lussac, L. J., 61, 66.
 Gerhardt, P., 75 n.
 Gibbs, J. W., 117.
 Goethe, W., 74, 245, 254.
 Griesinger, G., 73 n., 74 n.
 Hahn, H., 240 n.
 Hamilton, W. R., 76, 78-80, 87.
 Hartmann, N., vi, vii.
 Heisenberg, W., xiii, 62, 170,
 171 e n., 174, 178, 180, 181
 e n., 182, 186, 188, 189, 190 e
 n., 199, 210, 224 n., 254, 284.
 Helm, G., 207.
 Helmholtz, H. L. F. von, vii,
 7, 48, 72, 75 n., 76, 77, 79,
 80 e n., 81, 94-98, 182, 191,
 208, 209.
 Hempel, K. G., ix.
 Hermann, G., 75 n., 100 n.
 Hertz, H., ix, 71, 81, 82 n.,
 86 e n., 101 e n., 191, 261,
 271.
 Hilbert, D., 57, 69, 104, 166.
 Hobbes, Th., 227.
 Hoenigswald, R., 93 n., 258 n.
 Holst, 165 n.
 Hume, D., 29, 31, 32, 35-38, 43,
 63, 111, 145 e n.
 Husserl, E., 142 n., 274 n.
 Huyghens, C., 48, 61, 215, 217,
 218, 234 n., 244.
 Jacobi, J. G., 76.
 Jacobsson, M., 7.
 Jordan, P., xiv, 171, 188, 271 n.,
 275 n., 307 n.
 Joule, J. P., 72.
 Kaila, E., 135 n.
 Kant, I., vi, x, xii, xiii, xv, 6,
 7, 14, 31-40, 43, 90-92, 106,
 111-113, 122, 152-154, 157,
 228, 236, 237, 243, 263, 268,
 277, 291, 296-299.
 Karlgrén, B., 7.
 Kelvin, W. T., 218.
 Keplero, J., 25, 26 n., 29, 48, 60,
 61, 102, 164, 196, 250.
 Keynes, J., 68 n. 135, 136 e n.
 Keyser, C. J., 104 n.
 Kirchhoff, G. R., 48.
 Kneser, A., 81 n.
 Königsberger, L., 73 n., 95 n.
 Kramer, H. A., 165 n.
 Kries, J. von, 136 n., 146 e n.,
 156 e n.
 Kronecker, L., 249.
 Lagrange, G. L., 61, 72, 75 e n.,
 76, 79, 80 93 n., 164, 235,
 236.
 Lange, L., 186.
 Langevin, P., 175 n., 242 n.,
 254 n., 267 e n.
 Laplace, P. S., xii, 11-15, 17,
 20, 21, 23, 39-42, 97, 99, 134,
 168.
 Lasswitz, K., 214 n., 215, 216 n.
 Laue, M. von, 117 n., 120 n.,
 210, 264 e n., 267 e n.
 Lavoisier, A. L., 73, 216 e n.
 Leibniz, G. W., 23, 24 e n.,
 25-27, 28 e n., 29, 32, 60, 68,
 75 e n., 79, 85, 86, 100, 138,
 139 n., 141, 142 n., 150-152,
 154, 185 e n., 228, 231-233,
 234 e n., 235, 240, 241 e n.,
 244, 245 n., 250 e n., 252 e n.,
 258, 271 n., 273, 274 n., 303,
 305 n.

- Lévy-Bruhl, L., 148 n.
 Liebmann, O., 14, 15 n.
 Locke, J., 64, 265 n.
 Loschmidt, G., 120, 211.
 Lotze, R. H., 201, 202 n.
- Mach, E., 48, 53 n., 61 n., 72,
 73 e n., 87, 89, 104, 105 e n.,
 125, 126, 162 n., 186, 191,
 206 e n., 210.
 March, A., 282 n.
 Mariotte, E., 61, 66, 216.
 Maupertuis, P. L. M., 75 e n.,
 76, 79 e n.
 Maxwell, J. C., 7, 61, 65, 66,
 67 e n., 68 e n., 71, 101, 118,
 200, 245.
 Mayer, R., 48, 72, 73 e n., 74,
 207.
 Medicus, F., 137 n.
 Mill, J. S., 63 e n., 64, 82,
 83 e n., 124.
 Millikan, R. A., 163, 268.
 Mises, R. V. von, 20 n., 134 n.,
 139 n., 140, 141 n., 155 n.
 Mondolfo, R., 213 n.
 Moritz, M., 8.
- Natorp, P., vi, 6, 7, 278 e n.
 Nernst, W., 12, 62, 283 n.
 Neumann, C., 186.
 Newton, I., 7, 15, 48, 54, 93 n.,
 127, 156, 157 e n., 164, 184,
 185, 214 n., 235, 244, 245,
 250.
 Nizolio, M., 141.
- Occam, G., 85.
 Ostwald, W., 172 e n., 207 e n.,
 208 e n., 223.
- Painlevé, P. P., 66, 67 n.
 Parmenide, 56.
 Pauli, W., 271 n.
 Peirce, C. S., 135 e n.
 Perrin, J., 240 n., 254 n.
 Persico, E., 100 n., 161 n.
 Petzoldt, J., 87 e n.
 Planck, M., 4, 77 e n., 79 n.,
 99, 100 n., 102, 120, 121, 130,
 161, 162 e n., 163, 167, 169,
 174, 179, 182, 186, 209, 251,
 252 e n.
 Platone, 247 e n., 287 n., 294,
 296, 299.
 Pocar, E., 26 n.
 Poincaré, H., 143.
 Poisson, S. D., 79, 143.
 Popper, K., 143.
- Quételet, A., 308-310.
 Quine, W., ix.
- Reichenbach, H., 138 n., 143,
 144 e n., 145 e n.
 Reid, T., 145.
 Russell, B. A., 49 e n., 64.
 Rutherford, E., 219.
 Rydberg, R., 197.
- Schiller, F., 4, 301.
 Schleiermacher, F., 303.
 Schlick, M., 67 e n., 97 n.,
 101 n., 278.
 Scholz, H., 247 n.
 Schopenhauer, A., 86 n., 264.
 Schrödinger, E., 71, 78 e n.,
 121 e n., 167 e n., 169, 170 n.,
 174, 188, 199, 200, 209, 242,
 254 e n., 265, 266, 267 n.,
 268, 270.
 Shakespeare, W., 11.
 Simmel, G., 311, 312 n.
 Smoluchowski, M., 137 n., 155
 e n.
 Socrate, 293, 294.
 Sommerfeld, A., 163 n., 164,
 196 n., 198, 259, 268, 269 n.
 Spencer, H., 52 e n.
 Spinoza, B., 15, 295, 296, 299,
 304.
 Stevin, S., 72.
 Streintz, 186.
 Stumpf, K., 136 n.
- Taine, H., 3.
 Thomson, J. J., 208, 218, 219 e n.
 Toeplitz, O., 247 n.
- Van Der Waals, J. D., 129.
 Van't Hoff, J. H., 217.
 Varignon, P., 75 n., 241 n.
 Voss, A., 72 n.

- Weierstrass, K. T. W., 240, 249.
Weyl, H., 51 n., 55 n., 57 n.,
103 n., 193 e n., 248, 249 n.,
272 e n., 275.
Wiener, O., 52 n.
Wilson, C. T. R., 267.
Wind, E., 202 n.
- Wohlwill, E., 86 n.
Wolff, C., 241 n., 242 n.
Wundt, W., 260 e n.
- Zeller, E., 213 n., 222 n.
Zenone di Elea, 213.

INDICE

<i>Presentazione</i> (GIULIO PRETI)	p. IV
<i>Dedica</i>	» 1
<i>Prefazione</i>	» 3
PARTE I - CONSIDERAZIONI STORICHE PRELIMINARI	
I. Lo « spirito di Laplace »	» 11
II. Determinismo metafisico e determinismo critico	» 23
PARTE II IL PRINCIPIO CAUSALE DELLA FISICA CLASSICA	
I. I tipi fondamentali di enunciati fisici: gli enunciati di misura	» 47
II. Gli enunciati di legge	» 59
III. Gli enunciati di principi	» 71
IV. Il principio generale di causalità	» 89
PARTE III - CAUSALITÀ E PROBABILITÀ	
I. Regolarità dinamica e regolarità statistica	» 111
II. Il carattere logico degli enunciati statistici	» 133
PARTE IV I PROBLEMI DELLA CAUSALITÀ NELLA TEORIA DEI QUANTI	
I. I fondamenti della teoria dei quanti e le relazioni di indeterminazione	» 161
II. Per la storia e la teoria gnoseologica del concetto di atomo	» 205