

PROSPETTIVE

settanta

RIVISTA TRIMESTRALE DIRETTA DA GIUSEPPE GALASSO
NUOVA SERIE - ANNO III - 1981

Comitato di Redazione: Alberto Aquarone - Piero Craveri - Elena Croce
Francesco Gui - Gerardo Mombelli - Paolo Savona - Cristiana Zegretti
Segreteria di Redazione: Giacomo Garzya

GUIDA EDITORI - NAPOLI

Determinismo e indeterminismo nella fisica moderna

I. Rigore formale e rigore concettuale

La scoperta del quanto d'azione è del 1900, la formulazione della teoria della relatività ristretta è del 1905. La strana coincidenza per cui entrambe queste scoperte cadono nei primissimi anni del secolo assume, a posteriori, un valore simbolico: è infatti con queste scoperte, figlie del prodigioso sviluppo della fisica ottocentesca, che la visione del mondo su cui tale sviluppo si era basato entra in una crisi feconda e costruttiva che ancora oggi, dopo quasi un secolo, è lungi dall'essere conclusa. Per comprendere a fondo il senso di questa crisi è importante tener presente che lo scopo di ogni scienza della natura non è soltanto la scoperta di leggi e di modelli matematici che permettano di ordinare i dati sperimentali e prevedere nuovi fenomeni, o l'uso di tali scoperte per incrementare il benessere materiale degli uomini, ma anche, e non secondariamente, di contribuire alla formazione di una visione globale del mondo, di una intuizione qualificativa dei fenomeni naturali. Il punto di partenza di ogni disciplina scientifica è sempre l'esperienza, e perciò ciascuna di esse è implicitamente fondata su una visione del mondo storicamente determinata, che in essa si manifesta sia attraverso il modo dei singoli scienziati di porsi in relazione agli oggetti e alle teorie, sia, in modo più sottile, attraverso il linguaggio comune, cui si può pensare come ad una teoria primordiale soggettiva a tutte le specifiche teorie. Infatti il ricorso al linguaggio simbolico della matematica, che è alla base della formulazione quantitativa di ogni teoria, cioè della costruzione del modello, rappresenta il momento della « negazione » del linguaggio comune; tuttavia, quando le deduzioni effettuate all'interno del modello devono venire interpretate in termini di realtà fisica e diventano una guida per le nostre azioni e previsioni, esse devono venire « ri-tradotte » in termini di linguaggio comune, e ciò talvolta è sorgente di ambiguità e confusione, poiché il contenuto concettuale storicamente associato ad una parola può rivelarsi inadeguato ad esprimere l'uso specifico che di questa parola si fa in una data teoria. Una situazione del genere si è verificata con termini come « determinismo », « causalità », « stato di un sistema », ... In generale, il tentativo di superare queste ambiguità, di rendere cioè il linguaggio comune adeguato a rispecchiare fedelmente le implicazioni contenute nella forma matematica di una teoria, conduce ad una precisazione e ad una modificazione

delle immagini associate alle parole, e questo è il livello più elementare a cui una teoria scientifica « retro-agisce » con la nostra visione del mondo, modificandola.

Quando si dice che una teoria è « intuitiva », ci si riferisce implicitamente proprio alla possibilità di effettuare questa traduzione dal linguaggio matematico ad un linguaggio in cui i termini o le immagini sono riferite ad un contesto « comune », cioè già solidamente attestato nella nostra cultura. Non è necessario che questa traduzione sia del tutto fedele, cioè che un termine all'interno di un linguaggio abbia un unico corrispondente nell'altro linguaggio, che ne esaurisce completamente il contenuto; l'importante è che nella corrispondenza tra due termini ci sia una base intuitiva comune che fa sì che il significato della traduzione venga chiarito tanto dalle analogie quanto dalle differenze. Così, ad esempio, il termine « tempo » nelle teorie relativistiche non ha lo stesso significato che nella fisica classica, eppure il contenuto euristico comune ai due concetti permette, nella traduzione dal modello matematico al linguaggio comune, di associare al simbolo « t » che compare nelle formule della relatività, lo stesso tipo di immagine che associamo al tempo consueto, cioè la misura della durata del divenire, accompagnata però dalla consapevolezza razionale che ci sono delle proprietà nuove (nel caso, che la misura della durata di un evento dipende dal sistema di riferimento cui tale evento viene rapportato).

Il rapporto tra consapevolezza critica e « intuizione » non ha nulla di assoluto, è legato unicamente a condizioni culturali storicamente determinate: se in un futuro la gente imparasse a « pensare in termini relativistici », la componente di riflessione critica richiesta oggi dall'immaginare che un orologio in un sistema di riferimento in moto rispetto a me va più lentamente del mio, scomparirebbe. Naturalmente quanto più le nostre conclusioni teoriche si allontanano da alcune percezioni « immediate », o contrastano con alcune invecchiate abitudini (prima tra tutte l'antropocentrismo), tanto più lunghi sono i tempi di formazione del nuovo intuito (basi pensare al contrasto tra le immagini del sole che « sorge » o che « tramonta » e la consapevolezza razionale, vecchia ormai di trecento anni, che non è il sole a girare attorno alla terra). Da quanto detto segue in particolare che una teoria può essere considerata intuitiva anche se di fatto rompe con il vecchio intuito; l'unica cosa che si richiede è che ci sia un aggancio euristico che permetta di considerare l'intuizione associata alla vecchia teoria almeno come una base di partenza per costruire quella associata alla nuova. La teoria della relatività è un esempio tipico in cui questa condizione di intuitività è soddisfatta; la teoria quantistica rappresenta, come vedremo, un caso tipico in cui tale condizione di intuitività non è soddisfatta: come ebbe a dire W. Heisenberg, uno dei fondatori di questa teoria « ... nella teoria quantistica il formalismo (cioè il modello matematico, NDA) ha precduto la sua interpretazione... ».

Oggi il formalismo della teoria quantistica ha ricevuto una interpretazione completamente soddisfacente, ma ciò non significa che di esso noi abbiamo una intuizione diretta come nel caso della meccanica classica o relativistica. Nel complesso appare giustificata l'affermazione di H. Reichenbach (*I fondamenti*

filosofici della meccanica quantistica, Torino 1954) secondo la quale «... i fondamenti della meccanica quantistica consistono in una serie di principi i quali, nonostante l'eleganza matematica, non posseggono il carattere suggestivo di un principio che convinca a prima vista, come avviene per il principio di relatività...».

Se pensiamo, secondo una felice immagine di E. Bellone, allo sviluppo delle scienze come ad una « dinamica dei dizionari », allora il momento in cui le scienze cessano di essere tecnica per divenire cultura in senso più vasto è quello in cui tutti questi dizionari vengono riferiti all'impreciso, circolare, continuamente mutabile dizionario del linguaggio comune. Un altro dei fondatori della teoria quantistica, N. Bohr, ha più volte attribuito alle insufficienze del linguaggio corrente la nostra incapacità di conciliare la comune rappresentazione intuitiva con l'affermazione che lo stesso sistema fisico si comporta talvolta come ciò che noi chiamiamo « particella », e talvolta come ciò che chiamiamo « onda ».

Al di là dei fatti, delle scoperte concrete, delle conseguenze applicative con cui la teoria della relatività ha arricchito la nostra visione del mondo, l'impatto più generalmente culturale di questa teoria è consistito in una profonda rielaborazione di concetti come spazio, tempo, massa, energia, ..., e in ciò la teoria si è ricongiunta ad una tradizione culturale che affonda le sue radici nelle origini del pensiero occidentale. Una situazione analoga si è verificata con la meccanica quantistica e, in questo caso i concetti coinvolti sono quelli di « causalità », « determinismo », « individualità di un sistema fisico », e lo stesso concetto di « realtà fisica ».

Tuttavia, mentre l'impatto tecnologico e le nuove scoperte della teoria quantistica sono senz'altro paragonabili a quelle della teoria della relatività, lo stesso non si può dire dell'impatto più propriamente culturale, cioè di quel processo di retro-azione attraverso il quale una teoria cessa di interregire con la società solo a livello di uso, non è più solo una scoperta, ma diventa patrimonio culturale comune di una data epoca come elemento costitutivo della visione del mondo che caratterizza quell'epoca. I motivi di questo sfasamento nei tempi di penetrazione culturale di queste due teorie sono molteplici. Uno di questi è certamente legato al fatto che mentre le leggi e i fenomeni fisici che costituiscono il punto di partenza dell'analisi relativistica — propagazione della luce, relazione tra spazio, tempo e velocità, gravitazione, ... — sono abbastanza vicini all'esperienza quotidiana quelli che costituiscono il punto di partenza dell'analisi quantistica — radiazione di corpo nero, analisi delle righe spettrali, ... — si riferiscono ad un livello di sofisticazione sperimentale e concettuale molto superiore.

Questa differenza si riflette anche nella letteratura non tecnica sulle due teorie. Nel caso della relatività esistono ormai molti libri che ne espongono correttamente e in modo completamente accessibile tutti gli aspetti concettualmente rilevanti, mantenendo sempre una stretta connessione tra fenomeni fisici e l'evoluzione storica dei concetti ad essi legati. Nel caso della teoria quantistica invece sembra non essere ancora stato trovato un giusto equilibrio tra i seguenti poli estremi: (i) una esposizione in cui intervengono a livello sostanziale

elementi estremamente tecnici, che per essere seguita richiede una conoscenza specifica della fisica; (ii) una esposizione di tipo filosofico, nella quale alcuni aspetti della problematica legata alla teoria quantistica vengono rapportati a linee di pensiero ben radicate nella tradizione culturale occidentale, ma nella quale non risulta con sufficiente evidenza il legame tra i concetti generali e i fatti empirici su cui essi sono basati; (iii) una esposizione di tipo storico-critico che, nei limiti in cui non si interseca con le esposizioni di tipo (i), o le presuppone, non fornisce informazioni sul contenuto della teoria, ma sulle condizioni accademiche, umane, sociali, in cui tale teoria si è sviluppata. Tra i libri sull'argomento recentemente apparsi in traduzione italiana, *Storia della teoria dei quanti* di F. Hund (Torino 1980) e *Sulla realtà dei quanti* di J. M. Jauch (Milano 1980) forniscono un buon esempio di esposizioni del primo tipo, mentre, pur nella profonda differenza di concezioni o impostazioni, al terzo tipo si possono riportare la *Autobiografia di un fisico* di M. Born (Roma 1980) e il libro *Fisica e società negli anni '20*, (Materiali di Testi e Contesti 1980). Un esempio di esposizione del tipo (ii) è invece la monografia *Quantum physics and the philosophical tradition* di A. Petersen (MIT Press 1968).

Tutti e tre i tipi di esposizione, pur nelle loro differenze, presentano un notevole interesse relativamente al dibattito interno alla teoria quantistica. L'apparizione in un breve intervallo di tempo di varie opere o traduzioni in lingua italiana, sui fondamenti, l'interpretazione e la storia della teoria quantistica, come il moltiplicarsi di incontri e convegni sull'argomento, rivelano, a nostro parere, che i tempi stanno finalmente diventando maturi nel nostro paese perché tale dibattito compia un salto qualitativo superando l'ambito ristretto del mondo scientifico. Si tratta cioè, dopo cinquant'anni di dibattito interno, di fare un bilancio della situazione concettuale della teoria quantistica, con particolare riferimento alle grandi dispute che ne hanno accompagnato lo sviluppo e che sono ben lontane dall'essere sopite. Molte polemiche hanno sollevato le affermazioni che la teoria quantistica nega che un oggetto abbia delle proprietà ben definite e indipendenti dal fatto che un osservatore le misuri (come esempio si può pensare alla definizione di elettrone data da P. Franck¹: « L'elettrone è l'insieme delle grandezze fisiche che noi introduciamo allo scopo di stabilire il sistema di principi a partire dai quali possiamo logicamente dedurre ciò che indica l'ago dell'apparecchio di misurazione »); che secondo la teoria quantistica è la nostra osservazione a « costringere » un sistema ad assumere una certa definita proprietà, e che questo passaggio dalla potenzialità all'attualità non segua altra legge se non quella del caso; che questa teoria nega l'esistenza di connessioni causali nel divenire dei fenomeni. Nel dibattito su queste affermazioni si sono innestate ramificazioni ideologiche e psicologiche che hanno spinto la grande maggioranza dei fisici ad instaurare con questa teoria un rapporto di puro uso oppure, nel caso di quelli che hanno affrontato il problema dei fondamenti, a limitarsi, nelle loro opere, agli aspetti puramente matematico-formali della teoria. La molteplicità dei punti di vista, l'aridità del formalismo, la sua anti-intuitività, hanno contribuito a tenere questa proble-

¹ P. FRANCK, *Foundation of Physics*, in *International Encyclopedia of Unified Science*, I, n. 7.

matica, che è senz'altro una delle più profonde della nostra epoca, lontana dal mondo dei non specialisti. Per superare questa impasse è importante avviare un tentativo di abolire quelle ostruzioni linguistiche che scoraggiano anche le persone interessate a capire e disporre per questo ad uno sforzo intellettuale. Intendiamo con ciò un orientamento diretto a separare il momento del *rigore formale*, cioè legato al linguaggio della matematica o a fatti sperimentali molto tecnici, da quello del *rigore concettuale*, che riguarda invece il nostro modo di porci di fronte ai concetti, di analizzarli nelle loro mutue relazioni, di criticarli, cioè di distinguere in essi l'aspetto di rappresentazione del mondo da quello di pregiudizio. Una rivalutazione del momento concettuale del rigore, in contrapposizione a quello formale, non serve solo a incrementare la comunicabilità del discorso scientifico « verso l'esterno », ma può avere un suo ruolo chiarificatore anche nel dibattito interno al mondo scientifico. Un aspetto importante di questa chiarificazione deve necessariamente riguardare quella « terra di nessuno » in cui il linguaggio scientifico si raccorda con il linguaggio comune e contribuisce alla formazione di quei concetti e quei programmi che, pur non essendo propriamente scientifici, hanno, come ha dimostrato I. Lakatos², una forte influenza sullo sviluppo della scienza. Non ci sono dubbi sul fatto che il libro della natura sia scritto in linguaggio matematico, ma gli uomini non pensano in linguaggio matematico (o almeno, non ancora) e perciò nel momento in cui questo libro vogliamo leggerlo, cioè tradurlo nel lessico del linguaggio comune, di fatto introduciamo nel « testo » le ambiguità e gli *idola fori* dovute alla dimensione storica di quest'ultimo. L'equazione di Newton ($F=ma$) matematicamente è la stessa da circa trecento anni, ma la sua « traduzione », la sua ricchezza evocativa è stata soggetta a un ampio sviluppo storico in questo periodo. Il peso di questa « traduzione » è tanto maggiore quando essa non opera su affermazioni specifiche (come quelle implicitamente contenute in una equazione), ma su concetti che nel modello matematico possono essere ben definiti e i cui corrispondenti nel linguaggio comune hanno un contenuto evocativo storicamente e psicologicamente determinato enormemente più ricco. Il rigore necessario in questo stadio per evitare, nei limiti del possibile, le ambiguità, non può essere formalizzato completamente in uno schema matematico, proprio perché si riferisce al rapporto tra gli schemi matematici e il linguaggio in quanto significante, cioè in ultima analisi alla storia, e questi referenti non possono essere formalizzati nel senso delle teorie assiomatiche. Si tratta cioè di un rigore nella trattazione di argomenti non rigorosamente definiti. Il fatto che questa componente del rigore scientifico sia stata abbastanza sottovalutata, specialmente negli ultimi anni, è certamente una delle radici di quello squilibrio, cui abbiamo accennato precedentemente, tra gli aspetti tecnici, filosofici e storici o aneddotici che si può riscontrare nella massima parte delle esposizioni, ad uso non strettamente interno, della teoria quantistica. Esso inoltre è anche alla radice di molte incomprensioni sorte nel dibattito interno alla scienza sui fondamenti e l'interpretazione della teoria quantistica. Infatti i problemi di questa teoria relativi al rigore formale, cioè la costruzione del modello mate-

² Cfr. *Critica e crescita della conoscenza*, a cura di G. GIOIELLO, Milano 1976.

matico, la dimostrazione della sua coerenza interna, sono stati risolti nella fase iniziale dello sviluppo della teoria (relativamente a tali problemi la situazione può dirsi chiarita intorno al 1932). Invece i problemi in cui il « rigore concettuale » (nel senso precisato sopra) avrebbe dovuto giocare un ruolo preminente, cioè l'interpretazione e i fondamenti della teoria, sono ancora oggi oggetto di dibattito. Come si vede entrambi i problemi non riguardano il modello matematico della teoria in sé, ma la sua relazione con le nostre rappresentazioni concettuali. Precisamente: alla base del problema dei fondamenti sta il desiderio di ridurre il modello matematico ad una espressione necessaria di alcune nostre ipotesi o affermazioni direttamente significative in termini di linguaggio comune (in questo senso il fine di una corretta assiomatizzazione è quello di rendere « intuitiva » la teoria).

Così, ad esempio, il formalismo della teoria della relatività ristretta si può dedurre dall'affermazione che ogni segnale si propaga con velocità minore o uguale a quella della luce nel vuoto, e che questa è finita. Alla base del problema della interpretazione sta invece il desiderio di rendere significante il modello, cioè di collegare il suo sviluppo matematico con lo sviluppo della nostra conoscenza del mondo reale.

In quanto segue discuteremo alcuni aspetti essenziali di questi due problemi relativamente ai quali quella operazione di separazione tra rigore formale e rigore concettuale risulta particolarmente fruttuosa.

II. La concezione meccanicistica della natura

Il referente naturale delle due grandi rivoluzioni scientifiche del '900 — relatività e teoria quantistica — è quella concezione del mondo, di cui la teoria di Newton è nello stesso tempo espressione e modello standard, che è stata denominata « meccanicismo ». Tuttavia, mentre la relatività generalizza la concezione meccanicistica in una concezione che, mantenendone i presupposti qualitativi e il programma, cerca il suo momento unificante non nel concetto di particella, ma in quello più astratto di campo, la teoria quantistica sconvolge questa visione negando non tanto la validità dei suoi fondamenti, quanto la possibilità di erigere, a partire da questi, una teoria della natura fondata sull'esperienza, quale vuole essere la fisica. In altri termini la principale novità della teoria quantistica, dal punto di vista concettuale, non sta tanto nel fatto che essa cambia la nostra concezione della natura, quanto nel fatto che essa cambia la nostra idea di cosa sia una descrizione della natura intesa come descrizione sperimentale. Per comprendere a fondo il significato di questo cambiamento sarà opportuno descrivere, almeno in grandi linee, i presupposti impliciti su cui è basata la concezione meccanicistica. In termini molto generali si può dire che tale concezione si fonda sul postulato implicito che i fenomeni naturali siano governati da *leggi esatte*, accessibili alla ragione e all'esperimento, e che fine della fisica sia la scoperta di tali leggi. Secondo tale concezione gli unici limiti all'esattezza della nostra descrizione dei fenomeni naturali sono legati a limitazioni tecnologiche o all'insufficiente sviluppo delle teorie, e perciò

sono storicamente superabili. Più precisamente, i due presupposti fondamentali di ogni teoria di tipo meccanicistico sono:

1) per ogni sistema fisico esiste un complesso B di grandezze osservabili tra loro indipendenti e tali che il valore assunto da ogni altra grandezza riguardante il sistema in un dato istante sia esprimibile come funzione dei valori assunti dalle grandezze di B in quell'istante;

2) (Postulato del determinismo) conoscendo i valori delle grandezze dell'insieme B a un dato istante è possibile determinare i loro valori in ogni istante futuro (e quindi, a causa della condizione 1), anche i valori futuri di una qualsiasi altra grandezza).

Questi presupposti costituiscono lo schema generale dei due tipi di leggi fisiche caratteristiche delle teorie meccanicistiche: le leggi che collegano i valori di grandezze diverse in uno stesso istante (per esempio la legge di gravitazione universale di Newton, che fornisce il valore della forza che si esercita fra due corpi in funzione delle loro masse e della loro distanza); le leggi di evoluzione, che descrivono il divenire temporale di un sistema (per esempio la legge del moto che permette di calcolare, nota la posizione e la velocità di una particella a un dato istante, le sue posizioni e velocità a ogni istante futuro). Entrambi i tipi di leggi esprimono relazioni funzionali esatte tra grandezze, cioè forniscono i valori esatti di certe grandezze in funzione dei valori esatti di altre (va precisato che parlare di valori esatti è già una idealizzazione, poiché le nostre misure, per quanto accurate, non sono mai esatte).

Spesso le leggi di tipo 1) e 2) sono considerate espressioni quantitative del concetto di causalità, se non addirittura sostitutive di questo concetto (come nell'affermazione di H. Weyl, inserita in una linea di pensiero che risale a Helmholtz e a Mach: « L'abbandono della ricerca metafisica delle cause a favore della ricerca scientifica delle leggi è predicata da tutti i grandi scienziati »³). Nel seguito useremo il termine « leggi causali » in senso più ristretto, riferito cioè solo alle leggi del tipo 2), ed esprimeremo il fatto che la descrizione esatta del futuro di un sistema è completamente determinata una volta nota una descrizione completa del suo presente (o, più in generale, del suo passato). Le leggi di tipo 1) saranno invece indicate col termine di « relazioni funzionali esatte ».

Accanto ai due principi generali del meccanicismo sopra enunciati, ve ne è un terzo che esprime una convinzione a priori, un vero e proprio atto di fede nel fatto che le leggi della natura, siano esse di tipo funzionale o causale, siano accessibili alla conoscenza con la ragione e gli esperimenti. Questa affermazione di fede è di fondamentale importanza per capire lo spirito di una visione meccanicistica del mondo. È stata proprio questa tenace fede nell'accessibilità che ha spinto Einstein a rifiutare sempre la nuova visione del mondo prospettata dalla teoria quantistica. In un famoso articolo del 1935, scritto con Podolsky e Rosen⁴, in cui critica la pretesa della meccanica quantistica di essere una

³ H. WEYL, *Philosophy of mathematics and natural science*, Princeton University Press, 1949.

⁴ A. EINSTEIN, B. PODOLSKY, N. ROSEN, *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?*, in « *Physical Review* », 47 (1935), pp. 777-780.

descrizione completa della natura, Einstein enuncia esplicitamente quel « postulato del realismo » che è alla base di ogni concezione meccanicistica della natura. Secondo tale postulato tutte le proprietà di un qualsiasi sistema fisico (specificate dal fatto che certe grandezze osservabili associate al sistema assumono dei valori ben precisi) sono simultaneamente specificate, indipendentemente dal fatto che tale valore venga o meno sperimentalmente misurato. Da questa visione del mondo segue un concetto di stato di un sistema fisico inteso come fotografia istantanea presa sul divenire del reale, come insieme delle specificazioni di tutte le sue proprietà ad un dato istante (dove con « tutte le sue proprietà » ci si riferisce non solo alle proprietà del sistema che sono descritte in una particolare teoria, in una determinata epoca storica, ma anche a quelle proprietà che in quell'epoca non sono ancora state individuate, o non vengono considerate fra i parametri caratteristici della data teoria). Questo concetto di stato è molto simile a quello delineato da Bergson nell'« *Evolution créatrice* », con la differenza che, a causa del postulato del determinismo, lo stato meccanicistico ha in sé un principio dinamico, è in un certo senso l'embrione del divenire.

È chiaro inoltre che dal punto di vista del meccanicismo (anche di un meccanicismo generalizzato come quello di Einstein) una qualsiasi descrizione di un sistema che non sia, almeno potenzialmente, una descrizione di tutte le proprietà del sistema non può essere una descrizione completa. Prima però di analizzare la questione della « completezza » della descrizione quantistica, analizziamo brevemente tale questione nel caso delle consuete teorie meccanicistiche. Come si è visto, ogni tipo di teoria meccanicistica è imperniata su tre tipi di leggi:

- a) leggi che riguardano i valori a priori possibili delle grandezze fisiche;
- b) relazioni esatte tra i valori di differenti grandezze fisiche in uno stesso istante;
- c) legge di evoluzione del complesso di grandezze osservabili indipendenti associate al sistema.

Fra queste leggi non ve ne è alcuna che permetta di stabilire se il complesso di grandezze indipendenti prescelto sia tale da permettere effettivamente di specificare, in funzione dei valori da esse assunti, i valori di tutte le altre grandezze osservabili che rappresentano proprietà del sistema.

Nessuna teoria che ammetta un insieme potenzialmente infinito di osservabili (proprietà del sistema) che non siano banalmente date a priori come funzione di un numero finito di esse, è in grado di stabilire sperimentalmente se un dato insieme finito di osservabili sia « completo », nel senso che non si potrà mai dimostrare sperimentalmente che queste definiscano tutte le proprietà fisiche del sistema. Non solo, ma all'interno della teoria non si potrà neppure stabilire *quanto* una data descrizione si discosti dalla completezza. Ciò implica che nel programma del meccanicismo non solo non può essere inclusa la speranza di arrivare ad una descrizione « fedele » (completa) della natura, ma neppure quella di una « approssimazione asintotica » ad essa (cfr. B. d'Espagnat, voce « Fisica » dell'Enciclopedia Einaudi, vol. 6).

Se immaginiamo lo stato meccanicistico di un sistema, inteso come insieme di

tutte le proprietà del sistema esistenti obiettivamente e indipendentemente dal fatto che l'uomo le osservi o le misuri, come un punto in uno spazio immaginario, possiamo allora pensare ai vari concetti di stato relativi ai successivi sviluppi storici di una teoria meccanicistica come a una successione di punti in questo spazio immaginario che si « avvicina sempre più » al punto che rappresenta il vero stato. Ma, anche accettando questa concezione « lineare » dello sviluppo della scienza, non si deve confondere l'« avvicinarsi sempre di più » (cosa che può accadere rimanendo sempre lontani dalla meta) con il « tendere asintoticamente », in cui è implicita l'idea che la differenza tra approssimante e approssimato diventi trascurabile dopo un numero finito di passi. Questo secondo tipo di approssimazione non può mai essere garantito nell'ambito di una teoria meccanicistica, data la mancanza di un criterio obiettivo che permetta di valutare *quanto* lo « stato del sistema in una data teoria » si discosti dallo « stato reale ». In conclusione quindi in una teoria meccanicistica lo stato di un sistema è determinato da un insieme di caratteristiche obiettive, cioè i valori di un insieme completo di grandezze a un dato istante; ma cosa si debba intendere quando si parla di « insieme completo » di osservabili lo decide la teoria.

III. Altre implicazioni concettuali del principio di Heisenberg

La meccanica quantistica non rinnega i due postulati fondamentali del meccanicismo, ma li svuota di significato operativo affermando, con il principio di indeterminazione di Heisenberg, che esistono grandezze osservabili i cui valori non sono simultaneamente misurabili con precisione arbitraria.

Un esempio di grandezze osservabili cui tale principio si applica è dato dalla coppia posizione-velocità (più precisamente, impulso) di una particella. Se si tiene presente che in meccanica classica la coppia posizione-velocità è proprio un esempio di insieme completo di osservabili (nel senso del meccanicismo, cioè un insieme di osservabili di cui tutte le altre sono funzione), è facile comprendere come l'accettare il principio di indeterminazione di Heisenberg implichi uno svuotamento del programma meccanicistico. Infatti, anche accettando l'esistenza delle leggi esatte postulate dal meccanicismo, l'impossibilità di effettuare misure simultanee su alcune osservabili implica l'impossibilità di verificare sperimentalmente e perciò le vanifica in quanto leggi sperimentali.

Laplace affermava che se un matematico infinitamente bravo conoscesse le posizioni e le velocità di tutte le particelle dell'universo potrebbe, mediante le equazioni di Newton, predire tutta la storia futura dell'universo e ricostruire quella passata; il principio di Heisenberg non invalida direttamente quest'affermazione, si limita ad affermare che neanche un fisico infinitamente bravo potrebbe fornire al matematico i dati iniziali di cui egli ha bisogno, e ciò non a causa di difficoltà tecniche, ma a causa di un principio fondamentale che limita le possibilità di ogni conoscenza sperimentale.

Prima di continuare la nostra analisi delle implicazioni concettuali del principio di Heisenberg è bene sottolineare che, se è vero che esso cambia radicalmente

la nostra concezione di cosa sia una descrizione della natura, dal punto di vista delle concrete previsioni sperimentali il rapporto tra la teoria quantistica e quella newtoniana è di sostanziale continuità. Infatti sia nel caso della relatività che della meccanica quantistica le deviazioni dalla fisica classica cominciano ad essere rilevanti solo quando le velocità delle particelle si avvicinano a quella della luce (per la relatività) o le loro masse sono piccole rispetto alla costante di Planck, (per la teoria quantistica). Quando i valori di queste grandezze sono lontani da tali valori limite, le correzioni apportate da queste teorie alla descrizione della fisica classica si riducono a perturbazioni trascurabili, ed è in questo senso che è lecito vedere una sostanziale continuità nello sviluppo della fisica, pur nella variazione discontinua di « visione del mondo » che, come Kuhn osserva, accompagna le grandi rivoluzioni scientifiche. Va osservato infine che l'enunciato da noi riportato sopra è una forma debole del principio di Heisenberg; la formulazione completa richiede anche una stima quantitativa del grado di incompatibilità tra due grandezze (ed è in questa stima che compare la costante di Planck, che caratterizza l'ordine di grandezza dei fenomeni quantistici allo stesso modo in cui la velocità della luce caratterizza l'ordine di grandezza dei fenomeni relativistici). Poiché tutte le principali implicazioni concettuali del principio di indeterminazione seguono dalla formulazione debole, nel seguito ci riferiremo soltanto a questa.

Il principio di indeterminazione è un principio negativo, come il secondo principio della termodinamica (secondo cui non è possibile trasferire calore da un corpo freddo ad uno più caldo senza usare lavoro), o come il principio secondo cui non è possibile raggiungere una velocità superiore a quella della luce nel vuoto. Tuttavia, anche nell'ambito di tali principi, è abbastanza sui generis poiché, per la prima volta nella storia delle scienze naturali un principio fisico non riguarda proprietà di grandezze osservabili (come ad esempio l'affermazione che il calore non passa spontaneamente da un corpo freddo ad uno più caldo), ma il rapporto soggetto-oggetto così come esso si realizza in una operazione di misura.

Il principio di Heisenberg non solo non fornisce alcuna informazione sui valori esatti simultanei di — ad esempio — posizione e velocità di una particella, ma eleva a principio generale l'impossibilità di procurarsi sperimentalmente una tale informazione. L'analisi dei ragionamenti che condussero Heisenberg a formulare (nel 1927) questo principio richiede un bagaglio di conoscenze specifiche che non vogliamo presupporre in questa esposizione: basterà dire, parafrasando un'asserzione di E. Fermi sul secondo principio della termodinamica, che sperimentalmente questo principio è fondato soprattutto sul fatto che ogni tentativo di invalidarlo, sia pure con esperimenti ideali, è fallito. Molti tentativi in questo senso sono stati fatti principalmente da Einstein, che rifiutò sempre di accettare le limitazioni alla conoscenza umana che ne derivano. Tuttavia nessuno degli esperimenti ideali escogitati da Einstein per invalidare il principio di indeterminazione ha retto alle sottili argomentazioni di N. Bohr che spesso, analizzando in modo più approfondito tali esperimenti, riuscì a dimostrare che essi conducevano in realtà a conclusioni opposte a quelle prospettate da Einstein. Questo dibattito serratissimo e mai aspro tra Bohr e

Einstein si è protratto per molti anni. Una sintesi dei rispettivi punti di vista si può trovare nei saggi di questi autori contenuti nel volume *Albert Einstein scienziato e filosofo* (Torino 1958).

Dal principio di indeterminazione segue che se una teoria contiene affermazioni sui valori esatti di alcune osservabili, esisteranno altre osservabili relative al sistema su cui la nostra informazione non potrà che essere di tipo statistico. Ora, anche la fisica classica contiene molte affermazioni di tipo statistico, ma queste sono dovute al fatto che si sta scegliendo una descrizione approssimata della realtà, una descrizione esatta essendo sempre, almeno in linea di principio, possibile secondo i principi del meccanicismo. La teoria quantistica capovolge questa situazione: sono le teorie esatte ad essere descrizioni approssimate della realtà (approssimate perché trascurano effetti dell'ordine di grandezza del quanto d'azione), mentre il livello più fine di descrizione è sempre statistico (in una teoria statistica convivono sempre affermazioni esatte e affermazioni statistiche, e queste ultime non sono riconducibili, neppure in linea di principio, alle prime). C'è quindi, secondo il principio di Heisenberg, un livello statistico primario al quale non può sottrarsi nessuna descrizione abbastanza fine della natura; a questo può eventualmente sovrapporsi un livello statistico secondario, legato alla nostra insufficiente informazione. Il secondo livello è, in linea di principio, eliminabile; il primo no. A questo punto sorge spontanea la domanda: il livello statistico primario è il riflesso, nella nostra teoria, di un indeterminismo di fondo delle leggi della natura, oppure tali leggi esistono e il principio di indeterminazione esprime solo la loro inaccessibilità alla conoscenza?

Ad esempio, esistono in natura degli elementi radioattivi (come l'uranio) che decadono emettendo delle particelle. La teoria quantistica descrive tale decadimento assegnando, per ogni intervallo di tempo, la probabilità che l'elemento emetta una particella. Ci si può chiedere: questa legge probabilistica riflette il fatto che il decadimento è puramente casuale (una specie di « libera scelta » istante per istante fatta dagli atomi), oppure tale decadimento avviene secondo una ben precisa legge che ci sfugge e che perciò è sostituita, nel modello matematico, da una relazione statistica? Se fosse vera la seconda ipotesi, saremmo portati a ritenere incompleta la teoria quantistica, poiché la descrizione da essa fornita del fenomeno non rende conto di quell'« elemento di realtà » costituito dalla legge esatta, e lo sostituisce con una relazione statistica. D'altra parte, poiché tutti i sostenitori della teoria quantistica hanno sempre affermato che essa è una teoria « completa », molti dei suoi oppositori hanno ritenuto di poter dedurre da ciò che una tale posizione implicasse automaticamente l'accettazione della prima ipotesi (cioè che il decadimento dell'atomo non è retto da nessuna legge esatta) e ne hanno dedotto che la teoria quantistica rifiuta la causalità e introduce « ...una specie di arbitrarietà o mancanza di leggi, fondamentale e irriducibile nel comportamento dettagliato del mondo... »⁵.

L'alternativa dunque sembra essere questa: o si accetta che la meccanica quan-

⁵ D. BOHM, *Causality and chance in modern physics*, London 1957.

tistica sia incompleta, oppure occorre negare che i processi elementari (come la radioattività) siano regolati da precise leggi causali. I sostenitori della teoria quantistica invece affermano che tale alternativa nasce da un malinteso, dall'usare cioè in relazione alla teoria quantistica il termine « teoria completa » nel significato ad esso attribuito nell'ambito delle teorie meccanicistiche. Nel § II si è detto che una teoria è completa, dal punto di vista meccanicistico, se essa rende conto, almeno virtualmente, di tutte le proprietà di un sistema. In particolare quindi nessuna teoria statistica può essere completa nel senso del meccanicismo. D'altra parte il principio di indeterminazione implica che ci sono dei limiti a priori sulla quantità di informazione conseguibile mediante misure in un dato istante su un dato sistema, e che in particolare nessun apparato sperimentale può rendere conto, neppure virtualmente, di tutte le proprietà di un sistema ad un dato istante. In tale contesto il termine « descrizione completa » non può riferirsi a tutte le proprietà di un sistema ad un dato istante (se si vuole che tale descrizione sia confrontabile con l'esperienza), ma solo a quelle proprietà del sistema simultaneamente verificabili o, come diremo d'ora in poi, compatibili. Con questa accezione del termine « completo » una teoria può certamente essere completa e statistica: essa sarà completa (nel senso meccanicistico) se ristretta alle osservabili compatibili ma, una volta noti i valori di queste osservabili, qualsiasi affermazione sui valori delle rimanenti osservabili sarà di tipo statistico. L'esistenza di eventuali relazioni causali tra osservabili incompatibili non viene negata, ma solo relegata nell'ambito di quelle affermazioni che, non essendo suscettibili di verifica sperimentale (seguito Popper potremmo dire « non essendo sperimentalmente falsificabili ») non sono oggetto di studio da parte della fisica.

Sia nelle teorie meccanicistiche che in quelle quantistiche lo stato di un sistema è univocamente determinato dall'assegnazione dei valori di un insieme massimale (i.e. che non può essere ampliato in modo non banale) di osservabili compatibili indipendenti. Ma nel caso meccanicistico tutte le osservabili sono di una classe di osservabili, e soltanto le distribuzioni di probabilità dei valori di tutte le osservabili relative al sistema, e quindi tutte le sue proprietà. Nel caso quantistico invece l'assegnazione di uno stato determinerà i valori esatti di una classe di osservabili, e soltanto le distribuzioni di probabilità dei valori delle altre grandezze. In particolare l'unica forma di determinismo possibile in meccanica quantistica sarà il determinismo statistico, che consiste nella possibilità di determinare con esattezza le distribuzioni di probabilità di tutte le osservabili relative a un qualsiasi istante di tempo successivo a un dato istante *t* in funzione delle distribuzioni di probabilità di queste osservabili al tempo *t*. Riassumendo quindi, la teoria quantistica non nega l'esistenza di leggi causali, ma la possibilità che l'insieme di tali leggi sia accessibile con gli esperimenti; non introduce un elemento di indeterminismo nelle leggi che regolano i processi elementari, ma afferma la ineliminabilità di una componente statistica nella nostra descrizione di tali processi.

Una situazione analoga si ha per quanto riguarda il problema della « realtà fisica ». La posizione delle teorie meccanicistiche in proposito è stata sintetizzata in quello che abbiamo chiamato il « postulato del realismo ». Anche que-

sio diventa, se si accetta il principio di indeterminazione, un'affermazione non suscettibile di verifica sperimentale neppure in linea di principio (e quindi, in questo senso, metafisica). Alcuni autori hanno da ciò dedotto che secondo la meccanica quantistica «...nessuna proprietà fisica dovrebbe mai essere attribuita a un sistema quantistico, con l'unica possibile eccezione di quelle molto particolari del tipo: se A è lo strumento di misura con cui il sistema sarà messo in interazione le proprietà fisiche del sistema sono esclusivamente quelle per misurare le quali A è stato progettato...»⁶. Cioè le proprietà di un sistema fisico dipenderebbero da quali misure faremo su quel sistema. È stato anche sostenuto il punto di vista simmetrico, secondo cui le proprietà fisiche di un sistema dipenderebbero da quali misure abbiamo fatto su di esso.

Entrambi i punti di vista ritengono di interpretare il formalismo matematico della teoria nel senso illustrato dal seguente esempio. Consideriamo un sistema molto semplice, per esempio una particella libera; in questo caso l'assegnazione del valore della sola posizione definisce il suo stato quantistico (cioè la massima informazione sperimentalmente conseguibile sul sistema). Supponiamo di aver misurato all'istante t la posizione, e di aver trovato che essa ha un ben definito valore. Allora dalla discussione precedente segue che in una qualsiasi altra osservabile, che non sia funzione della posizione, all'istante t possiamo determinare non i valori esatti, ma solo la distribuzione di probabilità di tali valori. A questo punto alcuni proseguono così il ragionamento: se la teoria quantistica è una teoria completa, e all'istante t fornisce valori esatti per le sole osservabili di posizione, ciò vuol dire che solo queste hanno valori esatti, mentre tutte le altre grandezze in quell'istante non hanno valori precisi ma solo, per così dire, la « potenzialità » di assumere valori precisi (Heisenberg ha esplicitamente paragonato questa potenzialità alla *δύναμις* aristotelica e alla « potentia » latina). Poiché le proprietà ben definite di un sistema corrispondono al fatto che delle osservabili assumono dei valori precisi, si deduce — concludono questi autori — che il fatto che le proprietà ben definite del sistema siano quelle relative alla sua posizione dipende dall'aver effettuato una misura di posizione su di esso.

Altri autori, relativamente allo stesso esempio, ragionerebbero nel modo seguente. Supponiamo di non sapere in quale stato sia il sistema. Se decidessimo di fare su di esso una misura di posizione all'istante t , troveremo un valore ben definito di questa osservabile. Ma, per il postulato del realismo, tale valore ben definito non può dipendere dall'atto di misura. Quindi il sistema all'istante t dovrebbe avere, indipendentemente dalla misura, una posizione ben definita e questa, e le grandezze esprimibili in funzione di essa per il ragionamento precedente, sarebbero le sue uniche proprietà in quell'istante. D'altra parte, se decidessimo di misurare la velocità del sistema all'istante t , ragionando in modo analogo concluderemo che le uniche proprietà ben definite del sistema a quell'istante sono quelle legate alla velocità. La conclusione di questi autori è quindi che è la decisione di effettuare una data misura in un certo istante che determina quali proprietà il sistema possiede a quell'istante. Può essere istrut-

tivo divertirsi a inventare qualche paradosso che nasce da interpretazioni del genere. Tuttavia è facile rendersi conto del fatto che, come nel caso della causalità, anche questi punti di vista si basano sul pregiudizio di ispirazione meccanicista secondo cui se sotto certe condizioni sperimentali non è in nessun modo possibile determinare il valore di una grandezza, allora ciò significa che in quelle condizioni quella grandezza non assume alcun valore. Dato che una tale interpretazione non è in alcun modo deducibile dal principio di indeterminazione, affermazioni di tale genere sono del tutto arbitrarie.

Non c'è nulla nella teoria quantistica che autorizzi ad affermare che il nostro atto di conoscenza influisce su proprietà obiettive degli oggetti. Questo tipo di affermazioni appartengono esclusivamente al campo delle opinioni personali di chi le formula, e giustamente B. Russell liquidò la questione affermando che problemi del genere equivalgono a chiedersi se possa piovere in un posto dove non ci siano occhi (né alcun altro strumento) per controllare se piove. Una simile questione è formulata in modo tale che non appena si cercasse di effettuare un controllo sperimentale sulla risposta (andando a controllare direttamente o indirettamente se piove) si altererebbero le condizioni della domanda (introducendo occhi o strumenti sul luogo) e quindi, di fatto, si risponderebbe ad una domanda diversa. A questa categoria di affermazioni appartiene anche l'amenia teoria del signor Everett⁷, che peraltro non si può confutare su un piano puramente logico, secondo la quale ogni volta che si effettua una misura su un'osservabile di cui la meccanica quantistica non permette di predire con esattezza i valori, l'intero universo si scinde in tante copie assolutamente non comunicanti fra di loro quanti sono i valori a priori possibili dell'osservabile, e in ciascuna copia il risultato dell'esperimento è uno dei possibili valori dell'osservabile. Può avere un senso riportare affermazioni di questo genere se non altro per sottolineare che le implicazioni di ogni teoria che pretenda di individuare dei limiti a priori sulla conoscenza umana vanno affrontate con estremo rigore concettuale, poiché dietro tali limitazioni ci può sempre essere spazio per l'arbitrio.

Con questo rapido sguardo d'insieme sulla meccanica quantistica non abbiamo certo inteso esporre esaurientemente (e in realtà neppure affrontare a fondo) tutti i problemi concettuali sollevati da questa teoria. Piuttosto il nostro tentativo è stato quello di indicare con un esempio concreto come attraverso la separazione del rigore concettuale dal rigore formale il pensiero scientifico possa inserirsi, almeno nelle sue componenti qualitative, in un dibattito più vasto e presentarsi non più come uno strumento o tecnica, ma come elemento costitutivo di una visione del mondo.

LUIGI ACCARDI - DANIELA DOHRN

⁷ H. EVERETT III, « *Relative state* » formulation of quantum mechanics, in *The many-worlds interpretation of quantum mechanics*, B. De Witt e N. Graham eds., Princeton U. P., 1973.