

Il principio di causalità nella fisica moderna (*).

Tra le molte affermazioni rivoluzionarie a cui ci ha abituato la fisica degli ultimi anni, ve ne è una che è sembrato investisse addirittura i fondamenti logici del nostro modo di pensare, ed è l'affermazione che nel microcosmo non vale il principio di causalità. Scopo di questa conferenza è di illustrare brevemente questa affermazione, precisandone i limiti, il significato e il valore.

Diciamo anzitutto che cosa intenderemo per principio di causalità o (con espressione più esatta) *determinismo*.

Vi sono dei fenomeni (p. es. quelli astronomici) dei quali è possibile fare la previsione anche a lunga scadenza con precisione grandissima, perchè obbediscono a leggi semplici e note, come quelle della meccanica. Di altri fenomeni (p. es. quelli meteorologici) la previsione esatta è praticamente impossibile, ma noi abbiamo la convinzione che ciò derivi solo dall'enorme numero e complicazione degli elementi in gioco, non da una indeterminazione intima delle leggi elementari che li governano. Esiste anche un'altra categoria di fenomeni nei quali questa convinzione è per lo meno discutibile — i fenomeni vitali — ma questi per ora saranno esclusi dalle nostre considerazioni. Esaminiamo piuttosto quale è la caratteristica dei fenomeni meccanici che ne permette la prevedibilità. Essa è questa: le incognite (coordinate del sistema) soddisfano certe equazioni differenziali che, integrate, ci danno queste incognite in funzione di t e di certe costanti arbitrarie. Se

(*) Da una conferenza tenuta il 21 settembre 1929 nel Congresso di Firenze.

ora noi vogliamo prevedere lo stato del sistema al tempo, p. es. $t = 7$, non dobbiamo fare altro che porre in queste espressioni per t il valore 7 e per le costanti certi valori che possiamo riavere dall'osservazione delle velocità e posizioni del sistema p. es. all'istante attuale $t = 0$. Se quindi tutti i fenomeni si potessero ridurre a fenomeni meccanici — come era la speranza dei fisici fino a poco più di mezzo secolo fa — basterebbe conoscere la velocità e la posizione attuali di tutte le particelle dell'universo, per poter teoricamente conoscere tutto il futuro, ed anche tutto il passato.

Si è poi scoperto che esistono dei fenomeni anche più fondamentali di quelli meccanici, cioè quelli elettromagnetici; ma anche essi soddisfano equazioni differenziali aventi proprietà analoghe, cosicchè si può dire che « lo schema della fisica teorica classica è tale che, se si conoscessero per un istante posizione e velocità di tutti gli elettroni e tutti i protoni, e campo elettrico e magnetico in ogni punto, resterebbero determinati tutti i fenomeni passati e futuri »: questi sono tutti scritti, per così dire, nello stato attuale dell'universo. È questo ciò intendiamo per « determinismo fisico », è questo che la fisica teorica di oggi è stata indotta a negare.

Ciò che si nega, nella proposizione precedente, non è la conseguenza ma la premessa, vale a dire la possibilità, anche teorica, di procurarsi quegli elementi, come la posizione e velocità di una medesima particella, o il campo elettrico e magnetico in un medesimo punto, che servono a determinare i valori delle costanti di integrazione. Questa impossibilità — si noti — non deriva da difficoltà pratiche o da limitazione dei nostri mezzi, ma ha radici profonde nella natura delle cose, talebè l'introdurre nelle formule questi dati, significa introdurvi fin da principio una violazione delle leggi naturali.

Le considerazioni che hanno condotto HEISENBERG a formulare questo principio non possono venire qui accennate; ma ne mostriamo il carattere su un esempio semplice. Se una particella (p. es. un elettrone) si muove su una retta senza essere soggetta a forze, la meccanica razionale ci insegna a prevedere la sua ascissa al tempo t conoscendo l'ascissa e la velocità al tempo 0. Ma come possiamo noi effettivamente procurarci questi dati?

Per determinare la posizione di un elettrone si può (a parte difficoltà pratiche) illuminarlo e osservare la luce diffusa p. es. con un microscopio; la velocità si potrà avere con due misure successive di posizione in un intervallo di tempo noto. Ora avviene che un elettrone nel diffondere la luce subisce un impulso (effetto COMPTON) cosicchè appena abbiamo compiuto la misura della velocità questa è già alterata. Se quindi noi vogliamo servirci di questa misura per conoscere la posizione p. es. al tempo $t = 7$ secondi dobbiamo estendere l'intervallo di tempo in cui misuriamo la velocità al di là di 7 secondi, il che significa fare i profeti in ritardo. Ma quello che è importante è che qualunque altro artificio si escogiti per procurarsi i dati necessari a conoscere la posizione al tempo $t = 7$ richiede sempre delle osservazioni fatte prima e dopo questo istante. La formulazione precisa di questo principio, che è detto principio di indeterminazione o di HEISENBERG è la seguente: non si possono conoscere con precisione tanto le coordinate q di un sistema, quando i rispettivi momenti p nel medesimo istante, in condizioni tali da potersene servire per determinare le costanti d'integrazione, ma degli uni e delle altre si possono conoscere solo le distribuzioni di probabilità (o curve di probabilità) le quali hanno larghezze (errori quadratici medi) Δp , Δq legate dalla relazione $\Delta p \cdot \Delta q \geq \frac{h}{2\pi}$.

La ragione intima di questa impossibilità sta nel fatto che il mondo dei fenomeni elementari presenta una curiosa caratteristica, a cui non siamo abituati: quella cioè che non si possono osservare i suoi fenomeni senza alterarli profondamente. La luce, che è una cosa così delicata e impalpabile nella vita comune, rappresenta per gli atomi e gli elettroni un ciclone devastatore, e così pure qualunque altro mezzo che ci metta in contatto con tali fenomeni, appunto perchè si tratta di fenomeni elementari.

E quando dei dati numerici sfuggono ad ogni determinazione, non per ragioni pratiche, ma per una concettuale impossibilità di determinarli, non si ha alcun diritto di introdurli nelle formule poichè sono privi di significato fisico.

Non bisogna credere però che questo indeterminismo renda impossibile e inutile il ricercare le leggi dei fenomeni

anche nel mondo microscopico: bisogna soltanto cambiare l'impostazione dei problemi, e ricercare solo le leggi probabilistiche. P. es. invece di partire dai valori delle p e delle q di un sistema al tempo 0 per trovarne i valori al tempo t , si parte dalle distribuzioni di probabilità delle p e delle q al tempo 0 per trovare le loro distribuzioni di probabilità al tempo t . La nuova meccanica quantistica svolta da HEISENBERG, SCHRÖDINGER, BORN, JORDAN, DIRAC, e altri, insegna appunto con vari metodi (della meccanica ondulatoria, delle matrici, degli operatori) a risolvere questi problemi, i quali sono perfettamente determinati; si può quindi dire che *le probabilità sono rette da leggi determinate*.

Una situazione per molti rispetti analoga a questa, si ha nel campo dell'ottica: qui però è avvenuto il fatto, abbastanza curioso, che i problemi sono stati sempre impostati nel senso probabilistico sebbene non si sia mai fatta molta attenzione a ciò. Infatti scopo finale di qualsiasi problema di ottica è determinare la distribuzione dell'intensità luminosa nei vari punti dello spazio. Ma i vari metodi con cui si può misurare questa intensità si riducono tutti in definitiva a un indiretto conteggio del numero di molecole che hanno assorbito un quanto di luce, il quale assorbimento avviene, come è noto, in modo discontinuo; così p. es. l'annerimento di una lastra è una misura del numero di granuli di argento anneriti, la sensazione luminosa è — per quello che se ne sa — anch'essa legata a un fenomeno fotochimico discontinuo, e quindi la sua intensità dipende dal numero delle molecole della retina che hanno subito la modificazione, e così via. Si tratta dunque sempre di metodi statistici, e la intensità luminosa non è altro che la probabilità che un granulo di argento (o un'altra particella sensibile) subisca per effetto della luce una particolare modificazione. L'ottica ha trovato delle leggi (di tipo ondulatorio) le quali insegnano a calcolare il vettore E tale che $|E|^2$ misura questa probabilità in accordo con l'esperienza. Il carattere probabilistico di queste leggi sfugge di solito perché nei casi ordinari si ha a che fare con innumerevoli fenomeni elementari di assorbimento, ma diviene ben evidente quando si esamina p. es. il caso di un atomo il quale compie un atto elementare di emissione in presenza di una lastra fotografica: sappiamo allora che un solo granulo di argento sarà annerito.

L'ottica non è in grado di direi quale sarà questo granello, ma può direi soltanto come è distribuita la probabilità di impressionarsi tra i vari granuli della lastra.

Il metodo seguito dall'ottica per determinare le probabilità è stato trasportato con successo alla meccanica da SCHRODINGER, il quale ha creato la meccanica ondulatoria. In questa si introduce una grandezza ψ (analogo al vettore elettrico E dell'ottica, ma scalare) la quale soddisfa un'equazione di tipo ondulatorio ed è tale che il valore di $|\psi|^2$ in un punto fornisce la probabilità di trovare in quel punto una particella materiale. Questa teoria ha avuto una brillante conferma dalla esperienza della diffrazione degli elettroni eseguita da DAVISSON e GERMER e in altre analoghe.

Esaminiamo ora sommariamente le principali obiezioni che si presentano spontanee alla mente di chi per la prima volta si trova di fronte a questi nuovi punti di vista.

1° - Secondo alcuni l'indeterminismo ripugna alla nostra intuizione. Ora bisogna tener presente che la nostra intuizione si è formata sulla base dell'esperienza comune, la quale riguarda sistemi macroscopici e non sistemi elementari; nei sistemi macroscopici il determinismo sorge per legge statistica anche se i fenomeni elementari non sono soggetti a uno schema determinista (come avviene p. es. nei fenomeni sociali). È per questo che si incontra una certa difficoltà a concepire un indeterminismo fondamentale nel mondo fisico: allo stesso modo la nostra intuizione, fondata sull'osservazione dello spazio euclideo o quasi euclideo, trova difficoltà a concepire le geometrie non euclidee, le quali pure sono logicamente possibili.

2° - « Potete escludere » dicono alcuni « che esista un altro ordine di fenomeni oggi sconosciuti i quali permettano di ristabilire il determinismo, fornendo p. es. il modo di osservare un elettrone senza alterarne la velocità e così via? ». Rispondiamo che questa possibilità, a rigore, non si può escludere, e non si potrà mai; tutto ciò che si può dire è che si ha l'impressione che ciò sia molto improbabile; ad ogni modo dovrebbe trattarsi di fenomeni totalmente diversi da quelli ora noti. Ma il vero passo importante sta secondo noi nell'aver scoperto la possibilità che questo ordine di fenomeni

che ristabiliscano il determinismo non esista, senza che ciò impedisca di inquadrare tutti i fenomeni fisici conosciuti in uno schema perfettamente coerente. Questa scoperta è in un certo senso paragonabile a quella — altrettanto paradossale — della possibilità logica di una geometria in cui non vale il postulato della parallela.

3° - Si può infine domandare se il nuovo punto di vista sia utile per il progresso della scienza, e fecondo di risultati concreti. Dei risultati raccolti finora nei campi più svariati della fisica parlerà tra breve il Prof. FERMI; io voglio soltanto accennare — uscendo alquanto dal campo delle deduzioni di carattere fisico — ad una possibilità molto lontana, ma grandiosa, che potrà forse essere aperta dalle nuove teorie. La rete delle relazioni causali che legano strettamente tra loro i diversi eventi del mondo fisico sembra che abbia delle lacune dovunque è un organismo vivente, poichè ivi interviene a indirizzare il corso dei fenomeni un fattore nuovo: il pensiero. I tentativi per far rientrare anche i fenomeni della vita nel quadro del mondo fisico incontravano finora, secondo molti, una difficoltà pregiudiziale, e cioè il contrasto tra lo stretto determinismo dei fenomeni fisici e l'intuizione che abbiamo della nostra libera volontà. Oggi che è caduto il determinismo nel mondo fisico, cade anche questa difficoltà pregiudiziale: restano naturalmente altri enormi ostacoli da superare — se pure la cosa è possibile — ma si può comunque dire che è questa la prima volta che, nello schema delle scienze esatte, si intravede un posto dove forse la scienza di domani potrebbe collocare i fenomeni della volontà e del pensiero.

E. PESTICO