

causalità FAF In senso lato, particolare rapporto di connessione tra enti o eventi, uno dei quali, detto *effetto*, dipende dall'altro, detto *causa*. La natura di tale dipendenza è intesa comunemente nel senso che la causa produce l'effetto, ma un'analisi accurata di questa nozione rivela una gamma di significati più ampia. Anche maggiore è la diversità secondo cui sono stati intesi il carattere di questa dipendenza (in particolare, la sua necessità e universalità) e il modo o addirittura la possibilità di appurarla. Ne derivano anche formulazioni diverse del cosiddetto *principio di c.* e della sua interpretazione e giustificazione, che si riflettono sulla nozione, a esso collegata, di *determinismo*. Pertanto quello della *c.* deve essere considerato un ambito tematico, più che un singolo concetto, al cui chiarimento concorre la precisazione delle diverse questioni accennate.

Indice: **1.** Il concetto di causa. **2.** Il principio di causalità: **2a.** Il principio di causalità nella scienza. **3.** Causalità e determinismo: **3a.** Determinismo e meccanicismo; **3b.** Determinismo e probabilità. **4.** L'indeterminismo quantico. □
BIBLIOGRAFIA.

1. Il concetto di causa

La nozione di *causa* si radica nell'esperienza umana della produzione di oggetti o fatti per azione volontaria e comporta: un agente, un fine, condizioni concrete su cui si esercita l'azione, la rappresentazione concettuale di ciò che si vuol produrre. D'altro lato questi stessi elementi permettono di spiegare perché l'oggetto o il fatto prodotto esistono, e sono così e non diversamente. Perciò, quando il pensiero greco inaugurò la ricerca razionale di come *dare il perché* (*λόγον διδόναι*) delle cose, chiamò genericamente cause le risposte alla domanda sul perché, cosicché il concetto greco di causa (*αἰτία*) corrisponde in pratica al nostro concetto di *ragione per cui*: le famose quattro cause aristoteliche (efficiente, finale, materiale e formale) rispecchiano infatti gli elementi sopra accen-

nati della produzione intenzionale di oggetti o fatti. Nel caso di eventi non prodotti dall'azione umana, la relativa causa finale, e in molti casi anche efficiente, fu collocata nella natura intrinseca o *essenza* degli enti che producono certi effetti. Inoltre, essendo la funzione concettuale della causa quella di *dar ragione* di qualcosa, si comprende come Aristotele affermi che le premesse di un ragionamento corretto sono causa delle sue conclusioni. Il concetto classico di causa non è dunque univoco e il pensiero antico e medievale ne hanno sviscerato alcune decine di sensi diversi (oltre ai già detti, per es.: attiva, adeguata, creatrice, negativa, diretta, indiretta, esemplare, estrinseca, intrinseca, prima, seconda, strumentale, libera, occasionale, fisica, psichica, morale, prossima, remota, necessaria, sufficiente, vera). Una simile ricchezza deriva dal fatto che conoscere in senso pieno era inteso come un conoscere le cause: tuttavia non è azzardato affermare che queste varie denominazioni si presentano essenzialmente come suddivisioni di due tipi di causa che vengono delineandosi come fondamentali: la *efficiente* e la *finale*. Con l'avvento della scienza moderna (v. FISICA: 3) la causa efficiente passa in primo piano, e finisce col diventare l'unico significato comunemente inteso quando si parla di causa senza ulteriori specificazioni.

Poiché la determinazione delle cause forniva la spiegazione razionale delle cose, essa doveva avere i caratteri dell'*universalità* (non patire eccezioni) e della *necessità* (mostrare perché la cosa è così e non può essere diversamente). La considerazione di questo fatto ci conduce a trattare del principio di causalità.

2. Il principio di causalità

Ne furono date nella storia della filosofia molte formulazioni diverse. Già Eraclito e Democrito avevano affermato che «tutto avviene in base a ragione (*λόγος*) e necessità (*ἀνάγκη*)», e Platone ribadiva: «è necessario che tutti gli eventi siano stati prodotti da una qualche causa» (*Filebo* 26 e). Espressioni quasi identiche si ritrovano in Aristotele (per es. *Metafisica*, VII 1032a), il quale precisa che il principio di *c.* riguarda specificamente il *divenire*, cioè il *mutamento*, chiamato genericamente *moto* (*κίνησις*), cosicché tale principio può essere formulato dicendo: «tutto ciò che è in moto è necessariamente mosso da qualche cosa» (*Fisica* VII 241b). Stoici ed epicurei concepirono l'Universo come sottoposto a rigorose leggi causali: espresse da un'intelligenza immanente al Cosmo secondo i primi, agenti a caso secondo gli altri. Epicuro diede la seguente formulazione del principio di *c.*: «nulla sorge dal nulla». Nel pensiero cristiano questi vari elementi si combinano con l'idea di Dio, che diviene la causa prima di tutte le cose e il loro ordinatore (ossia colui che ha stabilito l'ordine delle varie cause). Alcune famose formulazioni scolastiche del principio di *c.* sono traduzioni latine di enunciati greci sopra citati, come *nihil fieri sine causa* (Agostino); *ex nihilo nihil*; *omne quod movetur ab alio movetur* (Tommaso d'Aquino).

In tutti questi casi il principio di *c.* ha il carattere di *principio metafisico*, ossia valido per la realtà in quanto tale, senza eccezioni o limitazioni di sorta. Esso s'applica anche alla realtà fisica, ma avendo portata universale, può imporre di oltrepassarla, quando ciò sia richiesto dall'ulteriore ricerca di cause, e condurre alla scoperta di tipi di realtà non fisica. Il principio di *c.* è una *condizione necessaria di intelligibilità del reale*.

Già Aristotele ha chiarito che il principio di *c.* serve a spiegare il *mutamento*, nelle sue quattro modalità fondamentali: locale (il movimento fisico), quantitativo (aumento o diminuzione), qualitativo (trasformazione di qualità), sostanziale (nascita e morte). Pertanto tale principio può essere enunciato dicendo: «tutto ciò che muta ha una causa», ma non già (come talora si legge): «tutto ciò che esiste ha una causa»; anzi, la spiegazione causale esige che si approdi a cause ultime immutabili e non causate (tale è l'aristotelico «motore immo-

bile»). Un termine moderno che sintetizza le varie forme di mutamento, ossia il cambiamento di condizione di qualcosa che già esiste e il venire all'esistenza o il cessare d'esistere di un qualcosa, è probabilmente quello di *evento*; possiamo proporre pertanto come formulazione del principio di c. classico in linguaggio attuale la seguente: *ogni evento ha una causa*.

Nell'età moderna il principio di c. subisce importanti evoluzioni. Molti autori continuano a conferirgli un senso nettamente *ontologico* (ossia di principio supremo della realtà); basti citare Spinoza: «da una data causa determinata segue necessariamente l'effetto», e, al contrario, «se non si dà alcuna causa determinata, è impossibile che segua un effetto» (*Etica* I, assioma 3); oppure «di qualunque cosa si deve assegnare una causa, o ragione, sia del perché esiste, sia del perché non esiste» (*ibidem*, I 11). In questa seconda formulazione affiora lo stretto rapporto fra causa e ragione (già sottolineato dal pensiero antico), cioè il significato *logico* del principio. Quest'ultimo balza in primo piano quando Leibniz lo traduce nel *principio di ragion sufficiente*: «nulla accade senza che ve ne sia una causa o per lo meno una ragione determinante, ossia qualche cosa che possa servire a render ragione a priori del perché ciò sia esistente, piuttosto che non esistente, e perché ciò sia così piuttosto che in tutt'altro modo» (*Saggi di teodicea*, I, 44).

Troviamo qui le premesse di quella riduzione del nesso di c. al piano logico che sarà caratteristica dell'idealismo (specie in Hegel) e che si ritrova anche in diverse impostazioni attuali della *spiegazione scientifica* (v. *TEORIA*: 1). Contro la fondazione logica del principio di c. si posero gli empiristi, i quali finirono con lo svuotarlo del suo carattere di necessità, secondo la famosa critica di D. Hume: egli considera due eventi *A* e *B* di cui si affermi che *A* è causa e *B* effetto, e rileva che il *nesso* fra i due non appare dotato di alcuna necessità, riducendosi a una pura successione nel tempo. Tale nesso, infatti, non si fonda su alcuna necessità logica (potendosi pensare senza contraddizione che ad *A* non segua *B*), e non risulta dalla constatazione empirica (si vede che *B* segue ad *A*, ma non si vede il nesso). Poiché, in base ai suoi presupposti empiristi, un principio generale può soltanto ricavarsi per induzione da casi particolari, e poiché in nessuno di questi risulta la necessità del nesso causale, questo non può venir enunciato neppure come principio universale. Esso vale soltanto come fede psicologica, fondata sull'associazione costante di due eventi che si susseguono nel tempo, e che c'induce ad attendere il secondo evento quando sia comparso il primo. È bene tener presente che Hume discute della c. dentro il problema della giustificazione delle previsioni, e si può quindi rilevare che la sua critica non colpisce la formulazione corretta del principio di c.: ogni evento ha una causa. Non basta, infatti, l'incertezza che proprio *A* sia la causa di *B* (questione gnoseologica) per affermare che *B* accade *senza una causa*. Tuttavia, è chiaro che questo principio non basta da solo a garantire la certezza delle previsioni nei casi concreti.

La critica humeana fu superata da I. Kant, il quale riconobbe sì che il principio di c. non ha carattere né logico, né induttivo, ma ne fondò l'universalità e necessità sul piano gnoseologico-trascendentale, facendone una condizione *a priori* della possibilità della conoscenza (in quanto è una *categoria* dell'intelletto). Con ciò il principio è indipendente dal successo nell'ulteriore compito (gnoseologico-empirico) di riuscire effettivamente a individuare la causa (necessariamente esistente) di un qualunque fenomeno empirico. Con Kant il principio di c. non ha più portata ontologica (non riguarda le cose in sé, dichiarate inconoscibili, ma solo i *fenomeni*), ma ha ancora natura metafisica, nel senso kantiano del tutto nuovo, secondo cui la metafisica è la dottrina delle condizioni *a priori* della possibilità del conoscere. Le sue formulazioni sono le seguenti: (a) *principio della produzione*: «tutto ciò che avviene (incomincia a essere) presuppone qualcosa a cui segue secon-

do una regola» (*Critica della ragion pura, Analitica trasc., II analogia dell'esperienza*, I ediz.); (b) «tutti i mutamenti avvengono secondo la legge della connessione di causa ed effetto» (*ibidem*, II ediz.). L'impostazione kantiana mostra chiaramente che la c. è ridotta a quella efficiente, e risente dell'influsso esercitato sulla filosofia dallo sviluppo della nuova scienza (v. *FISICA*: 5); non a caso infatti Kant parafrasa il principio di c. come: «principio del rapporto senza eccezioni di tutti gli avvenimenti del mondo sensibile secondo leggi naturali immutabili».

Tale influsso è percepibile anche nella comparsa della locuzione *legge di c.* come sinonimo di principio di c., con evidente derivazione dalla nozione di *legge* usata in fisica. Quest'uso, iniziato appunto da Kant, si generalizzò nel sec. XIX: così, un autore come J.S. Mill impiega l'espressione «legge (*law*) di c.» assai più spesso che quella di «principio» (*principle*). Tuttavia, nel sec. 20° compare una nuova espressione, quella di *legge (i) casuale (i)*, per qualificare un certo tipo di leggi fisiche, contrapposte alle *leggi probabilistiche* (v. oltre). A evitare confusioni con questo nuovo significato, s'è tornati oggi all'uso di parlare di principio di c. e non più di legge di c.: tuttavia, siccome le espressioni «legge di c.» e «legge causale» s'incontrano di fatto nelle pubblicazioni, è bene stare attenti a non confonderle.

2a. Il principio di causalità nella scienza

Gli ampliamenti terminologici e concettuali su accennati derivano dalla progressiva confluenza del linguaggio e del pensiero filosofico con quello scientifico, che, a partire dal sec. 17°, viene sostituendo quella precedente fra pensiero filosofico e teologico, con un'insensibile sostituzione del concetto di c. mediante quello di *legalità naturale*. Per quanto non senza resistenze e denunce degli impliciti equivoci (per es., da parte di G. Leibniz e G. Berkeley), questo processo appare già avanzatissimo in A. Comte, che sostiene la necessità di sostituire ovunque al posto dell'irraggiungibile determinazione delle cause intrinseche la semplice ricerca di *leggi*, cioè dei rapporti costanti che sussistono tra i fenomeni osservati (*Discours sur l'esprit positif*, 4).

Nell'Ottocento divenne opinione diffusa che il concetto di c. avesse ottenuto per la prima volta la sua definizione esatta mediante le leggi della meccanica classica. È una conseguenza della svolta inaugurata da G. Galilei e I. Newton i quali, richiedendo che nella *filosofia naturale* ci si limitasse alla ricerca delle leggi valide tra fenomeni quantitativi osservabili (v. *FISICA*: 3), avevano pure richiesto che la ricerca delle cause di queste stesse leggi dovesse evitare il ricorso a essenze, ma puntare sempre verso la scoperta di altre leggi dello stesso genere. In esse il concetto di «forza» svolgeva in effetti il vecchio ruolo della «causa», e veniva concepito con caratteristiche ben più impegnative di quanto non ammettessero, per es., le limitazioni strettamente empiristiche di uno Hume o quelle gnoseologico-trascendentali di un Kant: la forza era infatti posta senz'altro come causa dell'accelerazione dei corpi su cui agisce. Nella fisica newtoniana la forza per eccellenza è la gravitazione, la cui legge parve in grado di esprimere il principio di connessione causale vigente nella Natura. Tuttavia essa non era scevra da difficoltà, in quanto introduceva l'azione a distanza, opposta al modello di azione fisico-causale più comunemente accettato dell'azione per contatto (pressioni e urti), sostenuto, per es., dai cartesiani. Di qui i tentativi di ridurre anche la gravitazione a un'azione per contatto (v. *ETERE*: 8), il cui fallimento produsse effetti diversi. Da un lato, si giunse a proporre di eliminare dalla fisica il concetto di forza (divenuto oggetto di estreme controversie): è una vicenda che inizia con la meccanica analitica di G. Lagrange, e trova punti salienti nella sostituzione della forza mediante vincoli da parte di H. Hertz e nella sua scomparsa entro la relatività generale. Dall'altro lato, si cercò d'ammettere

anche le azioni a distanza: queste in un primo momento salvarono il concetto di forza, ma a certi prezzi. Infatti con l'elettrodinamica maxwelliana fece ingresso nella fisica il concetto di *campo*, che, propagandosi in modo continuo nello spazio, ripresentava l'azione per contatto e salvaguardava la forza e il suo aspetto causale; ma, falliti i tentativi di interpretare il campo come un *etere* (v.) *meccanico*, si dovette concepire il campo come una realtà indipendente accanto alla materia. Ciò non toccava ancora la c., ma ben presto emerse in fisica situazioni difficilmente compatibili con i modelli di c. in essa utilizzati. Infatti, nella stessa meccanica le forze possono essere pensate se si possono univocamente identificare, ma già il «problema meccanico dei molti corpi», e poi a maggior ragione le interazioni fra materia carica in movimento e campo elettromagnetico (in cui il campo reagisce sulle cariche in moto che lo generano), impedivano un'univoca distinzione di causa ed effetto all'interno di una sola relazione causale. Anche per questa strada prese corpo una diffidenza verso le nozioni di forza e di causa e, mentre si cercò di ridurre la prima a un concetto definito implicitamente dalle equazioni della fisica, si ritenne di dover eliminare del tutto la seconda sostituendola col semplice rapporto di *relazione funzionale*. Scrive E. Mach: «nelle scienze naturali più sviluppate l'uso dei concetti di causa ed effetto diviene sempre più limitato... Non appena si riesce a caratterizzare gli elementi degli eventi mediante grandezze misurabili... la dipendenza reciproca fra gli elementi si può rappresentare con il concetto di *funzione*, in modo assai più completo e preciso che non mediante concetti così poco determinati come quelli di causa ed effetto» (*Conoscenza ed errore*, 1905, p. 278). Esprimendosi in tal modo, Mach non faceva che codificare quella riduzione del rapporto di c. alla relazione di *corrispondenza univoca* che parecchi scienziati e filosofi venivano ormai sostenendo (R. Mayer, G. Kirchhoff, H. Hertz, C. Bernard, R. Avenarius, J. Petzold), e che prelude al primato attribuito al concetto di *funzione* nella scienza e nella filosofia del Novecento (per es. in E. Cassirer). Più radicalmente, B. Russell dichiarerà che la parola «causa» dovrebbe scomparire dal vocabolario filosofico in quanto non compare nelle scienze naturali più avanzate, precludendo così alla dissoluzione del principio di c. in termini puramente linguistici operata dalla filosofia analitica. Oggi si notano tendenze ad attribuire al principio di c. lo statuto d'un'ipotesi empirica dotata d'un alto grado di conferma, o quello pragmatico d'una prospettiva utile per condurre ricerca scientifica, ma senza intrinseco valore conoscitivo, o quello d'un semplice criterio metodologico-ermeneutico cui si adegua spontaneamente lo scienziato, o, infine, d'un'idea intuitiva che viene sostituita adeguatamente dal concetto di *spiegazione* scientifica (v. TEORIA: 1, 4).

Diamo un rapido cenno alla posizione della c. nella teoria della relatività. Nella relatività ristretta si mostra che non si può fare a meno di considerare i segnali, se si vogliono realizzare quelle relazioni che sono indispensabili per conferire alla c. un significato fisico (si pensi alla discussione einsteiniana sulla simultaneità di eventi spazialmente separati). Poiché la velocità della luce è un limite superiore per la trasmissione di qualsiasi azione fisica, ne segue una profonda revisione della struttura causale dello spazio-tempo: mentre un evento non può essere causalmente connesso con eventi a esso simultanei, ma spazialmente distanti, esso lo è con gli eventi di un intero ambito spazio-temporale quadridimensionale. D'altro canto, i segnali, comportando un'emissione e una ricezione senza cui non sarebbe possibile la trasmissione di informazione, ripresentano quel carattere di irreversibilità che pareva liquidato da molte considerazioni precedenti. Per una discussione dettagliata di questo problema, v. SPAZIO-TEMPO.

La menzione dell'*irreversibilità* induce a ricordare gli stretti rapporti che la c. intrattiene col *tempo* e che svolgono un ruolo

centrale, per es., nella definizione kantiana; su questi siamo costretti a sorvolare (v. SPAZIO-TEMPO), così come sulle conseguenze che se ne possono ricavare studiando l'irreversibilità in seno alla termodinamica. La questione ha una portata generale e si potrebbe vedere come i processi, in cui siamo soliti distinguere causa ed effetto, sono irreversibili: il sistema in cui si può estendere l'effetto era in passato aperto e la causa viene riportata al tempo che precede la conclusione della chiusura. I principi fisici invarianti rispetto all'inversione del tempo, validi per i sistemi chiusi, non valgono dunque per tali processi.

3. Causalità e determinismo

I problemi della c. vengono discussi, nella fisica contemporanea, specialmente in riferimento all'*indeterminismo quantico*. La cosa non è senza ragioni poiché c. e *determinismo* appaiono legati sin dall'antichità, e lo divengono in modo nuovo in seno alla scienza moderna. Bisogna tuttavia fornire alcune precisazioni e dissipare alcuni equivoci.

Il determinismo non è una conseguenza logica del principio di c., bensì un rafforzamento, che ammette tre varianti, concernente il rapporto fra causa ed effetto: (a) ogni causa ha un solo effetto; (b) ogni effetto ha una sola causa; (c) ogni causa ha un solo effetto, e viceversa (congiunzione delle prime due). Il *principio del determinismo* presuppone dunque quello di c. come condizione necessaria, ma non sufficiente, perciò il principio di c. continuerebbe a essere valido anche se quello del determinismo non lo fosse. Alle suddette formulazioni del determinismo sul piano ontologico (riguardanti la struttura del reale) ne corrispondono altrettante sul piano gnoseologico (riguardanti la conoscenza): (d) la conoscenza delle cause consente la previsione degli effetti; (e) la conoscenza degli effetti consente la retrodizione delle cause; (f) la conoscenza d'un evento consente la retrodizione delle sue cause e la previsione dei suoi effetti. È pure ovvio che il determinismo ontologico è condizione necessaria, ma non sufficiente, di quello gnoseologico, perciò potrebbe continuare a valere anche se quest'ultimo cadesse.

Così come l'abbiamo enunciato il determinismo ontologico è un principio metafisico (cioè valido per ogni tipo di realtà) e proprio come tale la sua validità è stata oggetto di millenari dibattiti, riguardanti la sua compatibilità con la *libertà* umana (impossibile se il determinismo avesse portata assoluta). In tale contesto è stato coniato il termine stesso «determinismo» alla fine del sec. 18°, e tale contesto non è affatto esaurito: dopo essere stato identificato con il fato, la volontà divina, la predestinazione, le leggi meccaniche, le leggi fisiche in generale, il determinismo continua a essere presente come polo antinomico della libertà nelle forme attuali del determinismo genetico, psicanalitico, sociologico. Va tuttavia sottolineato che, quando si parla di determinismo o d'indeterminismo in fisica, il contesto è del tutto diverso e riguarda esclusivamente la determinabilità di fenomeni fisici (v. EPISTEMOLOGIA: 1b, 3c). Sono quindi puri equivoci le affermazioni di autori anche illustri che parlano, in conseguenza dell'indeterminismo quantistico, d'una sorta di libera scelta dei corpuscoli o di libero arbitrio della Natura.

In effetti, la storia del concetto di determinismo si biforca a partire dal sec. 18° e un suo nuovo ramo si svolge interamente dentro la fisica, ma esso è preparato da alcuni sviluppi filosofici. Un primo passo consiste nella restrizione del determinismo da principio metafisico generale a principio di *filosofia della Natura* (v. EPISTEMOLOGIA: 1b, 4): ossia s'ammette che esso valga senza eccezioni soltanto nella Natura materiale. La cosa può oggi sembrarci ovvia, ma non va dimenticato che per millenni interpretazioni deterministiche della Natura erano convissute con interpretazioni animistiche e spontaneistiche, senza che uno schema potesse trionfare

sull'altro, per non dire della grande difficoltà di delineare chiaramente i confini di ciò che è Natura e di ciò che non lo è. Ciò che portò il determinismo a trionfare come principio di filosofia della Natura fu proprio l'avvento della scienza moderna, che nacque ispirandosi a esso e offrì, con la scoperta delle leggi della meccanica e le possibilità di predizione e retrodizione che esse assicurano, esempi probanti di determinismo gnoseologico. Ma poiché questo richiede come condizione necessaria il determinismo ontologico, fu giocoforza ammettere anche quest'ultimo come tesi fondamentale di filosofia della Natura. Da quanto detto si potrebbe ricavare che il determinismo, pur non essendo forse un principio di portata assoluta, neppure nella filosofia della Natura (come provano le forme non deterministiche di concepirla, cioè di renderla intelligibile), corrisponde al tipo di intelligibilità della Natura che caratterizza la scienza. Più esattamente, diremo che il determinismo s'è storicamente imposto come condizione di intelligibilità della predittività e retrodittività scientifica. Si comprende quindi perché esso sia stato spesso addirittura identificato con la possibilità della *previsione* (determinismo gnoseologico), pur essendo il determinismo ontologico logicamente primario: infatti, se risultasse smentita la possibilità di principio della predizione e retrodizione, svanirebbero le basi empiriche per una postulazione del determinismo ontologico, che risulterebbe quello che era nei secoli precedenti lo sviluppo della meccanica, cioè una visione della natura coerente, razionale, ma non cogente. Per le stesse ragioni i tipi di determinismo ontologico ammissibili risulteranno sempre strettamente connessi ai tipi di previsione e retrodizione che li esigono, come si vedrà in seguito.

3a. Determinismo e meccanicismo

Non è dunque vero che il determinismo sia un'antiquata visione metafisica della Natura; esso è il portato della scienza moderna, tant'è vero che la sua formulazione canonica completa appare per la prima volta in un noto passo di P.S. de Laplace del 1814, in cui si può vedere il punto d'arrivo della scienza galileiano-newtoniana, che aveva tradotto il principio di c. nell'affermazione dell'esistenza di leggi naturali che legano alle loro cause fenomeni empiricamente osservabili. Queste leggi sono espresse da equazioni matematiche e sono tali che, se si possono determinare esattamente tutte le grandezze di stato di un sistema di corpi a un dato istante (condizioni iniziali), si possono calcolare esattamente i valori delle medesime grandezze per qualsiasi istante passato o futuro. L'esatta determinabilità delle grandezze di stato era considerata un semplice problema pratico, indefinitamente migliorabile con il perfezionarsi della tecnica strumentale. Laplace, dunque, dopo aver dichiarato che «tutti gli avvenimenti, anche quelli che per la loro piccolezza sembrano non ubbidire alle grandi leggi della Natura ne sono una conseguenza necessaria» e che «gli avvenimenti attuali hanno coi precedenti un legame fondato sul principio evidente che nulla può cominciare a essere senza una causa che lo produca, ... *principio della ragion sufficiente*», conclude: «dobbiamo quindi considerare lo stato presente dell'universo come l'effetto del suo stato anteriore e come la causa del suo stato futuro. Un'intelligenza che, per un dato istante, conoscesse tutte le forze da cui è animata la Natura e la situazione rispettiva degli esseri che la compongono, se per di più fosse abbastanza profonda per sottomettere questi dati all'analisi, abbraccerebbe nella stessa formula i movimenti dei più grandi corpi e dell'atomo più leggero» (*Saggio filosofico sulle probabilità*, in *Opere*, tr. it., Torino, 1967, pp. 242-243). Il determinismo viene in tal modo caratterizzato come possibilità di previsione esatta, di cui vengono esplicitate quattro condizioni: una ontologica (esistenza di leggi deterministiche), due gnoseologiche (conoscenza delle leggi e conoscenza degli stati a un dato istante), una tecnica (capacità di risolvere le equazioni). Sorvolando sulla

condizione tecnica, osserviamo che delle due condizioni gnoseologiche una sola ha un corrispettivo di determinismo ontologico, quella riguardante le leggi, ma non quella riguardante gli stati (per tale determinismo è indifferente lo stato di un sistema fisico, mentre è rilevante la modalità di *transizione* fra stati, che viene affermata deterministica piuttosto che aleatoria o libera). Ne dobbiamo dedurre che, di fronte a un eventuale scacco del determinismo gnoseologico, dovremo analizzare se esso è imputabile all'inadeguata conoscenza degli stati (il determinismo ontologico non sarebbe sfiorato), oppure delle leggi (il determinismo ontologico diverrebbe più problematico).

3b. Determinismo e probabilità

Il determinismo è compatibile col ricorso alla *probabilità*: questa infatti può servire a trattare insieme non solo di eventi del tutto aleatori, ma anche di eventi sottoposti a leggi deterministiche, di cui si conoscono però imperfettamente le condizioni di applicazione. Il passo citato, del resto, funge nello scritto di Laplace come premessa per dire che, non essendo l'uomo in grado di prestazioni paragonabili a quelle dell'ipotetica intelligenza superiore (che conosce tutte le leggi e tutti gli stati dei corpi in un dato istante), ma essendo d'altra parte in grado di conoscere alcune leggi e alcuni stati, egli può servirsi di queste conoscenze per formulare previsioni valide entro certi limiti d'approssimazione grazie all'uso del calcolo delle probabilità. In altri termini, la presupposizione del determinismo ontologico (leggi) consente una parziale soddisfazione del determinismo gnoseologico su base probabilistica.

Questo modo di ragionare copre solo una parte del problema, ossia quella per cui una trattazione probabilistica consente di determinare, per lo meno entro un intervallo, un evento singolo immerso in un collettivo di eventi solo parzialmente conosciuto: è un margine di indeterminazione che corrisponde al massimo risultato nello sforzo di determinazione. Ma v'è anche un'altra faccia del problema: i metodi probabilistici consentono di trattare in modo deterministicamente esatto proprio i collettivi. Pertanto le cosiddette leggi probabilistiche o statistiche sono leggi deterministiche rispetto ai collettivi di cui effettivamente trattano, e consentono di ricavare informazioni probabilistiche circa gli eventi individuali, di cui in realtà non parlano direttamente.

La comparsa in fisica di leggi statistiche iniziò con la teoria cinetica dei gas: pur ammettendosi che le singole molecole in agitazione obbediscano alle leggi meccaniche, è praticamente impossibile fissare le variabili di stato di ciascuna, per di più in un medesimo istante. Tuttavia, non sono queste le determinazioni e le previsioni che interessano, ma quelle concernenti altre variabili di stato, che definiscono il sistema gassoso nel suo complesso; tali determinazioni sono di tipo termodinamico (per es., energia cinetica), collegabili alle variabili meccaniche delle molecole solo considerandole come un collettivo, ossia per somma o per media, e vengono introdotte soltanto perché servono a interpretare corrispondenti grandezze specifiche del gas (per es., calore e temperatura). Considerazioni di questo medesimo tipo riguardano i rapporti fra meccanica statistica e termodinamica.

Ragionamenti in parte simili, ma in parte anche diversi rispetto a quelli qui accennati, riguardano i sistemi fisici in cui, pur essendo strettamente deterministiche le leggi in gioco, variazioni anche minime nelle condizioni iniziali producono dopo un certo tempo differenze grandissime negli stati finali. Inaugurata da ricerche di H. Poincaré sul problema gravitazionale dei tre corpi (1890), questa è divenuta ormai una complessa teoria della cosiddetta *instabilità asintotica*, che concerne parecchi sistemi fisici aperti, cioè tali che gli scambi al contorno (vale a dire con l'ambiente), pur inducendo piccole variazioni nelle condizioni iniziali, provocano un'evol-

zione globale del sistema imprevedibile sulla base delle sue sole leggi interne (in quanto si apre un largo ventaglio di possibilità compatibili con condizioni iniziali quasi identiche). Si parla in questi casi di *caos deterministico*, perché è pur sempre possibile individuare correlazioni che isolano all'interno del sistema globale sottosistemi caratterizzabili mediante variabili collettive, rispetto alle quali si può impostare una dinamica di tipo almeno praticamente deterministico. Essenziale a tal fine è la considerazione dei diversi tempi che caratterizzano la «memoria» delle variabili in gioco: le variabili «veloci» sono sottoposte a fluttuazioni (derivanti dalle perturbazioni delle condizioni iniziali) che s'esauriscono più rapidamente, lasciando emergere una stabilità che riguarda le variabili più «lente», meno numerose e trattabili in modo deterministico. Ciò conduce a una gerarchizzazione dei sistemi fisici, che sale fino a quelli che costituiscono gli organismi viventi.

4. L'indeterminismo quantico

Assai più complessa è la situazione che si presenta con la *meccanica quantistica*, a cui è attribuito nello stato attuale un carattere irriducibilmente statistico. Qui le relazioni d'indeterminazione di Heisenberg esprimono l'impossibilità teorica di pervenire a una determinazione esatta e simultanea di coppie di grandezze coniugate di una particella, come, per es., posizione e velocità, le quali servirebbero a precisare il suo «stato» nel senso della meccanica classica. Il significato di tali relazioni, che sono intrinsecamente legate al dualismo onda-corpuscolo, non sta tanto nell'impossibilità di principio, che esse stabiliscono, di conoscere i dati iniziali che sarebbero necessari (secondo la meccanica classica) per risolvere le equazioni del moto, quanto nei limiti che esse pongono alla possibilità di pensare coerentemente (cioè senza contraddire i principi della meccanica quantistica) le particelle come punti materiali che descrivono traiettorie continue. Di fronte alle difficoltà poste da questa situazione, diverse vie d'uscita sono state prospettate. In primo luogo, avremmo a che fare con un indeterminismo gnoseologico che non esclude logicamente la possibilità d'un sottostante determinismo ontologico, analogo a quello della meccanica statistica. In secondo luogo, si tratterebbe pur sempre di un'indeterminatezza nelle condizioni iniziali che non intacca il carattere deterministico delle leggi. La prima riflessione ha condotto a prospettare la possibilità di *teorie a variabili nascoste*, capaci di ristabilire il determinismo anche riguardo al comportamento delle singole particelle, e in tal senso si parla di un'*incompletezza* della meccanica quantistica. Tentativi del genere non sono stati abbandonati neppure dopo la dimostrazione d'un teorema negativo di J. von Neumann, a cui non s'attribuisce un reale carattere probante. Oggi tuttavia, dopo il risultato di alcuni esperimenti suggeriti da un'accurata analisi dovuta a J. Bell, il margine di prospettiva per una teoria di questo tipo, che non contraddica certi generali requisiti (come il *principio di c. relativistico*), sembra assai ridotto. La seconda riflessione sembra confortata dal fatto che le equazioni che governano la funzione d'onda ψ hanno in sé stesse natura deterministica nel senso usuale della fisica, e assumono carattere statistico soltanto quando si passa a interpretare le loro soluzioni per avere informazioni circa le grandezze cinematiche d'una particella in relazione a processi di misura: in quel momento la ψ ci offre solo intervalli di probabilità per i valori di tali grandezze. Risulta cioè che il principio d'indeterminazione significa davvero l'impossibilità di assegnare lo stato di una particella solo se esso è ancora pensato classicamente. Lo «stato quantistico» invece, specificato istante per istante dalla stessa funzione ψ , è perfettamente definito dalle condizioni iniziali, appunto, quantistiche. Per tale via il carattere deterministico della fisica quantistica parrebbe ulteriormente ribadito. Per quanto apparentemente plausibili, queste considerazio-

ni risentono di alcuni equivoci di fondo dell'impostazione generale entro cui si collocano, che è opportuno chiarire.

Ogni scienza non si occupa di «cose» nel senso ordinario del termine, ma di oggetti specifici, che risultano da un ritaglio della realtà condotto in base a certi «punti di vista», concretizzati in concetti tecnicamente definiti e legati a operazioni strumentali standardizzate d'osservazione e misurazione (v. EPISTEMOLOGIA: 3c). A questi oggetti devono attagliarsi e riferirsi i concetti e le leggi, mentre l'uso degli strumenti determina anche il grado d'approssimazione con cui tali oggetti sono dati, e quindi il senso dell'esattezza ricercata. Essendo l'oggetto qualcosa che è, ma solo in tanto e nella misura in cui è conosciuto, scompare ogni possibile discrepanza fra livello ontologico e livello gnoseologico: l'oggetto non è qualcosa di puramente pensato, poiché è anche il risultato di determinazioni empirico-operative, e in ciò consiste la sua ontologicità; questa però non deborda i confini di tale conoscibilità operativa e teorica. Entro tali confini ogni scienza tende a essere deterministica, cioè cerca di stabilire leggi deterministiche capaci di consentire previsioni compatibili con il grado di precisione con cui sono dati i suoi oggetti. Ciò non esclude che si possa tentare di stabilire legami fra i contenuti di una scienza e quelli di un'altra, ma si dovrebbe badare a non cadere nel *riduzionismo* (v. EPISTEMOLOGIA: 3e), ossia a non far svanire la specificità degli oggetti d'una scienza pretendendo d'interpretarli senza residui in quelli di un'altra. Il fallimento del meccanicismo ottocentesco ha chiarito proprio l'illusorietà d'una simile pretesa, di cui forse s'annidano ancora alcuni residui nella fisica attuale.

Esistono dunque diversi determinismi, come esistono leggi fisiche di natura diversa: una *determinismo meccanico*, uno *termodinamico*, uno *elettrodinamico*, uno *relativistico*, uno *quantistico*, ognuno relativo ai rispettivi oggetti. L'indeterminismo può subentrare quando si persegue l'intenzione (peraltro legittima) di trarre da una teoria anche informazioni d'un tipo che in realtà è pertinente a oggetti d'una teoria diversa: in questa traduzione non v'è da stupirsi che una parte della determinatezza vada perduta, come accade nel caso dell'interpretazione probabilistica d'un'equazione termodinamica, se da essa volessimo trarre informazioni circa le coordinate spazio-temporali d'una molecola. Ma è questo il solo caso possibile? No, e la fisica quantistica ce lo mostra. Da un canto, essa contiene leggi deterministiche concernenti collettivi di eventi nello spazio-tempo (come tracce macroscopiche, misure, ecc.), che permettono previsioni statistiche rigorose e controllabili circa la frequenza del loro prodursi, ma, d'altro canto, gli oggetti di cui essa tratta non sono tali collettivi, ma quelli che, per usare un termine molto neutro, potremmo chiamare i «microoggetti», ritenuti dalla teoria come le cause degli eventi macroscopici osservati. Tali microoggetti vengono idealizzati pensando, per es., una particella come un punto materiale che si muove nello spazio-tempo rimanendo sempre identico a sé stesso; ma ciò significa pensare la particella come un oggetto classico (cioè d'un'altra teoria) e l' inadeguatezza di tale idealizzazione emerge proprio dalle relazioni di Heisenberg, che ribadiscono in tal modo la differenza di oggetti già legata alle differenze delle operazioni con cui gli oggetti vengono empiricamente determinati. Differenza che risulta ulteriormente ribadita dal fatto che i microoggetti sono in gran parte veri e propri costrutti teorici escogitati per rappresentare l'insieme dei dati in un senso metaforico e gestaltico (v. TEORIA).

Perciò, finché impiegheremo concetti classici per descrivere i microoggetti, questi, che non sono classici, potranno venire descritti soltanto con un certo grado d'indeterminatezza, ossia saranno oggettivamente indeterminati: il problema delle variabili nascoste nasce dalla convinzione (che però dev'essere suffragata su base oggettiva) che esistano in linea di principio dati d'altro tipo capaci di determinare in modo

completo il comportamento dei microoggetti (v. anche COMPLEMENTARITÀ). Si può allora meglio analizzare anche il significato del determinismo della funzione ψ , espresso dal fatto ch'essa obbedisce a un'equazione deterministica. L'equazione, in quanto tale, non ha significato fisico diretto e, quando lo riceve, risulta di fatto un mezzo tecnico (cioè tecnicamente matematico) per calcolare probabilità condizionali: date certe informazioni su un sistema, si calcola la probabilità che un esperimento eseguito su di esso dopo un determinato intervallo di tempo dia un certo risultato. Ma tutte le assegnazioni di probabilità, anche se sono determinate, possono essere verificate soltanto da distribuzioni di frequenza, ossia, nel nostro caso, da una distribuzione statistica dei comportamenti di molti sistemi simili al nostro. Sul sistema singolo, dunque, la teoria (salvo casi limite eccezionali di probabilità eguale a 1) non dice assolutamente nulla di attuale, ma solo di potenziale, nel senso per es. che un fotone con una certa distribuzione di frequenza è potenzialmente esistente in tutta una regione finita. Ora, la differenza rispetto alla meccanica statistica sta qui: mentre in questa non si eseguono esperimenti e non si ricercano informazioni sul comportamento di una singola molecola (essa non è «oggetto» della teoria), in fisica quantistica ha perfettamente senso sperimentare su un singolo fotone (esso è un «oggetto» della teoria); tuttavia su di esso non si può ottenere un'informazione completa, ma solo «indeterminata», cioè appunto di tipo statistico. Perciò la teoria quantistica è essenzialmente indeterministica sotto questo aspetto. Per ulteriori particolari, v. TEORIA.

BIBLIOGRAFIA: D. BOHM, *Causality and chance in modern physics*, Routledge & Kegan Paul, Londra, 1957; M. BORN, *Natural philosophy of cause and chance*, Clarendon Press, Oxford, 1949, tr. it., *Filosofia naturale della causalità e del caso*, Boringhieri, Torino, 1962; M. BUNGE, *Causality*, Harvard Univ. Press, Cambridge Mass., 1963², tr. it., *La causalità*, Boringhieri, Torino, 1970; F. ENRIQUES, *Causalità e determinismo nella filosofia e nella storia della scienza*, Atlantica, Roma, 1945³; P. FRANCK, *Das Kausalgesetz und seine Grenzen*, Springer, Berlino, 1932; J.L. MACKIE, *The cement of the universe. A study of causation*, Clarendon Press, Oxford, 1974.

Evandro Agazzi