

David Lindley

*Incertezza*

Einstein, Heisenberg, Bohr e il principio di indeterminazione

traduzione di Simonetta Frediani

2008, Giulio Einaudi editore, Torino

*C'è un rapporto fra la creatività umana e la struttura della materia?*

Il determinismo era la chiave di volta della fisica classica, il principio fondamentale della causalità. Bohr traduceva in parole il più grande timore di Einstein, che aveva espresso più e più volte negli anni. Nella fisica classica, tutto ciò che accade, accade per una ragione, perché altri eventi precedenti hanno portato a quell'evento, ne hanno determinato le condizioni, l'hanno reso inevitabile. Ma nella meccanica quantistica, a quanto sembra, le cose accadono come accadono senza che sia possibile dire perché.

[...] Verso la fine del 1926, Einstein scrisse a Bohr alcune frasi che sono diventate famose a forza di essere ripetute, soprattutto dal loro autore, che era così soddisfatto di come aveva espresso il concetto da tirarle fuori ogni volta che erano opportune. "La meccanica quantistica è degna di ogni rispetto," scrisse a Bohr, "ma una voce interiore mi dice che non è ancora la soluzione giusta. È una teoria che ci dice molte cose, ma non ci fa penetrare più a fondo il segreto del Gran Vecchio. In ogni caso, sono convinto che *questi* non gioca a dadi." Se la probabilità doveva sostituire la causalità, a giudizio di Einstein la base razionale per costruire teorie della fisica era stata distrutta.

(capitolo 11, *Personalmente propendo per rinunciare al determinismo*, pp 142 - 143)

Il ragionamento era il seguente: se il calore è semplicemente un frenetico andirivieni collettivo di atomi, allora la fisica del calore in definitiva deve seguire dalle leggi del moto di Newton applicate a questi atomi; le collisioni tra gli atomi devono essere calcolabili tanto quanto le carambole sul tavolo da biliardo, e in tal caso il comportamento del calore deve essere analogamente prevedibile. Questa visione di onniscienza scientifica, in cui ogni particella dell'universo deve seguire leggi rigorose e razionali, è ben riassunta nelle famose parole del marchese Pierre-Simon de Laplace, che nel Settecento offrì uno dei più importanti contributi allo sviluppo del newtonianismo fino al suo massimo splendore matematico:

"Possiamo considerare lo stato attuale dell'universo come l'effetto del suo passato e la causa del suo futuro. Un intelletto che a un determinato istante dovesse conoscere tutte le forze che mettono in moto la natura, e tutte le posizioni di tutti gli oggetti di cui la natura è composta, se questo intelletto fosse inoltre sufficientemente ampio da sottoporre questi dati ad analisi, esso racchiuderebbe in un'unica formula i movimenti dei corpi più grandi dell'universo e quelli degli atomi più piccoli; per un tale intelletto, nulla sarebbe incerto; e il futuro, proprio come il passato, sarebbe evidente davanti ai suoi occhi."

*Nulla poteva essere incerto*, questo era il punto cruciale. Storpiando le parole di un altro francese, pos-

siamo dire: *Tout comprendre c'est tout prédire*, comprendere tutto vuol dire prevedere tutto. Da queste grandiose affermazioni derivano tutti i *cliché* familiari sul mondo considerato come una macchina, l'universo come un meccanismo a orologeria e tutta la scienza vista come fondamentalmente deterministica e inflessibile.

(capitolo 2, *L'entropia tende a un massimo*, pp 26 - 27)

Ogni elemento radioattivo, osservarono Rutherford e Soddy, aveva una velocità di decadimento descritta in funzione di un parametro che prese il nome di emivita. Partendo con un grammo dell'elemento conosciuto all'epoca come torio X, ad esempio, e aspettando all'incirca undici minuti, si rimarrebbe con mezzo grammo. Dopo altri undici minuti, resterebbe un quarto di grammo, poi un ottavo e così via, sempre più vicino a zero, senza però raggiungerlo mai.

È un decadimento esponenziale, quindi segue una regola matematica abbastanza semplice. Se però si pensa al campione come a un insieme di atomi, ci si rende conto del suo significato inquietante. In ogni intervallo di undici minuti, metà degli atomi si disintegra mentre l'altra metà non fa nulla. Come si fa a dire quali atomi decadono e quali non decadono?

Come aveva osservato Marie Curie, quel che rendeva la radioattività così problematica era la sua spontaneità. Ora Rutherford e Soddy avevano reso quantitativa questa imprevedibilità. Il decadimento segue una legge elementare di probabilità, tale che in ogni momento ogni atomo ha una certa probabilità di decadere. Ma cosa significa per il principio di causa ed effetto se un atomo se ne sta lì, badando agli affari suoi, e poi in un certo momento apparentemente imprevedibile si disintegra? Che cosa l'ha fatto decadere? Ovvero, cosa l'ha fatto decadere e cosa l'ha fatto decadere in quel particolare momento?

Va detto che la casualità, all'inizio del Novecento, non era più un concetto tanto nuovo e allarmante, com'era solo una generazione prima. I fisici a quel punto avevano digerito l'uso della teorizzazione statistica sugli atomi nei gas e avevano accettato di malavoglia l'intrusione della probabilità nel comportamento "non proprio prevedibile" dell'entropia. Se anche il decadimento radioattivo seguiva una legge probabilistica, forse la ragione fondamentale non era tanto diversa.

(capitolo 3, *Un enigma, un argomento che suscita profondo stupore*, pp 44 - 45)

In altre parole, questi due processi — il decadimento radioattivo di un nucleo e il salto di un elettrone da una certa orbita a un'altra — non solo erano entrambi spontanei, ma erano anche spontanei nello stesso modo. In nessuno dei due casi il cambiamento avveniva in un momento particolare: avveniva quando avveniva, senza un motivo evidente. Il che pareva significare che questi fenomeni fisici procedevano senza una causa identificabile.

"La faccenda della causalità tormenta molto anche me," scrisse Einstein a un collega qualche anno più tardi, quando l'enigma non aveva ancora trovato una spiegazione adeguata. Era praticamente l'unico ad avere queste preoccupazioni. Quasi tutti gli altri fisici erano troppo occupati a giocare con l'atomo di Bohr per dedicare il loro tempo a inquietarsi per simili questioni metafisiche. Impiegarono un bel po' di tempo a mettersi in pari.

(capitolo 4, *Come fa un elettrone a decidere?*, p. 57)

Per essere un uomo annoverato fra i grandi teorici della fisica, Niels Bohr aveva capacità notevolmente limitate nei regni superiori della matematica. Non arabescava di equazioni i suoi articoli e invece esponeva assunti e concetti generali, cercando di ricavarne conclusioni quantitative le più semplici possibile. Durante la maggior parte della sua carriera, fu solo grazie all'aiuto di una squadra di assistenti dotati di talento matematico che Bohr riuscì a trasformare le sue notevoli intuizioni fisiche in argomenti quantitativi. Questo modo di lavorare alimentò l'alone di mistero di cui gradualmente si circondò. Bohr sembrava capace di percepire dove stesse la soluzione di un problema anche se non poteva capire direttamente come arrivarci. Molti anni più tardi, Werner Heisenberg, raccontando una conversazione avuta con Bohr, scrisse: "Bohr mi confermò [...] di non aver elaborato i complessi modelli atomici grazie alla meccanica classica; piuttosto, gli erano venuti in mente in modo intuitivo, sulla base dell'esperienza, come immagini."

(capitolo 5, *Un'audacia mai vista in precedenza*, pp 62 - 63)

Nel suo *annus mirabilis*, il 1905, due dei quattro articoli leggendari di Einstein enunciarono la relatività speciale (nel secondo, un articolo piuttosto breve, compariva l'equazione scientifica più famosa del mondo,  $E = mc^2$ ). Un altro articolo si occupava del moto browniano. Il quarto trattava quelli che aveva preso a chiamare "quanti di luce." Einstein sosteneva che si dovesse prendere alla lettera l'argomento di Planck in merito ai pacchetti di energia: trattando i pacchetti di energia come se fossero davvero piccoli oggetti discreti e utilizzando i metodi statistici *standard* sviluppati da Boltzmann e altri, molte delle proprietà dimostrate dalla radiazione elettromagnetica ne scaturivano direttamente. Nel caso che non fosse un argomento convincente, ne presentava anche un altro: asserendo che la luce è fatta di piccoli pacchetti di energia, riusciva a spiegare dettagli in precedenza sconcertanti dell'effetto fotoelettrico, in cui la luce che colpisce certi metalli genera una piccola tensione elettrica.

Ma credere ai quanti di luce era in contraddizione con l'enorme e ininterrotto successo della teoria ondulatoria classica di Maxwell del campo elettromagnetico. Per di più, prendere sul serio i quanti di luce introduceva inevitabilmente nella fisica i problemi associati della discontinuità e dell'imprevedibilità. Le onde classiche si comportavano sempre in modo regolare, graduale, senza salti. I quanti di luce, se poi esistevano, necessariamente arrivavano e se ne andavano all'improvviso, senza apparente ragione o causa. È questa la radice del problema che angustiò Einstein per il resto della vita. Fu il primo a credere alla realtà dei quanti di luce, ma si ribellò con più forza di chiunque altro contro l'implicazione che i quanti di luce introducono inevitabilmente nella fisica la spontaneità e la probabilità.

(capitolo 5, *Un'audacia mai vista in precedenza*, p. 70)

"Quando si tratta di atomi," concluse Bohr in modo enigmatico, "il linguaggio si può usare soltanto come nella poesia. Anche il poeta non si preoccupa tanto di descrivere fatti quanto di creare immagini e stabilire connessioni mentali."

Per Heisenberg era un discorso strano, ma molto significativo. Soltanto una generazione prima, Boltzmann e i suoi seguaci sostenevano strenuamente che l'atomo era una *cosa* concreta, non un'astrazione teorica né tanto meno un'allusione poetica. Ma Bohr ora sosteneva che i fisici non potevano sperare di

descrivere gli atomi concretamente, che dovevano accontentarsi di analogie e metafore? Che la realtà intrinseca di un atomo era inaccessibile per loro? Che forse anche parlare della realtà intrinseca di un atomo era privo di senso?

(capitolo 7, *Come si può essere contenti?*, pp 90 - 91)

I premi Nobel a Bohr e ad Einstein misero in luce un'evidente contraddizione. Einstein, come faceva ormai da molti anni, accettava alla lettera la realtà dei quanti di luce, però era insoddisfatto del modo in cui contaminavano la fisica con elementi di discontinuità e caso. In netto contrasto, Bohr aveva ideato un modello atomico che rendeva conto dell'emissione e dell'assorbimento di luce a specifiche frequenze da parte degli elettroni, ma poi era finito nei guai perché si rifiutava di accettare che questi pacchetti di luce fossero davvero fondamentali per la fisica.

(capitolo 8, *Preferirei fare il ciabattino*, p. 100)

Ideando la relatività, Einstein reinventò lo spazio e il tempo. Il suo punto di partenza era stato un'attenta indagine del significato della simultaneità. Nella meccanica newtoniana, il tempo era assoluto. Se due eventi accadevano in luoghi diversi nello stesso momento, la simultaneità dei due eventi era un fatto oggettivo, un dato indiscutibile. Ma Einstein ebbe la perspicacia di domandarsi come avrebbero fatto gli osservatori di questi due eventi a sapere che erano avvenuti contemporaneamente. Avrebbero dovuto sincronizzare gli orologi, come dicevano un tempo i personaggi dei film di guerra. Questo significava scambiare segnali — con lampi di luce, comunicando via radio, eccetera. Ma questi segnali viaggiano, al massimo, alla velocità della luce, e Einstein, seguendo scrupolosamente il modo in cui osservatori diversi avrebbero stabilito in pratica i tempi e i luoghi degli eventi, mostrò che in generale non avrebbero potuto convenire sulla simultaneità. Due eventi contemporanei per un certo osservatore sarebbero accaduti uno dopo l'altro per un secondo osservatore.

Più o meno nello stesso modo, sosteneva Heisenberg, era del tutto inutile immaginare di poter descrivere una visione assoluta, da una prospettiva onnisciente, dell'interno di un atomo. L'unica cosa possibile era osservare in vari modi il comportamento dell'atomo — la luce che assorbe ed emette — e dedurre nel modo migliore possibile che cosa accade al suo interno.

Einstein non ci credeva. Nella relatività, per quanto gli osservatori possano non essere d'accordo, gli eventi mantengono una chiara e indiscutibile fisicità. Confrontando i propri dati, un insieme di osservatori può arrivare a un accordo accettabile per tutti su ciò che hanno osservato, poiché la relatività speciale rende conto delle discrepanze tra le singole storie. Esiste un'oggettività di fondo.

A suo modo di vedere, la situazione era tutt'altra nella meccanica quantistica. Heisenberg sembrava dire, pensava Einstein, che fosse sciocco persino andare alla ricerca di una rappresentazione coerente della struttura e del comportamento di un atomo. [...].

Heisenberg respinse le accuse. La relatività era stata controversa perché toglieva fondamento alle vecchie domande che i fisici si erano sempre posti sullo spazio e sul tempo e li obbligava a porne di nuove. Ciò non significava che lo spazio e il tempo fossero diventati privi di senso. Quel che lui e altri colleghi stavano cercando di fare per il caso degli atomi era esattamente la stessa cosa: riuscire a capire

quali fossero le domande giuste. Alcune vecchie forme di conoscenza sarebbero andate perse, certo, ma nuove forme le avrebbero sostituite.

(capitolo 11, *Personalmente propendo per rinunciare al determinismo*, pp 137 - 138)

Bohr, nel suo articolo del 1926, osservò che non era più possibile prevedere quale sarebbe stato il risultato specifico di una collisione. Quel che si poteva specificare erano soltanto le probabilità di un insieme di risultati. “Emerge qui tutto il problema del determinismo,” scrisse. “Nella meccanica quantistica non esiste una quantità che in un caso particolare determina il risultato di una collisione [...]. Personalmente propendo per rinunciare al determinismo.”

Il determinismo era la chiave di volta della fisica classica, il principio fondamentale della causalità. Bohr traduceva in parole il più grande timore di Einstein, che aveva espresso più e più volte negli anni. Nella fisica classica, tutto ciò che accade, accade per una ragione, perché altri eventi precedenti hanno portato a quell'evento, ne hanno determinato le condizioni, l'hanno reso inevitabile. Ma nella meccanica quantistica, a quanto sembra, le cose accadono come accadono senza che sia possibile dire perché.

[...] Verso la fine del 1926, Einstein scrisse a Bohr alcune frasi che sono diventate famose a forza di essere ripetute, soprattutto dal loro autore, che era così soddisfatto di come aveva espresso il concetto da tirarle fuori ogni volta che erano opportune. “La meccanica quantistica è degna di ogni rispetto,” scrisse a Bohr, “ma una voce interiore mi dice che non è ancora la soluzione giusta. È una teoria che ci dice molte cose, ma non ci fa penetrare più a fondo il segreto del Gran Vecchio. In ogni caso, sono convinto che *questi* non gioca a dadi.” Se la probabilità doveva sostituire la causalità, a giudizio di Einstein la base razionale per costruire teorie della fisica era stata distrutta.

(capitolo 11, *Personalmente propendo per rinunciare al determinismo*, pp 142 - 143)

Anche Pauli si era imbattuto in questa stessa difficoltà. Ne parlò a Heisenberg in una lettera, in cui usò la lettera  $p$  per indicare la quantità di moto e la lettera seguente,  $q$ , per indicare la posizione. “Posso guardare il mondo con l'occhio  $p$ ,” scrisse, “e posso guardare il mondo con l'occhio  $q$ , ma se voglio aprire tutt'e due gli occhi allo stesso tempo, divento pazzo.”

Le particelle quantistiche non si manifestavano in modo chiaro. Rivelavano situazioni contraddittorie. Era l'enigma con cui stava lottando Heisenberg. Come poteva trovare un modo per obbligarla la meccanica quantistica a rivelare i suoi segreti, a lasciargli vedere quel che avveniva all'interno?

*Non poteva!* Fu questa la risposta che gli balenò in mente una sera mentre camminava a passi lenti nel parco, immerso nei suoi pensieri. [...] Non vi era modo di costringere un sistema quantistico a svelare una descrizione che avesse un significato non ambiguo in termini classici.

[...] Finalmente, Heisenberg riuscì a comprendere un punto che fino a quel momento né lui né Bohr avevano compreso. La questione cruciale non era teorica né tanto meno, come spesso Bohr sembrava pensare, filosofica. Alla fin fine era una questione *pratica*.

Forse non era possibile parlare della posizione e della quantità di moto (*cioè della velocità*, n.d.r.) degli oggetti quantistici in un modo che avrebbe avuto senso sotto le vecchie regole. Ma ciò che si poteva ancora fare, Heisenberg ora lo capiva, era quello che i fisici avevano sempre fatto: attribuire un significato

alla posizione e alla quantità di moto *misurandole*. Per superare la confusione teorica era necessario prestare attenzione alle questioni di ordine pratico.

Ora doveva soltanto farsi venire in mente un esempio semplice per mettere in chiaro la sua intuizione. E così, forse con il bell'esperimento di Compton di pochi anni prima in qualche recesso della mente, escogitò l'esempio di disarmante semplicità che ha fatto del suo nome un'icona. Un elettrone viaggia nello spazio. Un osservatore lo illumina, poi rileva la luce diffusa dalla particella in movimento. Misurando questa luce — la sua frequenza e la sua direzione — l'osservatore può cercare di dedurre la posizione e la quantità di moto dell'elettrone nel momento in cui la luce lo ha colpito. Ed è lì, scoprì Heisenberg, che le cose si fanno interessanti.

La luce è fatta di quanti — o fotoni, come da poco li aveva battezzati il chimico fisico americano Gilbert Lewis. L'incontro tra uno di questi fotoni e l'elettrone in movimento è un evento quantistico. Quell'incontro, come aveva dimostrato Bohr, non produce risultati ben precisi, ma una gamma di risultati possibili, con varie probabilità. Ribaltando questa logica, Heisenberg si rese conto che un osservatore non può inferire un unico evento che ha condotto al risultato misurato. Al contrario, esiste un certo insieme di incontri elettrone-fotone che si sarebbero potuti realizzare. E necessariamente questo significa, capì Heisenberg, che sarebbe impossibile inferire in modo univoco quali siano la posizione e la quantità di moto dell'elettrone.

Pauli aveva detto che è possibile considerare la posizione, oppure la quantità di moto, ma non entrambe allo stesso tempo. Heisenberg, riflettendo con cura sulla questione, capì che non è così semplice. Non è una mutua esclusione, ma un inevitabile compromesso. Più un osservatore tenta di estrarre informazioni sulla posizione dell'elettrone, meno è possibile conoscere la sua quantità di moto, e viceversa. Ci sarà sempre, come diceva Heisenberg, una "inesattezza" (*Ungenauigkeit*) nelle conclusioni.

(capitolo 12, *Le nostre parole sono inadeguate*, pp 150 - 152)

Bohr presentò la sua ampia filosofia nel settembre del 1927, nel corso di una riunione che si tenne a Como in occasione del centenario della morte di Alessandro Volta, il pioniere italiano dell'elettricità. Storicamente, il suo intervento di Como segna più di ogni altra cosa l'introduzione formale nella scienza dell'idea che le misurazioni non sono registrazioni passive di un mondo oggettivo, ma interazioni attive in cui l'oggetto misurato e il modo in cui lo si misura contribuiscono inseparabilmente al risultato. [...] Era emersa l'idea, tanto spesso citata e tanto poco compresa, che la misurazione disturbi il sistema che viene misurato. Ma, come Bohr cercò di spiegare, *tutte* le misurazioni equivalgono a perturbazioni di ciò che viene misurato. La reale novità della meccanica quantistica che Bohr voleva comunicare era che la misurazione *definisce* ciò che viene misurato. Quel che si ottiene da una misurazione dipende da che cosa si è scelto di misurare, e questo non è nulla di nuovo, ma, come Heisenberg ora aveva dimostrato, misurare un certo aspetto di un sistema *chiude la porta* a tutte le altre cose che si potranno scoprire e quindi limita l'informazione che potrà produrre qualsiasi misurazione futura.

(capitolo 13, *Il terribile gergo incantatorio di Bohr*, pp 160 e 161)

Einstein non si placò. Un anno dopo il quinto congresso Solvay, scrisse sprezzante ma rassegnato a

Schrödinger: “La rassicurante filosofia — o religione? — di Heisenberg-Bohr è così ben congegnata che per il momento offre al vero credente un morbido cuscino da cui non è facile farlo alzare. Lasciamolo pure dov'è, allora.” È ironico che Einstein contestasse la religiosità degli altri quando l'autorizzazione a disapprovare la meccanica quantistica gli derivava dal suo accesso diretto ai pensieri del “Gran Vecchio.”  
(capitolo 13, *Il terribile gergo incantatorio di Bohr*, p. 168)