Principio di indeterminazione di Heisenberg

(Reindirizzamento da Principio di indeterminazione)

La comprensione dell'argomento trattato in questa voce presuppone la conoscenza dei seguenti concetti:

notazione bra-ket
postulati della meccanica quantistica
operatore statistica

Nella fisica quantistica, il **principio di indeterminazione di Heisenberg** implica che:

> « Nell'ambito della realtà le cui connessioni sono formulate dalla teoria quantistica, le leggi naturali non conducono quindi ad un completa determinazione di ciò che accade nello spazio e nel tempo; l'accadere (all'interno delle frequenze determinate per mezzo delle connessioni) è piuttosto rimesso al gioco del caso. »
>
> (W.Heisenberg, *Indeterminazione e realtà*, Napoli, Guida 1991, p.128)

Il principio rende ragione del fatto che posizione e quantità di moto di una particella elementare non siano determinabili contemporaneamente in quanto l'una esclude l'altra. Esso rappresenta una chiave di volta della meccanica quantistica confermato da oltre ottant'anni di esperienze.

Nelle formulazioni moderne della meccanica quantistica il *Principio di indeterminazione di Heisenberg* resta un principio base della meccanica quantistica compatibile coi postulati.

In generale, qualunque coppia di grandezze osservabili generiche, che non siano nella relazione di essere *compatibili*, non si potranno misurare simultaneamente, se non a prezzo di indeterminazioni l'una tanto più grande quant'è più piccola l'altra.

Indice

Panoramica

Il principio di indeterminazione viene a volte spiegato erroneamente, sostenendo che la misura della posizione disturba necessariamente il momento lineare della particella e lo stesso Werner Heisenberg diede inizialmente questa interpretazione. In realtà il disturbo non gioca nessun ruolo, in quanto il principio è valido anche quando la posizione viene misurata in un sistema e il momento viene misurato in una copia identica del primo sistema. È più accurato dire che in meccanica quantistica le particelle hanno alcune proprietà tipiche delle onde, non sono quindi oggetti puntiformi, e **non possiedono** una ben definita coppia posizione e momento, oppure che l'indeterminazione risiede nella **preparazione** stessa del sistema.

Si consideri la seguente analogia: supponiamo di avere un segnale che varia nel tempo, come un'onda sonora, e che si vogliano sapere le frequenze esatte che compongono il segnale *in un dato momento*. Questo risulta essere impossibile: infatti per poter determinare le frequenze accuratamente, è necessario campionare il segnale per un intervallo temporale e si perde quindi la precisione sul tempo. (In altre parole, un suono non può avere sia un tempo preciso, come in un breve impulso, che una frequenza precisa, come in un tono puro continuo). Il tempo e la frequenza dell'onda nel tempo, sono analoghi alla posizione e al momento dell'onda nello spazio. Il principio viene abitualmente reso con la formula

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

in cui Δx è l'errore sulla posizione e Δp quello sulla quantità di moto, mentre $\hbar$ è la costante di Planck ridotta $\hbar = h/2\pi$.

Si noti che le singole grandezze osservabili per le cui coppie esista una relazione di indeterminazione, prese separatamente, possono essere misurate con un errore minimo e precisione assoluta.

Le deviazioni standard utilizzate nel calcolo dell'indeterminazione sono diverse da quelle rilevabili per le stesse grandezze, misurandole singolarmente.

In questo modo, l'errore calcolabile con la relazione di indeterminazione non è derivabile dalle grandezze in sè, né da un problema statistico, una conoscenza imprecisa dell'oggetto della misura, ma dall'*atto di misurarle simultaneamente*.

In questi termini, il mondo del determinismo causale dovrebbe cedere il passo a quello dell'indeterminismo e del caso. Infatti, l'impossibilità di misurare con precisione simultaneamente due grandezze, salvo che siano compatibili, equivale all'impossibilità di verificare il nesso causale fra due generiche quantità.

Solo dal 1925 - 27 in poi, con i lavori di Max Born, Werner Heisenberg e Pasquale Jordan, di Paul Adrien Maurice Dirac, di John von Neumann, nasce la fisica della non commutatività. Questi studi dimostrano che *l'indeterminazione coimplica la non commutatività*.

La nuova fisica deriva le relazioni di indeterminazione fra grandezze fisiche dal fatto che a queste non può applicarsi la proprietà commutativa.

Viceversa, la situazione particolare in cui due grandezze osservabili si possano misurare simultaneamente, come accadrebbe per due diverse componenti della posizione, è precisamente quella in cui il prodotto (degli scarti quadratici, e delle relazioni fra le grandezze) non dipende dall'ordine dei fattori. Le grandezze osservabili compatibili sono quelle che *commutano tra loro*, per cui l'indeterminazione vale zero.

I fenomeni fisici sono descritti con il formalismo matriciale, con matrici quadrate di ordine arbitrario (da 2 a infinito) che godono in molti casi della proprietà distributiva e associativa, ma non di quella commutativa. È noto che il prodotto matriciale non è commutativo, salvo che per le matrici di ordine 1, che sono i numeri stessi e per le matrici circolanti, ovvero matrici nelle quali colonne e righe slittano in avanti di un elemento

$$C = \begin{bmatrix} c_0 & c_{n-1} & \dots & c_2 & c_1 \\ c_1 & c_0 & c_{n-1} & & c_2 \\ \vdots & c_1 & c_0 & \ddots & \vdots \\ c_{n-2} & & \ddots & \ddots & c_{n-1} \\ c_{n-1} & c_{n-2} & \dots & c_1 & c_0 \end{bmatrix}$$

Portando un esempio numerico:

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 4 & 1 & 2 & 3 \\ 3 & 4 & 1 & 2 \\ 2 & 3 & 4 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 4 & 1 & 2 & 3 \\ 3 & 4 & 1 & 2 \\ 2 & 3 & 4 & 1 \\ 1 & 2 & 3 & 4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 & 1 & 2 & 3 \\ 3 & 4 & 1 & 2 \\ 2 & 3 & 4 & 1 \\ 1 & 2 & 3 & 4 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 4 & 1 & 2 & 3 \\ 3 & 4 & 1 & 2 \\ 2 & 3 & 4 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 20 & 26 & 28 & 26 \\ 26 & 20 & 26 & 28 \\ 28 & 26 & 20 & 26 \\ 26 & 28 & 26 & 20 \end{bmatrix}$$

Prodotto e somma sono operatori commutativi, ma non lo sono combinazioni lineari di queste operazioni, e le composizioni di due operazioni geometriche, come due rotazioni o due traslazioni, da queste descrivibili. La proprietà commutativa si applica a:

- Operatori lineari per matrici di ordine 1, ossia numeri semplici, cui si applica somma, prodotto, un operatore lineare geometrico come una traslazione o una rotazione, oppure la combinatoria.

- Alcune particolari matrici di ordine superiore al primo, che godono della proprietà commutativa del prodotto.

Nella fisica dei fenomeni atomici o subatomici, le grandezze osservabili non si possono descrivere mediante numeri o funzioni a valori numerici, ma mediante "operatori lineari autoaggiunti su uno spazio di Hilbert", ovvero mediante elementi autoaggiunti di un'algebra di operatori.

Il principio di indeterminazione restituisce la forma di una relazione esatta, che determina una struttura matematica estremamente rigida e precisa.

Il principio di indeterminazione ha posto fine al determinismo così come lo aveva teorizzato in origine Isaac Newton e rielaborato in tempi più recenti dal marchese De Laplace. Per Newton era sufficiente conoscere posizione e velocità di un corpo in un dato momento per poter calcolare con le leggi della fisica classica tutti i suoi stati precedenti e futuri. Laplace riprese questa teoria, affermando che doveva esistere un insieme di leggi fisiche tale da poter predire qualunque accadimento futuro e passato che si sarebbe verificato nell'universo. Laplace notava che le leggi fisiche ammettono una molteplicità di soluzioni: il problema poteva risolversi ammettendo che lo stesso esperimento possa dare esiti diversi, oppure introducendo un vincolo matematico, tale da ridurre a una sola le soluzioni possibili.

Il principio di Heisenberg esclude questa opzione, essendo la condizione al contorno un intervallo di valori misurabili per ogni grandezza osservata, per cui lo stato del sistema (al contorno e in qualunque altro istante) non è determinato in modo univoco; la meccanica quantistica introduce una novità di fondo nel metodo sperimentale: la teoria non predice più un numero, ma un insieme di valori *associati a una probabilità*. La teoria viene verificata su grandi numeri: l'esperimento è ripetuto molte volte, per accertare che le possibili soluzioni si manifestano con la frequenza predetta dalla teoria. Einstein rifiutò questa interpretazione.

Laplace era convinto che la soluzione che realmente si verifica, è determinata da un vincolo, la condizione al contorno. Se potessimo conoscere la "condizione iniziale" o "condizione al contorno" in un qualunque istante dell'universo (l'origine, l'istante presente, etc.), saremmo in grado di predire lo stato dell'universo in qualunque altro istante. Il principio di indeterminazione esclude la possibilità di conoscere con un'accuratezza infinita la condizione iniziale nello spazio e/o nel tempo: la condizione al contorno è determinata da più di una grandezza fisica, ad esempio posizione e velocità, tempo ed energia, che quindi risentono dell'indeterminazione.

Se l'universo fosse descrivibile in un dato istante da *una sola grandezza* fisica, la misura della condizione al contorno avrebbe comunque una dispersione non inferiore a quella individuata dal principio di indeterminazione di Heisenberg: *il quadrato dell'errore* di misura sarebbe maggiore della quantità individuata da Heisenberg. Un esempio di condizione al contorno con una sola grandezza è quello delle soluzioni alle equazioni di campo di Einstein, per le quali lo stato dell'universo in qualunque istante è descrivibile da un'unica grandezza, la sua densità.

Quanto più è precisa la misura, tanto più essa è invasiva e disturba il fenomeno da misurare. Il principio "condanna" a un compromesso, *dovendo il prodotto degli errori di misura essere maggiore di una certa costante*: se si ottiene un'accuratezza infinita nel misurare la velocità e, quindi, una bassissima dispersione dei dati, sarà in proporzione tanto più alto l'errore nel determinare la posizione, e viceversa. Stando alla teoria quantistica anche un singolo quanto di luce disturberà la particella, alterandone in modo imprevedibile la velocità.

Il principio di Heisenberg mostra che non ha senso dare una misura senza fornire l'errore relativo: tutte le misure dovrebbero essere fornite nella forma di un valore più o meno una certa dispersione.

Il principio di indeterminazione come teorema

Nonostante fosse inizialmente stato formulato come principio, ed il nome sia rimasto tale, nella meccanica quantistica contemporanea si preferisce far discendere il principio di indeterminazione dai postulati. In questo senso il principio di indeterminazione è in realtà un teorema.

Dimostrazione

Presi gli operatori $\hat{A}$ e $\hat{B}$ (associati alle grandezze osservabili A e B) si possono definire gli scarti dalla media come $\hat{A}_0 = \hat{A} - \left\langle \hat{A} \right\rangle$ e $\hat{B}_0 = \hat{B} - \left\langle \hat{B} \right\rangle$. Di conseguenza le deviazioni standard hanno la forma $\Delta \hat{A}^2 = \left\langle \hat{A}_0^2 \right\rangle$ e $\Delta \hat{B}^2 = \left\langle \hat{B}_0^2 \right\rangle$.
Il prodotto delle deviazioni standard può essere riscritto come:
$\Delta \hat{A}^2 \Delta \hat{B}^2 = \left\langle \hat{A}_0^2 \right\rangle \left\langle \hat{B}_0^2 \right\rangle \geq \left\| \left\langle \hat{A}_0 \hat{B}_0 \right\rangle \right\|^2$ (dove l'ultimo passaggio non è altro che la disuguaglianza di Cauchy-Schwarz).
Per procedere riscriviamo $\hat{A}_0 \hat{B}_0$ in funzione del commutatore e dell'anticommutatore ($\hat{A}_0 \hat{B}_0 = \frac{1}{2} \left[\hat{A}_0, \hat{B}_0 \right] + \frac{1}{2} \left\{ \hat{A}_0, \hat{B}_0 \right\}$) e notiamo che, dato che le traslazioni non influenzano i commutatori, $\left[\hat{A}_0, \hat{B}_0 \right] = \left[\hat{A}, \hat{B} \right]$.
Supponendo di poter scrivere $\left[\hat{A}, \hat{B} \right] = i\hat{C}$ (questo, ad esempio, è vero per tutte le coppie di grandezze coniugate), otteniamo
$\Delta \hat{A}^2 \Delta \hat{B}^2 = \left(\Delta \hat{A} \Delta \hat{B} \right)^2 \geq \left\| \left\langle \frac{i}{2} \hat{C} + \frac{1}{2} \left\{ \hat{A}_0, \hat{B}_0 \right\} \right\rangle \right\|^2 \geq \frac{\left\| \left\langle \hat{C} \right\rangle \right\|^2}{4}$ ovvero
$\Delta \hat{A} \Delta \hat{B} \geq \frac{\left\| \left\langle \hat{C} \right\rangle \right\|}{2}$ che è il principio di indeterminazione nella sua forma più generale.
Nel caso particolare dell'indeterminazione fra posizione e momento, si ha (dato che $[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar$) esattamente $\Delta \hat{x} \Delta \hat{p} \geq \frac{\hbar}{2}$.

Corollari

Come risulta dalla dimostrazione formale di cui sopra:

- il prodotto delle incertezze nelle due misure non può essere inferiore alla costante di Planck;
- il principio di indeterminazione non si applica a tutte le possibili coppie di osservabili. Ad esempio è sempre possibile, in linea di principio, misurare posizione e carica elettrica contemporaneamente e con precisione arbitraria. In maniera analoga, mentre il principio di indeterminazione si applica alla misura di x e della componente della quantità di moto lungo x, questo non si applica alla misura contemporanea di x e di p_y (dato che $[x, p_y] = 0$).

Indeterminazione e correlazione

L'incertezza della misura prevedibile con il principio di Heisenberg è radicalmente diversa dalla presenza di termini di correlazione, di non linearità.

Il principio di indeterminazione si presenta, come detto in precedenza nella forma:

$$\Delta \hat{x} \Delta \hat{p} \geq \frac{\hbar}{2}.-$$

Il termine di correlazione rappresentato in molti casi con l'indice di Pearson ha la forma:

$$\rho_{xy} \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y.$$

Abbiamo le seguenti analogie:

- entrambi sono il prodotto degli scarti quadratici delle misure di due grandezze osservabili;
- anche fra gli scarti di un termine di indeterminazione esiste una correlazione negativa: se cresce $\Delta\hat{x}$, sarà misurato un $\Delta\hat{p}$minore. Il legame però non è calcolabile a priori con una relazione analitica. Nel primo caso, invece, una correlazione negativa/positiva è esplicitata dal fattore ρ_{xy}.

Gli scarti quadratici del principio di indeterminazione *non sono* e non sono collegati alle deviazioni standard rilevabili quando le grandezze sono misurate *separatamente*, e, quindi, teoricamente possono differire di alcuni ordini di grandezza.

Due grandezze possono essere misurate con estrema precisione separatamente, e dare luogo a un termine di indeterminazione, non trascurabile se misurate simultaneamente.

L'indeterminazione per energia e tempo

Il principio di indeterminazione di Heisenberg, formulato per la coppia posizione-movimento, è anche applicabile alla coppia energia e tempo, fatto di notevole importanza e che, come tale, ha conseguenze molto rilevanti. Queste conseguenze possono essere chiarite meglio partendo da un esempio pratico. Per misurare l'energia di un fotone si può fare uso della formula di Planck

$$E = h\nu$$

che manifesta la proporzionalità diretta tra l'energia E e la frequenza del fotone ν. In pratica però, per misurare la frequenza si devono contare le oscillazioni in un intervallo di tempo determinato: per fare ciò bisogna che si verifichi almeno un'oscillazione completa. Ecco perché l'intervallo di tempo deve essere determinato: non si può infatti stabilire la frequenza di una radiazione in meno tempo di quello che la luce impiega per fare un'oscillazione completa. Perciò per le onde radio si impiega più tempo a stabilire la frequenza rispetto alla radiazione visibile, perché per compiere un'oscillazione le prime ci impiegano molto più tempo delle seconde. Questa premessa sottolinea che c'è sempre un limite ineliminabile con cui si può conoscere la frequenza di un fotone o di qualunque altra particella: se infatti si misura solo parte dell'oscillazione, il valore della frequenza e per conseguenza quello dell'energia, è indeterminato; perciò, una determinazione esatta del valore energetico della particella, implica un campionamento piuttosto lungo dell'onda. Ma se in un esperimento interessa sapere quando avviene un evento, lo si deve fare a scapito della misura dell'energia, perché in simili situazioni non è più possibile misurare oscillazioni complete. Ecco che energia e tempo risultano essere non compatibili fra loro, perché una precisa misurazione dell'una rende imprecisa quella dell'altro e viceversa. Usando poi i formalismi matematici, il prodotto degli errori sulle misurazioni dell'energia e del tempo ha le medesime proprietà del prodotto della coppia posizione-momento e risulta quindi essere

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

da cui deriva che

$$\Delta E \geq \frac{\hbar}{2\Delta t}$$

da cui si vede che l'indeterminazione sull'energia e sul tempo sono inversamente proporzionali.

Bisogna sottolineare però questa relazione ha un significato diverso rispetto a quella che lega posizione e impulso. Intanto queste ultime sono varibili dinamiche misurabili in ogni istante; invece il tempo (almeno in meccanica quantistica non relativistica) è una variabile indipendente, quindi non è una grandezza osservabile in senso stretto. Quindi, anche se una particella non può avere simultaneamente posizione e impulso ben definiti, l'energia si può misurare con precisione arbitraria in ogni istante di tempo: ΔE è la differenza tra due valori esatti dell'energia misurati in due istanti diversi.

A volte si dice è possibile "prendere in prestito" un'energia ΔE purché sia "restituita" entro Δt, violando quindi la conservazione dell'energia per breve tempo. Questa però non è un'interpretazione legittima del principio: è più corretto dire che se la durata di uno stato (ad es. la vita media di una particella) è limitata, la sua energia è indefinita.

La conseguenza estrema di tutto questo è il fatto che il vuoto non sia poi così vuoto, ma in realtà ricco di fluttuazioni energetiche di brevissima durata, che provocano effetti come la schermatura della carica elettrica e il mascheramento di quella di colore. Infatti, nella elettrodinamica quantistica (QED), il vuoto è considerato come se fosse denso di coppie elettrone-positrone che si creano e si annichilano in un tempo così breve da non poter essere osservate e dette virtuali. Questa peculiarità del vuoto è ben visibile però, perché queste particelle, pur essendo virtuali, interagiscono con le particelle reali, schermandone la carica elettrica: se, per esempio, un elettrone venisse inserito in questo vuoto, la sua carica verrebbe parzialmente indebolita. Anche la cromodinamica quantistica (QCD), per spiegare il mascheramento della carica di colore dei quark all'interno del vuoto, ritiene quest'ultimo "popolato" da coppie quark-antiquark virtuali che si comportano esattamente come gli elettroni e positroni virtuali nella QED.

Un'altra conseguenza, che eviterebbe la violazione del principio di conservazione dell'energia, sarebbe la creazione di coppie di particelle in cui una delle due ha energia positiva e l'altra negativa, come è dimostrato dalle soluzioni negative che si possono ottenere nell'equazione di Dirac e come è suggerito da Stephen Hawking per spiegare come i buchi neri possano emettere particelle e perdere massa, teoria recentemente dimostrata vera dallo stesso fisico. Infatti proprio come il vuoto in QED e QCD, quello che circonda un buco nero ha le stesse proprietà. Il fatto che i buchi neri emettano particelle è pertanto spiegabile ipotizzando che le particelle non vengano emesse direttamente dal buco nero, ma dai suoi dintorni ed in particolare da questo vuoto quantistico, ricco di fluttuazioni: la forte gravità del buco nero attrae anche queste particelle virtuali e a volte può capitare che solo una delle due cada nel buco; l'altra riuscirebbe a sfuggire e potrebbe essere osservata perché, avendo persa la sua compagna, si trasformerebbe in una particella reale. E delle due particelle create nel vuoto quella attratta dal buco nero è quella con energia negativa, possedendo una minore energia potenziale. Quello che ne risulta, è che la massa del buco nero è, seppur insensibilmente, diminuita.

Indeterminazione e stringhe

Il principio di Werner Heisenberg è fondamentale anche nella teoria delle stringhe, con la quale risulta essere perfettamente coerente, sebbene in maniera diversa rispetto alla meccanica quantistica. In particolare, l'indeterminazione è strettamente correlata con la tensione della stringa, attraverso un parametro fondamentale, e con la sua lunghezza. La novità sta nel fatto che, nella teoria delle stringhe, ad un momento infinito non corrisponde, come dovrebbe essere tradizionalmente, una dimensione di lunghezza pari a zero. Questo perché la relazione tra momento e lunghezza è:

$$\Delta L \sim \frac{\hbar}{p} + \alpha' \frac{p}{\hbar},$$

dove ΔL è la lunghezza di stringa, p è il suo momento, $\hbar$è la costante di Planck rinormalizzata e α' è un parametro, il quale svolge un ruolo primario nella teoria delle stringhe, in quanto l'uguaglianza

$$T_{stringa} = \frac{1}{2\pi\alpha'}$$

esprime il suo legame con la tensione propria della stringa; in questo modo deve esistere una minima lunghezza di stringa osservabile, ovvero

$$L_{\min} \sim 2\sqrt{\alpha'}.$$

Perciò, tutti i problemi legati alla distanza pari a zero, così importanti nella teoria quantistica dei campi, per la teoria delle stringhe diventano irrilevanti. Infatti, se la teoria delle stringhe è una teoria quantistica della gravità, allora l'entità della scala di lunghezza deve essere almeno quella della scala di Planck, data dalla combinazione tra costante di gravitazione universale, velocità della luce e costante di Planck rinormalizzata:

$$L_P = \sqrt{\frac{\hbar G_N}{c^3}}.$$

Interpretazioni

Albert Einstein non era soddisfatto del principio di indeterminazione, e sfidò Niels Bohr con il seguente famoso esperimento mentale: "Riempiamo una scatola con del materiale radioattivo che emette radiazioni casuali. La scatola ha uno sportello, che viene aperto e chiuso immediatamente, da un orologio, a un preciso istante, permettendo così a un po' di radiazione di uscire. In questo modo il tempo è già noto con precisione. Vogliamo ancora misurare la variabile coniugata energia, con precisione. Non c'è problema dice Einstein: pesiamo la scatola prima e dopo. L'equivalenza tra massa ed energia, derivante dalla relatività speciale ci permetterà di determinare precisamente quanta energia ha lasciato la scatola". Bohr ribatté come segue, per di più applicando l'equivalenza massa-energia sviluppata proprio da Einstein: "Se l'energia esce, la scatola è più leggera e si solleverà leggermente sulla bilancia. Questo cambia la posizione dell'orologio. Quindi l'orologio devia dal nostro sistema di riferimento stazionario, e quindi per la relatività speciale, la sua misurazione del tempo sarà diversa dalla nostra, portando ad un inevitabile margine d'errore". Infatti, un'analisi dettagliata mostra che l'imprecisione è correttamente data dalla relazione di Heisenberg.

All'interno della diffusa (ma non universalmente accettata) interpretazione di Copenaghen della meccanica quantistica, il principio di indeterminazione è inteso come il fatto che a un livello elementare, l'universo fisico non esiste in forma deterministica, ma piuttosto come una collezione di probabilità, o potenziali. Ad esempio, il modello (probabilità di distribuzione) prodotto da milioni di fotoni che passano attraverso una fessura di diffrazione, può essere calcolato usando la meccanica quantistica, ma il percorso esatto di ogni fotone non può essere predetto da nessun metodo conosciuto. L'interpretazione di Copenaghen sostiene che non può essere predetto da *nessun* metodo.

Ed è questa interpretazione che Einstein stava mettendo in discussione quando disse: "Non credo che Dio abbia scelto di giocare a dadi con l'universo". Bohr, che era uno degli autori dell'interpretazione di Copenaghen rispose: "Einstein, smettila di dire a Dio cosa fare con i suoi dadi". Più tardi Stephen Hawking aggiunse "Einstein [...] sbagliò quando disse: «Dio non gioca a dadi». La considerazione dei buchi neri suggerisce infatti non solo che Dio gioca a dadi, ma che a volte ci confonda gettandoli dove non li si può vedere".

Einstein era convinto che questa interpretazione fosse errata. Il suo ragionamento era che tutte le distribuzioni di probabilità precedentemente conosciute, sorgessero da eventi deterministici. La distribuzione di un lancio di moneta può essere descritta con una distribuzione di probabilità (50% testa e 50% croce). Ma questo *non* significa che i movimenti fisici siano impredicibili. La meccanica classica può essere usata per calcolare esattamente come ogni moneta atterrerà, se le forze agenti su di essa sono conosciute. E la distribuzione testa/croce si allineerà con la distribuzione di probabilità (date forze iniziali casuali).

Einstein assunse che ci fossero delle variabili nascoste nella meccanica quantistica che sottostanno alle probabilità osservate. Né Einstein né altri sono mai riusciti a costruire una teoria della variabile nascosta soddisfacente, e la disuguaglianza di Bell illustra alcuni aspetti critici di questa ricerca. Anche se il comportamento di una particella individuale è casuale, è correlato al comportamento delle altre particelle. Quindi, se il principio di indeterminazione è il risultato di qualche processo deterministico, deve essere il caso che particelle poste a grande distanza trasmettano istantaneamente l'informazione a tutte le altre, per assicurare che ci sia una correlazione nel comportamento.

Voci correlate

- Effetto Pigmalione
- Dualismo onda-particella
- Interpretazione di Copenaghen
- Postulati della meccanica quantistica
- Teorie delle variabili nascoste
- Indeterminismo filosofico

Collegamenti esterni

- (**EN**) Quantizzazione di un pendolo
- (**EN**) Il principio di determinazione