

Perché, a distanza di 100 anni, anche i fisici non capiscono ancora la teoria  
quantistica di Sean Carroll/Nature febbraio 2025

La meccanica quantistica descrive una realtà controintuitiva in cui l'atto di osservazione influenza quello che viene osservato. E pochi scienziati sono d'accordo su che cosa significhi.

Ognuno di noi ha il suo esempio preferito di un trucco che riesce a fare un determinato lavoro in modo affidabile, anche se non ne capisce il motivo. Un tempo poteva essere schiaffeggiare sulla parte superiore del televisore quando l'immagine diventava sfocata. Oggi potrebbe essere spegnere e riaccendere il computer.

La meccanica quantistica, la teoria più importante e di successo della fisica moderna, è così. Funziona meravigliosamente, spiegando cose come i laser e la chimica, il bosone di Higgs e la stabilità della materia. Ma i fisici non sanno perché. O almeno, se alcuni di noi pensano di saperlo, la maggior parte degli altri non è d'accordo.

La caratteristica peculiare della teoria quantistica è che il modo in cui descriviamo i sistemi fisici è diverso da quello che vediamo quando li osserviamo. Le regole dei libri di testo della meccanica quantistica devono quindi invocare processi speciali per descrivere la "misurazione" o l'"osservazione", a differenza di ogni precedente struttura della fisica. Come campo, la fisica non ha un consenso sul perché di questa situazione, né sul suo significato.

I primi accenni al comportamento quantistico in natura si ebbero nei lavori dei fisici Max Planck nel 1900 e Albert Einstein nel 1905. Planck ed Einstein dimostrarono che alcune proprietà della luce potevano essere meglio spiegate immaginando che essa si presentasse in pezzi discreti, simili a particelle, piuttosto che come onde lisce come quelle rappresentate dall'elettromagnetismo classico. Ma le loro idee non erano in grado di descrivere una teoria completa. Fu il fisico tedesco Werner Heisenberg a proporre per primo, nel 1925, una versione completa della meccanica quantistica. Più tardi, nello stesso anno, Max Born e Pascual Jordan diedero seguito a Heisenberg e Erwin Schrödinger produsse presto una formulazione indipendente della teoria.

È quindi giusto celebrare il 2025 come il vero centenario della teoria quantistica. Sebbene una tale commemorazione possa giustamente sottolineare un'ampia gamma di successi sperimentali mozzafiato, deve

lasciare spazio al riconoscimento delle domande fondamentali che rimangono senza risposta. La meccanica quantistica è un bellissimo castello, e sarebbe bello essere rassicurati sul fatto che non è costruito sulla sabbia.

Una rottura con il passato

Da quando Isaac Newton ha formulato la meccanica classica nel XVII secolo, le teorie fisiche hanno seguito uno schema preciso. Si ha un sistema in esame: forse un pianeta in orbita attorno a una stella, o un campo elettrico o una scatola di gas. In ogni momento, il sistema è descritto dal suo "stato", che comprende sia la configurazione attuale del sistema sia il suo tasso di cambiamento; per una singola particella priva di caratteristiche, ciò equivale alla sua posizione e velocità (o, equivalentemente, alla quantità di moto). Poi ci sono le equazioni del moto, che ci dicono come si evolverà il sistema, dato il suo stato attuale. Questa ricetta di base ha funzionato per tutto, dalla gravità newtoniana fino alle teorie della relatività di Einstein che, come la teoria quantistica, sono un prodotto dell'inizio del XX secolo. Ma con l'avvento della meccanica quantistica, la ricetta è improvvisamente fallita.

**Il fallimento del paradigma classico può essere ricondotto a un unico, provocatorio concetto: la misurazione.** L'importanza dell'idea e della pratica della misurazione è stata riconosciuta dagli scienziati che lavorano da quando esistono gli scienziati che lavorano. Ma nelle teorie pre-quantistiche il concetto di base era dato per scontato. Si presumeva che qualsiasi quantità fisicamente reale postulata da una teoria avesse valori specifici in una particolare situazione. Se si voleva, si poteva andare a misurarle. Uno sperimentatore approssimativo poteva produrre errori di misura significativi o disturbare il sistema durante la misurazione, ma queste non erano caratteristiche ineluttabili della fisica stessa. Impegnandosi di più, si poteva misurare le cose con la delicatezza e la precisione desiderate, almeno per quanto riguarda le leggi della fisica.

La meccanica quantistica racconta una storia molto diversa. **Mentre nella fisica classica una particella come l'elettrone ha una posizione e una quantità di moto reali e oggettive in un dato momento, nella meccanica quantistica queste quantità, in generale, non "esistono" in modo oggettivo prima della misurazione. La posizione e la quantità di moto sono cose che possono essere osservate, ma non sono fatti preesistenti.** Questa è una distinzione importante. L'implicazione più evidente di questa situazione è il principio di indeterminazione di Heisenberg, introdotto nel 1927, secondo il quale non

esiste uno stato in cui un elettrone possa trovarsi e per il quale si possano prevedere perfettamente sia la sua posizione sia la sua quantità di moto in anticipo.

La teoria quantistica descrive invece lo stato di un sistema in termini di funzione d'onda, un concetto introdotto da Schrödinger nel 1926, insieme alla sua omonima equazione che descrive come il sistema cambia nel tempo. Per il nostro singolo elettrone, la funzione d'onda è un numero assegnato a ogni posizione in cui potremmo osservare l'elettrone – un'onda, in altre parole, che potrebbe essere per lo più localizzata vicino a un nucleo atomico o diffusa nello spazio.

Dove le cose si complicano è nella relazione tra la funzione d'onda e le quantità osservabili, come la posizione e la quantità di moto, che potremmo voler misurare. La risposta fu suggerita da Born poco dopo l'articolo originale di Schrödinger. Secondo l'interpretazione di Born, non possiamo mai prevedere con precisione il risultato di una misurazione quantistica. Possiamo invece determinare la probabilità di ottenere un particolare risultato per la posizione di un elettrone, per esempio calcolando il quadrato della funzione d'onda in quella posizione. Questa ricetta ha completamente ribaltato l'ideale di un universo deterministico e a orologeria che regnava fin dai tempi di Newton.

A posteriori, è impressionante la rapidità con cui alcuni fisici riuscirono ad accettare questo cambiamento. Alcuni, non tutti. Luminari come Einstein e Schrödinger non erano soddisfatti del nuovo consenso quantistico. Non è che non lo capissero, ma pensavano che le nuove regole dovessero essere dei trampolini di lancio verso una teoria ancora più completa.

La comparsa dell'indeterminismo è spesso rappresentata come la loro principale obiezione alla teoria quantistica: "Dio non gioca a dadi con l'universo", secondo la memorabile frase di Einstein. Ma le vere preoccupazioni erano più profonde. In particolare, Einstein si preoccupava della località, l'idea che il mondo consista di cose esistenti in luoghi specifici dello spazio-tempo, che interagiscono direttamente con le cose vicine. Era anche preoccupato per il realismo, l'idea che i concetti della fisica corrispondano a caratteristiche del mondo realmente esistenti, invece di essere semplici convenienze di calcolo.

La critica più aspra di Einstein apparve nel famoso documento EPR del 1935 – che prende il nome da lui e dai suoi coautori Boris Podolsky e Nathan Rosen

- con il titolo "la descrizione quantomeccanica della realtà fisica può essere considerata completa?". Gli autori risposero negativamente a questa domanda, sulla base di un fenomeno quantistico cruciale che evidenziarono e che divenne noto come **entanglement**.

Se abbiamo una singola particella, la funzione d'onda assegna un numero a ogni possibile posizione che essa può assumere. Secondo la regola di Born, la probabilità di osservare quella posizione è il quadrato del numero. Ma se abbiamo due particelle, non abbiamo due funzioni d'onda; la meccanica quantistica assegna un unico numero a ogni possibile configurazione simultanea del sistema di due particelle. Via via che consideriamo sistemi sempre più grandi, essi continuano a essere descritti da un'unica funzione d'onda, fino alla funzione d'onda dell'intero universo.

Di conseguenza, la probabilità di osservare una particella da qualche parte può dipendere dal luogo in cui osserviamo un'altra particella, e questo rimane vero indipendentemente dalla distanza tra le due. L'analisi EPR mostra che potremmo avere una particella qui sulla Terra e un'altra su un pianeta distante anni luce, e la nostra previsione di ciò che misureremo sulla particella lontana potrebbe essere "immediatamente" influenzata da ciò che misuriamo sulla particella vicina.

Le virgolette servono a ricordarci che, **secondo la teoria speciale della relatività, anche il concetto di "nello stesso momento" non è ben definito per punti distanti nello spazio**, come Einstein sapeva meglio di chiunque altro. **L'entanglement sembra andare contro i precetti della relatività speciale, in quanto implica che l'informazione viaggia più veloce della luce**: in quale altro modo la particella lontana può "sapere" che abbiamo appena effettuato una misurazione?

In realtà non possiamo usare l'entanglement per comunicare a grandi distanze. Misurando la nostra particella quantistica qui, ora sappiamo qualcosa su ciò che verrà osservato lontano, ma chiunque sia effettivamente lontano non ha accesso alla nostra conoscenza, quindi non è avvenuta alcuna comunicazione. Ma c'è almeno una certa tensione tra il modo in cui la teoria quantistica descrive il mondo e il modo in cui pensiamo che lo spazio-tempo funzioni nella relatività einsteiniana.

Recuperare la realtà

I tentativi di risolvere questa tensione si sono moltiplicati, ma non c'è un chiaro consenso in vista. In effetti, permane un notevole disaccordo intorno

alla questione più centrale che possiamo pensare: la funzione d'onda quantistica dovrebbe rappresentare la realtà o è solo uno strumento che usiamo per calcolare la probabilità dei risultati sperimentali? Questa questione divise fundamentalmente Einstein e il fisico danese Niels Bohr nei famosi dibattiti che ebbero per decenni sul significato della meccanica quantistica. Einstein, come Schrödinger, era un realista convinto: voleva che le sue teorie descrivessero qualcosa che potessimo riconoscere come realtà fisica. Bohr, insieme a Heisenberg, era disposto a rinunciare a qualsiasi discorso su ciò che stava "realmente accadendo", concentrandosi invece sulla formulazione di previsioni su ciò che accadrà quando qualcosa viene misurato.

Quest'ultima prospettiva ha dato origine alle interpretazioni "epistemiche" della teoria quantistica. Il punto di vista di Bohr e Heisenberg è diventato noto come interpretazione di Copenhagen, molto vicina a ciò che i fisici insegnano oggi nei libri di testo. Le versioni moderne includono il Qbism, abbreviazione di quantum bayesianism (bayesianesimo quantistico), e la meccanica quantistica relazionale. Entrambe queste interpretazioni sottolineano come gli stati quantistici non debbano essere considerati in sé, ma solo in relazione a un osservatore, al processo di misurazione e al cambiamento degli stati di conoscenza durante tale processo.

Un aspetto positivo degli approcci epistemici è che le preoccupazioni per le influenze più veloci della luce evaporano. Quando un osservatore effettua una misurazione, aggiorna la propria conoscenza; nulla viaggia fisicamente da una particella entangled all'altra. Un aspetto negativo è che **questi approcci lasciano completamente aperta la questione di cosa sia veramente la realtà**, che è (o dovrebbe essere, si presume) importante per la fisica. Ciò è particolarmente problematico se si considera che la funzione d'onda si comporta certamente come un oggetto fisico in determinate circostanze. Per esempio, la funzione d'onda può interferire con se stessa, come dimostra l'esperimento della doppia fenditura. Una funzione d'onda che passa attraverso due fenditure strette, ricombinandosi dall'altra parte, interferisce in modo costruttivo o distruttivo a seconda delle oscillazioni dell'onda. Questo sembra certamente il comportamento di una cosa fisica reale.

L'alternativa è un approccio ontico, che accetta che lo stato quantistico rappresenti la realtà (almeno in parte). Il problema è che non "vediamo" mai la funzione d'onda in sé; la usiamo solo per fare previsioni su ciò che vediamo.

Possiamo pensare che la funzione d'onda rappresenti una sovrapposizione di molti possibili risultati di misurazione. Ma è difficile resistere, una volta effettuata una misurazione e registrato un risultato, al pensare a quel risultato come a ciò che è reale, non alla sovrapposizione astratta di possibilità che lo ha preceduto.

Esistono diversi modelli ontici della meccanica quantistica che conciliano la centralità delle funzioni d'onda con la loro difficile relazione con le osservazioni. Nei modelli a onde pilota o a variabili nascoste, sviluppati per la prima volta in modo esaustivo da David Bohm all'inizio degli anni cinquanta, le funzioni d'onda sono reali, ma esistono anche gradi di libertà aggiuntivi che rappresentano le posizioni reali delle particelle, e sono queste ultime a essere osservate. Nell'interpretazione everettiana, o dei molti mondi, introdotta da Hugh Everett un po' più tardi, gli osservatori diventano invischiati con i sistemi che misurano e ogni risultato consentito si realizza in rami separati della funzione d'onda, che vengono interpretati come mondi paralleli. Nei modelli a collasso oggettivo di vario tipo, la funzione d'onda si aggiusta occasionalmente (in violazione dell'equazione di Schrödinger convenzionale) per somigliare alla realtà semiclassica che osserviamo.

Sebbene questi approcci siano spesso considerati interpretazioni concorrenti della meccanica quantistica, si tratta di un'idea errata, poiché si tratta di teorie fisiche distinte. I modelli di collasso oggettivo hanno una serie di conseguenze sperimentali esplicite; la più drammatica è la violazione del principio di conservazione dell'energia quando la funzione d'onda collassa oggettivamente, cosa che potrebbe essere osservabile in sistemi atomici ultrafreddi. I test sono in corso, ma non sono ancora state trovate prove di questi effetti. Per quanto se ne sa, non esiste un esperimento che possa distinguere tra l'approccio a onde pilota e quello everettiano. (I sostenitori di ciascuno di essi tendono a sostenere che l'altro è semplicemente mal definito)

Quindi, i fisici non sono d'accordo su cosa sia esattamente una misurazione, se le funzioni d'onda rappresentino la realtà fisica, se esistano variabili fisiche oltre alla funzione d'onda o se la funzione d'onda obbedisca sempre all'equazione di Schrödinger. Nonostante tutto ciò, la meccanica quantistica moderna ci ha fornito alcune delle previsioni più precisamente verificate in tutta la scienza, con un accordo tra teoria ed esperimento che si estende a molti decimali.

La teoria dei **campi quantistici relativistici**, alla base di tutta la moderna fisica delle particelle, deve essere annoverata tra i più grandi successi della **meccanica quantistica**. Per tenere conto del fatto che le particelle possono essere create o distrutte e delle simmetrie della relatività, il suo punto di partenza sono i campi quantistici che si estendono in tutto lo spazio. Le regole della teoria quantistica implicano che le piccole vibrazioni in questi campi sembrano naturalmente collezioni di particelle individuali. Le influenze iterate di queste vibrazioni l'una sull'altra portano a una pletora di fenomeni osservabili che sono stati fantasticamente confermati dagli esperimenti, dal modo in cui i quark sono confinati per formare protoni e neutroni, all'esistenza del bosone di Higgs. Questa particella si origina dalle vibrazioni di un campo di Higgs che permea tutto lo spazio, conferisce massa alle altre particelle e spiega perché la forza nucleare debole ha un raggio d'azione così breve. Secondo la teoria dell'inflazione cosmologica, l'origine delle stelle e delle galassie potrebbe addirittura essere ricondotta a minuscole variazioni quantistiche nella densità dell'universo primordiale.

Non è tutto qui

Ma nonostante i suoi successi, la teoria quantistica dei campi ha i suoi enigmi. È noto che un semplice calcolo delle correzioni quantistiche della probabilità di scattering di due particelle spesso porta a risposte infinitamente grandi – una caratteristica indesiderabile per una probabilità. La fisica moderna ha affrontato questo problema utilizzando le "teorie di campo effettive", che cercano di descrivere i processi solo a energie e momenti (relativamente) bassi, e dalle quali i fastidiosi infiniti sono del tutto assenti.

Ma questo quadro ci lascia ancora con problemi di "naturalità". Nell'approccio della teoria del campo efficace, i parametri che osserviamo a basse energie rappresentano gli effetti combinati di processi inosservabili a energie molto elevate. Questa comprensione ci permette di prevedere quali dovrebbero essere i valori naturali di parametri come la massa di Higgs o la densità di energia del vuoto. Ma i valori osservati di questi numeri sono molto più bassi del previsto: un problema che attende ancora una soluzione convincente.

**C'è poi il problema più grande di tutti: la difficoltà di costruire una teoria quantistica fondamentale della gravità e dello spazio-tempo curvo.** La maggior parte dei ricercatori del settore ritiene che la meccanica quantistica in sé non necessiti di alcuna modifica; dobbiamo semplicemente capire come

inserire lo spazio-tempo curvo nella storia in modo coerente. Ma sembra che siamo molto lontani da questo obiettivo.

Nel frattempo, la miriade di manifestazioni della teoria quantistica continua a trovare applicazione in un numero crescente di tecnologie relativamente concrete. La chimica quantistica sta aprendo strade alla progettazione di prodotti farmaceutici avanzati, materiali esotici e immagazzinamento di energia. La metrologia e il rilevamento quantistico stanno permettendo di misurare quantità fisiche con una precisione senza precedenti, fino a rilevare il minuscolo dondolio di un pendolo causato dal passaggio di un'onda gravitazionale generata da buchi neri distanti un miliardo di anni luce. E naturalmente i computer quantistici promettono di eseguire alcuni calcoli a velocità che sarebbero impossibili se il mondo funzionasse secondo i principi classici.

Tutto questo è avvenuto senza un accordo completo sul funzionamento della meccanica quantistica. Storicamente, i progressi della tecnologia hanno spesso facilitato – o addirittura reso necessario – il miglioramento delle conoscenze fondamentali. Inventiamo continuamente nuovi modi per picchiare sul televisore chiamato realtà, rimanendo ottimisti sul fatto che un'immagine disturbata alla fine verrà messa a fuoco.

L'autore Sean Carroll è professore di filosofia naturale alla Johns Hopkins University di Baltimora, negli Stati Uniti, e autore di diversi libri di divulgazione.