

Fotografia di Caleb Charland

FISICA

# Il paradosso dei paradossi quantistici

Una nuova versione della teoria dei quanti fa piazza pulita dei bizzarri paradossi del mondo microscopico. Il prezzo da pagare? L'informazione quantistica esiste solo nella nostra immaginazione

*di Hans Christian von Baeyer*

**V**isto che può spiegare senza soluzione di continuità il comportamento della materia su scale che vanno da quella subatomica a quella astronomica, la meccanica quantistica è la più riuscita tra tutte le teorie fisiche. Ma anche la più strana. Nel mondo quantistico le particelle sembrano essere in due posti nello stesso momento, l'informazione sembra viaggiare più veloce della luce e i gatti possono essere vivi e morti nello stesso istante.

Da novant'anni i fisici combattono con gli apparenti paradossi del mondo quantistico, e non hanno ancora ottenuto grandi successi. A differenza dell'evoluzione e della cosmologia, le cui verità sono state inglobate nel panorama intellettuale generale, la meccanica quantistica è ancora oggi considerata (addirittura da molti fisici) una bizzarra anomalia, un potente ricettario per costruire dispositivi ma utile per poco altro. La profonda confusione sul

senso della teoria dei quanti continuerà ad alimentare la percezione che i concetti profondi sul nostro mondo che questa teoria cerca di comunicarci siano irrilevanti per la vita quotidiana e troppo bizzarri per avere realmente importanza.

Nel 2001 un gruppo di ricercatori ha cominciato a sviluppare un modello che elimina i paradossi quantistici o li riformula in un modo meno problematico. Il modello, noto come **bayesianismo quantistico**, o **QBism**, ripensa l'entità fondamentale che si trova alla base delle stranezze quantistiche: la funzione d'onda.

Nella visione tradizionale della meccanica quantistica, un oggetto come un elettrone è rappresentato dalla sua funzione d'onda, un'espressione matematica che ne descrive le proprietà. Se vogliamo prevedere come si comporterà l'elettrone calcoliamo come evolve nel tempo la sua funzione d'onda. Il risultato del calcolo dà la probabilità che l'elettrone abbia una certa proprietà (come trovarsi in una certa posizione e non in un'altra). Ma i problemi arrivano quando i fisici si comportano come se la funzione d'onda fosse reale.

Il **QBism**, che unisce la meccanica quantistica al calcolo delle probabilità, sostiene che la funzione d'onda non ha una realtà oggettiva. Il **QBism** considera invece la funzione d'onda come un manuale di istruzioni, uno strumento matematico che un osservatore sfrutta per prendere decisioni migliori sul mondo che lo circonda: il mondo quantistico. Più specificamente, l'osservatore sfrutta la funzione d'onda per assegnare un valore alla propria fiducia nel fatto che un sistema quantistico avrà una certa proprietà, sapendo che le proprie scelte e azioni individuali influenzeranno il sistema in un modo intrinsecamente incerto.

Un altro osservatore, usando una funzione d'onda che descrive il mondo come lo vede quella persona, potrebbe arrivare a una conclusione completamente diversa sullo stesso sistema quantistico. Un sistema, o un evento, può avere tante diverse funzioni d'onda quanti sono gli osservatori. Dopo che gli osservatori hanno comunicato tra loro e hanno modificato le proprie funzioni d'onda tenendo conto della conoscenza acquisita, emerge una visione coerente del mondo.

Vista così, la funzione d'onda «potrebbe essere l'astrazione più potente mai scoperta», secondo N. David Mermin, fisico teorico della Cornell University recentemente convertito al **QBism**.

## Il quanto irreal

L'idea secondo cui la funzione d'onda non sarebbe reale risale agli anni trenta e agli scritti del danese Niels Bohr, uno dei padri fondatori della meccanica quantistica. Bohr la considerava parte del formalismo «puramente simbolico» della teoria quantistica: uno strumento di calcolo e nulla più. Il **QBism** è il primo modello a dare un sostegno matematico all'affermazione di Bohr, salda la teoria quantistica alla statistica bayesiana, una disciplina che ormai ha 200 anni e che definisce la «probabilità» più o meno come «fiducia soggettiva». La statistica bayesiana fornisce anche regole mate-

**Hans Christian von Baeyer** è un fisico teorico che si occupa di particelle e Chancellor Professor emerito al College of William and Mary, dove ha insegnato per 38 anni. È membro dell'American Physical Society, autore di sei libri divulgativi e vincitore del Science Writing Award dell'American Institute of Physics (due volte), di un Westinghouse AAAS Writing Award e di un National Magazine Award per i saggi e la critica.



matiche formali sul modo in cui aggiornare la propria fiducia soggettiva alla luce di nuove informazioni. Per i sostenitori del **QBism**, interpretando la funzione d'onda come una fiducia soggettiva sottoposta a revisione secondo le regole della statistica bayesiana, i misteriosi paradossi della meccanica quantistica spariscono.

Pensiamo di nuovo all'elettrone. Sappiamo che ogni volta che rileviamo un elettrone lo troviamo in una specifica posizione. Ma, mentre non guardiamo, la funzione d'onda dell'elettrone può espandersi, rappresentando la possibilità che l'elettrone sia in diversi posti contemporaneamente. Adesso effettuiamo una nuova misurazione: troveremo ancora l'elettrone in una specifica posizione. Secondo l'interpretazione usuale, l'osservazione fa sì che la funzione d'onda «collapsi» istantaneamente a un singolo valore.

Dato che il collasso avviene ovunque nello stesso identico istante, sembra violare il principio di località, l'idea cioè che ogni variazione in un oggetto debba essere provocata da un altro oggetto nei suoi immediati dintorni. Questo, a sua volta, porta ad alcune situazioni enigmatiche che Einstein definiva «inquietante azione a distanza».

Fin dalla nascita della meccanica quantistica, i fisici considerano il collasso della funzione d'onda come un aspetto paradossale e preoccupante della teoria. I suoi scomodi misteri spinsero i ricercatori a sviluppare versioni alternative della meccanica quantistica, con alterno successo (si veda il box a p. 36).

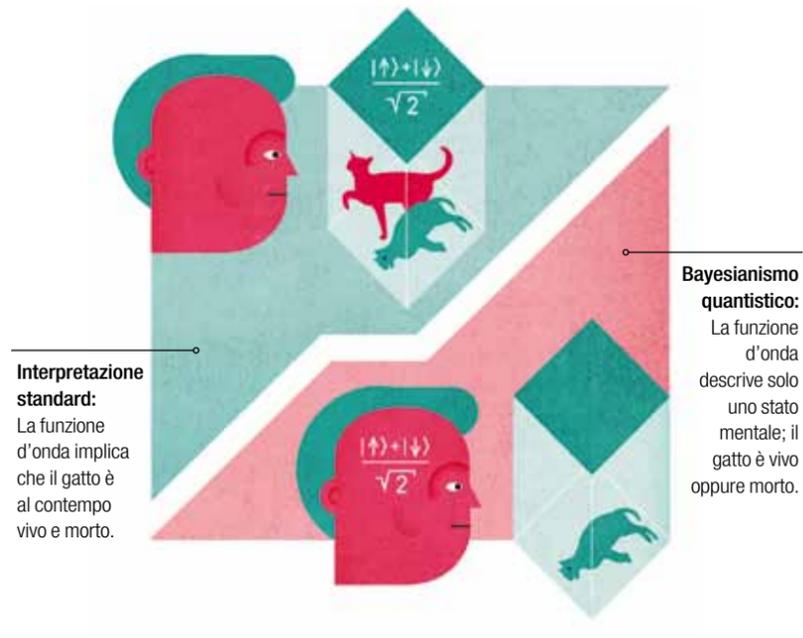
Eppure il **QBism** afferma che non c'è alcun paradosso. Il collasso della funzione d'onda è solo il fatto che un osservatore, in modo improvviso e discontinuo, rivede la sua assegnazione di probabilità in base a nuove informazioni, come un medico rivedrebbe la prognosi del cancro di un paziente sulla base di una nuova TAC. Il sistema quantistico non ha sperimentato alcun cambiamento strano e inspiegabile; il cambiamento è nella funzione d'onda, che è scelta dall'osservatore per riassumere le proprie attese.

Possiamo applicare questo modo di pensare al famoso paradosso del gatto di Schrödinger. Il fisico Erwin Schrödinger immaginò una scatola sigillata con dentro un gatto vivo, una fiala di veleno e un atomo radioattivo. Secondo le leggi della meccanica quantistica, l'atomo ha il 50 per cento di probabilità di decadere entro un'ora. Se l'atomo decade, un martello frantuma la fiala e libera il veleno, uccidendo il gatto. Altrimenti, il gatto vive.

Adesso effettuiamo l'esperimento, ma senza guardare all'inter-

## La cura per l'assurdità quantistica

Per capire la differenza tra il **bayesianismo quantistico** e l'interpretazione tradizionale della meccanica quantistica, consideriamo il famoso esempio del gatto di Schrödinger. Nella versione classica si chiudono in una scatola un gatto e una fiala di veleno. Un evento quantistico che si verifica con una probabilità del 50 per cento fa rompere (o no) la fiala e uccide (o no) il gatto. Prima che un osservatore guardi all'interno della scatola la funzione d'onda che descrive il sistema è in una sovrapposizione degli stati «vivo» e «morto», e così lo stesso gatto. L'osservazione fa collassare il gatto in uno stato o nell'altro. Nel **QBism**, invece, la funzione d'onda è semplicemente una descrizione dello stato mentale dell'osservatore. La sovrapposizione si applica solo a questo stato, e a nient'altro. Il gatto è vivo oppure morto; l'osservazione svela quale dei due.



**Interpretazione standard:**  
La funzione d'onda implica che il gatto è al contempo vivo e morto.

**Bayesianismo quantistico:**  
La funzione d'onda descrive solo uno stato mentale; il gatto è vivo oppure morto.

no della scatola. Dopo che è trascorsa un'ora, la teoria quantistica tradizionale affermerebbe che la funzione d'onda dell'atomo è in una sovrapposizione di due stati: decaduto e non decaduto. Ma dato che non abbiamo ancora osservato che cosa c'è nella scatola, la sovrapposizione si estende ulteriormente: anche il martello è in sovrapposizione, e così la fiala di veleno. E la cosa più grottesca è che il formalismo standard della meccanica quantistica implica che anche il gatto sia in sovrapposizione: è vivo e morto allo stesso tempo.

Argomentando che la funzione d'onda è una proprietà soggettiva dell'osservatore, anziché una proprietà oggettiva del gatto nella scatola, il **QBism** elimina il rompicapo. La teoria afferma che ovviamente il gatto è o vivo o morto (ma non entrambi); certo, la sua funzione d'onda rappresenta una sovrapposizione di vivo e morto, tuttavia una funzione d'onda è solo una descrizione delle opinioni dell'osservatore. Affermare che il gatto sia allo stesso tempo vivo e morto è come se un appassionato di *baseball* dicesse che la squadra dei New York Yankees è paralizzata in una sovrapposizione di vinto e perso fino a quando lui non guarda il tabellone del punteggio. Sarebbe un'assurdità, il delirio di un megalomane che pensa che il suo stato mentale personale abbia effetto sul mondo.

La speranza è che, eliminando i paradossi, il **QBism** aiuti i fisici

a concentrarsi sugli aspetti fondamentali della teoria quantistica – quali che possano essere – ed «eviti che perdano tempo a porsi domande sciocche su enigmi immaginari», dice Mermin.

## Il piantagrane

Il **QBism** è nato in un breve articolo, pubblicato nel gennaio 2002 e intitolato *Quantum Probabilities as Bayesian Probabilities*, di Carlton M. Caves, dell'Università del New Mexico, Christopher A. Fuchs, all'epoca ai Bell Labs a Murray Hill, nel New Jersey, e Ruediger Schack, dell'Università di Londra. Tutti e tre sono esperti della teoria dell'informazione quantistica, e le loro rispettive affiliazioni presso un dipartimento di fisica, un laboratorio industriale e un dipartimento di matematica mettono in evidenza la natura interdisciplinare del loro campo.

Da allora Fuchs è passato al Perimeter Institute, in Ontario, ed è diventato il principale portavoce del **QBism**. È un uomo con un carattere allegro e un modo di fare cordiale. Un ciuffo ribelle color sabbia fa da *pendant* al suo umorismo esuberante e sfrontato. I suoi colleghi non si stupiscono quando apre un lavoro con le parole: «In questo articolo cerco di piantare amichevolmente delle grane».

L'attività di Fuchs è segnata dalla convinzione che la scienza sia essenzialmente un'attività comunitaria e che si arrivi a conclusioni profonde solo attraverso un vigoroso scontro intellettuale. È attivo in modo impetuoso: si trascina il computer

portatile in uno zaino malridotto, organizza convegni, presiede comitati scientifici e tiene lezioni universitarie.

Con questo spirito Fuchs ha fondato una nuova forma di letteratura: nel 2011 la Cambridge University Press ha pubblicato i suoi scambi di posta elettronica con scienziati di tutto il mondo in un libro di 600 pagine dal titolo *Coming of Age with Quantum Information*. Mentre segue il travaglio che ha portato alla nascita del **QBism**, il volume apre una finestra sul modo in cui la fisica teorica è generata da esseri umani veri, in carne e ossa, non le creature bidimensionali di Wikipedia. Il libro documenta anche la convinzione di Fuchs, contraria a quella di molti scienziati, del fatto che la filosofia sia importante, non solo per come influenza la fisica, ma anche nel modo in cui si basa sulle scoperte più profonde della fisica... o dovrebbe farlo.

## Probabilità possibili

L'apertura di Fuchs verso le preoccupazioni della filosofia diventa chiara se consideriamo che il **QBism** ci costringe a riconsiderare che cosa intendiamo per probabilità. La probabilità è come il tempo: sappiamo che cos'è, fino a quando non ci chiedono di definirla. Certo, il 50 per cento di probabilità di ottenere testa con una moneta non truccata dice qualcosa su 100 lanci, ma come ci aiuta l'intuito a capire il senso di un'affermazione quale «la proba-

### IN BREVE

La **meccanica quantistica** è una teoria che ha ottenuto successi incredibili, ma anche piena di paradossi. Un modello recente, detto **bayesianismo quantistico** (o **QBism**), unisce la teoria quantistica al calcolo delle probabilità nel tentativo di

eliminare i paradossi o di porli in forma meno problematica. Il **QBism** **riconsidera l'oggetto** alla base dei paradossi quantistici: la funzione d'onda. Gli scienziati usano le funzioni d'onda per calcolare la probabilità che una particella abbia

una certa proprietà, come trovarsi in una determinata posizione. Ma quando si assume che una funzione d'onda sia reale emergono paradossi. Il **QBism** **afferma** che la funzione d'onda è solo uno strumento matematico usato da un osservatore

per assegnare il proprio grado di fiducia personale nel fatto che un sistema quantistico abbia una certa proprietà. In questa ottica, la funzione d'onda non esiste, si limita a riflettere lo stato mentale soggettivo di un individuo.

Illustrazioni di Anna-Kaisa Jormanainen

## Quattro interpretazioni della meccanica quantistica

Che cosa accade veramente nel mondo dei quanti? Gli scienziati hanno proposto almeno una decina di diverse interpretazioni di che cosa significhi il formalismo matematico. Il bayesianismo quantistico è forse la più radicale; queste quattro alternative sono tra le più diffuse.



**L'INTERPRETAZIONE DI COPENHAGEN**, sviluppata principalmente da Niels Bohr e Werner Heisenberg all'istituto del primo a Copenhagen, è la versione ortodossa della meccanica quantistica. Le proprietà misurabili di un sistema come un atomo formano, nel complesso, il suo stato quantistico. A sua volta questo stato è descritto o da una matrice, che somiglia a un foglio di calcolo, o da una formula detta funzione d'onda, che rappresenta un quadro delle possibilità. Il contatto con il mondo reale si ottiene con la regola di Born, una ricetta per ottenere probabilità misurabili per un dato sistema quantistico (e per la quale Max Born, mentore di Heisenberg, ricevette il premio Nobel). Nel corso di una misurazione, un osservatore provoca un collasso dello stato quantico in un nuovo stato che descrive l'effettivo esito dell'esperimento. Il collasso istantaneo implica che le azioni possano avere effetti che si muovono a velocità maggiori della luce.



**L'INTERPRETAZIONE DEL CAMPO GUIDA**. Molti fisici, tra i quali per un po' di tempo Albert Einstein, apprezzarono l'idea di riscrivere l'apparato matematico della meccanica quantistica in modo da includere un vero campo di forze fisico che controllasse il moto di una particella. Purtroppo questa immagine interessante viene meno appena sono in gioco numerose particelle (diciamo  $N$ ). Non si muovono nel nostro familiare spazio tridimensionale, ma in uno spazio astratto con  $3N$  dimensioni. Più problematico è il fatto che il campo guida esercita una forza con un'azione a distanza, in cui gli effetti fisici vengono trasmessi istantaneamente su grandi distanze.



**L'INTERPRETAZIONE DEI MOLTI MONDI**. Il modo più diretto per evitare l'enigma del collasso di uno stato quantistico consiste nell'eliminarlo. Questa mossa drastica ha raccolto in anni recenti molti sostenitori. L'interpretazione dei molti mondi postula un singolo stato quantico del mondo, che si evolve in modo continuo e prevedibile. Quando si effettua un esperimento per determinare quale tra due fenditure abbia attraversato un elettrone, per esempio, lo stato quantico non collassa su una delle fenditure. Quello che succede è che il mondo si biforca in due direzioni. Noi, osservatori nella vita vera, ci troviamo su uno dei rami e siamo ignari dell'altro. Così l'universo si ramifica come un albero fino a formare un immane multiverso in cui ogni possibile esito si verifica in uno tra un'infinità di differenti universi, tutti reali. I principali difetti di questa interpretazione, a parte quello che pretende dalla nostra immaginazione, sono il fatto che non spiega le «misurazioni» che portano a una biforcazione e la sua difficoltà nel giustificare la regola di Born.



**TEORIE DEL COLLASSO SPONTANEO**. Invece di eliminare il collasso provocato dall'osservatore, queste teorie postulano che i collassi siano naturali e avvengano spontaneamente nei sistemi quantistici, e diventino significativi quando il sistema interagisce con un oggetto macroscopico. Ma è necessaria l'invenzione di un nuovo meccanismo di collasso. Finché il meccanismo non potrà essere verificato sperimentalmente, è un'ipotesi misteriosa quanto il collasso indotto dall'osservatore di cui dovrebbe prendere il posto.

bilità che stasera piova è del 60 per cento», o della stima «55/45» del presidente Barack Obama sulle probabilità di successo dell'operazione bin Laden?

Nel corso degli ultimi tre secoli sono state sviluppate due definizioni contrastanti di probabilità, ognuna con numerose varianti. La versione moderna, ortodossa, chiamata probabilità frequentista, definisce la probabilità di un evento come la sua frequenza relativa in una serie di prove. Si ritiene che questo numero sia oggettivo e verificabile, e applicabile direttamente agli esperimenti scientifici. L'esempio tipico è «testa o croce»: in un gran numero di lanci circa metà daranno testa, e quindi la probabilità di ottenere testa è approssimativamente  $1/2$ . (Per evitare parole vaghe come «grande», «circa» e «approssimativamente», si affina la definizione in modo da richiedere un numero infinito di lanci, in cui la probabilità assume il suo valore esatto di  $1/2$ . Purtroppo a questo punto il valore diventa impossibile da verificare e così perde la sua pretesa di oggettività.) Per applicare questa definizione alle previsioni del tempo si potrebbero contare fenomeni meteorologici veri o simulati, ma per quanto riguarda l'intuizione del presidente Obama l'interpretazione frequentista è inutile: la missione bin Laden, ovviamente, non si può riprodurre.

Il punto di vista più vecchio, la probabilità bayesiana, prende nome dal pastore presbiteriano inglese del XVIII secolo Thomas Bayes, le cui idee furono perfezionate e diffuse dal fisico francese Pierre-Simon Laplace. Al contrario della probabilità frequentista,

quella bayesiana è soggettiva: è una misura del «grado di fiducia» nel fatto che un evento si verifichi. È un'indicazione numerica di quanto qualcuno scommetterebbe sull'esito di un evento. In casi semplici come i lanci di monete, le probabilità frequentista e bayesiana coincidono. Per la previsione di un fenomeno meteorologico o l'esito di un'azione militare, quella bayesiana, a differenza di quella frequentista, è libera di unire informazioni statistiche quantitative a stime intuitive basate sull'esperienza.

L'interpretazione bayesiana può affrontare facilmente casi singoli, su cui quella frequentista tace, ed evita le trappole dell'infinito, ma la sua vera potenza è più specifica. Sulla base di questa interpretazione le assegnazioni di probabilità sono soggette a cambiamenti perché i gradi di fiducia non sono fissi. Un meteorologo frequentista non avrebbe problemi a calcolare la probabilità di una precipitazione se la zona ha da molti anni un clima stabile e prevedibile. Ma nel caso di un cambiamento improvviso, come una siccità, per il quale ci sono pochi dati, un meteorologo bayesiano è attrezzato meglio per tener conto delle nuove informazioni e delle condizioni climatiche.

Al centro della teoria c'è una formula esplicita, il teorema di Bayes, per calcolare l'effetto di nuove informazioni sulla stima di una probabilità. Per esempio, quando si sospetta che un paziente abbia un tumore il medico assegna una probabilità iniziale, la «probabilità a priori», basata su dati come l'incidenza nota della malattia nella popolazione generale, la storia familiare del paziente e altri

fattori pertinenti. Ricevendo i risultati degli esami del paziente, il medico aggiorna poi questa probabilità usando il teorema di Bayes. Il numero ottenuto è il grado di fiducia personale del medico.

La maggior parte dei fisici dice di credere nella probabilità frequentista invece di quella bayesiana, semplicemente perché è stato insegnato loro a evitare la soggettività. Ma quando si tratta di formulare una previsione quello che vince è l'approccio bayesiano, afferma Marcus Appleby, matematico dell'Università di Londra, che attribuisce a Fuchs il merito di averlo convinto dell'importanza della probabilità bayesiana.

Appleby fa notare che considereremmo una follia partecipare a una lotteria se sapessimo che da dieci anni ogni settimana vince la stessa persona, sebbene un approccio rigidamente frequentista argomenterebbe che il risultato delle estrazioni precedenti non ha effetto su quelle future. In pratica, nessuno ignorerebbe quello che è successo nelle settimane precedenti. Il buon senso ci spingerebbe ad adottare il punto di vista bayesiano, ad aggiornare le nostre conoscenze e ad agire in base ai migliori dati disponibili.

**Affermare che il gatto di Schrödinger sia allo stesso tempo vivo e morto è un'assurdità, il delirio di un megalomane che pensa che il suo stato mentale personale abbia effetto sul mondo**

### Riscrivere le regole quantistiche

Anche se il QBism nega la realtà della funzione d'onda, non è una teoria nichilista che nega tutta la realtà, sottolinea il coautore del QBism, Schack. Il sistema quantistico esaminato da un osservatore è reale, sottolinea. Filosoficamente, spiega Mermin, il QBism propone una separazione, una frontiera tra il mondo in cui vive l'osservatore e la sua esperienza del mondo stesso: quest'ultima è descritta da una funzione d'onda.

Di recente Fuchs ha fatto un'importante scoperta matematica che potrà contribuire a rinsaldare il ruolo del QBism come valida interpretazione della probabilità e della meccanica quantistica. La scoperta riguarda la formula empirica, chiamata regola di Born, che dice agli osservatori come calcolare la probabilità di un evento quantistico usando la funzione d'onda. (In termini tecnici, la regola di Born afferma che possiamo misurare la probabilità di trovare un sistema quantistico con la proprietà  $X$  prendendo il quadrato del modulo della funzione d'onda associata a  $X$ .) Fuchs ha mostrato che la regola di Born si può riscrivere quasi completamente in termini di calcolo delle probabilità, senza fare riferimento a una funzione d'onda. La regola di Born era il ponte che collegava le funzioni d'onda ai risultati degli esperimenti; adesso Fuchs ha dimostrato che possiamo prevedere i risultati degli esperimenti usando le sole probabilità.

Per Fuchs la nuova espressione della regola di Born fornisce

un altro indizio del fatto che la funzione d'onda non sarebbe altro che uno strumento che dice agli osservatori come calcolare le loro opinioni soggettive, cioè le loro probabilità, sul mondo quantistico che li circonda. «Da questo punto di vista la regola di Born è un'aggiunta alla probabilità bayesiana, non nel senso che dà qualche tipo di probabilità più oggettiva, ma nel senso che fornisce ulteriori regole per guidare il comportamento quando si interagisce con il mondo fisico», scrive Fuchs.

La semplicità della nuova equazione è sbalorditiva. A parte un piccolo dettaglio, somiglia alla legge che dà la probabilità totale di un sistema, cioè il requisito logico che le probabilità di tutti i possibili esiti abbiano come somma 1: per esempio per il lancio di una moneta la probabilità di mostrare testa ( $1/2$ ) più la probabilità di mostrare croce ( $1/2$ ) devono dare 1. Il particolare che si discosta – l'unico riferimento alla meccanica quantistica in questa ricetta per come calcolare le probabilità in ambito quantistico – è la comparsa di  $d$ , la dimensione quantistica del sistema. «Dimensione», in questo caso, non si riferisce alla lunghezza o alla larghezza, ma al numero di stati che un sistema quantistico può occupare. Per esempio un singolo elettrone che può avere lo spin verso l'alto o verso il basso avrebbe una dimensione quantistica pari a due.

Fuchs sottolinea che la dimensione quantistica è un attributo intrinseco, irriducibile, che caratterizza la «natura quantistica» di un sistema, proprio come la massa di un oggetto ne caratterizza le proprietà gravitazionali e inerziali. Anche se  $d$  è implicita in tutti i calcoli della meccanica quantistica, la sua comparsa esplicita e vistosa in un'equazione fondamentale non ha precedenti. Con la nuova veste della regola di Born, Fuchs spera di aver scoperto la chiave per un nuovo modo di vedere la meccanica quantistica. «Mi diverto – confessa – all'idea che la regola di Born sia "l'assioma" più significativo di tutta la teoria quantistica».

### Una nuova realtà

Una delle critiche al QBism è che non è in grado di spiegare i fenomeni macroscopici in termini di quelli microscopici, più primitivi, come fa la meccanica quantistica tradizionale. Per il QBism il modo più diretto di rispondere a questa critica è raggiungere l'obiettivo dichiarato di costruire la teoria standard della meccanica quantistica sulla base di nuove ipotesi convincenti.

Questo obiettivo deve ancora essere raggiunto, ma già adesso il QBism offre un nuovo quadro della realtà fisica. Interpretando la funzione d'onda come grado di certezza personale, dà un preciso significato matematico all'intuizione di Bohr secondo cui «la fisica si occupa di quello che possiamo dire della natura». E i sostenitori del QBism accolgono il principio secondo cui, fino a quando non si è effettuato un esperimento, il suo esito semplicemente non esiste.

Prima della misurazione di velocità o posizione di un elettrone, per esempio, l'elettrone non ha velocità o posizione. È la misurazione che fa esistere la proprietà in questione. Come dice Fuchs: «Con ogni misurazione effettuata da uno sperimentatore, il mondo è plasmato un po' di più, prendendo parte a una sorta di nascita». In questo modo partecipiamo attivamente alla creazione continua dell'universo. ■

### PER APPROFONDIRE

Quantum Mechanics: Fixing the Shifty Split. Mermin N.D., in «Physics Today», Vol. 65, n. 7, p. 8, luglio 2012.

QBism, the Perimeter of Quantum Bayesianism. Fuchs C.A., <http://arxiv.org/abs/1003.5209>.

Interview with a Quantum Bayesian. Fuchs C.A., <http://arxiv.org/abs/1207.2141>.