Sfida quantistica alla relatività speciale

di David Z. Albert e Rivka Galchen*

"Le Scienze", 489, maggio 2009, pp. 40-47.

*Come molti effetti quantistici, l'*entanglement[1] *viola alcune delle più radicate intuizioni sul mondo. E forse minaccia i fondamenti della relatività speciale di Einstein.*

In sintesi: *Nell'universo come lo percepiamo, possiamo interagire solo con oggetti con cui veniamo in contatto. Quindi il modo "naturale" sembra locale. La meccanica quantistica, invece, contempla l'azione a distanza con una proprietà detta* entanglement, *in cui due particelle hanno un comportamento sincronizzato senza intermediari, è un fenomeno non locale. La non località non è solo controintuitiva. È un problema serio anche per la teoria einsteiniana della relatività speciale in quanto compromette la variabile tempo.*

Il nostro intuito alimenta da sempre un principio fondamentale: per muovere un sasso (o qualunque altro oggetto) dobbiamo toccarlo. O toccare un bastone che tocca il sasso. O dare un ordine che attraversa l'aria sotto forma di vibrazioni che raggiungono l'orecchio di una persona che ha un ramo con cui può toccare il sasso. E così via. Più in generale, intuiamo che le cose possono esercitare un effetto solo su altre cose che siano accanto a loro. Se A ha un effetto su B ma senza essere vicino a B, allora l'effetto deve essere indiretto, cioè deve essere qualcosa che viene trasmesso grazie a una catena di eventi in cui ciascun evento porta direttamente al successivo, in modo da coprire la distanza tra A e B. Ogni volta che ci sembra di aver trovato un'eccezione all'intuizione, per esempio interruttori che accendono i lampioni della città (ma poi ci

---

*

DAVID Z. ALBERT E RIVKA GALCHEN sono entrambi docenti alla Columbia University: uno insegna come la fisica racconta la storia del mondo, l'altra come scrivere storie. Albert ha la cattedra Frederick E. Woodbridge di filosofia alla Columbia ed è autore di *Meccanica quantistica e senso comune*. (Adelphi, 2000). Galchen è professore associato nella sezione di scrittura della School of Arts della Columbia. Il suo primo romanzo, *Atmospheric Disturbances*, è stato pubblicato lo scorso giugno dalla casa editrice Farrar, Straus and Giroux.

[1] L'***entanglement* quantistico** o **correlazione quantistica** è un fenomeno quantistico, privo di analogo classico, in cui ogni stato quantico di un insieme di due o più sistemi fisici dipende dagli stati di ciascuno dei sistemi che compongono l'insieme, anche se questi sistemi sono separati spazialmente. Il termine viene a volte reso in italiano con **non-separabilità** o **non-località**, in quanto uno stato *entangled* implica la presenza di correlazioni tra le quantità fisiche osservabili dei sistemi coinvolti. Per esempio, è possibile realizzare un sistema costituito da due particelle il cui stato quantico sia tale che – **qualunque sia il valore di una certa proprietà osservabile assunto da una delle due particelle** – il corrispondente valore assunto dall'altra particella sarà opposto al primo, nonostante i postulati della meccanica quantistica, secondo cui predire il risultato di queste misure sia impossibile. Di conseguenza in presenza di *entanglement* la misura effettuata su un sistema sembra influenzare istantaneamente lo stato di un altro sistema: in realtà, è facile mostrare che la misurazione non c'entra niente; quanto detto ha significato solamente in relazione al risultato della misurazione, non all'atto del misurare. Esiste un teorema che sancisce l'impossibilità di trasmettere, tramite questa proprietà, informazione ad una velocità superiore a quella della luce. Per meglio dire, non è possibile sfruttare affatto questa proprietà per nessun tipo di trasmissione, proprio perché è impossibile determinare l'esito di una misura tramite l'atto del misurare. (da Wikipedia).

rendiamo conto che il processo avviene grazie a cavi elettrici) o le trasmissioni radiofoniche (ma poi ci rendiamo conto che si propagano grazie alle onde radio), ci accorgiamo che pensandoci meglio non si tratta affatto di un'eccezione. Ovvero, non troviamo un'eccezione nell'esperienza quotidiana del mondo.

Indichiamo questa intuizione come «principio di località».

La meccanica quantistica ha ribaltato molte intuizioni, ma nessuna tanto radicata quanto la località. E questo ribaltamento porta con sé una minaccia, ancora irrisolta, alla relatività speciale di Einstein, un fondamento della fisica moderna.

La cosa da un altro mondo

Facciamo un passo indietro. Prima dell'avvento della meccanica quantistica, e anzi fin dall'inizio dello studio scientifico della natura, si riteneva che in linea di principio fosse possibile ottenere una descrizione completa del mondo fisico descrivendo, una per una, ognuna delle componenti fisiche più piccole e più elementari del mondo. Si sarebbe potuta esprimere l'intera storia del mondo come somma delle storie di queste componenti.

La meccanica quantistica contravviene a questa opinione.

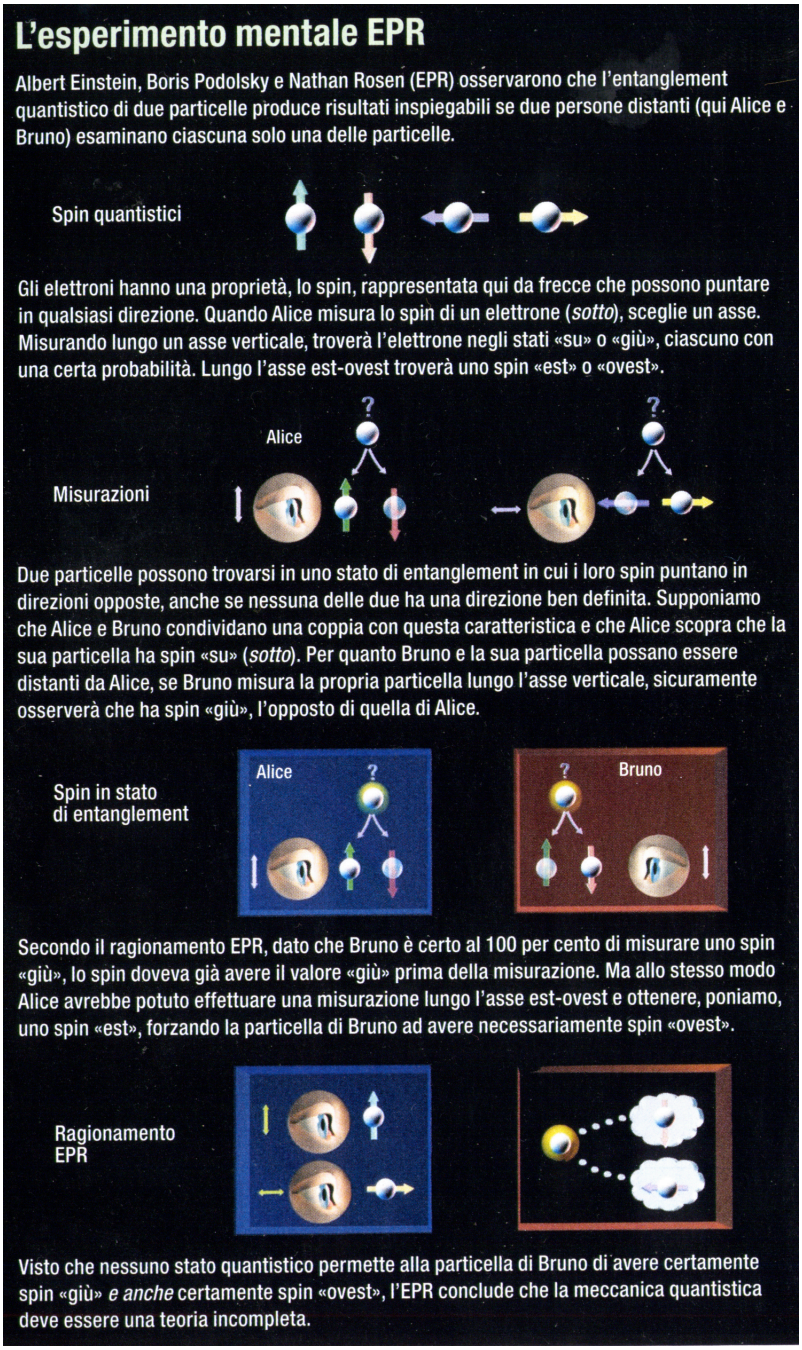
Le proprietà reali, misurabili, fisiche degli aggregati di particelle possono, in modo concreto, andar oltre o sfuggire o non aver niente a che vedere con la somma delle proprietà delle singole particelle. Per esempio, secondo la meccanica quantistica è possibile disporre due particelle in modo che si trovino a mezzo metro di distanza e che allo stesso tempo nessuna delle due abbia una posizione definita. Anzi, l'approccio standard alla fisica quantistica, l'interpretazione di Copenhagen elaborata dal grande fisico danese Niels Bohr all'inizio del secolo scorso e tramandata per generazioni di fisici, sottolinea che noi non ignoriamo i dettagli sulle posizioni precise delle singole particelle; semplicemente questi dettagli non esistono. Chiedere la posizione di una specifica particella è privo di senso come, per esempio, chiedere il colore del numero cinque. Il problema non è epistemologico (che cosa conosciamo) ma ontologico (come sono le cose).

I fisici dicono che le particelle correlate in questo modo sono in uno stato di *entanglement* quantistico. La proprietà sottoposta all'*entanglement* non è necessariamente localizzata: due particelle possono ruotare su se stesse in direzioni opposte ma senza che nessuna delle due ruoti esplicitamente in senso orario. Oppure una delle particelle potrebbe essere eccitata, ma nessuna delle due è esplicitamente quella eccitata. L'*entanglement* può connettere due particelle indipendentemente da dove si trovino, quali siano e dalle forze che esercitano l'una sull'altra: in linea di principio, potrebbero benissimo essere un elettrone e un neutrone agli estremi opposti della galassia. Quindi l'*entanglement* dà luogo a una sorta di intimità senza precedenti all'interno della materia.

L'entanglement è alla base di nuove discipline molto promettenti, informatica e crittografia quantistica, con cui risolvere alcuni problemi che vanno oltre le possibilità concrete di un computer ordinario e comunicare con la certezza di essere al sicuro da intercettazioni (si veda *Il calcolo quantistico con gli ioni* di Christopher R. Monroe e David J. Wineland, in «Le Scienze» n. 482, ottobre 2008).

Ma l'entanglement sembra anche implicare il fenomeno inquietante e controintuitivo detto «non località»: causare un effetto fisico su un corpo senza toccarlo e senza toccare una sequenza di entità fisiche che vanno da noi a lui. La non località implica che un pugno a Napoli può rompere un naso a Milano senza toccare nessun altro oggetto fisico (nessuna molecola d'aria, nessun elettrone che percorre un cavo, nessun segnale luminoso) nelle regioni che si trovano sul percorso.

La maggiore preoccupazione sulla non località, oltre alla sua enorme stranezza intrinseca, è che insinua una grave minaccia nei confronti della relatività speciale come la conosciamo. Negli ultimi anni questa vecchia preoccupazione, ormai ammessa nell'alveo della seria riflessione in campo fisico, è al centro di discussioni che potrebbero smantellare, deformare, far ripensare, consolidare o mandare in rovina i fondamenti della fisica.



Revisioni radicali della realtà

Einstein aveva parecchi dubbi sulla meccanica quantistica. Il cruccio fin troppo citato a proposito dei suoi elementi aleatori («Dio non gioca ai dadi») era solo uno dei tanti. Ma l'unica obiezione che avanzò formalmente, su cui scrisse un articolo, riguardava la bizzarria dell'entanglement quantistico. Questa obiezione è il nucleo di quello che è ora noto come paradosso EPR, dal nome dei tre autori, Einstein e i suoi colleghi Boris

Podolsky e Nathan Rosen (si veda il box a fronte). Nel loro articolo del 1935 *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete*? («La descrizione quantistica della realtà fisica si può considerare completa?») ragionavano rigorosamente per rispondere «no» alla domanda.

Il ragionamento faceva uso in modo fondamentale di una specifica istruzione dell'algoritmo quantistico per prevedere i risultati degli esperimenti. Supponiamo di misurare la posizione di una particella in *entanglement* quantistico con un'altra particella in modo che nessuna delle due, singolarmente, abbia una posizione precisa. Quando apprendiamo l'esito dell'esperimento modifichiamo la descrizione della prima particella perché ora sappiamo dove si trovava in un certo istante. Ma l'algoritmo richiede anche di modificare istantaneamente la descrizione della seconda particella, indipendentemente dalla distanza a cui si trova o da che cosa ci sia tra le due particelle.

L'*entanglement* era un elemento indiscusso dell'immagine del mondo che la meccanica quantistica presentava ai fisici, ma nessuno prima di Einstein ne aveva considerato molto le conseguenze. Einstein vide nell'*entanglement* non solo una stranezza, ma una fonte di dubbi. Lo trovò inquietante. In particolare, sembrava non locale.

All'epoca nessuno era pronto ad affrontare la possibilità che ci fossero veramente delle non località nell'universo, né Einstein né Bohr né nessun altro. Einstein, Podolsky e Rosen diedero per scontato che l'apparente non località della meccanica quantistica dovesse essere solo apparente, una sorta di anomalia matematica o scelta infelice di notazioni o, comunque, che fosse una conseguenza eliminabile dell'algoritmo: qualcosa di analogo a un'istruzione di una bizzarra ricetta di una torta che dica di togliere metà dello zucchero che era stato mescolato alla farina. Così come è possibile preparare la stessa torta con una ricetta diversa che non richiede di togliere ingredienti, allo stesso modo si potevano concepire previsioni quantistiche che non richiedessero passi non locali.

E nel loro articolo presentavano un ragionamento che mostrava che se (come tutti supponevano) non esistono nel mondo autentiche non località fisiche e se le previsioni della meccanica quantistica sono corrette, allora la meccanica quantistica deve trascurare alcuni aspetti della descrizione del mondo. Devono esserci parti della narrazione del mondo che non coglie.

Bohr rispose all'articolo EPR quasi da un giorno all'altro. La sua lettera di confutazione, scritta in fretta e furia, non attaccava nessuno degli specifici ragionamenti scientifici dell'articolo, ma metteva in dubbio, in modo oscuro e a tratti con toni da oracolo, l'uso nell'articolo della parola «realtà» e la definizione di «elementi della realtà fisica». Trattava a lungo della distinzione tra soggetto e oggetto, delle condizioni sotto cui ha senso porsi domande e della natura del linguaggio umano. Ciò di cui aveva bisogno la scienza, secondo Bohr, era una «revisione radicale del nostro atteggiamento nei confronti della realtà fisica».

Bohr si premurò di convenire con l'articolo EPR su un fatto: non erano possibili autentiche non località fisiche. La non località apparente, asseriva, era solo un'ulteriore ragione per abbandonare l'aspirazione antiquata ed eccentrica, così evidente nell'articolo EPR, a voler leggere nelle equazioni della meccanica quantistica un'immagine realistica dell'universo, un'immagine di ciò che momento per momento si trova sotto i nostri occhi. Bohr sosteneva infatti con forza che non solo vediamo il mondo come in uno specchio opaco, ma che questa visione fumosa e indefinita è la realtà stessa.

Quella di Bohr fu una risposta curiosamente filosofica a un problema scientifico. Ancora più curioso fu l'atteggiamento di chi prese la risposta di Bohr come vangelo

ufficiale della fisica teorica. Occuparsi ancora di questi argomenti diventò un'eresia. La comunità fisica si allontanò dalla sua antica aspirazione alla scoperta di come è fatto veramente il mondo e per lungo tempo relegò le questioni metafisiche alla letteratura fantastica.

Ancora oggi questa parte cruciale dell'eredità di Einstein rimane largamente nell'ombra. La biografia di Einstein pubblicata nel 2007 da Walter Isaacson, che ha riscosso un grande successo, assicura al lettore che le critiche di Einstein alla meccanica quantistica sono state risolte. Ma non è vero.

La località perde il suo posto

La prima volta che qualcuno affrontò in maniera scientifica il paradosso EPR (dopo trent'anni di oblio quasi totale) fu in un famoso articolo del 1964 scritto dallo straordinario fisico irlandese John S. Bell. Dal lavoro di Bell emerse che Bohr si sbagliava sul fatto che non ci fosse nulla che non andava con la sua interpretazione della meccanica quantistica e che Einstein si sbagliava a proposito di che cosa non andasse nell'interpretazione di Bohr. Capire che cosa non andasse veramente richiede di abbandonare l'idea di località.

La questione cruciale è se le non località che sembrano presenti nell'algoritmo della meccanica quantistica siano solo apparenti o qualcosa di più. Sembra che Bell sia stato il primo a chiedersi proprio che cosa significa questa domanda. Che cosa distinguerebbe le autentiche non località fisiche da quelle apparenti? Argomentò che se esistesse un algoritmo esplicitamente e completamente locale che dia le stesse previsioni dell'algoritmo quantistico sull'esito degli esperimenti, allora Einstein e Bohr avrebbero avuto ragione a ignorare le non località della meccanica quantistica considerandole semplici conseguenze accidentali di quella particolare formalizzazione. Se invece nessun algoritmo potesse fare a meno delle non località, allora si tratterebbe di autentici fenomeni fisici. Bell analizzò quindi una specifica situazione di *entanglement*, e concluse che dal punto di vista matematico non era possibile alcun algoritmo locale. Quindi il vero mondo fisico è non locale. Punto.[2]

---

[2] *Il teorema di Bell*. La non località del nostro mondo fisico è conseguenza di un teorema dimostrato da John S. Bell nel 1964 e dai risultati sperimentali ottenuti a partire dall'inizio degli anni ottanta. Il teorema elabora la situazione enigmatica delle particelle in entanglement descritta da Einstein, Podolsky e Rosen nel 1935. II ragionamento EPR assume che la natura sia locale e in particolare, quindi, una misurazione (per esempio compiuta da Alice) su una particella che è in entanglement con un'altra molto distante non può alterare istantaneamente lo stato fisico della lontana particella compagna (che Bruno può misurare). Ne concludono che la particella di Bruno deve già avere un ben determinato valore per lo spin in ogni direzione. Quindi la meccanica quantistica deve essere incompleta, perché non determina quei valori con l'eccezione dì garantire che siano coerenti con il risultato di Alice quando misura la propria particella. Bell chiese: assumendo che le particelle in entanglement di Alice e Bruno abbiano valori determinati, possono riprodurre i risultati previsti dalla meccanica quantistica per tutti i possibili modi in cui Alice e Bruno possono misurare le loro particelle? Ricordiamo che per particelle con spin in entanglement Alice e Bruno devono scegliere ognuno un asse lungo cui misurare lo spin. Bell ha dimostrato matematicamente che se Alice e Bruno scelgono di fare le misurazioni lungo assi che formano tra loro angoli come 45 e 90 gradi, dopo numerose ripetizioni dell'esperimento le misurazioni produrrebbero una distribuzione statistica dei risultati che differirebbe da quella prevista dalla meccanica quantistica, quale che sia la distribuzione dei determinati valori delle particelle. Sono stati compiuti esperimenti in cui si usavano fotoni in entanglement anziché elettroni (il che cambia gli angoli da usare ma rende l'esperimento tecnicamente molto meno complesso), ottenendo risultati conformi alle previsioni della meccanica quantistica. Quindi, per il teorema

Questa conclusione mette tutto a soqquadro. Einstein, Bohr e tutti coloro per i quali era scontato che un'autentica incompatibilità tra meccanica quantistica e principio di località sarebbe stato una cattiva notizia per la meccanica quantistica. Ma Bell aveva dimostrato che la località era incompatibile non solo con l'apparato teorico astratto della meccanica quantistica, ma anche con certe sue previsioni empiriche. Le verifiche sperimentali, in particolare il lavoro di Alain Aspect e collaboratori dell'Istituto di ottica a Palaiseau, in Francia, dal 1981 in poi, non lasciano dubbi sul fatto che quelle previsioni sono corrette. La cattiva notizia dunque non era per la meccanica quantistica, ma per il principio di località e, presumibilmente, anche per la relatività speciale perché, almeno in apparenza, si basa su una presunzione di località.

Gita metafisica a sorpresa

Anche per il lavoro di Bell la principale reazione, presente ancora oggi in molti ambienti, fu di relegarlo nell'oscurità. Bell aveva dimostrato che qualsiasi teoria in grado di riprodurre le previsioni empiriche della meccanica quantistica riguardo coppie di particelle legate da *entanglement* – in particolare, quindi, la meccanica quantistica stessa – doveva essere fisicamente non locale.

Questo messaggio fu praticamente ignorato. Ciò che quasi tutti dicono è che Bell dimostrò che qualsiasi tentativo di sostituire l'immagine della realtà data dalla meccanica quantistica vera e propria con qualcosa di più vicino alle nostre aspettative metafisiche classiche – qualunque teoria con variabili nascoste, o deterministica, o filosoficamente realistica – doveva essere non locale per poter riprodurre le previsioni della meccanica quantistica sui sistemi EPR. Per lo meno leggevano l'articolo di Bell, ma come se indossassero lenti da vista deformanti.

Solo una piccolissima minoranza di fisici sfuggì all'equivoco e capì che la dimostrazione di Bell e gli esperimenti di Aspect significavano che il mondo stesso è non locale. Ma anche questi fisici credevano che la non località non ponesse particolari minacce alla relatività speciale.

Questa opinione deriva dall'idea che la relatività speciale sia inestricabilmente collegata all'impossibilità di trasmettere messaggi a velocità superiore a quella della luce. Dopo tutto, se la relatività speciale è vera si deduce che nessun mezzo materiale per trasportare messaggi si può accelerare dalla quiete a velocità superiori a quella della luce. E si può sostenere che, secondo alcuni orologi, un messaggio trasmesso a velocità maggiore della luce arriva prima di essere inviato, scatenando tutti i paradossi del viaggio nel tempo.

Già nel 1932 il brillante matematico ungherese John von Neumann dimostrò che non si può convincere la non località della meccanica quantistica a diventare un meccanismo per trasmettere messaggi istantaneamente. Per molti decenni quasi tutti i fisici teorici considerarono la dimostrazione di von Neumann una garanzia del fatto che la non località della meccanica quantistica e la relatività speciale potessero coesistere.

Varie esperienze non locali

Ci vollero altri trent'anni dalla pubblicazione di Bell perché i fisici affrontassero con decisione questi problemi. La prima trattazione chiara, estesa, impeccabile dal punto di vista logico e completamente schietta della non località quantistica e della relatività apparve nel 1994 in un libro di Tim Maudlin, della Rutgers University, intitolato

---

di Bell, i fotoni non sono portatori di valori ben determinati. E dato che questo contraddice la conclusione di EPR, l'assunzione che la natura sia locale è a sua volta erronea. Dunque l'universo in cui viviamo non può essere locale.

Quantum Non-Locality and Relativity. Il suo lavoro mostra che la compatibilità della non località e della relatività speciale è una questione molto più sottile di quanto potremmo credere basandoci sui luoghi comuni sui messaggi istantanei.

Il lavoro di Maudlin è arrivato in un momento di cambiamenti profondi nell'ambiente intellettuale. A partire dall'inizio degli anni ottanta le posizioni di Bohr – impossibilità di una descrizione all'antica, filosoficamente realistica del mondo subatomico – cominciavano visibilmente a indebolirsi. Ormai numerose ipotesi scientifiche concrete e promettenti sembravano dare una buona descrizione di questo tipo, almeno nell'approssimazione ottenuta trascurando gli effetti della relatività speciale. Tra queste ipotesi c'erano la meccanica bohmiana dell'inglese David Bohm (sviluppata alla fi ne degli anni cinquanta, ispirò il lavoro di Bell ma per il resto fu largamente ignorata) e il modello GRW degli italiani Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini e Tullio Weber (si veda *L'alternativa di Bohm alla meccanica quantistica*, di David Z. Albert, in «Le Scienze» n. 311, luglio 1994). Le antiche aspirazioni della fisica a fare da guida alla metafisica, a dirci in modo letterale ed esplicito come è fatto il mondo, aspirazioni assopite e trascurate per più di cinquant'anni, cominciavano a risvegliarsi.

Il libro di Maudlin si incentrava su tre aspetti importanti. Innanzitutto la teoria della relatività speciale fa affermazioni sulla struttura geometrica di spazio e tempo. L'impossibilità di trasmettere massa o energia o informazione o relazioni causali a velocità maggiore della luce non è, di per sé, sufficiente a garantire che le asserzioni della teoria a proposito della geometria siano corrette. Quindi la dimostrazione di von Neumann sulla trasmissione di messaggi, di per sé, non ci dà garanzie sulla possibile coesistenza pacifica della non località quantistica e della relatività speciale.

Inoltre la validità della relatività speciale è, di fatto, compatibile con un'enorme varietà di meccanismi ipotetici per la trasmissione più veloce della luce di massa, energia, informazione e relazioni causali. Negli anni sessanta, per esempio, Gerald Feinberg della Columbia University pubblicò una teoria coerente e conforme alla relatività su una specie ipotetica di particelle, i tachioni, ai quali è fisicamente impossibile viaggiare a una velocità inferiore a quella della luce. Maudlin inventò altri esempi.

Quindi la semplice presenza della non località nella meccanica quantistica non significa che la meccanica quantistica non possa coesistere con la relatività speciale. Dunque forse c'è speranza.

Infine, sottolinea Maudlin, il tipo particolare di azione a distanza presente nella meccanica quantistica è di altra natura rispetto a quello dei tachioni di Feinberg o di altri esempi dello stesso Maudlin. Ciò che è straordinario nel modo in cui le particelle quantistiche si influenzano non localmente l'una con l'altra è che non dipende dalla disposizione spaziale o dalle caratteristiche intrinseche delle particelle, come accade per le influenze relativistiche accennate finora, ma solo dal loro trovarsi o meno in uno stato reciproco di *entanglement* quantistico.

Il tipo di non località che si incontra nella meccanica quantistica sembra richiedere una simultaneità assoluta, il che porrebbe una minaccia molto concreta e sinistra alla relatività speciale.

È questo il guaio.

C'è speranza per la relatività speciale?

Negli ultimi anni sono emersi dal dibattito due nuovi risultati che vanno in direzioni diverse. Il primo suggerisce un modo in cui la non località quantistica sarebbe compatibile con la relatività speciale. L'altro rivela un nuovo colpo infetto alle nostre

più radicate intuizioni sul mondo dall'unione di meccanica quantistica e relatività speciale.

Il primo risultato è apparso in un articolo del 2006 di Roderich Tumulka, matematico della Rutgers University che ha dimostrato come tutte le previsioni empiriche della meccanica quantistica su coppie di particelle sottoposte a entanglement si possono riprodurre con una raffinata modifica della teoria GRW (che propone un modo filosoficamente realistico per ottenere in vari casi le previsioni della meccanica quantistica). La modifica è non locale, ma è compatibile con la geometria dello spazio-tempo descritta dalla relatività speciale.

Questo lavoro è ancora in fase iniziale. Nessuno è riuscito a scrivere una versione della teoria di Tumulka applicabile a particelle che si attraggono o respingono a vicenda. La sua teoria introduce una nuova forma di non località nelle leggi fisiche: una non località non solo nello spazio ma anche nel tempo! Se si vuole usare la teoria di Tumulka per determinare le probabilità di ciò che accadrà in futuro, occorre partire non solo dall'attuale stato fisico completo del mondo (passaggio abituale in una teoria fisica), ma anche da fatti riguardanti il passato. Questa e altre caratteristiche sono preoccupanti, ma Tumulka ha eliminato in parte i timori di Maudlin sull'impossibilità di una pacifica convivenza tra non località quantistica e relatività speciale.

L'altro risultato, scoperto da uno di noi (Albert), mostra che la combinazione di meccanica quantistica e relatività speciale richiede di abbandonare un'altra convinzione fondamentale. Noi crediamo che ciò che c'è da dire sul mondo sia in linea di principio esprimibile sotto forma di narrazione. In termini più precisi e tecnici: quello che c'è da dire si può incorporare in un insieme infinito di proposizioni della forma «al tempo t_1 questo è l'esatto stato fisico del mondo» e «al tempo t_2 quest'altro è l'esatto stato fisico del mondo», e così via. Ma, presi insieme, *entanglement* quantistico e geometria dello spazio-tempo data dalla relatività speciale implicano che la storia fisica del mondo è troppo ricca perché questo sia possibile.

Il problema è che la relatività speciale tende a mettere insieme spazio e tempo in un modo che trasforma l'entanglement quantistico tra sistemi fisici distinti in qualcosa di simile a un entanglement tra situazioni fisiche in momenti diversi, qualcosa che in un modo molto concreto va oltre o sfugge o non ha niente a che vedere con nessuna somma di situazioni relative a istanti temporali distinti.

Questo e la maggior parte dei risultati teorici in meccanica quantistica si ottengono manipolando e analizzando la funzione d'onda, un ente matematico introdotto da Erwin Schrödinger ottant'anni fa per definire gli stati quantistici. È dalle funzioni d'onda che i fisici deducono la possibilità (anzi, la necessità) dell'*entanglement*, delle particelle che hanno posizioni indefinite e così via. Ed è la funzione d'onda che si trova alla base dei rompicapi sugli effetti non locali della meccanica quantistica.

Ma di che si tratta, esattamente? Gli studiosi dei fondamenti della fisica ne discutono intensamente. La funzione d'onda è un oggetto fisico concreto oppure è un qualcosa di analogo alle leggi del moto, alle proprietà interne delle particelle e alle relazioni tra punti nello spazio? Oppure è semplicemente la nostra attuale informazione sulle particelle? O che altro?

Le funzioni d'onda della meccanica quantistica non sono rappresentabili con nulla di più piccolo di uno spazio con dimensione incredibilmente grande: lo spazio delle configurazioni o delle fasi. Se, come sostengono alcuni, le funzioni d'onda devono essere considerate oggetti fisici concreti, dobbiamo prendere sul serio l'idea che la storia del mondo si svolga non nello spazio tridimensionale della nostra esperienza quotidiana o nello spazio-tempo della relatività speciale, ma in questo gigantesco e misterioso spazio delle configurazioni, da cui emerge in qualche modo l'illusione della tridimensionalità. Dovremmo allora considerare come emergente anche la nostra idea

tridimensionale di località. La non località della fisica quantistica potrebbe essere la finestra attraverso cui affacciarci su questo livello più profondo di realtà.

Lo status della relatività speciale, dopo poco più di un secolo di vita, diventa un problema aperto e in rapido sviluppo. Siamo arrivati a questa situazione perché fisici e filosofi hanno seguito fino in fondo quanto era rimasto in sospeso nelle critiche di Einstein alla meccanica quantistica, a lungo trascurate: un'altra dimostrazione del genio di Einstein. Può darsi che il maestro sottovalutato avesse torto dove credevamo avesse ragione e ragione dove credevamo avesse torto. In effetti forse vediamo l'universo attraverso uno specchio che non è poi così opaco come si è detto per troppo tempo.

Letture consigliate

Quantum Theory and Measurement.
Wheeler JA. e ZurekW.H. (a cura), Princeton University Press, 1983. (Contiene anche l'articolo originale «EPR» e la risposta di Bohr.)

Meccanica quantistica e senso comune.
Albert D. Z., Adelphi, Milano, 2000.

The Shaky Game: Einstein, Realism, and the Quantum Theory (seconda edizione).
Fine A., University of Chicago Press, 1996.

Quantum Nonlocality and Relativity: Metaphysical Intimations of Modern Physics (seconda edizione).
Maudlin T., Wiley-Blackwell, 2002.

Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics: Collected Papers on Quantum Philosophy (seconda edizione).
Bell J.S., Cambridge University Press, 2004.